


# СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И НА ТРАНСПОРТЕ: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

СБОРНИК ТРУДОВ X ВСЕРОССИЙСКОЙ (НАЦИОНАЛЬНОЙ) НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ, АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ

ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»

# СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И НА ТРАНСПОРТЕ: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

СБОРНИК ТРУДОВ X ВСЕРОССИЙСКОЙ (НАЦИОНАЛЬНОЙ) НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ, АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ

Челябинск

2026

**УДК 656**
**ББК 39**
**С56**

Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения: Сборник трудов X Всероссийской (национальной) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / [науч. ред. Е.К. Батовская]. – Челябинск: ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», 2026. – 465 с.

Научный редактор – д.б.н., и.о. зав. кафедрой «Техника и технологии» ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет» Е.К. Батовская

Редактор-корректор – начальник редакционно-издательского отдела ОУ ВО «ЮУТУ» Е.Ф. Струнина

В сборник включены статьи участников X Всероссийской (национальной) научнопрактической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов «Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения», состоявшейся в г. Челябинске 26 февраля 2026 г.

**ISBN 978-5-6055953-1-1**

© ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет», 2026
© Коллектив авторов, 2026

# ОГЛАВЛЕНИЕ

**Секция: Информационные технологии**


Бешенцев И.Д. Целеполагание создания алгоритма анализа качества транспортного обслуживания населения А-Актон 7

Будко С.А. Разработка мобильного приложения, направленного на оптимизацию цепи поставки лесных грузов 12

Ерюков М.М. Технологии SD-WAN для организации защищенных каналов связи между удаленными объектами энергетики 19

Ибрахим М.М., Невзорова О.А. Сравнительный анализ классических и нейросетевых методов управления динамическими объектами 26

Кузюков Е.В. Мобильный автоматизированный агро-блок как элемент жизнеобеспечения современных арктических станций: от транспортной базы к энергоэффективным технологиям 33

Наливкин Я.С., Голычев Ф.Д., Дубкова Е.С. Разработка системы пакетной обработки спутниковых снимков для автоматизированного мониторинга ландшафта 42

Наливкин Я.С., Голычев Ф.Д., Дубкова Е.С. Обучение и оценка эффективности сверточной нейронной сети для классификации ландшафтов 47

Наливкин Я.С., Голычев Ф.Д., Дубкова Е.С. Разработка программного обеспечения для автоматизированного анализа ландшафта на основе сверточных нейронных сетей 50

Наливкин Я.С., Голычев Ф.Д., Дубкова Е.С. Разработка модуля визуализации результатов классификации ландшафта для геоинформационных систем 55

Соболева Е.В., Клепиковская А.А. Особенности применения нейросетей для работы с таблицами в обучении инженеров для повышения качества их подготовки 59

Тельманова Е.Д., Шаповалов М.С. Применение интеллектуального алгоритма для обнаружения замыканий на землю в сетях с резонансно-заземленной нейтралью 65

Тукмаков Д.А. Численное моделирование подавления кинетической энергии ударной волны малой интенсивности в канале с помощью волокнистого наполнителя 71

Чёрный В.Г., Болсуновская М.В. Применение метрики значимости объекта на этапе предварительного анализа трехмерной сцены 78

Штурбабина Е.А. Прототип приложения для поиска попутчиков среди студентов 83

Щедрина Е.В. Развитие системного мышления инженеров аграрного вуза средствами цифровых технологий 91


**Секция: Транспортные технологии**


Балаба Д.Д., Гришкова Д.Ю. Инновационные контейнеры 98

Безвинюк К.Д., Кагадий И.Н. Анализ проектов транспортно-логистического развития РФ для повышения экспортного потенциала 104

Гришкова Д.Ю., Молодин Д.М. Автоматизированные системы мониторинга и нормативно-правовые основы замены маневровых тепловозов 109

Громов В.Н. Исследование состояния вентиляционных сетей на участках линий метрополитена с целью получения исходных данных для численного и физического моделирования, а также модернизации системы вентиляции 116

Добротворская Т.В. Цифровая трансформация институциональной структуры транспортного рынка России: анализ внедрения платформы «ГосЛог», систем ЭТРН и обязательных реестров 121

Канакин М.К., Басати Панах М., Матвеев Ю.В. Снижение углеродного следа авиации: анализ применения альтернативных топлив и оценка выбросов парка ВС РФ 132

Колбасов А.О., Татаринцев В.А. Повышение энергоэффективности магистральных трубопроводов транспорта нефти 144

Пермовский А.А., Викулова Ю.В. Инновационные подходы в логистике как способ улучшения транспортных услуг 154

Сахаров С.М., Басати Панах М. Разработка и верификация методики обратного проектирования лопаточного аппарата осевого компрессора в условиях импортозамещения 159
Токарев В.А., Кабалин М.Д. Реализация принципов системы «человек – материал – среда обитания» при использовании переработанного бетона в мостостроении 172
Утевский С.И. Модель международной системы доставки металлургической продукции морским транспортом 179
Чудинов С.А., Антонова А.П. Оценка эффективности мероприятий по снижению количества ДТП с участием диких животных на примере Свердловской области 183

**Секция: Электротехника**

Бойкин Д.Р., Павличенко И.А. Систематизация электроприемников и обеспечение надежности электроснабжения промышленных предприятий в современных условиях 190
Бойкин Д.Р., Павличенко И.А. Экономическая эффективность применения энергоэффективных трансформаторов в распределительных сетях: оценка на основе совокупной стоимости владения 195
Волошин А.А., Недоступ А.А., Ражев А.О. Повышение мощности макета промыслового катамарана для тралового промысла 201
Пономарева З.Р., Вахнина В.В. Особенности функционирования измерительных трансформаторов тока при коротких замыканиях 213
Шевкунова А.В., Мамруков А.И. Исследование сил одностороннего магнитного притяжения в вентильно-индукторном двигателе 218

**Секция: Электроэнергетика**

Абрамов В.А., Смышляев М.О. Использование отходов для выработки энергии 225
Абрамов В.А., Смышляев М.О., Заровняев М.И. Применение технологий каталитического горения для газотурбинных двигателей 229
Авдеев Я.В., Паскарь И.Н. Ограничения распределительных сетей 0,4 кВ как барьер развития микрогридов и интеллектуальных режимов электроснабжения 234
Баранов В.В. Анализ результатов расчета газовой микротурбинной установки замкнутого цикла малой мощности с применением гелия 243
Белов А.В., Батовская Е.К., Скородумова Н.В. О возможности использования пунктов коммерческого учёта для целей диагностики трансформаторов 253
Белов А.В., Батовская Е.К., Скородумова Н.В. Устройство для определения межвитковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора 263
Бойкин Д.Р., Павличенко И.А. Современные проблемы и перспективные направления повышения энергоэффективности распределительного сетевого комплекса России 274
Бугаев К.В., Мартко Е.О. Специфика балансировки нагрузки в изолированной энергосистеме 280
Валиев Д.З., Горшков К.Е. Исследование влияния положения ответвлений РПН понизительных трансформаторов на потери мощности в замкнутой сети 110кВ 283
Газизуллин К.Ф., Нырков И.Е., Редель А.Е. Будущее водородной энергетики в России: использование водорода как топлива в энергетических газотурбинных установках (ГТУ) 293
Доставалов Н.А., Павличенко И.А. Перспективы использования возобновляемых источников энергии для электроснабжения объектов транспортной инфраструктуры 299
Жилин Е.В. Модифицированный алгоритм управления активным фильтром гармоник на основе теории мгновенной мощности с фазовой автоподстройкой частоты 306
Захахатнов В.Г. Моделирование в преподавании технических дисциплин 311
Исмайлов Э.М., Гавриленко Т.В. Интеллектуальные системы управления распределенной генерацией электроэнергии в нефтегазовом секторе 317

Козлова Н.С., Понырко Н.А., Филиппов К.А. Обеспечение динамической устойчивости энергосистем с низкой инерцией: интеграция систем накопления энергии и технологий цифровых двойников 324
Коркин Н.А., Коркина А.А. Оптимизация энергопотребления в инфраструктуре высшего учебного заведения 332
Летинская И.Н. Особенности топографической съемки при проектировании линий электропередачи в Республике Татарстан 340
Ложкин Н.Е., Попов А.Н. Современные технологии выработки электроэнергии из биомассы: эффективность и перспективы 348
Майоров Г.А., Шабанов Д.Р., Дьяченко А.П., Бурцева Е.А. Экспериментальное сравнение проводов нового поколения с проводами марок АС/АСО с помощью математического моделирования в программе RASTRWIN3 354
Марьин Г.Е., Тимершин Б.Ф. Испытания теплоизоляционных материалов с целью определения коэффициента теплопроводности 368
Марьин Г.Е., Новоселова М.С. Перспективы развития водородных тепловых электрических станций 372
Махров С.Е., Попов А.Н. Технологии когенерации и тригенерации на основе микрогазовых турбин для повышения энергоэффективности объектов ЖКХ и промышленности 376
Машрапов А.А., Попов А.Н. Эволюция и сравнение топологий преобразователей для высоковольтной связи: инверторы с PWM против требовательных частот 383
Мельников Р.А., Павличенко И.А. Статические компенсаторы реактивной мощности (STATCOM) как средство снижения ущерба от низкого качества электроэнергии в распределительных сетях 6-10 кВ 389
Минусов А.А., Мартко Е.О. Использование высокотемпературных проводов с композитным сердечником с целью увеличения пропускной способности линий электропередач 395
Минусов А.А., Мартко Е.О. Повышение надежности электроснабжения потребителей в сельскохозяйственных регионах 398
Новоселова М.С., Марьин Г.Е. Применение альтернативных топлив в газотурбинных установках 403
Пряшникова П.Ф. Повышение эффективности квадратурного метода вычисления вероятностных характеристик электрических систем 406
Редель А.Е., Газизуллин К.Ф., Заровняев М.И. Исследование многослойного теплозащитного покрытия для лопаток газотурбинных двигателей с повышенной адгезионной прочностью 411
Рузанов Р.В., Вахнина В.В. Классификация непромышленных потребителей электрической энергии с использованием данных интеллектуальных систем учета электрической энергии и технологий искусственного интеллекта 417
Смолина Л.М., Плотников М.П. Обзор технологий цифровых двойников (Digital Twins) для задач электроэнергетики и опыт их внедрения 422
Смышляев М.О., Абрамов В.А., Заровняев М.И. Изменение механических характеристик деталей упрочненных боросилицированием 428
Смышляев М.О., Абрамов В.А., Заровняев М.И. Часто встречающиеся дефекты газовоздушного тракта газотурбинных двигателей 433
Храмцов Е.В., Макаров А.В., Жуйков А.В. Анализ горючих свойств четырех органических отходов производства 439
Худоногов И.А., Антонов М.С. Моделирование электромагнитного влияния воздушных линий электропередачи на смежные линии связи 448
Шилин А.А., Елфимова О.А., Кутейников П.Д. Сравнительный анализ отечественных и зарубежных показателей надежности в энергетических системах 453

Юшкевич П.Д. Анализ эффективности применения реклоузеров для городских распределительных сетей 10 – 35 кВ 459

## СЕКЦИЯ: ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

# ЦЕЛЕПОЛАГАНИЕ СОЗДАНИЯ АЛГОРИТМА АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НАСЕЛЕНИЯ А-АКТОН

*Бешенцев И.Д. – студент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»*

*Научный руководитель: Игнатов А.В. – к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»*

**Аннотация**

В статье рассматривается процесс целеполагания при создании специализированного программного обеспечения для анализа качества транспортного обслуживания населения (Алгоритм АКТОН, А-АКТОН). На основе анализа структуры стартап-проекта авторами выявлена комплексная проблема дисбаланса между территориальным развитием городов и реальными транспортными потребностями населения. Статья детализирует иерархию целей: от глобальной миссии проекта до конкретных функциональных задач программного продукта. Особое внимание уделяется ценностному предложению, объединяющему научно-практический подход, экономическую эффективность и стратегическое планирование с приоритетом развития городского наземного электрического транспорта (ГНЭТ). Проведенный анализ конкурентной среды подтверждает актуальность разработки, направленной на удовлетворение потребностей ключевых стейкхолдеров: органов власти (B2G), перевозчиков (B2B) и пассажиров (B2C). Статья служит методологической основой для формирования требований к интеллектуальным системам управления в рамках рынка НТИ «Автонет».

Современный этап урбанизации характеризуется возрастающим разрывом между динамикой территориального развития городов и возможностями транспортных систем удовлетворить возникающие потребности населения. Этот дисбаланс приводит к хроническим проблемам: перегруженности улично-дорожной сети (УДС), низкой доступности общественного транспорта для жителей новых районов, неэффективному использованию ресурсов перевозчиков и, как следствие, снижению качества жизни. Решение этих проблем требует перехода от реактивного к проактивному, научно обоснованному управлению транспортным комплексом. В данном контексте создание специализированного программного инструмента – алгоритма анализа качества транспортного обслуживания населения (А-АКТОН) – представляется не просто технической задачей, а комплексным проектом, успех которого закладывается на этапе грамотного целеполагания. Цель данной статьи – на основе структуры конкретного стартап-проекта проанализировать и систематизировать процесс формирования иерархии целей при разработке интеллектуальной системы для транспортного планирования.

Отправной точкой целеполагания является формулировка миссии, отражающей суть решаемой социально-экономической проблемы [2]. В представленном проекте миссия сформулирована как решение проблемы дисбаланса между территориальным развитием города и удовлетворением потребностей населения в транспортном обслуживании. Эта глобальная проблема выступает стратегической целью всего стартапа. Ее значимость подчеркивается соответствием технологического направления «создания интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта» и привязкой к рынку Национальной технологической инициативы (НТИ) «Автонет», что задает высокий уровень амбиций и требует инновационных подходов [4].

Данная стратегическая цель декомпозируется на ряд ключевых задач проекта управленческого и исследовательского характера:

1) исследование рынка и идентификация целевой аудитории;
2) проработка базовой бизнес-идеи;
3) анализ конкурентов и аналогов;
4) изыскание необходимых ресурсов;
5) создание продукта, решающего проблему с максимальной эффективностью и минимальной экономической нагрузкой.

Таким образом, программный продукт выступает не самоцелью, а инструментом для достижения более широкой социально-экономической миссии.

Тактические цели проекта материализуются в конкретных функциональных требованиях к алгоритму А-АКТОН. Продукт позиционируется как интеллектуальная система поддержки принятия решений, что определяет его многофункциональность. Основная функциональная цель продукта – на основе обработки комплексных исходных данных (модель города, слои точек притяжения, схемы УДС и инфраструктуры общественного транспорта, данные пассажиропотока) предоставлять обоснованные рекомендации по оптимизации транспортного обслуживания.

Для достижения этой цели алгоритм должен решать следующие ключевые задачи:

1) сценарное моделирование и оперативный расчет. Автоматический расчет требуемого количества водителей, среднего времени рейса, общего числа рейсов и других технико-эксплуатационных показателей в рамках различных сценариев развития транспортной системы [3];

2) оптимизация выбора транспорта и маршрутной сети: на основе элементов теории принятия решений и введенных параметров города алгоритм должен предлагать:

– наиболее подходящий вид транспорта для конкретных условий;

– наилучшие варианты прокладки новых или корректировки существующих маршрутных сетей;

– рекомендации по подвижному составу;

– ключевой аспект: учет приоритета развития городского наземного электрического транспорта (ГНЭТ – трамвай, троллейбус) как экологичного и эффективного вида перевозок;

3) визуализация и проектирование: Отображение эскизов размещения элементов проекта организации дорожного движения (ПОДД) и остановочных пунктов с детализацией по видам транспорта и привязкой к точкам притяжения;

4) комплексная оценка – предоставление возможности расчета трех видов оценочных характеристик для любого предложенного сценария:

– технико-эксплуатационные (пассажировместимость, скорость сообщения);

– энергетические (эффективность, потребление энергии);

– дорожно-строительные (необходимость реконструкции инфраструктуры).

Целеполагание также включает определение конкретных вариантов применения продукта, которые раскрывают его практическую ценность для разных пользовательских сценариев:

– диагностика текущего состояния: сравнение существующей маршрутной сети с актуальной потребностью в перевозках (для городов-миллионников);

– проактивное планирование: сравнение текущей сети с прогнозами роста перевозок в связи со строительством новых жилых и социокультурных объектов [5];

– экономическое обоснование: сравнение оправданности инвестиций в текущую и альтернативные маршрутные сети, планирование бюджетных вложений и ожидаемой выручки перевозчиков.

На основе этих функций формируется ценностное предложение продукта, которое является ключевым результатом этапа целеполагания:

– научно-практический синтез – сочетание фундаментальных расчетов (естественно-научный подход) и прикладных методик (опытно-конструкторский подход);

– экономия ресурсов – автоматизация многокритериальных расчетов, позволяющая быстро оценивать последствия изменения любого параметра, что экономит время и средства на этапе планирования;

– инновационность – применение современных методов сценарного моделирования и работы с данными в условиях неопределенности;

– ориентация на долгосрочную стратегию – фокус на стабильных и надежных решениях со сроком окупаемости, рассчитанным на перспективу, что соответствует задачам стратегического городского планирования.

Эффективное целеполагание требует четкой идентификации потребителей. Алгоритм АКТОН ориентирован на три основных сегмента, для которых ценность продукта дифференцирована. Информация по каждому из них, цели использования и ценности представлена в таблице 1.

Табл. 1.

Сегменты проекта А-АКТОН, их цели и ценность

| Сегмент | Органы исполнительной власти | Перевозчики | Конечные потребители – Пассажиры |
|---|---|---|---|
| Категория | B2G, Администрация | B2B, малый, средний и крупный бизнес | B2C |
| Цели использования | – стратегическое планирование;<br>– управление транспортным комплексом;<br>– обоснование бюджетных расходов. | – оперативное и тактическое планирование;<br>– оптимизация использования ресурсов (ПС, водители);<br>– повышение доходности. | опосредованно – через улучшения, инициированные администрацией и перевозчиками. |
| Ценность | – инструмент для достижения баланса между территориал. развитием и транспортной инфраструктурой;<br>– повышение эффектив-ности госуправления;<br>– улучшение транспортной ситуации в городе. | – рациональное планирование на основе актуальных данных;<br>– обоснованное при-нятие решений;<br>– повышение экономической эффективности бизнеса. | – повышение доступности, комфорта и надежности трансп. обслуживания;<br>– сокращение времени в пути и количества пересадок;<br>– формирование качественной городской среды. |

Источник: составлено автором

Анализ конкурентной среды подтвердил корректность выбранных целей. Прямых аналогов, полностью покрывающих заявленный функционал (сценарное моделирование + детальная оптимизация маршрутной сети ГНЭТ + комплексная оценка), на рынке не выявлено. Существующие решения (PTV Visum/Vissim, «Ритм-

3», «Я.Маршрутизация») либо являются тяжеловесными системами транспортного моделирования без детальной проработки маршрутов, либо сервисами для пассажиров [1]. Это позволило четко сформулировать конкурентные преимущества А-АКТОН, напрямую вытекающие из его целей:

– актуальность и комплексность – формирование проектов на основе достоверных данных и их многоаспектной оценки;

– гибкость и адаптивность – возможность настройки под города любого размера, рельефа и транспортной конфигурации;

– пользовательская ориентированность – понятный интерфейс, прозрачность алгоритмов и умеренные требования к вычислительным ресурсам.

Процесс целеполагания при создании алгоритма А-АКТОН представляет собой многоуровневую систему, начинающуюся с формулировки социально-экономической миссии по преодолению дисбаланса в городском развитии. Эта миссия последовательно трансформируется в стратегические цели проекта, конкретные функциональные задачи программного продукта и четко дифференцированное ценностное предложение для каждой группы стейкхолдеров (B2G, B2B, B2C). Проведенный конкурентный анализ доказал, что выбранные цели отвечают на реальный рыночный запрос в отсутствие полноценных аналогов. Таким образом, грамотно выстроенное целеполагание закладывает прочный фундамент для разработки не просто еще одного программного обеспечения, а востребованного инструмента для интеллектуального управления транспортным комплексом в русле приоритетов технологического развития и повышения качества жизни в городах. Дальнейшая работа над проектом должна быть направлена на детальную проработку дорожной карты, обеспечивающей достижение обозначенных целей – от создания отдельных модулей до получения свидетельства о государственной регистрации программы ЭВМ и выхода на точку безубыточности.

**Список используемых источников**

1. Арбатская Л.А. Методические основы формирования номенклатуры показателей доступности услуг автомобильного пассажирского транспорта // Вестник Оренбургского государственного университета. 2008. № 11 (93). С. 85–89.

2. Глушенкова Е.Д., Клепцова Л.Н. Анализ методического обеспечения качества транспортного обслуживания населения // Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы: материалы III Международной научно-

практической конференции, Новокузнецк, 5–6 декабря 2019 года / Отв. ред. Э. И. Забнева. Новокузнецк: Зебра, 2019. С. 37–41.

3. Дрючин Д.А., Майоров М.А. Основные направления повышения качества транспортного обслуживания населения городским пассажирским транспортом по регулярным маршрутам // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4 (179). С. 30–36.

4. Национальная техническая инициатива «Автонет» / НТИ Автонет. [Электронный ресурс]. URL: https://autonet-nti.ru/ (дата обращения: 31.01.2025).

5. Рачек С.В., Грибанова А.В. Совершенствование транспортного обслуживания населения муниципалитета в современных условиях // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. №3 (53). С. 296–300.

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОГО НА ОПТИМИЗАЦИЮ ЦЕПИ ПОСТАВКИ ЛЕСНЫХ ГРУЗОВ

*Будко С.А. – студент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

**Аннотация**

В статье рассматривается разработка мобильного приложения для лесопромышленных комплексов России, а также наглядно показаны разделы, включенные в него. Уделяется внимание современному положению лесной отрасли, а также узким местам при организации перевозки грузов. Рассматриваются технические, социальные и экономические факторы внедрения данного приложения.

В настоящее время лесопромышленные комплексы России сталкиваются с трудностями, вызванными санкциями, закрытием транзитных коридоров через Европу, а также ужесточением законодательства Российской Федерации, ростом логистических и финансовых издержек. В связи с этим произошла переориентация с европейского рынка на азиатский. Ключевым партнером остается Китай, а также осваиваются новые маршруты в страны АСЕАН: Индонезию и Вьетнам, развиваются рыночные отношения с Турцией и Ираном.

Стоит отметить, что лесные грузы имеют достаточно широкую номенклатуру, вследствие чего возникает необходимость выбора подвижного состава для конкретной перевозки с учетом особых условий транспортировки. Лесоматериалы требуют особого внимания ко всем процессам производства, начиная с лесозаготовки,

заканчивая хранением и последующей перевозкой. Ввиду этого, внедрение инновационных технологий в лесную отрасль является перспективным трендом для оптимизации процессов погрузки, выгрузки, оформления документов и транспортировки, для сокращения простоев, повышения качества перевозки и сокращения издержек.

Целью работы является разработка приложения для оптимизации работы с лесными грузами, которое будет интегрировано с действующими информационными системами.

Новизна приложения заключается в комплексной цифровизации с учетом требований и специфики лесной отрасли. Данное приложение направлено на исключение проблем, связанных с нерациональным использованием подвижного состава, расчетом необходимого количества крепления, оформлением перевозочных документов на железнодорожном транспорте, а также с выбором оптимального маршрута транспортировки, учитывая срок доставки, загруженность направления и стоимость.

В лесную отрасль внедрены информационные системы, в большей степени ориентированные на учет заготовок и поставок продукции из древесины. Ярким примером является Федеральная государственная информационная система лесного комплекса (далее ФГИС ЛК). Система обеспечивает сквозной контроль оборота древесины, повышает прозрачность сделок, помогает бороться с нелегальными рубками и оперативно реагировать на лесные пожары [1]. Работать в ФГИС ЛК обязаны все участники цепочки оборота древесины – заготовители, переработчики, продавцы, посредники и транспортные компании; несоблюдение новых требований влечёт серьёзные штрафы и даже конфискацию древесины или транспорта [1].

Особое внимание стоит уделить системе «ЭРА-ГЛОНАСС». С 1 января 2025 года весь автотранспорт, задействованный в лесной отрасли, должен быть оснащен аппаратурой спутниковой навигации (АСН) и передавать телеметрические данные в ФГИС ЛК через государственную систему «ЭРА-ГЛОНАСС» [2]. Данная программа позволяет отследить полный оборот древесины и исключить незаконные схемы транспортировки.

Информационная система «1С: Управление лесозаготовительным предприятием» предназначена для автоматизации отраслевых процессов управления и учета на лесозаготовительных предприятиях: от ведения реестра лесных участков и оценки лесного фонда до отгрузки заготовленного круглого леса покупателям [3].

В данной работе применяется комплексный подход, который учитывает специфику отрасли и нормативные требования. Разработанное приложение будет интегрировано с государственными системами (ФГИС ЛК и «ЭРА-ГЛОНАСС»).

Результаты и демонстрация: на главной странице приложения представлено меню выбора разделов: расчет оптимального маршрута следования, расчет средств креплений, выбор подвижного состава, расчет загрузки вагона, актуальные железнодорожные тарифы на перевозку и электронный документооборот (далее – ЭДО). Главная страница представлена на рисунке 1.




Рис. 1. Главная страница приложения

Источник: разработка автора

На рисунке 2 показан раздел «Расчет оптимального маршрута». Он содержит пункты отправления и назначения, наименование и массу груза. После ввода данных выводится таблица, в которой отображены маршрут следования, срок доставки, стоимость и тип перевозки. В данном разделе предлагаются различные варианты маршрутов с использованием различных видов транспорта.

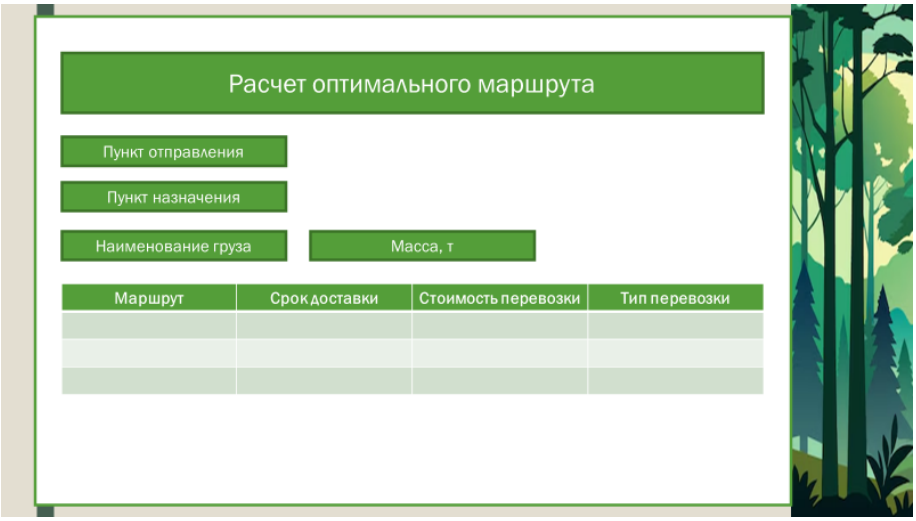



Рис. 2. Раздел «Расчет оптимального маршрута»

Источник: разработка автора

Раздел «Расчет средств креплений» предполагает наличие ячеек с типом груза и его параметров (габариты и масса). Далее в зависимости от типа груза предлагается схема размещения и крепления согласно Техническим условиям и ГОСТам, а также рассчитывается необходимое количество крепления. Данный раздел представлен на рисунке 3.




Рис. 3. Раздел «Расчет средств крепления»

Источник: разработка автора

На рисунке 4 изображен раздел «Расчет загрузки вагона». В этом разделе рассчитывается оптимальная загрузка вагона исходя из параметров груза и типа подвижного состава. Для наглядности выводится таблица с расчетами, где

предусмотрено подсвечивание ячеек: красный – перегруз, желтый – недогруз, зеленый – загрузка оптимальна.

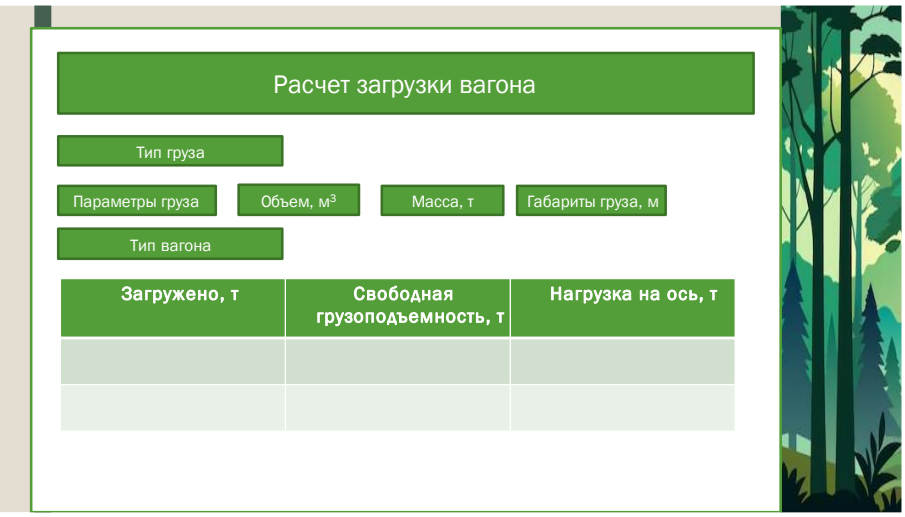



Рис. 4. Раздел «Расчет загрузки вагона»

Источник: разработка автора

Исходя из широкой номенклатуры лесных грузов, предоставляется выбор подвижного состава. Каждый тип подвижного состава имеет свои преимущества и недостатки. Разработанное приложение подбирает оптимальный вариант цепи поставки, исходя из типа груза, его параметров и маршрута следования. Лесные грузы можно перевозить как в специализированном подвижном составе – платформы-лесовозы, так и в универсальном – крытый вагон, полувагон, а также в контейнерах. На рисунке 5 представлен раздел «Подвижной состав».

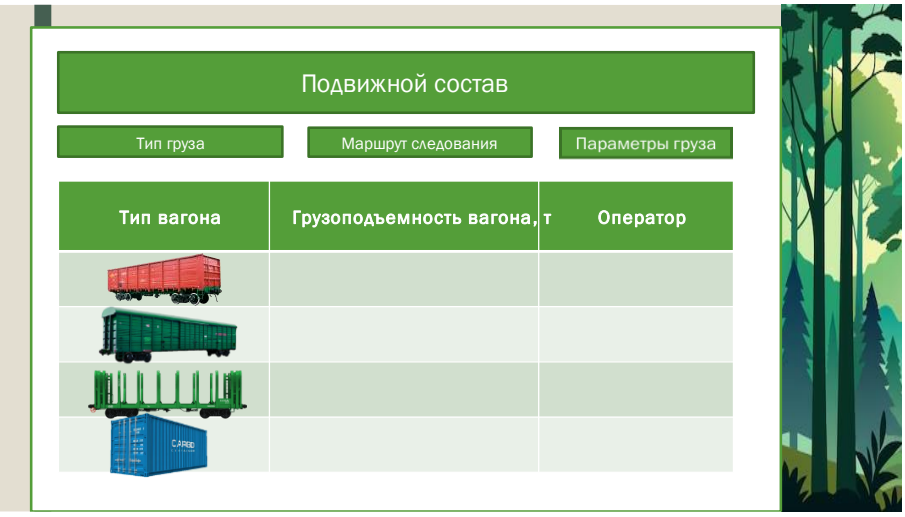



Рис. 5. Раздел «Подвижной состав»

Источник: разработка автора

На рисунке 6 изображен раздел «Тариф». Данный раздел интегрирован с системой «Магистраль» для расчета провозной платы в соответствии с Тарифным руководством №1. Тариф формируется с учетом базовой тарифной ставки, рода груза, типа подвижного состава, его принадлежности и расстояния перевозки.

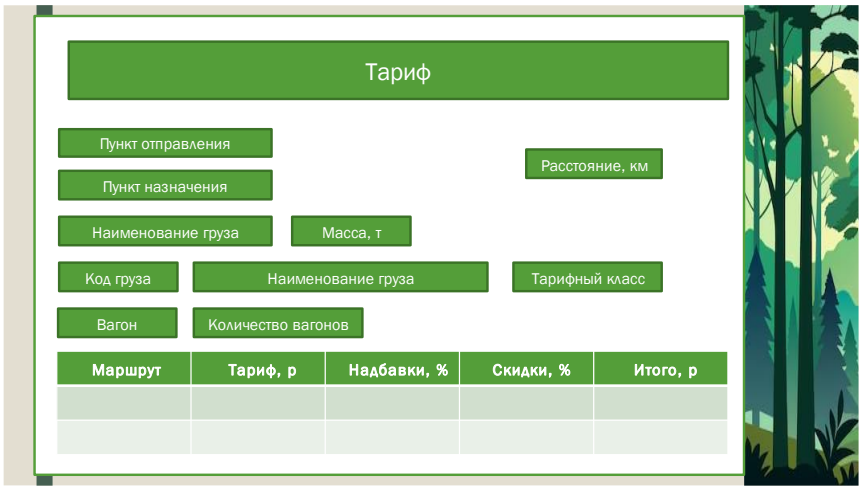



Рис. 6. Раздел «Тариф»

Источник: разработка автора

Раздел «Электронный документооборот» предполагает интеграцию с такими системами как: ЭТРАН – для подачи заявок на перевозку и оформления накладной, ФГИС ЛК – для формирования отчетов, ГЛОНАСС – для формирования отчетов по перемещению лесных грузов, Таможенные документы – для заполнения соответствующих деклараций при экспортных перевозках. Данный раздел представлен на рисунке 7.




Рис. 7. Раздел «Электронный документооборот»

Источник: разработка автора

План внедрения включает следующие этапы:

– анализ основных узких мест, возникающих при работе с лесными грузами, а также определение требований к приложению: интерфейс, функционал, интеграция с существующими системами;

– разработка и тестирование приложения, а также устранение ошибок и необходимая доработка;

– выбор предприятия для пилотного запуска и получение обратной связи, при необходимости корректировка;

– полный запуск приложения и обучение персонала по работе с ним;

– мониторинг, подразумевающий регулярное обновление ПО с учетом законодательных изменений, а также техническая поддержка.

Оценка эффективности приложения представлена в таблице 1.

Табл. 1

Оценка эффективности приложения

| Критерий | Описание |
|---|---|
| Технический | 1. Мониторинг транспорта в режиме реального времени.<br>2. Отчетность по перевозкам.<br>3. Высокая скорость обработки данных.<br>4. Планирование маршрута с учетом загрузки и состояния дорог.<br>5. Интеграция с государственными системами |
| Социальный | 1. Приложение помогает автоматизировать рутинные задачи, например оформление документов, построение оптимального маршрута.<br>2. Необходимость обучения новому.<br>3. Сотрудничество с учебными заведениями для проведения курсов по повышению квалификации сотрудников.<br>4. Риск оттока кадров из-за невозможности адаптации к новым условиям. |
| Экономический | 1. Затраты на разработку и внедрение.<br>2. Затраты на обучение персонала и оборудование.<br>3. Получение лицензии.<br>4. Снижение времени на оформление документов, сокращение простоев и оптимизация маршрутов.<br>5. Снижение затрат на логистику. |

Источник: составлено автором

Таким образом, разработка данного приложения позволит предприятиям оптимизировать свою работу благодаря замене ручного труда машинным. Данное приложение позволит за короткое время рассчитать необходимые данные, а также минимизировать ошибки за счет автоматизации. Интеграция с другими системами позволит автоматически формировать необходимые документы. Также повышается конкурентоспособность компании за счет автоматизации и прозрачности процессов.

Внедрение цифровой платформы позволит сократить операционные затраты и увеличить скорость обработки заявок.

**Список используемых источников**

1. ФГИС ЛК / Свое фермерство от Россельхозбанка. [Электронный ресурс]: https://svoefermerstvo.ru/svoeme-dia/articles/fgis-lk-edinyj-cifrovoj-centr-upravlenija-lesnymi-resursami (дата обращения: 04.02.2026).
2. ЭРА-ГЛОНАСС / МСС ГЛОНАСС. [Электронный ресурс]. https://mssglonass.ru/era-glonass-postanovlenie-1378/ (дата обращения: 04.02.2026).
3. 1С: Управление лесозаготовительным предприятием / Неосистемы Северо-Запад. [Электронный ресурс]: https://neosystems.ru/product/our-developments/modul1s-ka2/ (дата обращения: 04.02.2026).

## ТЕХНОЛОГИИ SD-WAN ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИЩЕННЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ МЕЖДУ УДАЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ

*Ерюков М.М. - студент, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются проблемы организации защищенных каналов связи между удаленными объектами электроэнергетики в условиях цифровизации отрасли и импортозамещения. Показаны ограничения традиционных подходов (MPLS, VPN поверх интернета). Обосновано применение технологии SD-WAN как программно-определяемого подхода к построению отказоустойчивых и безопасных сетей. Приведен анализ технической архитектуры SD-WAN для объектов КИИ, включая требования к оборудованию, каналам связи и системам управления. Уделено внимание вопросам кибербезопасности: шифрованию с использованием ГОСТ, интеграции с NGFW, сегментации трафика по стандарту IEC 62443 и организации удаленного доступа по принципу Zero Trust. Описан успешный опыт внедрения SD-WAN в российских энергокомпаниях («Самараэнерго»). Сделаны выводы о перспективах применения технологии для распределенной генерации и цифровых подстанций.

Современная электроэнергетика переживает этап глубокой цифровой трансформации. Повсеместное внедрение интеллектуальных систем учета, развитие распределенной генерации, включая возобновляемые источники энергии (ВИЭ), и концепция цифровых подстанций приводят к экспоненциальному росту числа удаленных объектов, требующих надежного и безопасного подключения к централизованным системам управления [1]. По данным отраслевых исследований,

доля компаний ТЭК, активно внедряющих цифровые решения, неуклонно растет, что влечет за собой качественное изменение требований к телекоммуникационной инфраструктуре.

Традиционные подходы к построению сетей связи, основанные на использовании выделенных каналов MPLS (Multiprotocol Label Switching), демонстрируют свою ограниченность в новых условиях. Основными недостатками являются:

– высокая стоимость аренды и эксплуатации выделенных каналов, особенно при подключении большого количества территориально распределенных объектов;

– сложность организации резервирования и, как следствие, недостаточная отказоустойчивость;

– трудности масштабирования – подключение нового объекта требует длительных согласований и ручной настройки оборудования;

– недостаточная гибкость управления разнородными каналами связи (интернет, lte, радиоканалы).

Кроме того, объекты электроэнергетики относятся к критической информационной инфраструктуре (КИИ), что предъявляет особые требования к безопасности сетей связи, включая выполнение требований регуляторов (ФСТЭК, ФСБ) и использование сертифицированных средств криптографической защиты информации (СКЗИ) [2].

Целью данной работы является анализ применимости технологии программно-определяемых глобальных сетей (SD-WAN) для создания защищенной, отказоустойчивой и экономически эффективной сети связи между удаленными объектами электроэнергетики. В рамках исследования решаются задачи обзора технологии SD-WAN, анализа требований к безопасности объектов КИИ, рассмотрения архитектурных решений и обобщения первого российского опыта внедрения в энергетическом секторе.

SD-WAN (Software-Defined Wide Area Network) – это программно-определяемая распределённая сеть. В основе технологии лежит концепция программно-определяемых сетей, которая предполагает, что управление сетью не зависит от технологий передачи данных и конкретных сетевых устройств, но опирается на политики, учитывающие особенности используемых приложений.

Простым языком, это технология, которая позволяет управлять связью между десятками и сотнями удаленных объектов (подстанций, электростанций, объектов

распределенной генерации) централизованно, «из единого окна», независимо от того, через какие каналы эти объекты подключены к интернету.

Ключевое отличие от традиционных сетей в том, что SD-WAN отделяет управление сетью (контроллер) от физической инфраструктуры. Администратор задает политики в центральной панели управления, а система сама «распространяет» настройки на все устройства.

SD-WAN умеет работать поверх любых доступных каналов:

– выделенные линии (MPLS, L2VPN, L3VPN) – для критичного трафика SCADA;

– обычный проводной интернет (xDSL, Ethernet);

– сотовая связь (4G/LTE, 5G) – как основной или резервный канал;

– спутниковая связь – для самых удаленных объектов (нефтяные платформы, арктические станции).

Ключевыми возможностями SD-WAN являются транспортная независимость поддержка любых типов подключений (MPLS, проводной интернет (Broadband), сотовые сети (LTE/5G), спутниковая связь) [4], динамическая маршрутизация на основе состояния каналов (Application-aware routing) (Автоматический выбор оптимального пути для каждого типа трафика на основе текущих показателей задержки, джиттера и потерь пакетов), автоматическая настройка оборудования на удаленном объекте при первом включении без участия инженера на месте (Zero-Touch Provisioning) [5], встроенное шифрование, организация защищенных туннелей (IPsec, DTLS) между всеми узлами сети по умолчанию [6].

Ключевое преимущество SD-WAN – возможность комбинирования различных типов каналов, обеспечивая прозрачное переключение между каналами без разрыва сессий прикладного уровня. Типовая архитектура включает:

– основной канал, выделенная линия связи (MPLS или L2VPN) для гарантированного качества критичного трафика SCADA;

– резервный канал, сотовые сети 4G/LTE (перспективно – 5G), активируемые при отказе основного канала или для передачи некритичного трафика (видеонаблюдение, обновления ПО);

– дополнительный канал, для особо удаленных или труднодоступных объектов (арктические зоны, удаленные промплощадки) может применяться спутниковая связь (например, Starlink) [9].

Базовый принцип SD-WAN – шифрование всего трафика по умолчанию с использованием IPsec или Datagram Transport Layer Security (DTLS) [4]. Однако для

российских объектов критической информационной инфраструктуры (КИИ) этого недостаточно – требуется применение сертифицированных средств криптографической защиты информации (СКЗИ). Решением является интеграция SD-WAN с выделенными крипто шлюзами, реализующими шифрование по ГОСТ. Пример такой архитектуры был реализован в проекте «Самараэнерго», где трафик Cisco SD-WAN туннелировался через оборудование «С-Терра Шлюз», обеспечивающее шифрование по ГОСТ 28147-89 [2]. Как отмечают эксперты Cisco, при необходимости использования выделенных крипто устройств SD-WAN может применять туннели GRE (Generic Routing Encapsulation) для передачи трафика, в то время как крипто устройство обрабатывает шифрование для обеспечения конфиденциальности [4].

Современные SD-WAN платформы включают встроенные функции межсетевого экранирования нового поколения (NGFW), системы предотвращения вторжений (IPS) и антивирусной защиты [6, 10]. Например, Cisco SD-WAN интегрируется с Cisco Secure Firewall Threat Defense, обеспечивая централизованное управление политиками безопасности через Cisco Secure Firewall Management Center [6]. Важной функцией является зональный межсетевой экран (Zone-Based Firewall), позволяющий создавать политики безопасности между выделенными VPN-сегментами [4].

Стандартные средства сетевой защиты не всегда способны корректно интерпретировать промышленные протоколы. Для решения этой задачи необходима интеграция SD-WAN со специализированными системами мониторинга промышленного трафика, такими как Cisco Cyber Vision или продукты Positive Technologies. Эти системы выполняют глубокую инспекцию пакетов (DPI) протоколов SCADA, выявляя аномалии и попытки проведения целевых атак (например, внедрение ложных команд RTCI) [8].

Концепция «нулевого доверия» (Zero Trust) становится стандартом для КИИ [11]. В контексте SD-WAN это реализуется через:

– ZTNA (Zero Trust Network Access), предоставление удаленным подрядчикам доступа строго к конкретным устройствам, на ограниченное время и с обязательной многофакторной аутентификацией (2FA/MFA);

– постоянную проверку устройств, все устройства, подключаемые к сети SD-WAN, проходят взаимную аутентификацию перед получением доступа к ресурсам [4];

– микросегментацию, изоляцию отдельных устройств (например, конкретного контроллера) в отдельный виртуальный сегмент.

Первый и наиболее показательный пример внедрения SD-WAN в российском энергетическом секторе – проект в ПАО «Самараэнерго», реализованный в 2020–2021 годах компанией «Открытые Технологии» [1, 2].

Основанием проекта была необходимость замены устаревшего оборудования, унификации аппаратного парка, обеспечения резервирования каналов связи и выполнения требований по защите информации с использованием алгоритмов ГОСТ.

Как решение была развернута сеть Cisco SD-WAN, объединившая около 50 удаленных объектов (районные отделения, подстанции) по Самарской области. Для обеспечения соответствия требованиям по криптозащите была выполнена интеграция с оборудованием «С-Терра Шлюз» (модели 100/1000/3000) [2].

Ключевые результаты:

– автоматизация развертывания сети благодаря Zero-Touch Provisioning;

– экономия на организации резервных каналов за счет активного использования сетей 3G/4G, особенно в малых населенных пунктах с ограниченным выбором операторов фиксированной связи;

– снижение операционных затрат за счет централизованного управления и применения типовых конфигураций для большого парка оборудования;

– обеспечение соответствия требованиям безопасности благодаря интеграции российских СКЗИ [1, 2].

Как отметил заместитель генерального директора по техническим вопросам ПАО «Самараэнерго» Р. Л. Шуман, внедрение позволило увеличить пропускную способность, снизить издержки и эффективнее использовать возможности ИТ-платформ [1].

Анализ внедрений SD-WAN по сравнению с традиционными WAN-сетями [3, 5, 10] показывает снижение совокупной стоимости владения (TCO), экономия на каналах связи достигает 25–30% за счет использования дешевых интернет-каналов вместо дорогих MPLS для части трафика, повышение отказоустойчивости – автоматическое переключение между каналами (failover) происходит за секунды, оставаясь незаметным для приложений и упрощение эксплуатации, централизованное управление сокращает время настройки новых объектов с дней до минут.

Дальнейшее развитие технологии SD-WAN для энергетики связано со следующими трендами:

– интеграция с SASE (Secure Access Service Edge): конвергенция SD-WAN с облачными сервисами безопасности (CASB, SWG, ZTNA) для защиты доступа к облачным приложениям и сервисам [9, 10];

– применение искусственного интеллекта (AI/ML): использование алгоритмов машинного обучения для предиктивной аналитики отказов каналов и автоматической оптимизации трафика (например, Huawei iMaster NCE);

– сети 5G: использование высокоскоростных сотовых каналов как полноценной альтернативы проводным подключениям, особенно для временных объектов и мобильных бригад;

– развитие отечественных платформ: появление полностью импортозамещенных SD-WAN решений (например, BI.ZONE, Secure SD-WAN, решения «ТрансТелеКом»), сертифицированных для работы на объектах КИИ.

Технология SD-WAN является эффективным и экономически оправданным решением для построения сетей связи в распределенной электроэнергетике, позволяя объединить разнородные каналы связи (MPLS, интернет, LTE) в единую управляемую структуру.

Архитектура SD-WAN органично включает необходимые механизмы защиты для объектов КИИ, встроенное шифрование, сегментацию трафика в соответствии с IEC 62443, межсетевое экранирование и возможность интеграции с внешними средствами защиты.

Для российских объектов критической инфраструктуры важно применение сертифицированных СКЗИ (например, шифрование по ГОСТ), что достижимо путем интеграции SD-WAN с отечественными крипто шлюзами, как успешно продемонстрировано в проекте «Самараэнерго».

Внедрение SD-WAN обеспечивает значительное снижение операционных затрат, повышение отказоустойчивости и ускорение подключения новых объектов благодаря автоматизации (ZTP) и централизованному управлению.

Перспективы развития технологии связаны с конвергенцией с облачными сервисами безопасности (SASE), применением искусственного интеллекта для управления трафиком и использованием сетей 5G.

Таким образом, SD-WAN следует рассматривать как базовую технологию для построения телекоммуникационной инфраструктуры цифровых подстанций и распределенной энергогенерации, отвечающую современным требованиям по надежности, безопасности и эффективности.

**Список используемых источников**

1. В ПАО «Самараэнерго» развернута сеть SD-WAN на основе решений Cisco // IT-World.ru. 20.07.2021. [Электронный ресурс]. URL: www.it-world.ru/news-company/68tr0koioow0w8s8sc4occ4owwc08o8.html (дата обращения: 26.02.2026).

2. ГОСТ Р 56498–2015/ IEC/PAS 62443-3: 2008. Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. – М.: Стандартинформ, 2019. 46 с.

3. Первый в энергетическом секторе России проект SD-WAN // IT-World.ru. 23.06.2021. [Электронный ресурс]. URL: www.it-world.ru/news-company/projects/176262.html (дата обращения: 26.02.2026).

4. The Definitive Guide to SD-WAN and Secure SD-WAN // Cirion Technologies. 2025. [Электронный ресурс]. URL: www.ciriontechnologies.com/en/connectivity/resources/sd-wan-guide/ (дата обращения: 26.02.2026).

5. Cisco SD-WAN for Critical Networks Infrastructure White Paper // Cisco Systems. Updated: July 11, 2025. [Электронный ресурс]. URL: /www.cisco.com/c/en/us/solutions/enterprise/design-zone-branch-wan/sd-wan-for-critical-networks-infrastructure-wp.html (дата обращения: 26.02.2026).

6. Imran Abdul Majeed Qadri. Architecting Resilient Network Operations: A Comprehensive Framework for Large-Scale Enterprise SD-WAN and Zero Trust Implementation // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. 2025. Vol. 11, No. 3. DOI: 10.22399/ijcesen.3960.

7. Cisco Secure Firewall Threat Defense SD-WAN Design and Deployment Guide // Cisco Systems. Updated: September 30, 2025. [Электронный ресурс]. URL: www.cisco.com/c/en/us/td/docs/security/secure-firewall/cvd/secure-firewall-sdwan-deployment-guide.html (дата обращения: 26.02.2026).

8. Coates G.M. et al. A Trust System Architecture for SCADA Network Security // IEEE Transactions on Power Delivery. 2009. Vol. 25, No. 1. P. 158-165. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2034834.

9. Network Resilience & Security Transformation Leveraging SD-WAN // Advanced Network Management Blog. May 5, 2025. [Электронный ресурс]. URL: anm.com/blog/network-resilience-and-security-transformation-with-sd-wan/ (дата обращения: 26.02.2026).

10. Network infrastructure design best practices for network security // Verizon Business. September 9, 2024. [Электронный ресурс]. URL:

www.verizon.com/business/resources/articles/s/network-infrastruce-design-best-practices-for-security/ (дата обращения: 26.02.2026).

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКИХ И НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

*Ибрахим М.М. – аспирант, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

*Невзорова О.А. – к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

**Аннотация**

В статье рассматривается задача управления динамическими техническими объектами с использованием классических и нейросетевых методов. В качестве базового метода управления применяется ПИД-регулятор, широко используемый в системах автоматического регулирования. В качестве перспективного направления предлагается применение нейросетевого модуля управления, предназначенного для компенсации нелинейностей и неопределённостей модели объекта. В работе выполнена разработка и формализация математической модели объекта управления, предназначенной для использования в имитационном моделировании. Рассмотрены принципы построения классического ПИД-регулятора и нейросетевого регулятора, а также возможные структуры их совместного применения. Выполнен сравнительный анализ классических и нейросетевых методов управления с точки зрения устойчивости, адаптивности и потенциальной эффективности при изменении параметров объекта управления. Показано, что применение нейросетевых алгоритмов может обеспечить повышение качества регулирования в условиях параметрической неопределённости и внешних возмущений.

## Введение

Системы автоматического управления широко применяются в различных отраслях промышленности, включая энергетику, машиностроение, химическую промышленность и транспорт. Основной задачей таких систем является обеспечение заданного режима работы объекта управления при наличии внешних возмущений и изменяющихся параметров объекта.

Наиболее распространённым средством регулирования в промышленных системах являются ПИД-регуляторы. Их популярность обусловлена простотой реализации, наглядной интерпретацией параметров настройки и достаточной эффективностью для широкого класса линейных объектов. Однако при наличии существенных нелинейностей, запаздываний и параметрических неопределённостей

эффективность классических регуляторов снижается, что приводит к ухудшению качества регулирования и возможной потере устойчивости [10].

В последние годы активно развиваются интеллектуальные методы управления, основанные на применении методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей. Нейронные сети обладают способностью аппроксимировать сложные нелинейные зависимости между входными и выходными величинами и могут адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования объекта управления [7,11]. Это делает их перспективным инструментом для построения адаптивных и робастных систем управления.

Актуальным направлением является разработка гибридных систем управления, сочетающих в себе преимущества классических и нейросетевых методов. В таких системах нейросетевой модуль используется в качестве корректирующего блока, дополняющего работу классического регулятора. Это позволяет сохранить устойчивость системы и одновременно повысить её адаптивные свойства.

Целью настоящей работы является разработка и формализация математической модели объекта управления для использования в имитационном моделировании, а также сравнительный анализ классических и нейросетевых методов управления динамическими объектами.

Объектом исследования является процесс управления динамическим техническим объектом.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы управления динамическими объектами на основе классического ПИД-регулирования и нейросетевых методов управления.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

– анализ классических методов управления динамическими объектами;

– создание математической модели объекта управления для использования в имитационном моделировании;

– выбор принципов построения нейросетевого регулятора для задач управления динамическими объектами;

– сравнительный анализ классических и нейросетевых методов управления по показателям качества регулирования.

## Обзор литературы

Основы теории автоматического управления подробно изложены в классических работах [2,1], где рассматриваются методы анализа устойчивости, качества переходных процессов и синтеза регуляторов.

Особое внимание уделяется линейным динамическим системам и методам частотного анализа.

Проблемы настройки и применения ПИД-регуляторов подробно рассмотрены в монографии [10], где приведены классические методы подбора параметров и оценки качества управления. Показано, что при корректной настройке ПИД-регуляторы обеспечивают приемлемые показатели устойчивости и точности, однако чувствительны к изменению параметров объекта.

В работах [7,11] рассматриваются принципы построения искусственных нейронных сетей и методы их обучения. Отмечается способность нейросетей аппроксимировать нелинейные зависимости без явного задания структуры модели объекта.

Применение нейронных сетей для идентификации и управления динамическими объектами показано в работе [4], где продемонстрирована возможность использования нейросетей для управления нелинейными системами без точного знания их параметров. Развитие интеллектуальных систем управления отражено в исследованиях [8], где анализируются архитектуры интеллектуальных регуляторов и их преимущества по сравнению с классическими алгоритмами.

Таким образом, анализ литературы показывает целесообразность использования комбинированных систем управления, сочетающих классические и интеллектуальные методы.

## Математическая модель объекта управления

В качестве объекта управления рассматривается абстрактный динамический объект, описываемый линейной инерционной моделью первого порядка [2]:

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} \quad (1)$$

где $K$ – коэффициент усиления объекта;

$T$ – постоянная времени объекта.

Во временной области динамика объекта может быть представлена дифференциальным уравнением:

$$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ku(t) \quad (2)$$

где $y(t)$ – выходная координата объекта управления;

$u(t)$ – управляющее воздействие.

Данная модель используется для описания различных технических процессов, обладающих инерционными свойствами. Несмотря на простоту, модель позволяет исследовать характер переходных процессов и влияние параметров объекта на качество управления.

**Формализация модели для имитационного моделирования**

Для реализации модели объекта управления в среде численного моделирования осуществляется переход от дифференциального уравнения к разностной форме. При использовании метода Эйлера получаем:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{\Delta t}{T}(-y_k + Ku_k) \quad (3)$$

где $y_k$ – значение выходной величины на шаге моделирования k;

$u_k$ – управляющее воздействие;

$\Delta t$ – шаг дискретизации.

Полученная дискретная модель может быть использована в программных средах имитационного моделирования для анализа работы различных алгоритмов управления. В модель могут быть введены внешние возмущения и случайные помехи, что позволяет исследовать устойчивость системы управления.

**Классический метод управления**

Для управления объектом применяется ПИД-регулятор, формирующий управляющее воздействие по закону:

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

где $e(t) = r(t) - y(t)$ – ошибка регулирования;

$r(t)$ – заданное значение выходной величины.

ПИД-регулятор обеспечивает устойчивое управление объектом при номинальных параметрах модели. Параметры $K_p$, $K_i$, $K_d$ выбираются на основе стандартных методов настройки, обеспечивающих компромисс между быстродействием и устойчивостью системы.

Однако при изменении коэффициентов K и T качество управления может ухудшаться, что проявляется в увеличении перерегулирования и времени установления переходного процесса [10].

**Нейросетевой подход к управлению**

В качестве альтернативного подхода рассматривается использование нейросетевого регулятора, реализованного в виде многослойной нейронной сети прямого распространения. На вход нейросети подаются параметры состояния системы [7]:

$$e(t), \dot{e}(t), \int e(t)dt \tag{5}$$

где $e(t)$ – ошибка регулирования;

$\dot{e}(t)$ – производная ошибки;

$\int e(t)dt$ – интеграл ошибки.

Выходом нейросети является управляющее воздействие:

$u_N N(t)$ – корректирующее управляющее воздействие нейросети.

Возможна реализация гибридной структуры управления:

$$u(t) = u_{PID}(t) + u_{NN}(t) \tag{6}$$

В гибридной структуре классический ПИД-регулятор обеспечивает базовую устойчивость системы, а нейросетевой модуль выполняет корректирующую функцию [4].

**Методика имитационного моделирования**

Имитационное моделирование системы управления проводится на основе формализованной математической модели объекта управления. Рассматриваются режимы ступенчатого изменения задания и наличие внешних возмущений.

В качестве показателей качества регулирования используются:

– интегральная абсолютная ошибка:

$$IAE = \int |e(t)|dt; \quad (7)$$

– время установления переходного процесса;

– величина перерегулирования.

Для сравнения методов управления анализируются два варианта системы:

1) система с классическим ПИД-регулятором;
2) система с нейросетевым модулем управления.

**Сравнительный анализ подходов**

Классические регуляторы характеризуются простотой реализации и прозрачностью настройки, однако их эффективность зависит от точности математической модели объекта управления [10].

Нейросетевые методы управления не требуют строгого знания модели объекта и обладают способностью адаптации к изменению его характеристик. Ожидается, что при наличии параметрической неопределённости нейросетевой регулятор обеспечит снижение интегральной ошибки и повышение быстродействия системы по сравнению с классическим ПИД-регулятором.

Таким образом, нейросетевые методы управления представляют собой перспективное направление развития систем автоматического регулирования [7, 8].

**Практическая значимость**

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной математической модели объекта управления в средах имитационного моделирования при проектировании систем автоматического управления. Полученные результаты могут быть использованы для разработки нейросетевых регуляторов и внедрения интеллектуальных методов управления в существующие системы автоматизации [10,8].

## Заключение

В работе рассмотрены классические и нейросетевые методы управления динамическими объектами. Разработана и формализована математическая модель объекта управления, предназначенная для использования в имитационном моделировании. Проанализированы принципы построения ПИД-регулятора и нейросетевого регулятора, а также возможные структуры их совместного применения.

Показано, что нейросетевые методы управления обладают потенциальными преимуществами при управлении объектами с изменяющимися параметрами и нелинейными характеристиками. Дальнейшие исследования будут направлены на построение и обучение нейросетевого регулятора, а также на экспериментальное сравнение его характеристик с классическим ПИД-регулятором по показателям качества регулирования.

## Список используемых источников


1. Астахов В.С. Теория автоматического управления: учебник. М.: Академия, 2019. 352 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 2019. 747 с.
3. Воронов А. Элементы теории автоматического регулирования. М.: Воениздат, 2015. 112 с.
4. Каляев И.А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Интеллектуальные системы управления. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2014. 256 с.
5. Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с.
6. Сенигов, П. Н. Теория автоматического управления: конспект лекций. Челябинск: ЮУрГУ, 2001. 93 с.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
8. Åström K. J. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning / K. J. Åström, T. Hägglund. Research Triangle Park: ISA, 2006. 343 p.
9. Goodfellow, I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. Cambridge: MIT Press, 2016. 775 p.

10. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Transactions on Neural Networks. 1990. Vol. 1, No.1. P. 4–27.

11. Slotine J.-J., Li W. Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991. 459 p.

# МОБИЛЬНЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АГРО-БЛОК КАК ЭЛЕМЕНТ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ: ОТ ТРАНСПОРТНОЙ БАЗЫ К ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

*Кузюков Е.В. – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

*Научный руководитель: Блинов А.В. – преподаватель, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

**Аннотация**

В статье рассматривается концепция автономного мобильного агро-блока контейнерного типа, интегрированного в транспортную и энергетическую инфраструктуру полярных станций. Представлены результаты теплотехнического моделирования системы глубокой утилизации тепла дизель-генераторных установок для обогрева вегетационной зоны. Описываются подходы к интеллектуальному управлению микроклиматом на основе мультиагентных систем и цифровых двойников. Проведён сравнительный анализ энергоэффективности современных светодиодных фитосистем.

## Введение

Обеспечение жизнедеятельности в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) неразрывно связано с задачей продовольственной безопасности и реализацией долгосрочной стратегии освоения региона. Согласно Указу Президента РФ от 26.10.2020 № 645, развитие Арктики является приоритетным направлением государственной политики [4]. В настоящее время снабжение удалённых поселений решается преимущественно за счёт дорогостоящего «северного завоза».

По данным АО «Росатом Арктика», являющегося единым морским оператором северного завоза с 2024 г., стоимость морской перевозки грузов в арктические регионы демонстрирует устойчивый рост: фрахт судов для перевозки ГСМ по маршруту Находка – необорудованный берег в 2024 г. составил 1 млн руб./сутки (рост на 53,8% по сравнению с 2023 г.), а в 2025 г. прогнозируется увеличение до 1,5 млн руб./сутки [2]. С 2021 г. количество судов для перевозки генеральных грузов

сократилось на 37,4%, что создаёт системные риски для снабжения [2]. Ежегодно на снабжение заполярных территорий продуктами, лекарствами, топливом и другими товарами направляется 87 млрд рублей, при этом закон о северном завозе (вступил в силу 01.04.2024) направлен на снижение стоимости товаров на 20% за счёт оптимизации логистики [3].

Гарантированное снабжение качественной свежей продукцией, особенно чувствительной к низким температурам и длительному хранению (овощи, фрукты, зелень), остаётся сложной инженерно-логистической задачей. В связи с этим актуальным становится развитие контейнерного фермерства – технологий выращивания растений в замкнутой, контролируемой среде непосредственно в местах проживания полярников.

Исследования NASA в рамках проекта HI-SEAS подтверждают, что наличие свежей растительной пищи значительно снижает уровень стресса у персонала в изолированных средах [4]. Международный проект EDEN ISS (European Space Agency), реализованный в Антарктиде в 2018 г., продемонстрировал возможность автономного выращивания овощей в течение 9 месяцев с получением 270 кг продукции для экипажа из 10 человек [5]. Однако внедрение традиционных теплиц в Арктике сдерживается высокой энергоёмкостью процессов отопления и освещения: по данным исследований, контейнерные фермы потребляют в 30 раз больше энергии на килограмм продукции по сравнению с традиционным земледелием [6].

Данная работа посвящена разработке концепции мобильного агро-блока, который решает эти проблемы за счёт интеграции с транспортными платформами высокой проходимости и энергетическими системами станций.

Исследование проводилось методом системного анализа и математического моделирования тепловых процессов. Для обоснования концепции использованы:

– теплотехнический расчёт – методика оценки теплопотерь ограждающих конструкций контейнера и баланса тепловыделений оборудования согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология и геофизика» [7];

– энергетический анализ – расчёт эффективности утилизации тепла ДГУ на основе данных о распределении энергии в дизельном двигателе: 30–35% – полезная механическая работа, 30% – тепло выхлопных газов, 30% – тепло охлаждающей жидкости [8];

– сравнительный анализ – оценка эффективности светодиодных фитосистем по критерию фотонной эффективности (PPE, мкмоль/Дж) на основе экспериментальных данных 2024 г. [9];

– моделирование управления – разработка архитектуры мультиагентной системы (МАС) с применением стандартов FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) [10].

**Концепция мобильного агро-блока и его энергетическая эффективность**

Для обеспечения мобильности и возможности оперативной переброски ресурсов между станциями перспективным решением является размещение агро-блока в теплоизолированном контейнере на базе высокопроходимой гусеничной платформы.

В качестве транспортной базы предложены сочлененные гусеничные транспортеры семейства «Витязь» (ДТ-30, ДТ-30П, ДТ-30ПМ). Технические характеристики ДТ-30ПМ [11]:

– грузоподъёмность: 30 т;

– масса в снаряженном состоянии: 29 т;

– мощность двигателя: 588 кВт (800 л.с.);

– рабочий диапазон температур: от –50 °С до +40 °С;

– удельное давление на грунт: 0,3 кг/см² (ниже давления стопы человека);

– преодолеваемый ров: до 4 м.

Данные машины способны работать при температурах до –50 °С, преодолевая снежную целину, торосы и водные преграды. Грузоподъёмность платформ позволяет транспортировать агро-блок весом до 20 тонн с запасом расходных материалов (субстрат, семена, удобрения) на длительный период автономной работы.

Модульный принцип построения, аналогичный применённому в зимовочном комплексе станции «Восток», позволяет быстро интегрировать агро-блок в существующую инфраструктуру. Контейнерное исполнение обеспечивает стандартные габариты для транспортировки морским, железнодорожным и авиационным транспортом.

Внутреннее пространство оптимизировано для вертикального фермерства с использованием многоярусных стеллажей с аэропонными системами. Плотность посадки при вертикальном расположении увеличивается в 3–5 раз по сравнению с

традиционным грунтовым выращиванием [13], что критически важно в условиях ограниченного пространства.

Ключевым инженерным вызовом для арктического контейнерного фермерства является высокая энергоёмкость освещения и отопления, составляющая до 50% себестоимости продукции [6]. В условиях, когда каждый киловатт-час электроэнергии получен за счёт сжигания привозного дизельного топлива, эффективность энергопотребления становится определяющим фактором жизнеспособности проекта.

Расчёт теплопотерь контейнера (габариты 12×2,5×2,9 м, утепление 200 мм вакуумными панелями):

Теплопотери через ограждения при температуре наружного воздуха –40 °C и внутренней +22 °C:

$$Q_{\text{потерь}} = k \cdot F \cdot \Delta t$$

где k – приведённый коэффициент теплопередачи (для вакуумной изоляции 0,15 Вт/(м²·°C));

F – площадь ограждающих конструкций (141 м²), Δt – разность температур (62 °C).

$$Q_{\text{потерь}} = 0{,}15 \cdot 141 \cdot 62 = 1311 \text{ Вт}$$

При учёте инфильтрации (коэффициент 1,3) общие теплопотери составляют 1704 Вт (≈1,7 кВт).

На современных станциях для отопления жилых модулей применяются комплексы утилизации тепла от дизель-генераторов. Дизельный двигатель выделяет [8]:

– 30% энергии топлива – через выхлопные газы (температура 400–600 °C);

– 30% – через систему охлаждения (температура 80–95 °C);

– 35% – полезная механическая работа;

– 5% – прочие потери.

Интеграция агро-блока в тепловой контур ДГУ позволяет минимизировать затраты на обогрев. Теплоноситель (пропиленгликоль 40%) циркулирует через теплообменники:

1. Выхлопной теплообменник – рекуперация тепла выхлопных газов (до 60% доступного тепла);

2. Конденсатор – тепло от охлаждения двигателя

Суммарная мощность утилизируемого тепла для ДГУ 500 кВт:

– тепло выхлопных газов: 500·0,3·0,6=90 кВт;

– тепло охлаждения: 500·0,3=150 кВт;

– доступно для агро-блока: 15–20 кВт (с учётом потерь и приоритета жилых модулей).

Этого достаточно для компенсации теплопотерь контейнера (1,7 кВт) и обогрева субстрата.

Современные светодиодные фитосистемы характеризуются высокой фотонной эффективностью (PPE). По данным исследований 2024 г. [9]:

– красные диоды (660 нм): до 3,84 мкмоль/Дж;

– дальний красный (730 нм): до 3,39 мкмоль/Дж;

– синие диоды (450 нм): до 2,38 мкмоль/Дж;

– белые диоды (5700 К): до 2,31 мкмоль/Дж.

При этом КПД преобразования электроэнергии в тепло составляет 60–70% (для диодов с PPE 2,9 мкмоль/Дж). В условиях Арктики это тепло является полезным для поддержания микроклимата.

Расчёт энергобаланса освещения:

Для площади посадки 50 м² (5 ярусов по 10 м²) при требуемой PPFD 250 мкмоль/(м²·с) и световом дне 16 ч:

$$E_{\text{потребления}} = \frac{PPFD \cdot S \cdot t}{PPE} = \frac{250 \cdot 50 \cdot 57600}{2{,}9 \cdot 10^6} = 248 \text{ кВт·ч/сутки}$$

Тепловыделение от светильников: 248·0,65=161 кВт·ч/сутки (≈6,7 кВт средней мощности), что покрывает потребности в отоплении с избытком.

Дополнение системы солнечными панелями актуально в полярный день. При инсоляции 400 Вт/м² (среднее для арктического лета) и площади панелей 20 м² (КПД 20%):

$$P_{\text{солнечной}} = 400 \cdot 20 \cdot 0{,}2 = 1{,}6 \text{ кВт}$$

Накопители энергии (литий-ионные батареи) позволяют сглаживать пики потребления. В перспективе рассматривается использование водорода, полученного методом электролиза в период избыточной генерации.

**Интеллектуальное автоматическое управление**

Для минимизации ручного труда и исключения ошибок персонала управление агро-блоком осуществляется автоматически. Архитектура системы управления строится на взаимодействии автономных программных агентов [10]:

– агент «Климат» – контроль температуры, влажности, $CO_2$;

– агент «Свет» – управление фотопериодом и спектром;

– агент «Тепло» – регулирование теплообмена с ДГУ;

– агент «Ирригация» – контроль pH, EC, влажности субстрата;

– агент «Энергия» – мониторинг доступной мощности.

Агенты ведут «переговоры» для оптимального распределения ограниченных ресурсов. Например, при снижении доступной мощности агент «Энергия» сигнализирует агенту «Свет» о переходе на режим пониженной интенсивности (достаточный для поддержания фотосинтеза, но не оптимальный для роста), а агент «Климат» снижает интенсивность вентиляции.

Создание виртуальной модели агро-блока позволяет [14]:

– прогнозировать время сбора урожая на основе моделей роста растений;

– диагностировать износ оборудования до наступления отказа;

– тестировать режимы выращивания в облачных сервисах (Digital Twin) до их применения на практике;

– оптимизировать энергопотребление через предиктивную аналитику.

Цифровой двойник накапливает данные о росте растений в зависимости от параметров среды, создавая базу знаний для оптимизации будущих циклов. Это особенно важно для Арктики, где цена ошибки (потеря урожая) крайне высока из-за длительности логистического плеча замены семян (6–12 месяцев).

Использование легковесных протоколов (MQTT, CoAP) обеспечивает надёжную передачу данных от датчиков при нестабильных каналах связи (спутниковый канал с задержкой 500–800 мс). Локальный контроллер (PLC) работает автономно, сохраняя данные в буфере и синхронизируясь с центральным сервером при появлении устойчивого соединения [15].

В настоящее время существуют прототипы роботизированных теплиц для Арктики, подтверждающие техническую реализуемость концепции:

Томский политехнический университет – разработан исследовательский комплекс «Фитотрон» с управлением спектрально-энергетическими характеристиками облучения (красные, синие и белые светодиоды с регулируемым током 0–700 мА) [17].

Проект «АгроПолигон» (МГУ) – исследования в области замкнутых систем жизнеобеспечения.

Отличие предлагаемого решения – глубокая интеграция с энергосистемой станции через утилизацию тепла ДГУ и использование отечественной транспортной базы («Витязь»), обеспечивающей технологический суверенитет.

**Выводы**

Проведённые расчёты показывают, что интеграция агро-блока с системой утилизации тепла ДГУ позволяет снизить энергопотребление на отопление на 85–90% по сравнению с автономным электрическим обогревом. При этом:

– теплопотери контейнера: 1,7 кВт;

– доступное тепло от ДГУ: 15–20 кВт (при условии приоритета жилых модулей);

– тепловыделение от освещения: 6,7 кВт.

Энергетический баланс положительный даже при экстремальных температурах (–50 °С), при этом сохраняется резерв мощности для быстрого прогрева системы после транспортировки.

Предварительная оценка себестоимости продукции (при условии интеграции с ДГУ):

– электроэнергия на освещение: 248 кВт·ч/сутки × 365 дней × 15 руб./кВт·ч = 1,36 млн руб./год;

– тепло: 0 руб. (утилизация от ДГУ);

– субстрат и семена: 150 тыс. руб./год;

– амортизация оборудования: 300 тыс. руб./год.

Итого: ≈1,8 млн руб./год при урожайности 200–300 кг зелени и 50–80 кг овощей. Стоимость 1 кг продукции: 6000–7200 руб., что сопоставимо с логистическими издержками доставки свежих овощей в арктические станции (5000–15000 руб./кг в зимний период).

Ограничения и риски:

– зависимость от ДГУ – при остановке генераторов требуется резервное электрическое отопление (мощность 5 кВт);

– квалификация персонала – необходимость подготовки операторов для работы с мультиагентными системами.

Разработка мобильного агро-блока является перспективным направлением, объединяющим достижения в области транспортного машиностроения, теплоэнергетики и искусственного интеллекта. Реализация данной концепции

отвечает стратегическим задачам освоения Арктики и повышения качества жизни персонала в высоких широтах.

Научная новизна заключается в комплексном подходе к интеграции контейнерного фермерства с энергетической системой полярной станции через глубокую утилизацию тепла ДГУ, что позволяет достичь энергетической эффективности, недостижимой для автономных систем.

Практическая значимость подтверждена теплотехническими расчётами, демонстрирующими возможность поддержания микроклимата при температурах наружного воздуха до –50 °C без дополнительных энергозатрат на отопление.

**Список используемых источников**

1. Двухзвенный гусеничный транспортер ДТ-30П «Витязь» // Официальный сайт ОАО «Завод транспортной техники» [Электронный ресурс]. URL: https://vityaz.atvgroup.ru (дата обращения: 20.02.2026).

2. Кузнецов И.И. Протоколы IoT для спутниковой связи в удаленных регионах // Т-Коммунал. 2022. № 10. С. 45–50.

3. О северном завозе: Федеральный закон от 04.08.2023 № 411-ФЗ // [Электронный ресурс]. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?doc_itself=&backlink=1&nd=605786827&page=1&rdk=0 (дата обращения: 20.02.2026).

4. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645 // Собрание законодательства РФ. 2020. № 44. Ст. 6875.

5. Панов В. Доклад на Восточном экономическом форуме (4 сентября 2024 г.) // Материалы ВЭФ-2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/doc/8009591 (дата обращения: 20.02.2026).

6. СП 131.13330.2020 СНиП 23-01-99*. Строительная климатология и геофизика. М.: Стандартинформ, 2021. 128 с.

7. Сурнина Е.Н. Разработка методики проектирования энергоэффективных светодиодных облучателей для тепличного растениеводства: дис. канд. техн. наук. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2024. 185 с.

8. Филин П. А. Повседневная жизнь полярников в Арктике и Антарктике: опыт сопоставления // Этнография. 2024. №4 (26) [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/povsednevnaya-zhizn-polyarnikov-v-arktike-i-antarktike-opyt-sopostavleniya (дата обращения: 20.02.2026).

9. Benke K., Tomkins B. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture // Sustainability: Science, Practice and Policy. 2017. Vol. 13(1). P. 13–26.

10. Foundation for Intelligent Physical Agents. FIPA Specifications // [Электронный ресурс]. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/773093 (дата обращения: 20.02.2026).

11. Kabeyi M.J.B., Oludolapo A.O. Performance analysis of diesel engine heat pump with heat recovery for water heating // Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 2308–2324. DOI: 10.1016/j.egyr.2020.08.010.

12. Li X., Zhang Y., Li Y., Yang C. Photon efficacy and cost investigation of LEDs at different wavelengths and color temperatures for horticulture // Discover Applied Sciences. 2024. Vol. 6(1). P. 137. DOI: 10.1007/s44279-024-00137-9.

13. NASA Human Research Program. Evidence Report: Risk of Performance and Team Failures Due to Inadequate Cooperation, Coordination, Communication, and Psychosocial Adaptation within a Team. Houston: NASA, 2015. 142 p.

14. The Arctic as a Food Producing Region // [Электронный ресурс]. URL: https://oaarchive.arctic-council.org/server/api/core/bitstreams/6ed6f5bf-e15f-4d11-b5ab-72cfbd44603c/content (дата обращения: 20.02.2026).

15. Van Ginkel S.W., Igou T., Broussard J., Merkle S., McDonald M., Hernandez R. et al. Implementing Vertical Farming at University Scale to Promote Sustainable Design Education // Sustainability. 2017. Vol. 9(9). P. 1558. DOI: 10.3390/su9091558.

16. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming–A review // Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69–80.

17. Zabel P., Bamsey M., Schubert D., Tajmar M. Biomass Production of the EDEN ISS Space Greenhouse in Antarctica During the 2018 Experiment Phase // Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11. P. 656 DOI: 10.3389/fpls.2020.00656.

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПАКЕТНОЙ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА ЛАНДШАФТА

*Наливкин Я.С. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Голычев Ф.Д. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Дубкова Е.С. – к.с.-х.н., доцент, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

**Аннотация**

В статье представлена разработка программной системы для пакетной обработки больших объемов спутниковых снимков с применением сверточных нейронных сетей для автоматизированного мониторинга ландшафта. Описана архитектура конвейера обработки данных, включающая этапы загрузки изображений, инференса модели классификации, визуализации результатов и сохранения выходных данных. Система обеспечивает масштабируемую и эффективную обработку множественных снимков в автоматическом режиме, что делает ее применимой для задач регионального экологического мониторинга и управления земельными ресурсами.

## Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли генерируют огромные объемы спутниковых снимков, требующих оперативной обработки и анализа для решения задач экологического мониторинга, управления земельными ресурсами и городского планирования. Традиционные методы ручной интерпретации снимков не способны справиться с возрастающими объемами данных, что обусловливает необходимость разработки автоматизированных систем пакетной обработки [3].

Применение методов глубокого обучения, в частности сверточных нейронных сетей (CNN), позволяет автоматизировать процесс классификации ландшафта на спутниковых снимках с высокой точностью. Однако для практического применения этих методов в масштабах региона или страны необходима разработка эффективных конвейеров обработки данных, обеспечивающих автоматическую обработку множественных изображений с минимальным участием оператора [4].

Целью данной работы является разработка программной системы пакетной обработки спутниковых снимков, интегрирующей модули предобработки, классификации и визуализации результатов в единый автоматизированный конвейер.

**Архитектура системы пакетной обработки**

Разработанная система пакетной обработки (batch_runner.py) реализована на языке Python и представляет собой конвейер, состоящий из следующих основных компонентов (табл. 1):

– модуль загрузки данных: осуществляет сканирование директории с исходными спутниковыми снимками и формирование списка файлов для обработки;

– модуль инференса: выполняет классификацию каждого снимка с использованием предобученной сверточной нейронной сети;

– модуль визуализации: создает цветовые карты сегментации и сохраняет результаты в формате изображений;

– модуль управления процессом: координирует работу всех компонентов и обеспечивает отслеживание прогресса обработки.

Табл. 1.

Модульная архитектура

| Компонент | Функциональность | Используемые технологии |
|---|---|---|
| Загрузчик данных | Сканирование директорий, фильтрация файлов по расширению | os, pathlib |
| Препроцессор | Разбиение на тайлы, нормализация | NumPy, OpenCV |
| Инференс | Классификация тайлов с использованием CNN | PyTorch |
| Визуализатор | Создание цветовых карт, наложение контуров | Matplotlib, OpenCV |
| Менеджер процесса | Отслеживание прогресса, обработка ошибок | tqdm, logging |

*Примечание: Модульная архитектура обеспечивает гибкость и возможность независимой модификации компонентов системы.*

Источник: составлено авторами

**Алгоритм пакетной обработки**

Процесс пакетной обработки реализован в виде последовательного конвейера, обрабатывающего каждый снимок независимо от других. Это обеспечивает возможность параллелизации обработки на многопроцессорных системах и устойчивость к ошибкам при обработке отдельных файлов.

Алгоритм пакетной обработки включает следующие этапы:

– сканирование директории data/raw и формирование списка файлов изображений с расширениями .jpg, .png, .tif.;

– для каждого файла из списка выполняется вызов функции analyze_large_image, которая осуществляет разбиение изображения на тайлы и классификацию каждого тайла с использованием предобученной модели;

– результаты классификации передаются в модуль визуализации visualize_segmentation, который создает цветовую карту сегментации с контурным выделением границ классов;

– результирующее изображение сохраняется в директории data/results с префиксом result_ и исходным именем файла;

– прогресс обработки отображается с использованием библиотеки tqdm, что позволяет оператору отслеживать состояние процесса в режиме реального времени [5].

**Оптимизация производительности**

Для обеспечения высокой производительности при обработке больших объемов данных в системе реализованы следующие оптимизации:

– пакетная загрузка данных: Изображения загружаются и обрабатываются последовательно, что минимизирует потребление оперативной памяти и позволяет обрабатывать датасеты, размер которых превышает доступную память;

– использование GPU-ускорения: Система поддерживает выполнение инференса модели на графических процессорах (GPU) при наличии соответствующего оборудования. Это достигается за счет параметра device, который может принимать значения cpu или cuda [2];

– кэширование модели: Предобученная модель загружается один раз в начале процесса обработки и повторно используется для всех изображений, что исключает накладные расходы на многократную загрузку весов модели (табл. 2).

Табл. 2.

Результаты тестирования

| Конфигурация | Количество снимков | Среднее время обработки (сек/снимок) | Общее время (мин) |
|---|---|---|---|
| CPU (Intel Core i7-9700K) | 100 | 12.4 | 20.7 |
| GPU (NVIDIA RTX 3070) | 100 | 3.2 | 5.3 |
| GPU (NVIDIA RTX 4090) | 100 | 1.8 | 3.0 |

*Примечание: Тестирование проводилось на снимках размером 2048x2048 пикселей с размером тайла 256x256.*

Источник: составлено авторами

**Обработка ошибок и логирование**

Система пакетной обработки включает механизмы обработки ошибок, обеспечивающие устойчивость к сбоям при обработке отдельных файлов. В случае

возникновения ошибки при обработке конкретного снимка (например, из-за повреждения файла или недостатка памяти), система регистрирует ошибку в лог-файле и продолжает обработку следующих файлов.

Логирование осуществляется с использованием стандартной библиотеки Python logging и включает следующую информацию:

– время начала и завершения обработки каждого снимка;
– размер обработанного изображения и количество тайлов;
– предсказанные классы и их распределение;
– сообщения об ошибках с трассировкой стека вызовов.

**Интеграция с облачными платформами**

Разработанная система может быть интегрирована с облачными платформами хранения и обработки данных, такими как Amazon S3, Google Cloud Storage и Microsoft Azure. Это позволяет организовать масштабируемую обработку спутниковых снимков с использованием распределенных вычислительных ресурсов [1].

Для интеграции с облачными платформами система поддерживает:

– загрузку исходных снимков непосредственно из облачных хранилищ;
– сохранение результатов обработки в облачные хранилища;
– использование контейнеризации (Docker) для развертывания на облачных вычислительных платформах.

**Практическое применение**

Разработанная система пакетной обработки была апробирована в рамках проекта по мониторингу изменений растительного покрова в Дальневосточном регионе. В течение трех месяцев было обработано более 5000 спутниковых снимков общим объемом 2.3 терабайта. Результаты обработки использовались для выявления областей вырубки лесов, изменения границ водоемов и расширения застроенных территорий.

Автоматизированная система обработки позволила сократить время анализа данных с нескольких месяцев (при ручной обработке) до нескольких дней, что демонстрирует высокую практическую значимость разработанного решения.

## Заключение

Разработанная система пакетной обработки спутниковых снимков представляет собой эффективный инструмент для автоматизированного мониторинга ландшафта на больших территориях. Модульная архитектура, оптимизация производительности и механизмы обработки ошибок обеспечивают надежную и масштабируемую обработку больших объемов данных. Интеграция с облачными платформами расширяет возможности применения системы для решения задач регионального и глобального экологического мониторинга.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методов параллельной обработки множественных снимков с использованием распределенных вычислительных систем и интеграцию с платформами потоковой обработки данных для мониторинга в режиме реального времени.

## Список используемых источников

1. Gao J. et al. A general deep learning based framework for 3D reconstruction of the Earth's surface from satellite imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. Vol. 195. P. 46–62.

2. Le H. et al. A convolutional neural network architecture designed for the automated segmentation and classification of seabird colonies from high-resolution satellite imagery // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 201–216.

3. Lunga D. et al. Apache spark accelerated deep learning inference for large scale satellite image analytics // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. Vol. 13. P. 3675–3690.

4. Milosavljević A. et al. Automated Processing of Remote Sensing Imagery Using Deep Learning Semantic Segmentation: A Building Extraction Case Study // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. No. 8. P. 486.

5. Pritt M., Chern G. Satellite image classification with deep learning // 2017 IEEE applied imagery pattern recognition workshop (AIPRW). IEEE, 2017. P. 1–7.

# ОБУЧЕНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЛАНДШАФТОВ

*Наливкин Я.С. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Голычев Ф.Д. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Дубкова Е.С. – к.с.-х.н., доцент, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

**Аннотация**

Данная статья посвящена детальному описанию процесса обучения и оценки эффективности сверточной нейронной сети, разработанной для классификации ландшафтов. Рассматриваются методы подготовки данных, включая создание обучающих и валидационных выборок, а также стратегии обучения модели. Представлены ключевые метрики оценки производительности и обсуждаются потенциальные направления для дальнейшего улучшения системы.

## Введение

Эффективность систем автоматизированного анализа ландшафта, основанных на глубоком обучении, напрямую зависит от качества обучающих данных и стратегии обучения нейронных сетей. В предыдущей статье была представлена архитектура сверточной нейронной сети `LandscapeCNN` и механизм инференса. Данная статья углубляется в аспекты, связанные с подготовкой данных, процессом обучения модели и методами оценки ее производительности, что является ключевым для создания надежного и точного программного обеспечения [1].

Целью данной работы является демонстрация методологии обучения и валидации `LandscapeCNN`, а также анализ факторов, влияющих на ее способность к точной классификации различных типов ландшафта. Особое внимание уделяется использованию специализированных наборов данных и метрик, позволяющих объективно оценить качество разработанного решения.

## Подготовка данных и датасета

Для обучения и валидации модели `LandscapeCNN` был использован специально подготовленный набор данных, организованный в директории `dataset`. Он включает в себя изображения различных типов ландшафта, таких как лес, поле, вода, застроенные территории и пустоши. Данные разделены на обучающую (`train`) и

валидационную (`val`) выборки для обеспечения корректной оценки обобщающей способности модели.

Каждое изображение в датасете представляет собой тайл фиксированного размера, что соответствует подходу, описанному в `preprocess.py`. Для увеличения объема обучающих данных и повышения устойчивости модели к вариациям входных изображений применяются методы аугментации данных, такие как случайные повороты, отражения, изменения яркости и контрастности. Это помогает предотвратить переобучение и улучшить производительность на новых, ранее не виденных данных [2].

**Процесс обучения модели**

Обучение модели `LandscapeCNN` осуществляется с использованием скрипта `train_model.py`. Основные компоненты процесса обучения включают:

Загрузчик данных (DataLoader): Организует подачу данных в модель батчами, что оптимизирует использование вычислительных ресурсов.

Функция потерь (Loss Function): В данном случае используется кросс-энтропийная функция потерь (`nn.CrossEntropyLoss`), которая является стандартным выбором для задач многоклассовой классификации.

Оптимизатор (Optimizer): Для обновления весов модели применяется оптимизатор Adam (`torch.optim.Adam`), известный своей эффективностью и адаптивностью к различным задачам глубокого обучения.

Цикл обучения (Training Loop): Модель обучается в течение заданного количества эпох. На каждой эпохе происходит прямой проход (forward pass) для получения предсказаний, вычисление потерь, обратный проход (backward pass) для расчета градиентов и обновление весов модели.

Пример фрагмента кода из `train_model.py`:

```
import torch
import torch.nn as nn
import torch.optim as optim
from torch.utils.data import DataLoader
from torchvision import datasets, transforms
from src.cnn_model import LandscapeCNN

# ... (определение датасета и загрузчиков)

model = LandscapeCNN(num_classes=len(classes)).to(device)
```

```
criterion = nn.CrossEntropyLoss()
optimizer = optim.Adam(model.parameters(), lr=0.001)
for epoch in range(num_epochs):
model.train()
running_loss = 0.0
for inputs, labels in train_loader:
inputs, labels = inputs.to(device), labels.to(device)
optimizer.zero_grad()
outputs = model(inputs)
loss = criterion(outputs, labels)
loss.backward()
optimizer.step()
running_loss += loss.item()
print(f»Epoch {epoch+1}, Loss: {running_loss/len(train_loader)}»)
# ... (сохранение модели)
```

**Оценка эффективности**

Оценка эффективности модели проводится на валидационной выборке после каждой эпохи обучения или по завершении всего процесса. Ключевыми метриками для оценки классификационных моделей являются:

Точность (Accuracy): Доля правильно классифицированных образцов от общего числа. Это наиболее интуитивно понятная метрика, но может быть обманчивой при несбалансированных классах.

Полнота (Recall), Точность (Precision) и F1-мера: Эти метрики предоставляют более детальное представление о производительности модели для каждого класса, что особенно важно в задачах, где стоимость ошибок разных типов может отличаться [3].

Матрица ошибок (Confusion Matrix): Визуальное представление количества правильных и неправильных классификаций для каждого класса, позволяющее выявить, какие классы модель путает чаще всего.

Результаты оценки помогают определить, насколько хорошо модель обобщает данные, и выявить области для улучшения, например, путем корректировки архитектуры, увеличения объема данных или тонкой настройки гиперпараметров.

**Заключение и перспективы**

Детальное описание процесса обучения и оценки эффективности сверточной нейронной сети для классификации ландшафтов демонстрирует комплексный подход к разработке надежного программного обеспечения. Использование

структурированного датасета, адекватных методов аугментации и тщательная оценка с помощью различных метрик позволяют создать модель, способную эффективно решать задачи анализа ландшафта.

Дальнейшие исследования могут включать эксперименты с более сложными архитектурами CNN (например, ResNet, U-Net для семантической сегментации), применение трансферного обучения с предобученными моделями, а также интеграцию с более широким спектром геопространственных данных (например, LiDAR, мультиспектральные снимки) для повышения точности и детализации анализа. Развитие программного обеспечения в направлении интерактивных инструментов визуализации и интеграции с ГИС-платформами также является перспективным направлением.

**Список используемых источников**

Geron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. 2nd ed. O'Reilly Media, 2019. 856 p.

Shorten C., Khoshgoftaar T.M. A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning // Journal of Big Data. 2019. Vol. 6. № 1. P. 60.

Sokolova M., Lapalme G. A systematic analysis of performance measures for classification tasks // Information Processing & Management. 2009. Vol. 45. №4. P. 427–437.

# РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ЛАНДШАФТА НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Наливкин Я.С. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Голычев Ф.Д. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Дубкова Е.С. – к. с.-х. н., доцент, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

**Аннотация**

В данной статье представлена разработка программного обеспечения для автоматизированного анализа ландшафта с использованием сверточных нейронных сетей. Описана

архитектура модели, процесс предобработки изображений и механизм инференса для классификации различных типов ландшафта. Программное обеспечение позволяет эффективно обрабатывать большие изображения, разбивая их на тайлы и классифицируя каждый тайл, что делает его применимым для задач мониторинга окружающей среды и городского планирования [7].

## Введение

Автоматизированный анализ ландшафта является критически важной задачей в различных областях, включая экологический мониторинг, городское планирование, сельское хозяйство и управление природными ресурсами. Традиционные методы анализа часто требуют значительных временных и человеческих ресурсов, что ограничивает их применимость для крупномасштабных и динамичных исследований. С развитием технологий машинного обучения, в частности сверточных нейронных сетей (CNN), появилась возможность автоматизировать и значительно ускорить этот процесс [7, 10]. Применение искусственного интеллекта в ландшафтной экологии значительно расширяет возможности для анализа и прогнозирования сложных пространственных паттернов и процессов [2].

Настоящая работа посвящена разработке программного обеспечения, использующего CNN для классификации различных типов ландшафта на основе спутниковых или аэрофотоснимков. Целью является создание эффективного и масштабируемого инструмента, способного обрабатывать большие объемы данных и предоставлять точные результаты для поддержки принятия решений.

## Архитектура модели

В основе разработанного программного обеспечения лежит сверточная нейронная сеть `LandscapeCNN`, реализованная с использованием библиотеки PyTorch. Архитектура модели включает в себя три сверточных слоя, каждый из которых сопровождается функцией активации ReLU и слоем Max Pooling для уменьшения размерности и извлечения высокоуровневых признаков (табл. 1). После сверточных слоев следуют два полносвязных слоя для окончательной классификации [4, 6]. Использование CNN в дистанционном зондировании для классификации растительности показало высокую эффективность [5].

Табл. 1.

Архитектура сверточной нейронной сети LandscapeCNN [4–6]

| Слой | Тип слоя | Входные параметры | Выходные параметры |
|---|---|---|---|
| Conv1 | nn.Conv2d | (3, 16, 3, padding=1) | (16, H, W) |
| Pool1 | nn.MaxPool2d | (2, 2) | (16, H/2, W/2) |
| Conv2 | nn.Conv2d | (16, 32, 3, padding=1) | (32, H/2, W/2) |

Продолжение табл. 1

| | | | |
|---|---|---|---|
| Pool2 | nn.MaxPool2d | (2, 2) | (32, H/4, W/4) |
| Conv3 | nn.Conv2d | (32, 64, 3, padding=1) | (64, H/4, W/4) |
| Pool3 | nn.MaxPool2d | (2, 2) | (64, H/8, W/8) |
| Fc1 | nn.Linear | (64 * 32 * 32, 128) | (128) |
| Fc2 | nn.Linear | (128, num_classes) | (num_classes) |

Примечание: H и W обозначают высоту и ширину входного изображения.

Входное изображение имеет 3 канала (RGB). Количество выходных классов (`num_classes`) по умолчанию установлено на 5, что соответствует различным типам ландшафта, таким как лес, поле, вода, застроенные территории и пустоши. Модель обучается на наборе данных, состоящем из размеченных изображений, где каждый пиксель или тайл изображения ассоциирован с определенным классом ландшафта.

**Предобработка изображений**

Для эффективной обработки больших изображений и подготовки их к подаче в нейронную сеть используется модуль предобработки. Основной функцией этого модуля является разбиение исходного изображения на тайлы фиксированного размера (например, 256x256 пикселей). Это позволяет обрабатывать изображения, размер которых превышает возможности оперативной памяти или входные требования модели [1, 3]. Функция `split_into_tiles` из `preprocess.py` выполняет эту задачу. Если тайл на краю изображения оказывается меньше заданного размера, он дополняется нулями (padding) до стандартного размера. Это обеспечивает единообразие входных данных для CNN и предотвращает потерю информации на границах.

**Механизм инференса**

Модуль инференса (`inference.py`) отвечает за загрузку обученной модели, обработку входных изображений и получение предсказаний. Процесс инференса включает следующие шаги:

– загрузка модели и классов: Обученная модель `LandscapeCNN` и соответствующий список классов загружаются из файлов `cnn_landscape_trained.pth` и `classes.json` соответственно. Это обеспечивает гибкость и позволяет использовать различные предобученные модели;

– разбиение изображения на тайлы: Входное изображение разбивается на тайлы с использованием функции `split_into_tiles`;

– классификация тайлов: Каждый тайл преобразуется в тензор PyTorch, нормализуется и подается на вход обученной CNN. Модель выдает предсказание класса для каждого тайла;

– визуализация результатов: Полученные предсказания используются для создания карты сегментации ландшафта, где каждый тайл окрашивается в цвет, соответствующий предсказанному классу. Результаты сохраняются в виде изображения для дальнейшего анализа. Применение искусственного интеллекта в экологическом мониторинге, включая классификацию изображений, является перспективным направлением [8].

Пример использования модуля инференса:

```
import argparse
from src.inference import analyze_large_image

if __name__ == «__main__»:
parser = argparse.ArgumentParser(description=«Landscape Segmentation Inference»)
parser.add_argument(«--image», required=True, help=«Путь к анализируемому изображению»)
parser.add_argument(«--model», default=«models/cnn_landscape_trained.pth», help=«Путь к модели»)
parser.add_argument(«--device», default=«cpu», help=«Устройство (cpu или cuda)»)
args = parser.parse_args()

preds, shape, classes = analyze_large_image(
args.image,
model_path=args.model,
device=args.device,
tile_size=(256, 256)
)
print(«✅ Анализ завершён.»)
print(f»Размер исходного изображения: {shape}»)
if classes:
print(«Классы:», classes)
```

**Заключение**

Разработанное программное обеспечение предоставляет мощный инструмент для автоматизированного анализа ландшафта, используя современные методы глубокого обучения. Модульная архитектура позволяет легко адаптировать систему под различные задачи и типы ландшафтов. Дальнейшие исследования могут быть

направлены на улучшение точности модели, оптимизацию производительности и интеграцию с геоинформационными системами для более комплексного анализа. Применение глубокого обучения для классификации изображений дистанционного зондирования является активно развивающейся областью [9].

**Список используемых источников**

1. Castelluccio M. et al. Land use classification in remote sensing images by convolutional neural networks / ArXiv preprint arXiv:1508.00092. 2015. [Electronic resource]. URL: https://arxiv.org/abs/1508.00092 (accessed: 10.01.2026)

2. Frazier A. E., Song L. Artificial Intelligence in Landscape Ecology: Recent Advances, Perspectives, and Opportunities // Current Landscape Ecology Reports. 2024. Vol. 10. No. 1. P. 1–15.

3. Garcia-Garcia A. et al. A Review on Deep Learning Techniques Applied to Semantic Segmentation / ArXiv preprint arXiv:1707.03237. 2017. [Electronic resource]. URL: https://arxiv.org/abs/1704.06857 (accessed: 10.01.2026)

4. Karpathy A. Convolutional Neural Networks for Visual Recognition. CS231n Course Notes. 2023. URL: https://cs231n.github.io/convolutional-networks/ (дата обращения: 10.10.2025).

5. Kattenborn T. et al. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. Vol. 173. P. 24–49.

6. Kulkarni A. D. Deep Convolution Neural Networks for Image Classification // UT Tyler Scholar Works. 2022. [Electronic resource]. URL: http://hdl.handle.net/10950/4001

7. Ma L. et al. Deep Learning for Land Cover Classification: A Review // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. No. 10. P. 1603.

8. Olawade D. B., Alade O. M. Artificial intelligence in environmental monitoring // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. No. 1. P. 1–15.

9. Shao Z., Cai J. Remote sensing image fusion with deep convolutional neural network // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2018. Vol. 11. No. 4. P. 1192–1200.

10. Stupariu M. S. et al. Machine learning in landscape ecological analysis: a review of recent approaches // Landscape Ecology. 2022. Vol. 37. No. 1. P. 1–20.

# РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛАССИФИКАЦИИ ЛАНДШАФТА ДЛЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Наливкин Я.С. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Голычев Ф.Д. – магистрант, ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

*Дубкова Е.С. – к. с.-х. н., доцент ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет»*

**Аннотация**

В статье представлена разработка программного модуля для визуализации результатов автоматизированной классификации ландшафта, полученных с использованием сверточных нейронных сетей. Модуль обеспечивает создание интерактивных карт сегментации с цветовым кодированием классов ландшафта, контурным выделением границ объектов и полупрозрачным наложением на исходные спутниковые снимки. Описаны алгоритмы обработки предсказаний модели, методы визуализации и интеграция с геоинформационными системами для поддержки принятия решений в области управления природными ресурсами и контролю с/х.

## Введение

Визуализация результатов автоматизированной классификации ландшафта является критически важным этапом в процессе анализа геопространственных данных. Несмотря на высокую точность современных моделей машинного обучения, их практическая применимость в значительной степени зависит от способности представить результаты в интуитивно понятной и информативной форме для конечных пользователей, таких как специалисты по городскому планированию, экологи и лица, принимающие решения [2].

Традиционные методы визуализации результатов классификации часто ограничиваются простым отображением цветовых карт, что не позволяет в полной мере оценить пространственное распределение и границы различных типов ландшафта. Интеграция визуализации с исходными спутниковыми снимками и геоинформационными системами (ГИС) открывает новые возможности для комплексного анализа и интерпретации данных [6].

Целью данной работы является разработка программного модуля визуализации, который обеспечивает создание высококачественных интерактивных карт сегментации ландшафта на основе результатов работы сверточных нейронных сетей.

**Архитектура модуля визуализации**

Разработанный модуль визуализации (visualizer.py) реализован на языке Python с использованием библиотек OpenCV, Matplotlib и NumPy. Модуль принимает на вход предсказания модели классификации в виде массива меток классов для каждого тайла изображения и выполняет следующие операции:

– преобразование предсказаний в карту классов: Массив предсказаний преобразуется в двумерную карту, где каждый элемент соответствует классу ландшафта для соответствующего тайла;

– масштабирование карты классов: Карта классов масштабируется до размеров исходного изображения с использованием интерполяции ближайшего соседа (INTER_NEAREST) для сохранения дискретности классов;

– цветовое кодирование: Каждому классу ландшафта присваивается уникальный цвет (табл. 1) в соответствии с заранее определенной цветовой палитрой.

Табл.1.

Цветовая схема визуального представления [1]

| Класс ландшафта | RGB код | Визуальное представление |
|---|---|---|
| Фон | (0, 0, 0) | Черный |
| Лес | (34, 139, 34) | Зеленый лес |
| Поле | (255, 255, 0) | Желтый |
| Вода | (0, 0, 255) | Синий |
| Застроенные территории | (255, 0, 0) | Красный |
| Пустоши | (160, 160, 160) | Серый |

*Примечание: Цветовая палитра разработана с учетом принципов картографической семиотики для обеспечения интуитивной интерпретации результатов.*

**Алгоритм контурного выделения границ**

Для повышения информативности визуализации модуль реализует алгоритм автоматического выделения границ между различными классами ландшафта. Алгоритм основан на применении метода поиска контуров Suzuki-Abe, реализованного в функции cv2.findContours библиотеки OpenCV [5].

Процесс выделения границ включает следующие шаги:

– для каждого класса ландшафта создается бинарная маска, где пиксели, принадлежащие данному классу, имеют значение 1, остальные – 0;

– на бинарной маске применяется алгоритм поиска внешних контуров (RETR_EXTERNAL);

– найденные контуры отрисовываются на изображении с заливкой соответствующим цветом класса;

– поверх цветовой заливки наносится черная обводка толщиной 1 пиксель для четкого выделения границ.

Данный подход позволяет визуально разделить смежные области различных типов ландшафта и обеспечивает высокую читаемость результирующих карт.

**Полупрозрачное наложение и интеграция с исходными снимками**

Одной из ключевых особенностей разработанного модуля является возможность полупрозрачного наложения результатов классификации на исходные спутниковые снимки. Это достигается с использованием функции взвешенного суммирования изображений (cv2.addWeighted), где исходное изображение и цветовая карта классификации комбинируются с весовыми коэффициентами 0.6 и 0.4 соответственно [4].

Такой подход позволяет сохранить визуальный контекст исходного снимка, одновременно отображая результаты автоматизированной классификации, что значительно облегчает интерпретацию данных и выявление возможных ошибок модели.

**Создание интерактивных легенд**

Для обеспечения полноты визуализации модуль автоматически генерирует легенду, отображающую соответствие цветов и классов ландшафта. Легенда создается с использованием библиотеки Matplotlib и сохраняется в виде отдельного изображения высокого разрешения (200 DPI).

**Интеграция с геоинформационными системами**

Результаты визуализации сохраняются в формате PNG с сохранением геопространственной привязки, что обеспечивает возможность импорта в популярные ГИС-платформы, такие как ArcGIS и QGIS. Это позволяет проводить дальнейший пространственный анализ, накладывать результаты на другие геопространственные слои и использовать их для поддержки принятия решений в области управления природными ресурсами и городского планирования [3].

**Экспериментальные результаты**

Модуль визуализации был протестирован на наборе из 50 спутниковых снимков различных регионов с разрешением от 1024x1024 до 4096x4096 пикселей. Среднее время обработки одного изображения составило 2.3 секунды на процессоре Intel Core i7-9700K, что демонстрирует высокую вычислительную эффективность разработанного решения.

Визуальная оценка результатов, проведенная группой экспертов в области дистанционного зондирования, показала, что полупрозрачное наложение и контурное выделение границ значительно улучшают интерпретируемость результатов классификации по сравнению с традиционными методами визуализации.

**Заключение**

Разработанный модуль визуализации представляет собой эффективный инструмент для представления результатов автоматизированной классификации ландшафта, полученных с использованием сверточных нейронных сетей. Применение цветового кодирования, контурного выделения границ и полупрозрачного наложения на исходные снимки обеспечивает высокую информативность и интуитивную понятность визуализации. Интеграция с геоинформационными системами расширяет возможности практического применения разработанного программного обеспечения в области экологического мониторинга и управления природными ресурсами.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку интерактивных веб-интерфейсов для визуализации результатов в режиме реального времени и интеграцию с облачными платформами обработки геопространственных данных.

**Список используемых источников**

1. Brewer C. A. Color use guidelines for mapping and visualization // Visualization in modern cartography. 1994. P. 123–147.

2. Choi Y. GeoAI: Integration of artificial intelligence, machine learning, and deep learning with GIS // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. No. 6. P. 3895.

3. Esri. Deep learning in ArcGIS Pro / ArcGIS Pro.com. URL: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/deep-learning/deep-learning-in-arcgis-pro.htm (дата обращения: 10.10.2025).

4. Milosavljević A. et al. Automated Processing of Remote Sensing Imagery Using Deep Learning Semantic Segmentation: A Building Extraction Case Study // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2020. Vol. 9. No. 8. P. 486.

5. Suzuki S., Abe K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Computer vision, graphics, and image processing. 1985. Vol. 30. No. 1. P. 32–46.

6. Zuo R., Wang J., Yin B. Visualization and interpretation of geochemical exploration data using GIS and machine learning methods // Applied Geochemistry. 2021. Vol. 134. P. 105094.

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РАБОТЫ С ТАБЛИЦАМИ В ОБУЧЕНИИ ИНЖЕНЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИХ ПОДГОТОВКИ

*Соболева Е.В. – к.п.н, доцент, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»*

*Клепиковская А.А. – магистрант, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»*

**Аннотация**

В статье исследуется проблема включения нейросетей для работы с таблицами в информационное взаимодействие, организованное при обучении будущих инженеров. Ведущий подход – моделирование ситуаций, связанных с решением задач и разработкой инновационных решений, на примере материалов курсов по направлению подготовки 15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств». Цель исследования – выявить особенности применения нейросетей для работы с таблицами в обучение специалистов для повышения качества их подготовки.

В руководстве по использованию генеративного искусственного интеллекта (далее – ИИ) в образовании и научных исследованиях, представленных экспертами ЮНЕСКО, сформулированы причины, обусловливающие необходимость осуществлять системную подготовку специалистов, способных эффективно применять генеративный ИИ для обработки больших объёмов данных и активизации аналитических процессов [2]. В том числе, в электроэнергетике и на транспорте.

К. Риос-Кампос, Э. Канова, И. Закинаула, Х. Закинаула, Д. Кастро Варгас, В. Пенья, К. Идрого, Р. Артеага указывают, что, так как в настоящее время во всём

мире признаётся важность включения технологий ИИ в образование, то необходимо проводить дополнительные исследования для уточнения его влияния на повышение качества обучения [5]. Н. Милославская, А. Толстой определяют необходимость применения современных ИКТ, в том числе и инструментов ИИ, для академического и профессионального взаимодействия [4].

В. Кришнан предостерегает, что угрозы кибербезопасности с каждым годом становятся всё более сложными и масштабными [3]. Поэтому системе образования необходимо реагировать на новые вызовы и совершенствовать программы подготовки высококвалифицированных инженеров для общества Индустрии 4.0. Среди ключевых навыков подготовки специалистов, способных осуществлять автоматизацию технологических процессов и производств отметим: поиск, обработка и анализ информации; знание норм права; оценка роли информационных технологий и информационной безопасности; применение физических и математических моделей для решения профессиональных задач [6].

Е.В. Щедрина, О.Н. Ивашова определяют необходимость применения генеративных нейросетей для повышения качества подготовки технических специалистов [1]. Один из выводов авторов связан с тем, что интеграция сервисов ИИ в деятельность по анализу таблиц, построение диаграмм и упрощения работы с формулами MS Excel – важное условие востребованности и профессиональной самореализации инженеров в обществе Индустрии 4.0. Однако, реализация потенциальных возможностей на практике предполагает совершенствование (качественное изменение) методики преподавания отдельных предметов.

Таким образом, с одной стороны, интеграция сервисов, функционирующих на базе ИИ, в обучение инженеров для электроэнергетики и транспорта – важное условие для повышения как качества их подготовки. С другой стороны, существует реальные методические, нормативно-правовые, организационные проблемы, которые требуют дополнительного изучения с учётом специфики будущей профессиональной деятельности студентов.

Цель статьи – выявить особенности применения нейросетей для работы с таблицами в обучении инженеров для повышения качества их подготовки. К исследованию привлечено 72 студента по направлению подготовки 15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств». Генеративные сервисы применялись на занятиях по дисциплине «Информатика».

Итак, анализ литературы позволил выявить, что с одной стороны, появление современных инструментов ИИ оказывает значительное положительное влияние на

общество. Например, возможности нейросетей генерировать тексты, составлять заголовки и давать ценные рекомендации обогащает процесс обучения, повышает эффективность аналитической деятельности и помогает в продвижении новых идей. С другой стороны, современные специалисты для электроэнергетики и транспорта должны учитывать и следующие два обстоятельства:

– требования работодателей к уровню фундаментальных знаний в области программирования, которые необходимы, чтобы создавать инновационное программное обеспечение, значительно увеличились;

– инструменты, помогающие осуществлять поиск, обработку, анализ и защиту информации в различных системах, совершенствуются.

Определим ключевые возможности ИИ, активно применяемые в информационном обществе.

I группа возможностей. ИИ способен обрабатывать текстовые и мультимедийные данные, извлекая из них полезную информацию.

II группа возможностей. ИИ для работы с таблицами может значительно ускорить процесс взаимодействия, повысить качество поддержки и предоставить больше персонализированных услуг для участников, задействованных в разработке инновационных решений для анализа и защиты информации в области электроэнергетики и транспорта.

III группа возможностей. Нейросети, например, могут использоваться для создания адаптивных интерфейсов, которые подстраиваются под нужды разных категорий пользователей в области электроэнергетики и транспорта.

IV группа возможностей. Нейросети для работы с таблицами могут быть использованы в процессе обнаружения и предотвращения кибератак в области электроэнергетики и транспорта. Нейросетевые модели распознают подозрительную активность и оперативно реагируют на потенциальные угрозы. Алгоритмы, которые лежат в основе работы ИИ, могут помогать начинающим специалистам в области электроэнергетики и транспорта выявлять необычные паттерны, которые могут свидетельствовать о попытках несанкционированного доступа или утечки данных.

Итак, нейросети для работы с таблицами в представленном исследовании рассматриваются как онлайн-сервисы, открывающие для специалистов в области электроэнергетики и транспорта следующие возможности:

– обработки информации в различном формате (не только мультимедийном, но и заархивированном);

– активизация обмена данными между заинтересованными участниками, занятыми в разработке инновационных решений для анализа и защиты информации в области электроэнергетики и транспорта;

– создание интерфейсов для пользователей, которые могут подстраиваться под их задачи и интересы;

– определение наличия вредоносного содержимого, подозрительных шаблонов.

Опишем логику организацию деятельности студентов по изучению и применению нейросетей для работы с таблицами. В рамках одного из лекционных занятий будущим специалистам в области электроэнергетики и транспорта была сообщена необходимая им теоретическая информация в следующей последовательности:

– технология обработки электронных таблиц и программные средства для реализации технологии;

– возможности ИИ для обработки числовой и текстовой информации. Именно здесь студенты рассматривали возможности таких нейросетей как Excel Formulizer, Numerous.ai, Ajelix.

Например, сервис Numerous.ai (https://numerous.ai/onboarding/) позволяет генерировать формулы. Пользователь с помощью простого языка может описать требуемый результат, а Numerous.ai автоматически сгенерирует необходимую формулу. Поддерживаются даже сложные функции, такие как Sum, Average и др.

При рассмотрении возможностей Excel Formulizer специалисты в области электроэнергетики и транспорта отметили следующее: сервис сокращает время для создания формул и обнаруживать ошибки, совершённые при ручном написании. Однако было выявлено и следующее: интерфейс сервиса только на английском языке, хотя нейросеть понимает запросы на русском.

И наконец, Ajelix – это нейросеть, разработанная специально для работы с MS Excel. Ajelix может генерировать сложные формулы по запросам пользователей, анализировать данные, автоматизировать рутинные вычислительные процессы. Отличительной особенностью (конкурентным преимуществом) Ajelix является то, что все функциональные возможности реализуются через понятый интерфейс без необходимости изучать сложные алгоритмы.

В рамках каждого из семинаров (согласно рабочей программе дисциплины) деятельность студентов на занятиях была организована в соответствии с представленными далее этапами. Каждый этап включает:

– описание ключевого вида учебной деятельности (например, построение диаграмм);

– пример решаемой задачи;

– варианты интеграции нейросетей для работы с электронными таблицами. Студенты могли использовать любую из нейросетей (Excel Formulizer, Numerous.ai, Ajelix).

1 этап. Интерфейс программы MS Excel, работа с листами, ввод данных в ячейки, автозаполнение.

Продумайте структуру и оформление для таблицы, содержащей данные о кибератаках разных стран мира за 2024 год. Реализуйте информационную модель средствами электронных таблиц и нейросетей.

2 этап. Формулы в MS Excel. Использование различных типов ссылок в расчетах». Используя данные составленной таблицы, вычислите эффективность одной кибератаки в области электроэнергетики, реализуемой на информационном пространстве России.

3 этап. Встроенные функции табличного процессора. Применение различных типов встроенных функций. Например, найти среднюю сумму финансовых потерь Китая и США от кибератак в области электроэнергетики.

4 этап. Задания для самостоятельного выполнения. Примечание: работа на 2, 3, 4 этапах предполагает, что студенты инструментами рассмотренных нейросетей будут генерировать формулы для решения каждой из задач. Обязательные аспекты деятельности: анализ получившихся результатов и последующее вычисление средствами MS Excel.

5 этап. Построение диаграмм и графиков на основе табличных данных. Студенты выполняли графическое представление и средствами табличного процессора, и инструментами одной из нейросетей.

6 этап. Форматирование таблиц с помощью правил условного форматирования, сортировка.

7 этап. Защита табличных данных.

Таким образом, первая идея методического подхода – постепенная, обусловленная практической необходимостью, интеграция элементов ИИ в учебную деятельность по созданию, обработке информации и последующей её защите.

Вторая идея методического подхода – использование нейросетей для работы с таблицами на стадии поиска решения задачи из области электроэнергетики и транспорта, проверки гипотезы (формулы, диаграммы), а не как самостоятельный способ решения.

Третья идея методического подхода – соблюдение правил информационной безопасности при регистрации на сайтах, сервисах и веб-приложениях.

Результаты исследования позволили выявить следующие особенности применения генеративных нейросетей в обучении специалистов в области электроэнергетики и транспорта:

– необходимо создавать условия для понимания обучающимися важности профессии;

– изучение нейросетей должно находиться в тесной взаимосвязи с изучением других информационных технологий (обработки текстов, электронных таблиц);

– инструменты рассмотренных нейросетей используются преимущественно для генерации формул в процессе решения каждой из задач в области электроэнергетики и транспорта. Обязательным условием должно являться то, чтобы анализ получившихся результатов и последующее вычисление студенты реализовывали средствами табличного процессора.

При формулировании системы заданий в области электроэнергетики и транспорта следует учитывать проблемы кибербезопасности (несанкционированный доступ к информации, ошибки пользователя, нарушение приватности персональных данных, дезинформация).

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования программ системы профессиональной и дополнительной профессиональной подготовки специалистов в области электроэнергетики и транспорта.

**Список используемых источников**

1. Щедрина Е.В., Ивашова О.Н. Применение генеративных нейросетей в обучении агроинженеров // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 4. С. 75–80. DOI 10.26897/2687-1149-2024-4-75-80.

2. Guidance for generative AI in education and research / Unesco.org. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unesco.org/en/articles/guidance-generative-ai-education-and-research (дата обращения: 22.12.2025).

3. Krishnan V. Generative AI for Vulnerability Management: A Blueprint // Journal of Artificial Intelligence & Cloud Computing. 2024. Vol. 3. P. 1–4. DOI: 10.47363/JAICC/2024(3)382.

4. Miloslavskaya N., Tolstoy A. Formation of General Professional Competencies in Academic Training of Information Security Professionals. // Information Security Education for Cyber Resilience, 14th IFIP WG 11.8 World Conference, WISE 2021, Virtual Event, June 22–24. 2021. P.13–26. DOI: 10.1007/978-3-030-80865-5_2

5. Rios-Campos C., Cánova E., Zaquinaula I., Zaquinaula H., Castro D., Peña W., Idrogo C., Arteaga R. Artificial Intelligence and Education // South Florida Journal of Development. 2023. Vol. 4. P. 641–655. DOI: 10.46932/sfjdv4n2-001.

6. Soboleva E.V., Karavaev N.L. Preparing Engineers of the Future: the Development of Environmental Thinking as a Universal Competency in Teaching Robotics // European Journal of Contemporary Education. 2020. Vol. 9. No 1. P. 160–176. DOI 10.13187/ejced.2020.1.160.

# ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С РЕЗОНАНСНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*Тельманова Е.Д. – к.п.н., доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»*

*Шаповалов М.С. – магистрант, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»*

**Аннотация**

В статье выполнен сравнительный анализ наиболее эффективных методов распознавания однофазного замыкания на землю и алгоритмов принятия решений о неисправностях в распределительных электрических сетях с резонансно-заземленной нейтралью. Представлено обоснование эффективности применения оптимизированной искусственной нейронной сети *FINET* совместно с детектором *PSF*.

С расширением масштабов промышленного и гражданского строительства наблюдается постоянный рост кабельных линий распределительных сетей

напряжением 6 /10 кВ. В электрических сетях с резонансным заземлением нейтрали через дугогасительный реактор (ДГР), несмотря на значительный рост емкостного тока замыкания на землю, характеристики установившегося состояния поврежденного и исправного участка кабельных линий практически не отличаются. В результате, неисправный кабель невозможно точно и быстро определить и оперативно снять перенапряжение с неповрежденных фаз. При этом необходимо помнить, что в сетях переменного тока с резонансно-заземленной нейтралью могут возникать прерывистые короткие замыкания, результатом которых является быстрое изменение рабочего состояния сети [2].

В последние годы ученые провели множество исследований и экспериментов по созданию более простого и быстрого способа распознавания однофазного замыкания на землю и поврежденной фазы. Тем не менее предлагаемые методы обнаружения неисправностей сталкиваются с такой проблемой, как низкая вычислительная эффективность. А методы, основанные на определении разности амплитуд или фаз тока нулевой последовательности подвержены негативному влиянию таких факторов, как сложная структура распределительной электросети и ошибки трансформатора, что значительно снижает вероятность обнаружения повреждений. Кроме того, фиксируемые в ходе исследований синусоидальные сигналы неисправности показали, что прерывистые замыкания на землю не имеют четкой закономерности, и это затрудняет их обнаружение. Поэтому наибольшее распространение в последнее время получили методы, представляющие собой комбинированную стратегию получения характеристик и принятия решений о неисправности с использованием интеллектуальных алгоритмов.

С учетом всего вышеизложенного, можно утверждать, что применение интеллектуального алгоритма в принятии решений о неисправности на основе получаемых в режиме реального времени показателей позволит оперативно обнаруживать замыкание на землю даже при его прерывистом характере.

Для извлечения данных на основе анализа реальных характеристик активно используются следующие репрезентативные методы формирования выборки:

- многоразрешающий морфологический градиент (MMG);
- вейлет-преобразование (WT);
- S-преобразование (ST);
- математическая морфология;
- адаптивный фильтр Калмана (AKF);

– передовые методы обнаружения искажений (ADDT).

Основными методами принятия решений о неисправности на основе интеллектуального алгоритма являются искусственные нейронные сети, нечеткие системы вывода (формирования нечётких заключений о выходном сигнале на основе нечётких условий) и машина опорных векторов (алгоритм машинного обучения, применяемый для задач линейной и нелинейной классификации, регрессии и обнаружения аномальных данных).

В ряде научных исследований предложены алгоритмы, позволяющие обнаруживать неисправность в распределительных сетях с небольшими токами замыкания. М. Сарлак предлагает для обнаружения и локализации таких повреждений в распределительной сети использовать данные, полученные от датчиков напряжения и тока. Для идентификации замыкания на землю предлагаются два основных метода: линейный дискриминантный анализ Фишера и метод опорных векторов (Support Vector Machine SVM) для задач классификации [4]. Суть метода Фишера заключается в обнаружении таких направлений (векторов), которые наилучшим образом разделяют на классы нештатные ситуации или нарушения в контролируемом процессе. При этом критерий Фишера принимает максимальное значение [1]. Для ситуации, когда классов больше двух критерий определяется по выражению:

$$J = \sum_{i=1}^{c-1} \sum_{j=i+1}^{c} n_i n_j a_{i,j}\, tr\left[(w^T s_w w)^{-1} \cdot \left(w^T s_B^{i,j} w\right)\right] \quad (1)$$

Метод опорных векторов (*SVM*) – это бинарный классификатор, который является одним из инструментом машинного обучения. Он предназначен для классификации линейных и нелинейных данных и дальнейшей максимизации расстояния между двумя классами данных через гиперплоскость. Этот метод используется, как правило, не более чем для двух классов. В основе алгоритма *SVM* – решение задачи квадратичного программирования. Для разделения отличающихся классов данных используется дискриминантная функция:

$$f(x) = w^T x + b \quad (2)$$

В исследовании И. Баки для разложения сигналов неисправности и извлечения характеристик используется вейвлет-преобразование (*WT*), которые затем подаются

на вход ИНС для идентификации [3]. В предлагаемой методологии отслеживается изменение формы фазного тока, вызванное повреждениями и нормальными переключениями. С помощью дискретных вейвлет-преобразований выполняется разделение сигналов тока во временной области на различные гармоники и извлекаются определенные признаки для обучения нейронной сети. Такая предварительная обработка входных данных уменьшает их количество, что улучшает сходимость обучения. Структура искусственной нейронной сети – многослойный перцептрон. Для обучения используется алгоритм обратного распространения ошибки (*backpropagation*), основная идея которого заключается в минимизации функции ошибки за счет коррекции весов сети в направлении, противоположном градиенту этой функции.

Рассмотренные выше методы обнаружения повреждения при однофазном коротком замыкании требуют точных данных о переходных процессах при повреждении сети. Но получение сигналов неисправности является трудоемким процессом. Кроме того, на эффективность различных стратегий значительное влияние оказывают множественные помехи в рабочей сети. Поэтому, для наиболее эффективного обнаружения сигналов неисправности в сетях с резонансно-заземленной нейтралью можно использовать оптимизированную структуру нейронной сети *FINET* (*For IAFs Neuron Elaboration Net*), которая способна извлекать и определять признаки тока нулевой последовательности, в том числе и при прерывистых коротких замыканиях *IAFs* [5].

На вход такой сети подаются данные о переходных процессах, нормальном состоянии системы, переключении нагрузки и т.п. После идентификации повреждения *FINET* передает данные на вход детектора *PSF*, где *PF* – измеритель главных факторов, а *SF* – измеритель подчиненных факторов (рис. 1). Окончательное решение о наличие неисправности в сети является результатом вычислений. При этом вероятность ошибочной оценки неисправности незначительна.

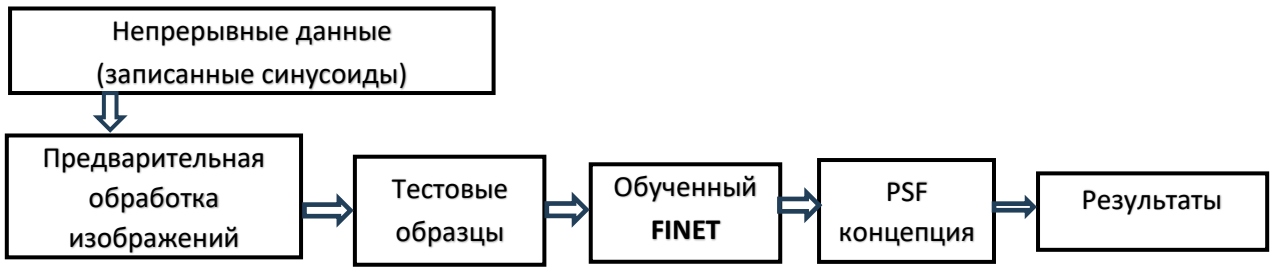



Рис. 1. Блок-схема системы принятия решения на основе FINET - PSF

Источник: составлено авторами

Для обучения на вход модели *FINET* подаются обучающие выборки, полученные в результате обработки сигнала нулевой последовательности из модели программного моделирования. Далее, обученная модель *FINET* и концепция *PSF* объединяются для реализации обнаружения *IAF* в реальном времени.

Принцип работы *PSF* следующий:

1) Если *IAF* не возникает, то цикличная форма сигнала в окне обнаружения идентифицируется *FINET* как «0», а $SF = SF + 1$.

2) Если *IAF* появляется, то на выходе *FINET* «1», а $PF = PF + 1$.

3) Если $PF = PF + 1$, то *SF* устанавливается равным 0.

4) Кратковременные *IAF* подтверждаются при выполнении условий:

$PF > \eta_1 \times f_s$ и $SF > \beta \times f_s$.

5) Долговременные *IAF* подтверждаются при выполнении условия:

$PF > \eta_2 \times f_s$.

6) Если выполняются условия $PF < \eta_3 \times f_s$ и $SF > \beta \times f_s$, то значения *PF* и *SF* устанавливаются равными 0.

Для исследования эффективности предлагаемой модели необходимо в программной среде *PSCAD/EMTDC* смоделировать различные типы событий (*IAF*, однофазное замыкание на землю, переключение нагрузки, переключение конденсаторной батареи) в распределительных системах различной архитектуры с резонансным заземлением. Дополнить параметры моделирования можно измеренными данными (эквивалентные данные аппаратного обеспечения и данные полевых испытаний).

Оптимизированная структура нейронной сети *FINET* (*For IAFs Neuron Elaboration Net*) имеет следующие преимущества. В результате разделения формы сигнала неисправности появляется возможность использовать малое количество обучающих выборок и нерепрезентативных характеристик выборки. Уменьшается вероятность исчезновения градиента во время обучения сети. За счет увеличения количества критериев решается проблема упущения появившегося повреждения. Проблема неправильной оценки измеренной формы сигнала решается путем подачи сегментированной формы сигнала тока нулевой последовательности в структуру *FINET – PSF*.

Обнаружение замыканий на землю в сетях с резонансно-заземленной нейтралью представляет собой крайне сложную задачу из-за случайного,

асимметричного и нелинейного характера тока, а также из-за небольшого его отличия от номинального тока нагрузки. В большинстве случаев такие замыкания не могут быть идентифицированы и локализованы с помощью обычных схем релейной защиты. Для своевременного обнаружения данных повреждений необходимы не только современные алгоритмы обнаружения (линейный дискриминантный анализ Фишера, метод опорных векторов), но и активно внедрять искусственные нейронные сети, обеспечивающие принятие обоснованного решения о неисправности. Для сетей с резонансно-заземленной нейтралью концепция *FINET– PSF* может обеспечить надежную и безопасную эксплуатацию распределительных сетей напряжением 6/10 кВ.

**Список используемых источников**

1. Галиаскаров М. Р., Русинов Л. А. Система диагностики на базе нелинейного метода главных компонент и дискриминантного анализа Фишера. // Известия СПбГТИ (ТУ). 2016. №33 (59). С. 91–96.

2. Alvin C. Depew, Jason M. Parsick, Robert W. Dempsey, Carl L. Benner, B. Don Russell and Mark G. Adamiak. Field Experience with High-Imnedance Fault Detection Relays // 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. P. 868–873.

3. Baqui I., Zamora I., Mazon A.J., Buigues, G. High impedance fault detection methodology using wavelet transform and artificial neural networks. Electric Power Systems Research, 2011. 81. P.1325–1333.

4. Sarlak M., Shahrtash, S. M. High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2011. P. 588–595.

5. Tian Y., Guo M.-F., Chen D.-Y. Intermittent Arc Fault Detection Based on Machine Learning in Resonant Grounding Distribution Systems», CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023. Т. 9. № 2. P. 599–611.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОДАВЛЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКНИСТОГО НАПОЛНИТЕЛЯ

*Тукмаков Д.А. – к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории механики сплошной среды, ФГБУН ФИЦ «Казанский научный центр Российской академии наук»*

**Аннотация**

В статье представлено численное решение для математической модели течения газа в канале с волокнистым наполнителем. Моделирование движения газа основывалось на решении уравнения Навье-Стокса для теплопроводной сжимаемой среды. Математическая модель реализовывала континуальную методику − для каждой компоненты смеси задаются свои объемные доли. При этом объемное содержание дисперсной компоненты – постоянная величина. Уравнения математической модели решались явной разновидностью численного метода конечных разностей. Чтобы подавить численные осцилляции примелась схема нелинейной коррекции сеточной функции.

Приложением информационных технологий является моделирование процессов в различных разделах физики. Одним из разделов физики является механика жидкости и газа [1–16]. Иногда возникает необходимость моделирования течений «сложных» неоднородных сред.

Различием таких течений от обыкновенной гидрогазодинамики [8] является задача по учету взаимодействия компонент в течениях сложных сред [2,5,8,15].

В публикации [1] представлен обзор теоретических и экспериментальных работ, по моделированию течений неоднородных сред. В статье [3] с помощью континуальной методики моделирования динамики многофазных сред в «замороженном» приближении исследуется ослабление ударных волн сферической геометрии.

Для математического моделирования динамики неоднородных сред различные методики.

Траекторный подход не учитывает взаимодействия в потоке «сложной среды». Равновесная методика математического моделирования динамики неоднородных сред упрощает моделирование сложных течений до описания течений однородных сред и также не учитывает взаимодействия компонент. Данная методика не позволяет математические исследовать такие процессы, когда в расчетной области одновременно находятся участки с неоднородной и однородной средами или когда концентрация дисперсной компоненты неравномерна.

Математические модели течений неоднородных сред диффузионного типа применяются, как правило, в случае если компоненты смеси имеют одинаковое агрегатное состояние, так как нет учета межфазного скоростного скольжения и межфазного теплообмена.

Континуальная методика [5,8,15,10-14] дает наиболее полное описание динамики неоднородной среды так как для каждой компоненты решения полная гидродинамическая система уравнений динамики, в которой проводится учет межкомпонентного скоростного скольжения и межкомпонентного обмена энергией.

В настоящей статье с помощью континуальной методики математического моделирования гидродинамики неоднородных сред разработана математическая модель динамики газа в канале с волокнистым наполнителем. Исследование предполагает расчет ударноволнового газового течения с учетом сопротивления дисперсного каркаса и теплообмена между материалом дисперсного каркаса и движущемся газом.

Для сравнение приводится математическая модель динамики газовзвеси (1)-(4) где дисперсная фаза движется. Прежде всего движение газовзвеси описывается уравнением неразрывности (1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}=0 \qquad (1)$$

Движение газовой компоненты описывается системой уравнений Навье-Стокса в двухмерном нестационарном виде для сжимаемого газ [16] при этом учитывается межкомпонентый обмен импульсом (2),(3) – $F_x$,$F_y$ :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\left(\rho u^2+p-\tau_{xx}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho uv-\tau_{xy}\right)}{\partial y}=-F_x+\alpha\,\partial p/\partial x \qquad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho uv-\tau_{xy}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho v^{\,2}+p-\tau_{yy}\right)}{\partial y}=-F_y+\alpha\,\partial p/\partial y \qquad (3)$$

Также учитывается уравнение сохранения энергии газовой компоненты (4):

$$\frac{\partial(e)}{\partial t}+\frac{\partial\left((e+p-\tau_{xx})u-\tau_{xy}v+\lambda\partial T/\partial x\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left((e+p-\tau_{yy})v-\tau_{xy}u+\lambda\partial T/\partial x\right)}{\partial y}=$$

$$=-\frac{6\alpha\lambda Nu_1(T-T_1)}{d^2}-|F_x|(u-u_1)-|F_y|(v-v_1)+\alpha\partial(pu)/\partial x+\alpha\partial(pv)/\partial y \quad (4)$$

Вязкость газа описывается следующим выражением (5) [15]:

$$D=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y},\ \tau_{xx}=\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}D\right),\tau_{yy}=\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{2}{3}D\right),\tau_{xy}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right). \quad (5)$$

В континуальной методике применятся так называемая «средняя плотность» дисперсной компоненты –$\rho_1$ [5,8,15], $\rho(t,x,y)=\rho_g(t,x,y)-\alpha(t,x,y)\rho_g(t,x,y)$, где $\rho_g(t,x,y)$– функция плотности газа, $\rho_1(t,x,y)=\alpha(t,x,y)\rho_{10}$, $\rho_{10}$=const – физическая плотность материала дисперсной компоненты смеси, $\alpha(t,x,y)$ – изменение объемного содержания дисперсной компоненты.

Для «средней плотности» также моделируется закон сохранения массы (6):

$$\frac{\partial\rho_1}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_1u_1)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_1v_1)}{\partial y}=0 \quad (6)$$

Учитываются уравнения сохранения импульса для дисперсной компоненты (7), (8):

$$\frac{\partial(\rho_1u_1)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho_1u_1^2)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho_1u_1v_1)=F_x-\alpha\frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho_1v_1)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_1u_1v_1)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_1v_1^2)}{\partial y}=F_y-\alpha\partial p/\partial y \quad (8)$$

Уравнение сохранение энергии дисперсной компоненты (9):

$$\frac{\partial(e_1)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(e_1u_1)+\frac{\partial}{\partial y}(e_1v_1)=\frac{6\alpha\lambda Nu_1(T-T_1)}{d^2} \quad (9)$$

Математическая модель динамики газа в среде с волокнистым наполнителем также описывается системой уравнений Навье-Стока, но имеет ряд отличий от

системы уравнений динамики газовзвеси (1)-(9) прежде всего за счет того, что объемное содержание дисперсной фазы постоянно – α=const (10)-(12):

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_g u\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho_g v\right)}{\partial y}=0 \tag{10}$$

$$(1-\alpha)\left(\frac{\partial\left(\rho_g u\right)}{\partial t}+\frac{\left(\rho_g u^{2}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho_g uv\right)}{\partial y}\right)+\frac{\left(p-\tau_{xx}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(\tau_{xy}\right)}{\partial y}=-F_{xfm}+\alpha\frac{\partial p}{\partial x} \tag{11}$$

$$(1-\alpha)\left(\frac{\partial\left(\rho_g v\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho_g uv\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(\rho_g v^{2}\right)}{\partial y}\right)-\frac{\partial\left(\tau_{xy}\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(p-\tau_{yy}\right)}{\partial y}=-F_{yfm}+\alpha\frac{\partial p}{\partial y} \tag{12}$$

Здесь также есть уравнение энергии (12) и уравнение передачи тепла от газа к дисперсной компоненты (13):

$$\frac{\partial(e)}{\partial t}+\frac{\partial\left((e+p-\tau_{xx})u-\tau_{xy}v+\lambda\partial T/\partial x\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left((e+p-\tau_{yy})v-\tau_{xy}u+\lambda\partial T/\partial x\right)}{\partial y}=$$

$$=-\frac{6\alpha\lambda Nu_{fm}\left(T-T_1\right)}{d^{2}}-u\left|F_{xfm}\right|-v\left|F_{yfm}\right|+\alpha\frac{\partial p}{\partial x}+\alpha\frac{\partial p}{\partial y} \tag{13}$$

$$\frac{\partial e_1}{\partial t}=\frac{6\alpha\lambda Nu_{fm}\left(T-T_1\right)}{d^{2}} \tag{14}$$

Вектора межкомпонентного обмена импульсом $F_x$,$F_y$ ,$F_{xfm}$,$F_{yfm}$:

$$F_x=\frac{3\alpha}{4d}C_d\,\rho\sqrt{\left(u-u_1\right)^{2}+\left(v-v_1\right)^{2}}\left(u-u_1\right),F_y=\frac{3\alpha}{4d}C_d\,\rho\sqrt{\left(u-u_1\right)^{2}+\left(v-v_1\right)^{2}}\left(v-v_1\right),$$

$$F_{xfm}=\frac{3\alpha}{4d}C_d\,\rho u\sqrt{u^{2}+v^{2}},F_{yfm}=\frac{3\alpha}{4d}C_d\,\rho v\sqrt{u^{2}+v^{2}}\ .$$

Обозначения, применяемые к формулам, описаны в работах [10-14].

Температуры и давление несущей среды определяются выражениями $T$=(γ-1)($e$/ρ-0.5($u^2$+$v^2$))/$R$, где $R$- газовая постоянная несущей фазы, $p$=(γ-1)($e$-0.5ρ($u^2$+$v^2$)).

Внутренняя энергия взвешенной в газе дисперсной фазы определяется как $e_1$=$\rho_1 C_{p1} T_1$, где $C_{p1}$ – удельная теплоемкость единицы массы вещества дисперсной фазы. $Nu_1$ – относительное число Нуссельта газовзвеси [4], $Nu_{fm}$–относительно число Нуссельта волокнистой среды, $d$ – диаметр частицы или же толщина нити волокна. Используются следующие обозначения:

$$Re_1 = \rho|\mathbf{V} - \mathbf{V}_1| d / \mu, Nu_1 = 2exp(-M_1) + 0.459\, Re_1^{0.55}\, Pr^{0.33}, M_1 = |\mathbf{V} - \mathbf{V}_1| / c,$$

$$Pr = C_p \mu \lambda^{-1},\ M = |\mathbf{V}| / c,\ Re_{1fm} = \rho|\mathbf{V}| d / \mu, Nu_{fm} = 2exp(-M) + 0.459 Re_1^{0.55}\, Pr^{0.33}$$

Системы уравнений (1)-(9) и (10)-(14) интегрировалась явным конечно-разностным методом второго порядка точности. Применение численного алгоритма на примере нелинейного уравнения в частных производных (15):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial a(f)}{\partial x} + \frac{\partial a(f)}{\partial y} = c(f) \qquad (15)$$

Алгоритм явного конечно-разностного метода Мак-Кормака [16] для уравнения (15) имеет вид (16)-(17):

$$f^*_{j,k} = f^n_{j,k} - \frac{\Delta t}{\Delta x}\left(a^n_{j+1,k} - a^n_{j,k}\right) - \frac{\Delta t}{\Delta y}\left(b^n_{j,k+1} - b^n_{j,k}\right) + \Delta t c^n_{j,k} \qquad (16)$$

$$f^{n+1}_{j,k} = 0.5(f^n_{j,k} + f^*_{j,k}) - 0.5\frac{\Delta t}{\Delta x}\left(a^*_{j,k} - a^*_{j-1,k}\right) - 0.5\frac{\Delta t}{\Delta y}\left(b^*_{j,k} - b^*_{j,k-1}\right) + 0.5\Delta t c^*_{j,k} \qquad (17)$$

Здесь $\Delta x$, $\Delta y$ - шаги по пространственному направлению, $\Delta t$ – шаг по времени. В расчетах применялась схема расщепления по пространственным переменным (18), реализуемая в виде последовательности одномерных конечно-разностных операторов – $P_x$, $P_y$ [4] (17):

$$f^{n+1}_{j,k} = \mathbf{P}_x\left(\frac{\Delta t_x}{2}\right)\mathbf{P}_y\left(\frac{\Delta t_y}{2}\right)\mathbf{P}_y\left(\frac{\Delta t_y}{2}\right)\mathbf{P}_x\left(\frac{\Delta t_x}{2}\right) f^n_{j,k} \qquad (17)$$

Временные шаги $\Delta t_x = \Delta t_y = \Delta t$. Переход со слоя $t^n$ на слой $t^{n+1}$ осуществляется следующим образом:

$$f^{(1)}_{j,k} = \mathbf{P}_x\left(\frac{\Delta t_x}{2}\right) f^n_{j,k}\ ,\ f^{(2)}_{j,k} = \mathbf{P}_y\left(\frac{\Delta t_y}{2}\right) f^{(1)}_{j,k}\ ,\ f^{(3)}_{j,k} = \mathbf{P}_y\left(\frac{\Delta t_y}{2}\right) f^{(2)}_{j,k},\ f^{n+1}_{j,k} = \mathbf{P}_x\left(\frac{\Delta t_x}{2}\right) f^{(3)}_{j,k}$$

Для получения монотонного численного решения к сеточной функции на каждом временном шаге применялась схема нелинейной коррекции [7,9].

Компьютерная программа численного решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, состоит из подпрограмм, описывающих следующие элементы математической модели: граничные условия, формирования конечно-разностного разбиения физической области, расчет взаимодействия составляющих двухфазной среды, численный алгоритм. В статье моделировался следующий физический процесс.

Предполагается, что канал разделен на две части. В одной части однородный газ, в другой части неоднородная среда – либо газовзвесь, моделируемая системой

уравнений (1)-(9), либо газ с волокнистой средой, моделируемой системой уравнений (10)-(14).

Ударная волна формируется в той части канала, где расположен однородный газ − рис.1. На рис.1 также изображена область с неоднородной средой, где дисперсная компонента – это либо твердые частицы, либо волокна некоторого материала. Давление газа в неоднородной среде– $p_1$=112 кПа. Величина давления в однородном газе – $p_2$=123.2 кПа.

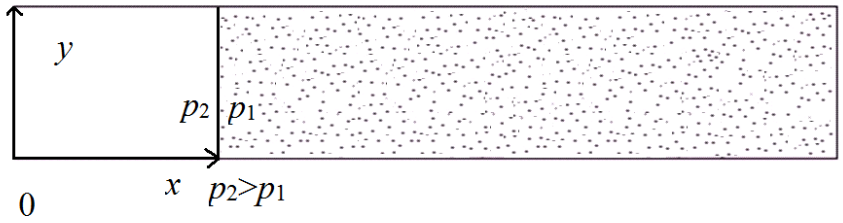



Рис.1 Схематичное изображение моделируемого процесса

Источник: составлено автором

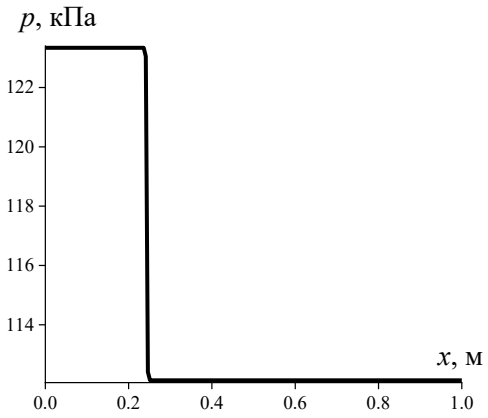



Рис.2 Пространственное распределение давления газа вдоль оси *x* в начальный момент времени

Источник: составлено автором

На рис. 2 в результате разрыва давления формируется прямой скачок уплотнения с интенсивностью – $n=p_2/p_1$=1.1. В последующие моменты времени распад начального разрыва давления газа формирует прямой скачок уплотнения, то есть одиночную ударную волну, в данном случае ударную волну малой интенсивности.

Работа выполнялась в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Казанского научного центра Российской академии наук.

**Список используемых источников**

1. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) //Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 4. С. 646–669.

2. Киселев С.П., Руев Г.А., Трунев А.П., Фомин В.М., Шавалеев М.Ш. Ударно-волновые процессы в двухкомпонентлых и двухфазных средах. Новосибирск: «Наука», 1992. 261 с.

3. Клиначева Н.Л., Ковалев Ю.М. Ослабление сферических ударных волн в гетерогенных средах//Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2017. Т. 10. № 4. С. 35–45.

4. Ковеня В.М. Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики. Новосибирск: Наука, 1990. 247 с.

5. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. Санкт-Петербург.: Недра, 2003. 284 с.

6. Лоицянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Москва: Дрофа, 2003. 784 с.

7. Музафаров И.Ф., Утюжников С.В. Применение компактных разностных схем к исследованию нестационарных течений сжимаемого газа. Математическое моделирование. 1993. Т.5. №3. С.74–83.

8. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. Москва: Наука, 1978. 336 с.

9. Тукмаков А.Л. Хаотические колебания аэроупругой системы с синхронизацией при противофазном возбуждении. Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44. № 6. С. 49–55.

10. Тукмаков А.Л., Тукмаков Д.А. Численное исследование влияния коагуляции на динамику двухфракционной газовзвеси// Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2024. Т. 17. №4. С. 66–81.

11. Тукмаков Д.А. Численное моделирование обтекания пластины потоком электрически заряженной двухфазной среды // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2019. № 1. С. 1–12.

12. Тукмаков Д.А. Конечно-разностная схема Эйлера первого порядка точности для моделирования одномерного стационарного течения порошковой среды//Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 10. С 1–8.

13. Тукмаков Д.А. Сопоставление компьютерных реализаций равновесной и континуальной методик моделирования многофазных сред на примере одномерного нестационарного течения газовзвеси //Вестник ЮУрГУ. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2023. Т. 23. № 3. С. 59–75.

14. Тукмаков Д.А. Численное моделирование взаимодействия газовзвеси с ударной волной континуальными математическими моделями с идеальной и диссипативными несущими средами // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2022 Т. 11. № 4. С. 67–87.

15. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газовзвесях частиц металлов. Новосибирск: Параллель, 2015. 301 с.

16. Флетчер К Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. Москва: Мир, 1991. 551 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИКИ ЗНАЧИМОСТИ ОБЪЕКТА НА ЭТАПЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОЙ СЦЕНЫ

*Чёрный В.Г. – аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

*Болсуновская М.В. – к.т.н, доцент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

**Аннотация**

В работе рассматривается задача формализации предварительного анализа трехмерных сцен для автоматизации настройки встроенных в 3D-движки инструментов оптимизации. Предлагается подход к оценке объектов на основе метрики значимости, учитывающей геометрическую сложность, размер в пространстве и их потенциал в качестве преград обзора. Полученная оценка позволяет осуществлять предварительное распределение объектов по уровням детализации.

## Введение

Приложения, разрабатываемые на современных 3D-движках, охватывают широкий спектр сфер: от цифровых развлечений до образовательных и промышленных симуляторов, включая создание цифровых моделей объектов транспортной и энергетической инфраструктуры [1, 6, 10]. Вместе с развитием

графических технологий, применяемых в процессе их создания, сохраняется рост сложности и детализации 3D-сцен. Необходимость снизить вычислительные нагрузки и при этом сохранить качество изображения сохраняет востребованность применения инструментов оптимизации рендеринга [2, 4].

В таких движках как Unity или Unreal Engine, используется ряд встроенных средств для оптимизации. Кроме базовых настроек рендеринга и качества текстур и материалов к ним можно отнести регулирование уровней детализации (Level of Detail, LOD) и отсечение невидимых объектов (Occlusion Culling). С помощью LOD динамически изменяется геометрическая сложность объектов на основе расстояния от камеры, а применение Occlusion Culling позволяет не отрисовывать модели, обзор на которые перекрыт [3, 5, 8].

Зачастую эти инструменты приходится настраивать вручную. Например, в движке Unity для LOD необходимо вручную определять подходящие объекты и задавать им сами уровни детализации, а также расстояние для возможных переключений [9]. В случае Occlusion Culling может потребоваться пометка загораживающих флагов соответствующими флагами в интерфейсе движка [7].

При работе с нагруженными объектами комплексными сценами такой процесс настройки становится трудозатратным. Кроме того, отсутствие формализованных критериев для принятия решений также усложняет процесс предварительной настройки инструментов оптимизации и вынуждает разработчиков подбирать объекты для оптимизации и искать потенциальные слабые места сцены. В связи с этим актуальной становится задача предварительного анализа 3D-сцен с целью автоматизации настройки различных встроенных в среды разработки инструментов оптимизации.

Цель работы – сформулировать подход к оценке значимости 3D-объектов для их автоматического распределения по уровням детализации в ходе предварительного этапа настройки оптимизации.

**Описание подхода**

Анализируемую 3D-сцену можно рассматривать как множество объектов, каждый из которых обладает набором измеряемых характеристик. В ходе этапа предварительного анализа предлагается рассматривать следующие свойства: геометрическую сложность объекта, его размер и потенциал в качестве преграды.

Геометрическая сложность выражается в виде количества треугольников в модели. Размер объекта подразумевает его объем или диагональ ограничивающего

параллелепипеда (bounding box). Потенциал в качестве преграды включает в себя приблизительное число случаев, в которых объект оказывается загораживающим, то есть связан с его оценкой как потенциального окклюдера в ходе настройки Occlusion Culling.

На основе сформулированных характеристик предлагается оценивать значимость объекта в рамках сцены для потенциального применения к нему оптимизации. Так, объекты будут рассматриваться не как отдельные геометрические модели, а как части системы взаимосвязанных объектов, которые можно ранжировать по значимости для оптимизации.

В рамках ранее проведенных исследований была подготовлен алгоритм для автоматизации подбора потенциальных загораживающих объектов, использующий трассировку лучей для подсчета количества перекрытий. Основа подхода показала свою корректность в ходе предварительной настройки Occlusion Culling через экспериментальную реализацию на движке Unity. Предлагается расширить модель предварительного анализа и использовать оценку объекта как окклюдера как один из факторов его значимости при распределении по уровням детализации. Такая комбинация позволит сгруппировать метрики и использовать их вместе для управления несколькими инструментами оптимизации, которыми в нашем случае будут Occlusion Culling и LOD.

Основная метрика значимости объекта может быть определена следующим образом:

$$V(o) = k_1 C(o) + k_2 S(o) + k_3 H(o)$$

где $V(o)$ – оценка значимости объекта,

$k_1, k_2, k_3$ – весовые коэффициенты,

$C(o)$ – геометрическая сложность,

$S(o)$ – размер,

$H(o)$ – оценка объекта как окклюдера.

В рамках системы LOD в движке Unity у модели должно быть несколько версий с разной геометрической сложностью, для каждой из которых задается свой порог расстояния для переключения уровней. Для текущей реализации подхода подразумевается применение метрики значимости объекта при распределении анализируемых объектов по уровням детализации. Объекты высокой значимости

должны упрощаться минимально, или вовсе не меняться, в то время как в отношении менее значимых объектов допускается большее упрощение. Таким образом, в ходе анализа будет осуществляться предварительная классификация объектов. При этом оценка объекта как окклюдера всё также будет оставаться доминирующим значением для Occlusion Culling. На рисунке 1 представлен отрывок интерфейса экспериментальной реализации на Unity, в котором задаются значения весовых коэффициентов и порогов классификации.

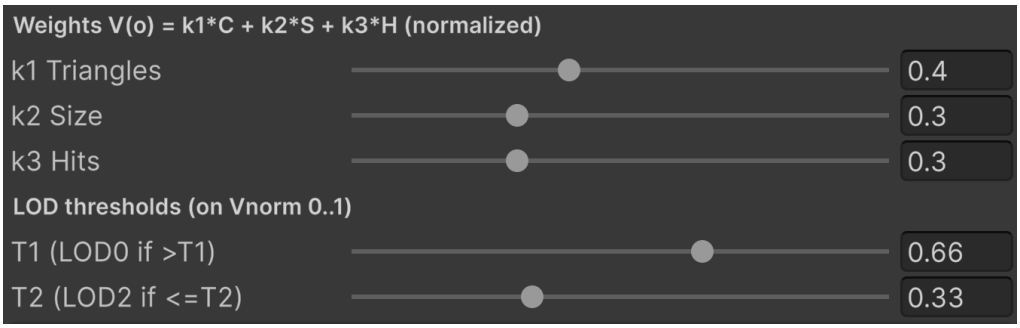



Рис. 1. Интерфейс настройки коэффициентов

Источник: составлено авторами на основе движка Unity

**Экспериментальная проверка**

Для проверки работы подхода была взята сцена с тысячей объектов, содержащая около 583 тысяч треугольников. Все объекты представляют собой модели зданий с умеренной геометрической сложностью. Значения коэффициентов были заданы следующим образом: 0.4 для кол-ва треугольников, и 0.3 для объема и попаданий. Среди зданий был подготовлен ряд одинаковых объектов, у которых серьезно увеличена геометрия. В результате, при классификации именно они оказались наиболее значительными, и соответственно были отнесены к уровню 0. Результаты анализа можно увидеть на таблице 1. Для демонстрации приведены значения одного объекта из каждой группы.

Табл. 1

Результаты анализа

| Объект | Треугольники | Объем | Попадания лучей | $V(o)$ | Уровень |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2364 | 115768 | 2416 | 0.98 | 0 |
| 2 | 2364 | 4527 | 399 | 0.45 | 1 |
| 3 | 840 | 1185 | 22 | 0.12 | 2 |

Источник: составлено авторами

Из представленных результатов видно влияние метрик геометрической сложности, объема и потенциала объекта в качестве окклюдера на итоговую метрику значимости. При этом различия в пространственном положении и объеме могут оказывать критическое значение, даже если объекты являются одинаковыми по сложности.

**Заключение**

В ходе выполнения работы был предложен подход к формализованной оценке значимости объектов на 3D-сцене в ходе её предварительного анализа. Предложенная модель учитывает ряд характеристик объекта: геометрическую сложность, размер и потенциал в качестве загораживающего объекта.

Проведенная экспериментальная проверка демонстрирует возможность ранжировать объекты сцены и предварительно распределять их по уровням детализации на основе метрики значимости. При этом такие параметры как пространственный размер и оценка объекта в качестве окклюдера оказывают влияние на результаты анализа даже при одинаковой геометрической сложности.

Предложенный подход может использоваться для анализа трехмерной сцены и формирования предварительного этапа настройки встроенных инструментов оптимизации, таких как регулирование уровней детализации и отсечение невидимых объектов.

Дальнейшие исследования могут быть связаны с углубленным анализом влияния весовых коэффициентов на результаты анализа, расширением набора учитываемых метрик и экспериментами по адаптации подхода к разным сценам и требованиям. Также может быть рассмотрен вопрос учёта потенциальных или предварительно заданных точек обзора.

**Список используемых источников**

1. Аникеев А.С. Генерация и моделирование 2D ландшафта по контрольным значениям с использованием Unity на языке программирования // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2020. № 4 (64). [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/generatsiya-i-modelirovanie-2d-landshafta-po-kontrolnym-znacheniyam-s-ispolzovaniem-unity-na-yazyke-programmirovaniya (дата обращения: 15.02.2026).

2. Гонахчян В.И. Модель производительности графического конвейера для однопроходной схемы рендеринга динамических трехмерных сцен // Труды ИСП РАН. 2020. № 4. С. 53–72.

3. Han S., Sander P. Triangle reordering for efficient rendering in complex scenes // Journal of Computer Graphics Techniques. 2017. Vol. 6. № 3. P. 38–52.

4. Hasselgren J., Andersson M., Akenine-Möller T. Masked software occlusion culling // Proceedings of High Performance Graphics (HPG '16). Goslar: Eurographics Association, 2016. P. 23–31.

5. Jiang T., Huang S., Yan Z. Rendering Optimization of Building Information Models Based on Occlusion Culling // 2024 4th International Conference on Public Management and Big Data Analysis (PMBDA 2024). Atlantis Press, 2025. P. 358–368.

6. Koch J., Gomse M., Schüppstuhl T. Digital game-based examination for sensor placement in context of an Industry 4.0 lecture using the Unity 3D engine – a case study // Procedia Manufacturing. 2021. Vol. 55. P. 563–570.

7. Occlusion Culling / Unity Technologies. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.unity3d.com/Manual/OcclusionCulling.html (дата обращения: 15.02.2026).

8. Pantazopoulos I., Tzafestas S. Occlusion culling algorithms: A comprehensive survey // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 2002. Vol. 35. P. 123–156.

9. Set up a scene for occlusion culling / Unity Technologies. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.unity3d.com/Manual/occlusion-culling-getting-started.html (дата обращения: 15.02.2026).

10. Wang Z., Wu G., Boriboonsomsin K., Barth M., Han K., Kim B., Tiwari P. Cooperative Ramp Merging System: Agent-Based Modeling and Simulation Using Game Engine // SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles. 2019. Vol. 2. P. 1–14. DOI: 10.4271/12-02-02-0008.

## ПРОТОТИП ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ПОИСКА ПОПУТЧИКОВ СРЕДИ СТУДЕНТОВ

*Штурбабина Е.А. – студент, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются ключевые подходы к разработке прототипа приложения для поиска попутчиков среди студентов, направленного на оптимизацию транспортной мобильности и

повышение безопасности совместных поездок. Отдельное внимание автор уделяет вопросам верификации пользователей, анализу существующих способов организации карпулинга, а также обоснованию необходимости создания специализированных платформ для учащихся в условиях цифровизации образования.

Разработка прототипа приложения для поиска попутчиков среди студентов представляет собой комплекс мер, направленных на оптимизацию транспортной мобильности внутри учебных заведений. В условиях растущей урбанизации, реформ общественного транспорта, повышения стоимости проезда и экологической нагрузки, проблема организации совместных поездок становится критически важной для учащихся, стремящихся совмещать экономию бюджета с гибкостью планирования маршрутов и возможностью поиска новых знакомых.

В современном мире быстроразвивающихся технологий и цифровизации образования количество студентов, нуждающихся в ежедневных или эпизодических поездках, неуклонно растет. По данным мониторинга транспортного поведения молодежи, около 63% студентов используют общественный транспорт, и еще 15% – личный автомобиль для добирания до вуза ежедневно [3]. Рост числа личных транспортных средств в студенческой среде сопровождается увеличением транспортной нагрузки на дороги и ухудшением экологической обстановки в городах. При этом карпулинг – совместное использование поездок – сталкивается с проблемой недоверия между незнакомыми людьми и отсутствием удобных верифицированных площадок для коммуникации. При организации поездок через общие доски объявлений или социальные сети существует высокий риск столкнуться с недобросовестными попутчиками, небезопасными маршрутами или мошенничеством, если личность водителя или пассажира не была должным образом подтверждена.

В настоящее время можно выделить нескольких критериев эффективности подобных сервисов, при соблюдении которых пользователи смогут безопасно и комфортно организовывать совместные поездки. Это:

1. **Верификация участников** – подтверждение статуса студента с помощью фотографии справки об обучении, копии зачетной книжки или студенческого билета, а также скриншота личного кабинета студента для исключения посторонних лиц.

2. **Информационная безопасность** – необходимость соответствия законодательству о защите персональных данных (Федеральный закон № 152-ФЗ «О персональных данных») [4]. Несоблюдение законодательных требований при обработке данных студентов влечет за собой юридические (штрафы, судебные иски),

репутационные (потеря доверия со стороны университета и учащихся) и финансовые последствия для разработчиков.

3. **Репутационная система** – обязательное наличие механизмов рейтингования и обратной связи для проверки благонадежности участников поездок.

4. **Эргономичность** – интерфейс и логика приложения должны учитывать особенности мобильности студентов (нерегулярное расписание, сессионные периоды).

Поиск попутчика среди студентов может быть реализован несколькими способами. *Первый способ* – децентрализованный поиск через социальные сети и мессенджеры (тематические чаты и группы). Пользователь публикует пост с маршрутом, а желающие откликаются на предложение. Однако информация быстро уходит в ленте, отсутствуют фильтры и гарантии безопасности. Эффективность такого поиска низкая, а данные (номер телефона, государственный номер машины, пути постоянного перемещения) становятся доступны широкому кругу лиц. Остается высокий риск столкнуться с мошенничеством. Примером может служить публикация в группе «Ищу попутчика» в общем городском паблике в социальной сети ВКонтакте [2]. *Второй способ* – использование универсальных карпулинговых сервисов, таких как BlaBlaCar [1]. Эти платформы предлагают удобный функционал, но ориентированы на междугородние поездки, а не на регулярные короткие маршруты «общежитие – вуз», и не предоставляют инструментов проверки именно студенческого статуса. Модерация профилей не учитывает специфику учебного расписания. *Третий способ* – использование специализированного студенческого приложения-платформы. Это процесс, при котором поиск попутчиков становится доступным, безопасным и эффективным, что достигается за счет узкой аудитории и интеграции с университетскими данными. При таком способе сведения о маршрутах видны только проверенным пользователям (сокурсникам и студентам того же вуза), что значительно снижает риски недобросовестных водителей и попутчиков.

Специфика разрабатываемого прототипа предполагает обработку персональных данных (ФИО, контактные данные, место учебы, геолокационные данные, фотографии документов). В соответствии с классификацией Федерального закона № 152-ФЗ, такая информация относится к категории персональных данных, что накладывает строгие обязательства по обеспечению их защиты [4].

В связи с этим в приложении реализован следующий комплекс мер безопасности:

1. **Идентификация и аутентификация**: доступ к приложению осуществляется только после прохождения процедуры регистрации и входа. Пароли пользователей хранятся в базе данных в хешированном виде, что исключает компрометацию учетных записей даже при получении доступа к базе данных.

2. **Верификация статуса**: модуль подтверждения вуза предусматривает загрузку фотографий документов. Для минимизации рисков хранения чувствительных данных в открытом виде, на следующем этапе разработки планируется внедрение шифрования загружаемых изображений.

3. **Контроль доступа**: разграничение прав доступа между ролями «Водитель» и «Попутчик» позволяет предотвратить несанкционированные действия (например, создание фиктивных поездок).

Основными угрозами для подобных систем являются:

– **перехват данных**: при передаче данных между клиентом и сервером существует риск их перехвата. Для минимизации этой угрозы на всех этапах взаимодействия должен использоваться протокол HTTPS с шифрованием TLS;

– **социальная инженерия и фишинг**: создание фальшивых профилей для сбора данных. Противодействием является обязательная верификация документов и система рейтингов, позволяющая отслеживать подозрительное поведение;

– **угрозы целостности данных**: попытки модификации данных о поездках или отзывов. Защита реализуется через логирование действий и контрольные суммы.

На данный момент на платформе с локальным хостом реализованы следующие функции, демонстрирующие жизнеспособность концепции MVP (Minimum Viable Product):

1. **Модуль регистрации и авторизации (Рис. 1, 2)**: реализован с использованием хеширования паролей, что позволяет гарантировать сохранность учетных данных даже в случае утечки базы данных.

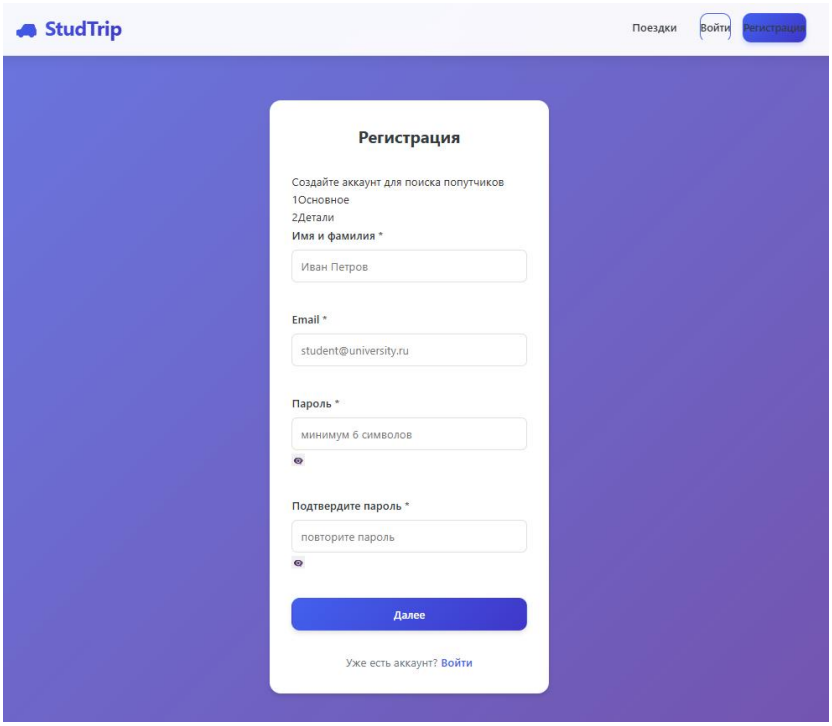



Рис. 1. Регистрация

Источник: разработка автора

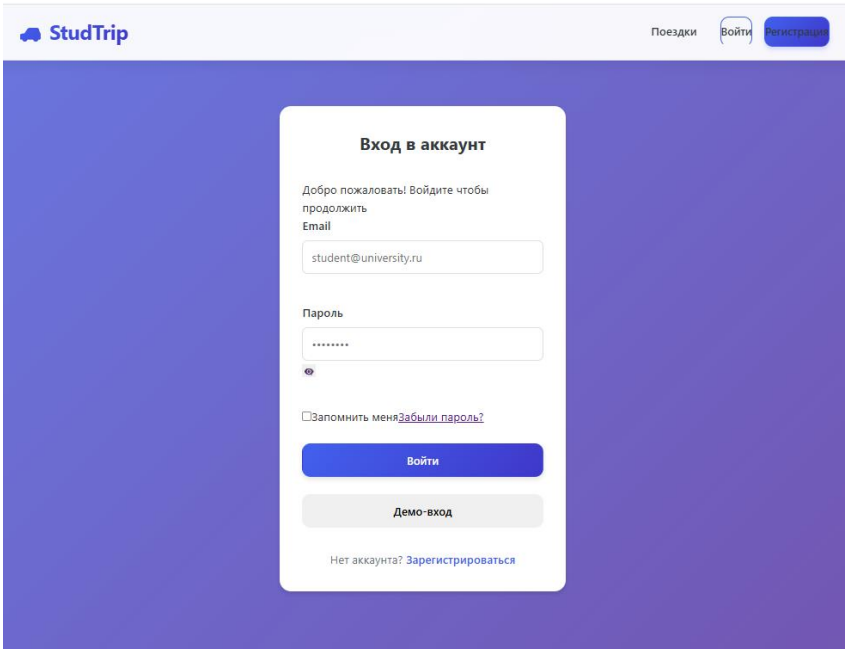



Рис. 2. Вход

Источник: разработка автора

2. **Личный кабинет (Рис. 3.)**: содержит основную информацию о пользователе, его рейтинг и историю поездок.

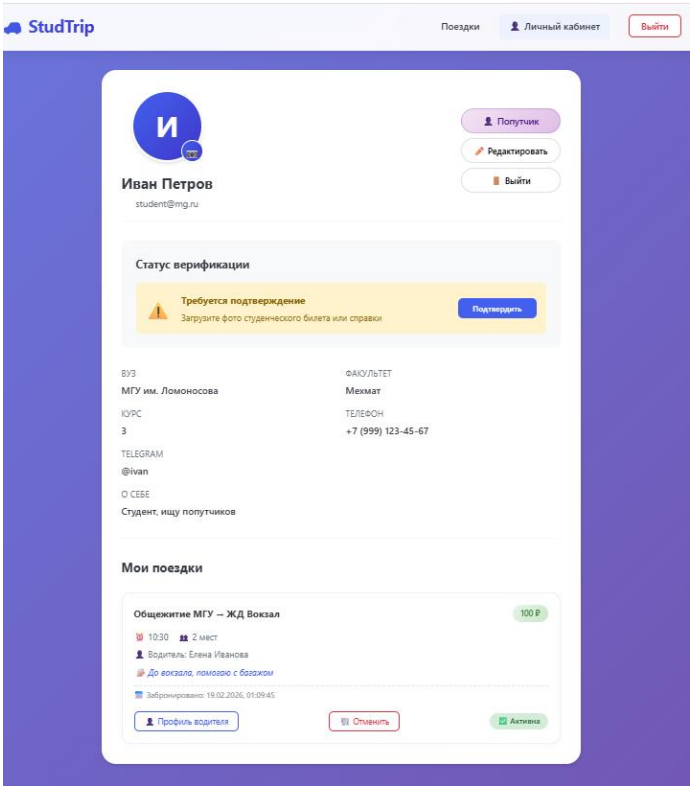



Рис. 3. Личный кабинет

Источник: разработка автора

3. **Модуль поиска и создания поездок (Рис. 4.)**: ключевой функционал платформы.

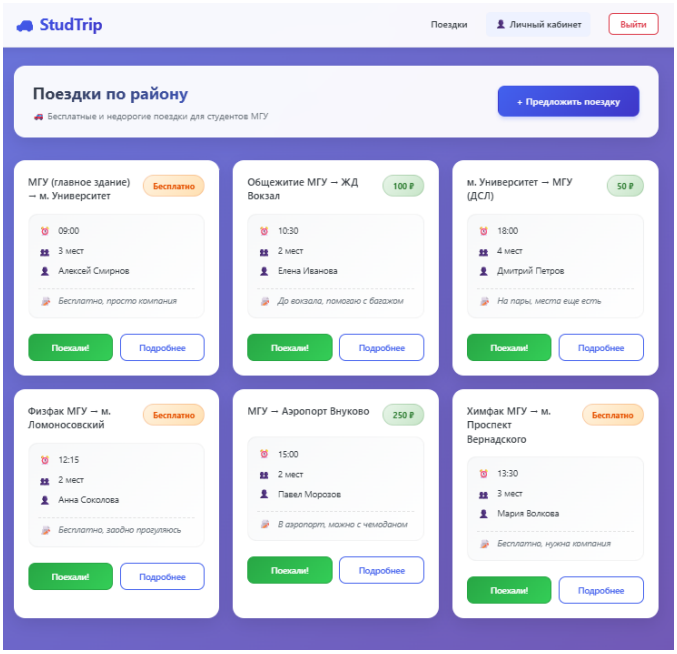



Рис. 4. Поиск поездок

Источник: разработка автора

4. **Модуль верификации статуса студента (Рис. 5.)**: пользователь загружает фотографию подтверждающего документа (студенческий билет, зачетная книжка, справка об обучении).

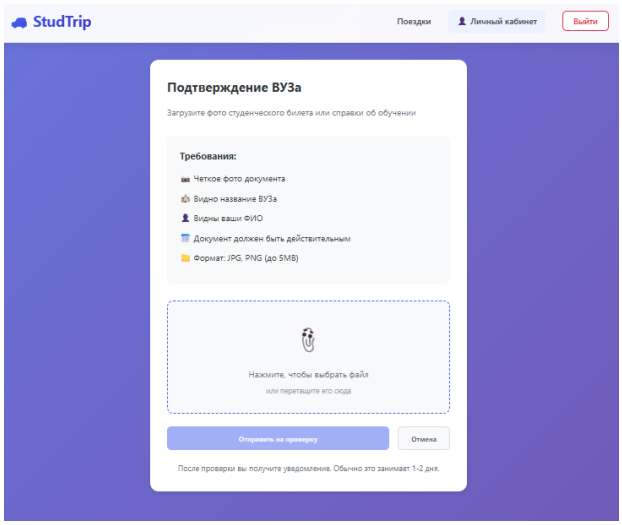



Рис. 5. Подтверждение вуза

Источник: разработка автора

5. **Модуль рейтинга и отзывов (Рис. 6.)**: после завершения поездки пользователи могут оценить друг друга. Это создает «иммунитет» системы против недобросовестных участников: чем выше рейтинг, тем больше доверия к пользователю.

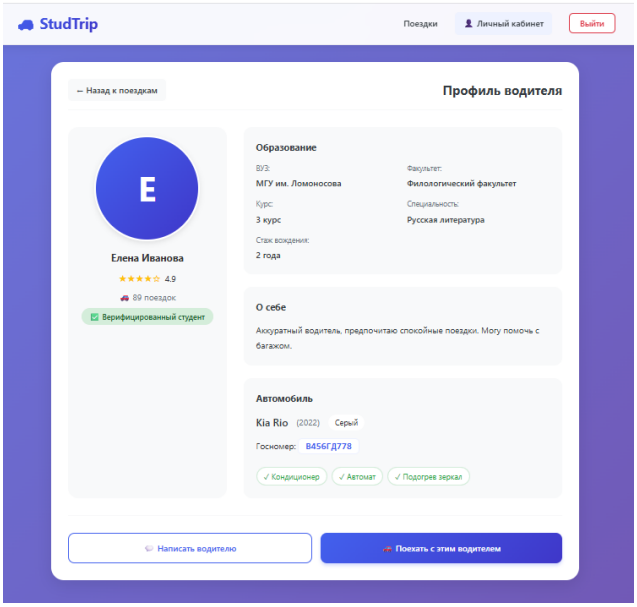



Рис. 6. Профиль водителя

Источник: разработка автора

В качестве дальнейшего развития прототипа планируется решение следующих задач:

1. **Разработка микросервисной архитектуры** для разделения функционала поиска, обмена сообщениями и обработки платежей, если функция компенсации расходов на топливо будет актуальна.
2. **Внедрение сквозного шифрования (End-to-End Encryption)** для личных сообщений между водителем и пассажирами, чтобы даже администратор системы не имел доступа к переписке.
3. **Интеграция с картографическими сервисами (API Яндекс.Карт или Google Maps)** для автоматического расчета расстояния и времени в пути, а также для отображения оптимальных маршрутов.
4. **Автоматизация верификации** с использованием технологий компьютерного зрения для распознавания текста на загружаемых документах, что позволит сократить время модерации и исключить человеческий фактор при проверке статуса студента.

В ходе работы над прототипом было установлено, что создание специализированного приложения для поиска попутчиков среди студентов является актуальной задачей, решение которой позволит снизить финансовую нагрузку на учащихся и уменьшить транспортный поток в городах. Особый упор в разработке делается на аспекты информационной безопасности: верификацию личности, защиту персональных данных и репутационную систему. Разработанный прототип прошел первичное тестирование в условиях локальной сети, подтвердив корректность работы алгоритмов поиска, системы авторизации и модуля загрузки документов. Дальнейшее внедрение приложения в вузовскую среду позволит не только упростить логистику студентов, но и сформировать базу для сбора статистики о транспортных предпочтениях молодежи, что полезно для городского планирования. Помимо этого, реализованный прототип демонстрирует работоспособность ключевых модулей и может служить основой для полноценного внедрения в инфраструктуру вуза.

**Список используемых источников**

1. Автобус или автомобиль? Выбирайте поездки по низким ценам / BlaBlaCar. [Электронный ресурс]. URL: https://www.blablacar.ru/ (дата обращения: 18.02.2026).

2. Поиск попутчиков | Ищу попутчика или попутчицу / Vk.com. [Электронный ресурс]. URL: https://vk.com/poiskpoputchika (дата обращения: 18.02.2026).

3. Симанова И.А., Щепкова И.В. Исследование предпочтений студентов к виду транспорта // Молодой ученый. 2015. № 10.2 (90.2). С. 78–81.

4. О персональных данных: Федеральный закон от 27.07.2006 № 152-ФЗ (последняя редакция) № 152-ФЗ / КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/ (дата обращения: 18.02.2026).

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМНОГО МЫШЛЕНИЯ ИНЖЕНЕРОВ АГРАРНОГО ВУЗА СРЕДСТВАМИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Щедрина Е.В. – к.п.н., доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К. А. Тимирязева»*

**Аннотация**

В статье предлагается вариант работы студентов аграрного вуза, включающий работу с системой понятий, системой практико-ориентированных агроинженерных задач, с системой заданий для контроля в рамках дисциплины «Информатика и цифровые технологии». Цель исследования – выявить возможности современных информационных технологий для развития системного мышления студентов, обучающихся по специальности 35.03.06 «Агроинженерия».

В материалах ЮНЕСКО, представляющих аналитический отчёт об использовании средств информатизации в целях стимулирования структурных изменений современного цифрового общества, определяется следующее: активное проникновение компьютерной техники и телекоммуникаций определяет необходимость развития востребованных soft skills на всех уровнях образования [6]. В список качеств личности, определяющих успешность выпускников вузов на рынке труда в обществе Индустрии 4.0 (и на перспективу – Индустрии 5.0), согласно выводам Е. В. Щедриной, Е. В. Соболевой, Д. Ю. Ляпунова, Н. В. Гавриловской [7], следует отнести: эмоциональный интеллект, коммуникативные навыки, цифровая грамотность, умения программировать и работать в команде, системное и критическое мышление, и т.д.

Системное мышление, согласно Н. В. Ронжиной, включает переход [3]: от наблюдения событий или явлений к определению моделей поведения в рамках выполнения трудовых функций; от выбора (среди набора действий) к созданию эффективных и долгосрочных решений для глобальных проблем, влияющих на профессиональную деятельность. Среди таких проблем – изменение климата и

экологический кризис, экономическая нестабильность, цифровизация всех секторов экономики, быстрый технологический прогресс [2].

Конечно, представленное трактование дефиниции «системное мышление», одно из немногих существующих в отечественной и зарубежной литературе. Например, в работе В. В. Лихолетова, Е. В. Годлевской приводится определение этого термина как понимание реальности, которое подчёркивает значимость взаимодействий между частями системы, а не действий самих частей. Авторы также отмечают, что решение многих промышленных проблем требует применения системного подхода при проектировании и разработке более эффективных и экологически чистых технологий и механизмов [1].

Н. Л. Караваев, Е. В. Соболева рассматривают потенциал цифровых технологий для развития системного и критического мышления будущих инженеров [5]. Авторы приводят примеры конкретных практических задач, решение которых может поспособствовать развитию тех умений и навыков, которые и составляют основу системного мышления студента технического направления подготовки. Например, В таблице «Сотрудники IT-компании», используя автофильтр, выведите информацию о программистах, проживающих в городе Кирове ИЛИ Казани, с именем, начинающимся на букву «А», не имеющих телефона». Таким образом, здесь от обучающегося требуется выполнить работу с текстом задачи; выделить исходные данные и те, которые требуется получить; выполнить актуализацию имеющихся знаний по автофильтру; из имеющегося набора действий (заполнение ячеек, запись формул, применение автофильтра и т.д.) выбрать те, которые позволят достигнуть результат; оценить полученный ответ (правильность, оптимальность достижения, эффективность метода решения). Однако, Н. Л. Караваев, Е. В. Соболева в заключении сами отмечают, что необходимо дополнение сформулированных примеров, так как в текстах заданий, во-первых, следует учитывать специфику подготовки студента. И, во-вторых, дорабатывать предложенный набор, чтобы это действительно была система учебных задач [5].

K. Alford, N. Stedman, J. C. Bunch, S. Baker, G. A. Roberts определяют необходимость развития системного мышления в колледжах, выпускающих агроинженеров. Авторы приводят примеры того, как применение современных технологий в обучении высококвалифицированных специалистов (в частности, в области электрооборудования и электротехнологий) [4]. Например, в процессе решения задач снижения энергоёмкости экономики (расхода энергии на единицу произведённого ВВП) позволяет повысить качество подготовки выпускников. В

рамках эксперимента эти эмпирические материалы подтверждаются теоретическими обоснованиями.

Цель исследования: теоретическое обоснование и определение возможностей применения средств цифровых технологий для развития системного мышления инженеров будущего. Программа подготовки: 35.03.06 Агроинженерия. Направленность: Электрооборудование и электротехнологии.

Для развития системного мышления организуется учебная деятельность по работе с системой понятий, системой практико-ориентированных агроинженерных задач, с системой заданий для контроля по дисциплине «Информатика и цифровые технологии».

Требования к системе понятий: согласованность, понятность, расширяемость, наличие связей между понятиями и отсутствие неопределённости по их расположению в структуре; представление средствами инфографики.

Для системы учебных задач использовались текстовые и графические редакторы, электронные таблицы, базы данных, генеративные нейросети, интерактивные тренажёры.

Тестовые задания для оценки уровня сформированности системного мышления («низкий», «средний», «высокий») включают четыре типа задач: анализ и выявление закономерностей в структурных схемах, выявление закономерностей в логических последовательностях, выявление взаимосвязей между элементами в сложных системах агроинженерии, понимание диаграмм и схем агроинженерных процессов.

Определим необходимый понятийный аппарат и опишем логику комплексной методической работы преподавателя со студентами при изучении тем дисциплины «Информатика и цифровые технологии», максимально ориентированной на развитие системного мышления обучающихся.

Последовательность тем определена таким образом, чтобы после изучения дисциплины (согласно утверждённой рабочей программе) у выпускника были сформированы необходимые навыки и компетенции в вопросах организации работ в смежных областях электрооборудования, электротехнологий и информатики. Специалист будет иметь и опыт проектирования, оптимизации и управления системами объектов различного назначения для агрониженерии. Кроме того, научится анализировать режимы работы и возможные сбои агроинженерных систем (машин и процессов).

Системное мышление в представленном исследовании трактуется как умение специалиста видеть, как все элементы в любой системе (в частности, из сфер

электрооборудования, электротехнологий и информатики) связаны и влияют друг на друга.

Выпускник аграрного вуза по профилю подготовки «Электрооборудование и электротехнологии» – это профессионал, владеющий современными средствами информатики и цифровых технологий, и эффективно применяющий их для решения широкого спектра задач из области профессиональной деятельности.

Обеспечение комплексной методической поддержкой процесс подготовки студентов соответствующих направлений подготовки – важная часть работы педагогов вуза.

Пример системы понятий по теме «Текстовый редактор»: текстовый процессор, функциональные возможности, набор (символ, строка, текст), вставка/замена/удаление (символ, строка, текст, изображение), редактирование (символ, абзац, документ), форматирование (символ, абзац, документ), сохранение/ экспорт.

Методическая рекомендация 1. На этапе работы с понятиями из подсистемы «редактирование» и «форматирование» полезно провести работу относительно каждой функциональной возможности. Например, что содержательнее «редактирование символа» или «редактирование строки»? И наоборот. Можно рассмотреть применимость изученных понятий к разным видам текстовых редакторов: MS Word, Блокнот и т.п.

Методическая рекомендация 2. Здесь целесообразно продемонстрировать обучающимся, что возможности текстового редактора реализуются и средствами языка программирования. Например, в плане редактирования текста: требуется напечатать слово «байт» ровно 4 раза. И рассмотреть пример оператора, с помощью которого это можно сделать. Для Pascal это будет (как вариант): For N := -1 to 2 do writeln (‘байт’);

Методическая рекомендация 3. Выполнить реализацию оператора в другом языке программирования. Обсудить, что осталось прежним, а что (на каких этапах работы) – изменилось.

Пример системы учебных (агроинженерных) заданий:

1. Средствами поисковых систем найдите информацию относительно 10 открытий из области профессиональной деятельности, актуальных на Ваш взгляд. Например, событие 1 «В 1831 году Майкл Фарадей представил миру первый электрический генератор»; событие 3 «В 1923 году Василием Горячкиным была разработана формула силы тяги плугов»; событие 9 «В 2023 году профессору Чжун

Линь Вану присуждена премия «Глобальная энергия» за изобретение трибоэлектрического наногенератора (ТЭНГ).

2. Оформите найденную информацию с помощью текстового редактора, придерживаясь правил набора текста. Методическая рекомендация 4: можно заранее подготовить памятки для студентов. Например, как ставить неразрывный пробел, как добавлять автоматический список, как оформлять заголовки и др. На этом этапе работы – текст оформляется без использования таблиц.

3. Структурируйте получившийся материал и оформите его в виде таблицы в текстовом редакторе. Методическая рекомендация 5. Дополнительно предложить обучающимся выделить столбец для инфографики, изображений.

4. Средствами графического редактора 3D-Paint выполните графическое изображение одного из тех изобретений, которые Вы отметили ранее. Например, электромобиль, модель агроробота, устройство для одновременного выращивания рыбы и овощей

5. Реализуйте последовательность событий в виде ленты времени. Например, Timeline JS. Методическая рекомендация 6. Дополнительно предложить обучающимся проанализировать другие сервисы для создания лент времени и сравнить их функциональные возможности.

6. При помощи генеративного нейросетевого ресурса разработайте презентацию, посвящённую одному из топ-открытий, выделенных в таблице. Например, сервис Gamma (https://gamma.app/ru). Методическая рекомендация 7. Дополнительно предложить обучающимся проанализировать другие приложения для генерации презентаций и сравнить их функциональные возможности.

7. Перенесите таблицу из текстового редактора в электронный процессор. Методическая рекомендация 8. Полезно добавить (или сгенерировать) столбец с числовыми данными, которые затем использовать для применения формул, диаграмм, фильтрации.

8. Добавьте в электронную таблицу информацию, когда был выпущен первый трактор в СССР. На новом листе решите следующую последовательность задач:

9. Определить объем выполненной работы в у. э. га, если трактором конкретной марки вспахано 100 га при установленной сменной норме выработки, и конкретной сменной эталонной выработке трактора.

10. Определить основную зарплату за 150 га вспаханной зяби пахотным агрегатом, если известны сменная норма выработки и установленная тарифная ставка.

Методическая рекомендация 9. Предложить студентам придумать своё дополнительное условие (критерий) для расчёта. Например, определить потери мощности в трансмиссии и на буксование двигателей для трактора.

11. Разбить получившуюся таблицу на 3 новых таблицы. Например, таблицы «Открытия», «Изобретатели», «Страны». Определить атрибуты, выделить ключевое поле, установить связи между таблицами. Реализовать получившуюся информационную модель средствами базы данных.

Методическая рекомендация 10. Предложить студентам создать новый запрос для генеративной нейросети, с учётом получившейся схемы данных.

Методическая рекомендация 11. Предложить студентам реализовать схему данных средствами инфографики.

12. Разработать интерактивный тренажёр LearningApps (https://learningapps.org/) по информации из полученных электронных ресурсов (текст, электронная таблица, лента времени и т.п.).

Методическая рекомендация 12. Полезно будет разработать тренажёр и на отработку одного из понятий из агроинженерии. Например, по образу флеш-карт или на заполнение пропусков.

Представленный вариант взаимодействия может быть достаточно легко трансформирован, например, под профиль подготовки «Автоматизация и роботизация технологических процессов».

Итак, формально системное мышление – это многоуровневое представление, которое: поддерживает изучение объектов (процессов, явлений) в области агроинженерии; позволяет детализировано рассмотреть изучаемый объект (процесс, явление) и увидеть его взаимосвязь с другими составляющими агроинженерной структуры.

Таким образом, предложенный вариант комплексной методической поддержки учебной деятельности студентов аграрного вуза, обладает дидактическим потенциалом в плане развития системного мышления инженеров будущего.

**Список используемых источников**

1. Лихолетов В.В., Годлевская Е.В. О системно-философском и инструментальном базисе элитной подготовки будущих инженеров // Инженерное образование. 2018. № 23. С. 45–55.

2. Марача В.Г. Системное мышление и практики коллективного решения проблем // Системный анализ в экономике сборник трудов V Международной научно-

практической конференции – биеннале (21–23 ноября 2018) / под общ. ред. Г.Б. Клейнера, С.Е. Щепетовой. М.: Прометей, 2018. 512 с. ISBN 978-5-907100-60-2. С. 365–368.

3. Ронжина Н.В. Роль универсальной компетенции «системное и критическое мышление» в формировании профессионального мышления // Профессиональное образование и рынок труда. 2020. № 2. С. 116–121. DOI 10.24411/2307-4264-2020-10235.

4. Alford K., Stedman N., Bunch J. C., Baker S., Roberts G. A Paradigm Shift Toward Systems Thinking in Colleges of Agriculture // NACTA Journal. 2024. Vol. 68. P. 227–236. DOI: 10.56103/nactaj.v68i1.190.

5. Karavaev N.L., Soboleva E.V. Characteristics of the Project-Based Teamwork in the Case of Developing a Smart Application in a Digital Educational Environment // European Journal of Contemporary Education. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 417–433. DOI 10.13187/ejced.2020.2.417.

6. Knight H., Angelis R., Telg N., Morgan R. Towards the Coopetitive Circular Business Model: Theoretical foundations, conceptual envisioning, and future research imperatives // Industrial Marketing Management. 2025. Vol. 124. P. 20–39. DOI: 10.1016/j.indmarman.2024.11.005.

7. Shchedrina E.V., Soboleva E.V., Lyapunoff D.Yu., Gavrilovskaya N.V. Professionally oriented network course as the basis for developing the computational thinking of future engineers // Perspectives of Science and Education. 2024. №. 2(68). P. 184–200. DOI 10.32744/pse.2024.2.11.

## СЕКЦИЯ: ТРАНСПОРТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

# ИННОВАЦИОННЫЕ КОНТЕЙНЕРЫ

*Балаба Д.Д. – аспирант ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,*

*Гришкова Д.Ю. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

**Аннотация**

Данная статья посвящена исследованию и анализу новейших разработок в области контейнеростроения, направленных на повышение эффективности транспортировок, обеспечение сохранности продуктов и снижение негативного влияния на окружающую среду. Рассматриваются технологические достижения последних десятилетий, влияющие на конструкцию, функциональность и эксплуатационные характеристики контейнеров.

## Введение

Глобализация экономики требует разработки эффективных методов транспортировки грузов, обеспечивающих минимизацию издержек и сохранение качества продукции. Важнейшую роль здесь играет использование контейнеров, конструкция и функциональное наполнение которых постоянно совершенствуются. Современные контейнеры существенно отличаются от своих предшественников середины прошлого века, предлагая широкий спектр возможностей для разных отраслей промышленности и сфер услуг [5].

Сегодняшняя задача состоит в создании экологически чистых, надежных и экономически выгодных решений, удовлетворяющих потребности рынка и одновременно снижающих влияние человеческой деятельности на природу. Развитие контейнерных технологий тесно связано с использованием передовых материалов, внедрением автоматизированных систем слежения и контроля, применением возобновляемых источников энергии и обеспечением многократного использования контейнеров [7].

Цель настоящей статьи – представить полный обзор основных технологических достижений и тенденций в сфере контейнеростроения, проанализировать их преимущества и недостатки, выявить наиболее перспективные направления дальнейших исследований и разработок.

**Историческая справка**

Первые попытки стандартизировать контейнеры относятся ко второй половине XIX века, однако массовое распространение эта идея получила лишь в послевоенный период благодаря усилиям морских судоходных компаний. К концу XX века контейнер стал символом эффективной логистики, способствующим развитию международной торговли и росту производства.

Современный этап характеризуется переходом от стандартных металлических конструкций к многофункциональным модульным устройствам, включающим автоматику, навигационное оборудование и специализированную защиту. Возникают принципиально новые типы контейнеров, ориентированные на специфические условия перевозок и конкретные виды продукции [3].

Среди них можно выделить:

– изотермические контейнеры, поддерживающие стабильную температуру внутри корпуса независимо от погодных условий;

– рефрижераторы, предназначенные для транспортировки скоропортящихся продуктов питания, медикаментов и биологического материала;

– легкоразборные контейнеры, позволяющие быстро менять конфигурацию и оптимально использовать пространство;

– экологически чистые контейнеры, изготовленные из переработанных материалов и оборудованные системой утилизации отходов.

Помимо разнообразия форматов, особую важность приобретает интеграция контейнеров в единую цифровую экосистему управления поставками. Сегодня почти каждый крупный производитель снабжает свою продукцию RFID-метками, датчиками движения и температуры, трекерами геолокации и устройствами связи, подключаемыми к облачным сервисам обработки данных.

**Конструктивные особенности инновационных контейнеров**

Новые поколения контейнеров строятся с учетом трех главных факторов:

– улучшение характеристик защищенности и герметичности;

– повышение энергоэффективности и экологичности;

– интеграция информационно-коммуникационных технологий.

Материалы, используемые в производстве контейнеров, претерпели значительные изменения. Вместо традиционной стали всё чаще применяются легкие сплавы алюминия, композиты и полимеры, обеспечивающие прочность и долговечность при снижении массы и стоимости обслуживания. Специальные

покрытия и напыления защищают поверхности от коррозии, продлевая срок службы контейнеров [4].

Особое значение приобрели энергосберегающие решения. Например, многие рефрижераторные контейнеры комплектуются солнечными батареями, аккумуляторами и термоизоляционными слоями, позволяя поддерживать необходимую температуру без подключения к внешним источникам электроэнергии. Автоматизированные системы вентиляции и фильтрации воздуха улучшают качество транспортируемых продуктов и снижают потери [1].

Цифровые технологии также занимают важное место в современном контейнеростроении. Электронные системы мониторинга позволяют удаленно контролировать состояние груза, получать уведомления о нарушении целостности упаковки или изменении температуры. Широко используются датчики давления, вибрации, наклона и механических воздействий, помогающие выявлять потенциальные угрозы и предупреждать аварии [2].

**Практическое применение инновационных контейнеров**

Применение инновационных контейнеров охватывает множество областей хозяйственной деятельности:

– международные перевозки пищевых продуктов, лекарственных препаратов и промышленных изделий требуют соблюдения строгих санитарных норм и режимов хранения;

– нефтехимическая промышленность нуждается в специализированных резервуарах для перевозки агрессивных жидкостей и газов;

– военная сфера предъявляет повышенные требования к защите от внешнего воздействия и возможности быстрого развертывания мобильных складских комплексов;

– логистика в экстремальных климатических зонах предполагает использование утепленных и прочных контейнеров, устойчивых к воздействию низких температур, влаги и ультрафиолета.

Однако внедрение новых технологий сталкивается с рядом трудностей, среди которых высокая стоимость оборудования, ограниченность инфраструктуры для зарядки батарей и передачи данных, недостаток квалифицированного персонала и законодательные ограничения некоторых стран [6].

Для преодоления этих препятствий необходимы дальнейшие исследования и сотрудничество производителей, научных учреждений и государственных органов.

**Основные инновации за рубежом**

Модульные и разборные контейнеры. Одна из популярных новинок за рубежом – модульные контейнеры, которые можно быстро собирать и разбирать, экономя место и обеспечивая гибкость при транспортировке нестандартных грузов. Эта технология особенно востребована в странах Европы и Северной Америки, где логистические сети развёрнуты по всей территории и нуждаются в быстрой адаптации к меняющимся потребностям клиентов.

Модульные контейнеры также широко распространены в Азии, где высокий темп роста товарообмена и обширные расстояния делают необходимым эффективное управление транспортными потоками. Например, китайские производители разработали уникальные контейнеры из лёгких материалов, которые легко собираются вручную, что облегчает логистику и ускоряет доставку товаров.

Высокотехнологичные решения. Компании США, Германии и Японии специализируются на разработках высокотехнологических контейнеров с элементами Интернета вещей (IoT). Эти контейнеры оснащены различными сенсорами и модулями беспроводной связи, что позволяет владельцам отслеживать местонахождение груза, его состояние и климатические показатели. Такая система даёт возможность мгновенно реагировать на любые отклонения от нормы и минимизировать риск повреждения или утраты товаров.

Например, американские компании разрабатывают контейнеры с автономными системами энергоснабжения, использующими солнечные панели и ветрогенераторы. Подобные решения помогают экономить энергию и уменьшают зависимость от традиционных источников питания.

Экологичность и безопасность. Во многих странах ЕС и Канаде особое внимание уделяется вопросам экологичности контейнеров. Разработаны стандарты сертификации, определяющие минимальное содержание вредных веществ и эмиссий углекислого газа. Производители стремятся использовать вторично перерабатываемые материалы и создают замкнутый цикл производства, позволяющий многократно использовать контейнеры.

Некоторые компании внедряют технологию самоочистки поверхностей контейнеров, используя фотокаталитические материалы, способные уничтожать бактерии и микроорганизмы. Особенно актуально это направление в медицине и пищевой промышленности, где стерильность имеет первостепенное значение.

Беспилотные контейнерные терминалы. Ещё одна интересная тенденция за рубежом связана с созданием беспилотных контейнерных терминалов. Уже

реализованы пилотные проекты, где доставка и обработка контейнеров осуществляется автоматически, без участия человека. Это повышает скорость оборота грузов и улучшает общую производительность предприятий.

Наиболее успешные реализации таких проектов зафиксированы в Сингапуре и Южной Корее, где контейнерные парки функционируют круглосуточно, управляясь дистанционно через центральные диспетчерские центры.

**Проблемы и перспективы**

Несмотря на значительный прогресс, некоторые препятствия мешают быстрому распространению инновационных контейнеров за рубежом. Прежде всего, это высокие капитальные вложения в переоборудование инфраструктуры и обучение персонала работе с новыми технологиями. Дополнительные расходы связаны с сертификацией и соблюдением нормативных требований каждой отдельной страны.

Перспективы развития зависят от степени готовности рынков к нововведениям и способности компаний находить баланс между стоимостью и выгодностью внедрения новых решений. Тем не менее большинство аналитиков сходится во мнении, что будущее принадлежит именно таким высоким технологиям, способным изменить саму структуру мировых торговых потоков.

**Заключение**

Подведём итог анализа ситуации на рынке инновационных контейнеров:

– современные контейнеры превратились в высокоинтегрированную техническую инфраструктуру, объединяя разнообразные компоненты и функциональные модули;

– дальнейшее улучшение качества контейнеров зависит от прогресса в области робототехники, искусственного интеллекта, возобновляемой энергетики и экологии;

– экономические выгоды от использования инновационных контейнеров очевидны: сокращение расходов на топливо, увеличение срока годности продуктов, ускорение сроков поставки и уменьшение риска убытков;

– несмотря на успехи, достигнутые в разработке новых моделей контейнеров, предстоит решить ряд технических и организационных вопросов, связанных с масштабированием производства и адаптацией существующих стандартов.

Стратегически важно продолжать инвестиции в научно-исследовательские проекты, стимулируя разработку новых поколений контейнеров и расширение их применимости в самых разных областях экономики.

Международный рынок контейнеров продолжает стремительно развиваться, демонстрируя рост спроса на новые решения, направленные на оптимизацию логистических процессов, повышение уровня безопасности и снижение негативного воздействия на окружающую среду. За пределами России компании внедряют самые разные инновации, стремясь создать конкурентоспособные продукты и предложить клиентам удобные и эффективные решения для транспортировки товаров.

Иностранные рынки демонстрируют значительное разнообразие подходов к созданию инновационных контейнеров. Компании работают над повышением удобства использования, эффективностью и экологичностью своих решений. Глобальная конкуренция стимулирует постоянные улучшения, и в ближайшие годы мы можем ожидать появления ещё большего числа интересных решений, изменяющих облик мирового контейнерного хозяйства.

**Список используемых источников**

1. Контейнерный рынок России: ключевые причины падения и новые точки роста / РБК Компании. [Электронный ресурс]. URL: https://companies.rbc.ru/news/98Cn23viqG/kontejnernyij-ryinok-rossii-klyuchevyie-prichinyi-padeniya-i-novyie-tochki-rosta/ (дата обращения 08.02.2026).

2. Контейнеры теряют в весе / Коммерсантъ. [Электронный ресурс]. URL: https://www.kommersant.ru/doc/8209988 (дата обращения 15.02.2026).

3. Пат. 2788217 Рос. Федерация. Устройство для перевозки контейнеров в полувагонах и способ монтажа в полувагоне и подготовки к эксплуатации устройства для перевозки контейнеров / В.А. Иншаков, А.В. Банщиков. № 2022122506; заявл. 19.08.2022; опубл. 17.01.2023, Бюл. № 2. 16 с.

4. Попова Е.А. Новые способы перевозки крупнотоннажных контейнеров // Транспорт: наука, образование, производство: сборник статей Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2023. С. 150–154.

5. Федорова Н.Б., Подвербных А.А. Проблемы и перспективы контейнерных перевозок // Сборник трудов Международной научно-практической конференции. 2022. С. 145–148.

6. Эксперты предложили разработать нацпроект по развитию контейнерных перевозок / RG.ru. [Электронный ресурс]. URL: https://rg.ru/2025/05/23/gendirektor-

iert-magnushevskaia-perevozki-kontejnerov-za-10-let-uvelichilis-vtroe.html (дата обращения 18.02.2026).

7. Atud M.V., Njuma O.R., Chenaa T.A. et al Strategies for Reducing Demurrage at the Douala Container Terminals (RTC Terminal) during Importation // Asian Journal of Economics, Business and Accounting. 2023. Vol. 23. Iss. 23. P. 36–53. DOI: 10.9734/AJEBA/2023/v23i231169.

# АНАЛИЗ ПРОЕКТОВ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РФ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПОРТНОГО ПОТЕНЦИАЛА

*Безвинюк К.Д. – магистрант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

*Кагадий И.Н. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются актуальные проблемы и перспективы развития транспортной логистики Российской Федерации в северно-западном направлении. Выявлена динамика грузопотоков, структура экспортных и социально значимых грузов. Исследованы ключевые инфраструктурные проекты и объемы требуемых инвестиций. Рассмотрены особенности использования механизмов государственно-частного партнерства.

Транспортная система арктических и северных территорий РФ выполняет ключевую геостратегическую и экономическую функцию. В условиях геополитических изменений 2024–2026 гг. произошла кардинальная перестройка логистических цепочек: объем грузов, направляемых в порты Северо-Запада для транзита в Европу, сократился на 37% по сравнению с 2021 г. Одновременно с этим фиксируется устойчивый рост загрузки Северного морского пути (СМП) и железнодорожных подходов к нему [1]. Основные результаты экспортного взаимодействия РФ и стран-партнеров в ключевой момент переориентации логистики товародвижения приведены на рис. 1.




Рис. 1. Экспорт РФ в страны-партнеры (млн т) и доля в общем экспорте (%) [1]

На сегодняшний день существует инфраструктурный разрыв между растущей сырьевой базой и провозными способностями транспортных магистралей, а также необходимостью обеспечения надежного Северного завоза для регионов Крайнего Севера, для чего стратегически важно обосновывать экономически выгодные направления развития арктической логистики. Кроме того, инвестиции и механизмы государственно-частного партнерства (ГЧП) в развитии северных транспортных коридоров способны кратно ускорить процесс экономической привлекательности данного направления транспортно-логистического бизнеса.

В феврале 2026 г. вступила в силу актуализированная «Транспортная стратегия РФ до 2030 года» [4], закрепившая понятие «арктическая круглогодичная линия». Также утвержден план развития СМП до 2035 г. с целевым показателем грузопотока 220 млн тонн к 2030 г. (факт 2025 г. – 38 млн т) [5]. Федеральный закон № 489-ФЗ «О северном завозе» [6] перевел проекты Северного завоза в категорию федерального планирования, что позволило утвердить единый график завоза топливно-энергетических ресурсов в регионы Крайнего Севера и снизить стоимость фрахта на 9%. Номенклатура перевозимых грузов сместилась от продовольствия к стройматериалам и оборудованию, а доля контейнерных грузов в каботаже выросла с 12% до 31%. В общем виде структура экспортного грузопотока включает три основные категории: сжиженный природный газ (СПГ) (проекты «Ямал СПГ» и «Арктик СПГ 2» с проектной мощностью 19,8 млн т/год), нефть и нефтепродукты (проект «Восток Ойл» и ПАО «НК «Роснефть» с проектной мощностью до 100 млн т/год к 2030 г); твердые полезные ископаемые ПАО «ГМК «Норильского никеля» и АК «АЛРОСА» (ПАО).

Важным звеном в финансовой политике РФ по освоению арктической зоны стало соглашение о формировании портфеля концессионных проектов развития

Арктики с потенциальным объемом инвестиций до 1 трлн руб. По оценкам экспертов, на 1 руб. бюджетных средств в ГЧП-проектах будет привлекаться до 4 руб. частных инвестиций. Ключевым инфраструктурным проектом является Северный широтный ход-2 (СШХ-2) – железнодорожная линия «Обская – Салехард – Надым – Пангоды – Новый Уренгой – Коротчаево» с мостом через Обь (рис. 2). Общая стоимость оценивается в 1,2 трлн руб.




Рис. 2. Схема проекта «Северный широтный ход – 2» [3]

Для СШХ-2 концессионная схема рассматривается с участием ОАО «РЖД» и недропользователей ПАО «Газпром» и ПАО «НОВАТЭК». Кроме того, учитывая критически важный вопрос о производстве и вводе в эксплуатацию ледоколов, то с начала 2026 г. запущена программа субсидирования лизинга судов ледового класса с планом ввода 15 судов до 2028 г [5].

В рамках рассматриваемых проектов следует отметить, что в актуализированный ведомственный документ Минтранса России «Формирование сети транспортно-логистических центров» также включён 61 проект развития и строительства терминалов. В их число вошли 17 объектов ОАО «РЖД», в т.ч. терминалы на станциях Первая Речка, Хабаровск-2, Тальцы, Юрьевец, Сыктывкар, Кунцево-2, Гродеково, Забайкальск, Москва-Южный Порт, Мурманск, Доскино, Тихорецкая, Приволжье, Белгород, Нижнекамск. По итогам изучения технологии работы указанных грузовых терминалов и существующей клиентской базы предложены комплексные мероприятия по их развитию: модернизации и реконструкции действующих контейнерных и универсальных площадок, а также

полезной длины путей и грузовых фронтов. Это позволит существенно увеличить их перерабатывающие способности. По итогам реализации проекта предусмотрен прирост перерабатывающих способностей сети транспортно-логистических центров ОАО «РЖД» более чем на 1,2 млн ДФЭ в год [2]. Эти крупные проекты направлены на увеличение объёмов перевозок контейнеризированных грузов в направлениях международных транспортных коридоров.

Отдельно стоит упомянуть развитие Мурманского транспортного узла, включающего создание угольного терминала «Лавна» мощностью 18 млн т (инвестиции 80 млрд руб., открытие – 3 квартал 2026 г.). На рис. 3 приведена краткая характеристика части выполненных (на момент 2024 г.) и планируемых к реализации мероприятий (до 2030 г.) по развитию транспортно-логистического хода до порта Мурманска.

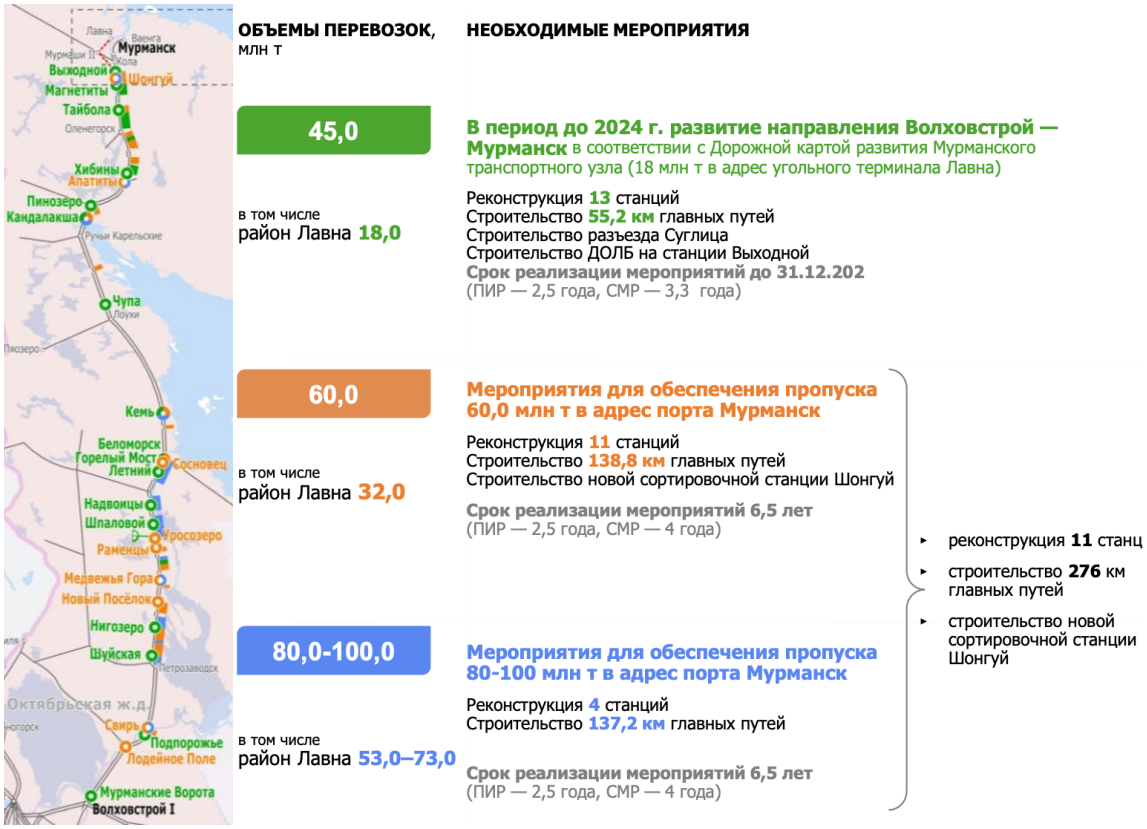



Рис. 3. Развитие железнодорожных грузовых перевозок в сообщении с морским портом Мурманск [2]

К преимуществам принятого к реализации типа взаимодействия государства и частного бизнеса станет как сокращение транзитного времени по перевозкам грузов, так и развитие сопутствующей инфраструктуры. Однако существенными рисками при этом являются высокая капиталоемкость строительства (в условиях вечной

мерзлоты – 2,5–3 млрд руб./км), тарифные диспропорции и имеющийся кадровый дефицит. Целесообразно проводить оценку мультипликативного эффекта инвестиций в развитие транспортной сети с учетом реальной перспективы освоения территорий, обладающих исключительным экспортным потенциалом. Все предпринимаемые инициативы государства и крупных компаний-экспортеров демонстрируют значительный интерес в целевом развитии существующей транспортной инфраструктуры и освоении новых направлений перевозок, в т.ч. ведущих в арктическую зону. Взаимоувязанная и грамотная работа логистических объектов, транспортных компаний, перевозчиков, инвесторов, грузовладельцев и других заинтересованных участников транспортного бизнеса обеспечат появление новых социально-экономических тенденций, способных повысить перспективу экспортно-импортного сотрудничества РФ с международными партнерами.

**Список используемых источников**

1. Клепач А.Н., Порфирьев Б.Н. Арктическая транспортная система: новые вызовы // Вопросы экономики. 2025. № 9. С. 27–43.

2. Обзор логистических рынков России. Итоги 2025 / INFOLine. Санкт-Петербург, 2026. [Электронный ресурс]. URL: https://infoline.spb.ru/research/logistics-2025/ (дата обращения: 15.02.2026).

3. Проект «Северный широтный ход – 2»: презентация ОАО «РЖД». Москва, 2026 / РЖД. [Электронный ресурс]. URL: https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104104?id=123456 (дата обращения: 10.02.2026).

4. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении Транспортной стратегии РФ» от 15.03.2025 № 432-р (ред. от 28.01.2026) // Собрание законодательства РФ. 2026. № 5. Ст. 892.

5. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 года» от 20.06.2025 № 789-р // Собрание законодательства РФ. 2025. № 26. Ст. 3456.

6. Федеральный закон «О северном завозе» от 04.08.2023 № 489-ФЗ (действующая редакция 2026 г.) // Собрание законодательства РФ. 2023. № 32. Ст. 6234.

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ ЗАМЕНЫ МАНЕВРОВЫХ ТЕПЛОВОЗОВ

*Гришкова Д.Ю. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

*Молодин Д.М. – аспирант, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»*

**Аннотация**

В статье рассмотрены автоматизированные системы управления техническим состоянием локомотивов, нормативно-правовые аспекты замены маневровых тепловозов в ОАО «РЖД» и оценка остаточного ресурса. Проанализированы эксплуатационные показатели работы станций и показатели надежности, готовности локомотивов. Предложены направления интеграции данных систем для оптимизации маневровой работы на железнодорожных станциях.

## Введение

Железнодорожный транспорт России, несмотря на значительный рост грузооборота и внедрение цифровых технологий, сталкивается с нарастающим дефицитом эффективной маневровой тяги. Парк маневровых тепловозов ОАО «РЖД» и промышленных предприятий характеризуется критически высоким уровнем износа: средний возраст многих серий (ТЭМ2, ЧМЭ3, ТЭМ7, ТЭМ18) превышает 26–33 года, а доля локомотивов, эксплуатируемых сверх нормативного срока службы, достигает 75–90 % в зависимости от владельца [6, 8]. По оценкам экспертов, к 2035 году потребуется обновить порядка 3500–10 000 единиц тягового подвижного состава, включая маневровые тепловозы, чтобы компенсировать естественное выбытие и обеспечить планируемый рост перевозок [9, 10].

## Объект исследования

Определить направления моделирования процессов замены маневровых тепловозов на основе данных автоматизированных систем мониторинга, нормативно-правовых механизмов и ключевых эксплуатационных и надежностных показателей.

## Методы исследования

Проанализировать действующие автоматизированные системы управления, порядок оценки остаточного ресурса и замены, систематизировать показатели работы

станций и надежности локомотивов, предложить практическое направление моделирования.

**Основной текст**

Современные автоматизированные системы ОАО «РЖД» образуют единую цифровую систему сбора, обработки и прогнозирования данных о тяговом подвижном составе, включая маневровые тепловозы.

Автоматизированная система управления тяговыми ресурсами обеспечивает комплексное планирование парка, бригад, простоев и ремонтов на основе данных журналов ТУ-152, автоматизированной системы оперативного управления перевозками и кассет НБД-2. Система автоматически рассчитывает межремонтные периоды, коэффициент технической готовности и формирует графики постановки на ремонт [1].

Единая система мониторинга технического состояния работает с бортовой телеметрией, стационарными автоматизированными системами технического диагностирования и внешними автоматизированными системами управления. Она идентифицирует предотказные состояния, проводит факторный анализ сбоев и прогнозирует остаточный ресурс по 300–500 параметрам (вибрация, температура, нагрузки) [1].

Автоматизированная система управления «Сетевой график» автоматизирует планирование ремонтов в депо с трехсуточными графиками, электронным документооборотом и контролем качества через терминалы. Снижает простои на 5–10 %, потери на 30 % [1].

«Умный локомотив» – система предиктивной диагностики на базе искусственного интеллекта. За 5 минут обрабатывает телеметрию и выдает «индекс здоровья» каждого узла, снижая аварийные ремонты в 3 раза и простои на 12 % [1].

Процесс замены маневровых тепловозов строго регламентирован и направлен на обеспечение безопасности движения, непрерывности маневровой работы и соответствия экологическим требованиям. Основные нормативные документы:

– Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250) устанавливают требования к техническому состоянию подвижного состава и запрещают эксплуатацию при исчерпании ресурса или наличии дефектов колесных пар, тормозов, систем сигнализации и связи [7];

– Положение о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов

ОАО «РЖД» (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2016 № 2796р, с изм. 2024 г.) определяет виды технического обслуживания и ремонтов, их периодичность и порядок вывода локомотивов из эксплуатации. Для маневровых тепловозов периодичность рассчитывается преимущественно по календарному времени нахождения в парке [6];

– Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (с изм. 2022 г.) обязывает проводить сертификацию всех новых и модернизированных локомотивов [11];

– Инструкция по учету локомотивов (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.10.2012 № 2155р, с изм. 2022 г.) регулирует постановку на учет в автоматизированной базе данных тягового подвижного состава, снятие с учета и оформление актов списания [2];

– СТО РЖД 1.09.003-2007 «Локомотивы. Порядок продления назначенного срока службы» (с изм. 2012 г.) допускает продление ресурса до 50 лет при условии удовлетворительного состояния главной рамы после комплексной диагностики [3].

Диагностика включает визуальный осмотр, неразрушающий контроль, толщинометрию и расчёты усталостной прочности. При отсутствии критических дефектов ресурс продлевается на 5–10 лет; при выявлении недопустимых повреждений принимается решение о списании или полной замене [3].

Общий срок замены – 1–6 месяцев. Процесс замены состоит из шести этапов [2, 3, 6, 7, 11]:

1) инициирование – мониторинг состояния парка в автоматизированной базе данных тягового подвижного состава при приближении к исчерпанию ресурса, частых отказах или экономической нецелесообразности дальнейшего ремонта;

2) анализ состояния и оценка остаточного ресурса – работа экспертной комиссии с проведением полной диагностики базовых узлов;

3) планирование закупки – включение локомотива в инвестиционную программу, проведение тендера или прямого контракта с производителем;

4) подготовка и пересылка нового локомотива – оформление документов, комиссионный осмотр, обкатка и доставка в депо приписки;

5) приемка и ввод в эксплуатацию – приемо-сдаточные испытания, обкатка, постановка на учет в автоматизированную базу данных тягового подвижного состава, оформление акта допуска формы ВУ-36, обучение локомотивных бригад;

6) вывод старого локомотива из эксплуатации – снятие с учета, оформление акта списания или передачи на запчасти, разборка либо утилизация.

Моделирование замены невозможно без учета эксплуатационных показателей станций и показателей надежности локомотивов. Показатели представлены в таблице 1 и 2 соответственно.

Табл. 1

Эксплуатационные показатели работы станций [5]

| № п/п | Показатель | Определение |
|---|---|---|
| 1 | Местная работа станции (ваг/сут) | Суммарный объём погрузки и выгрузки вагонов за сутки по всем грузовым фронтам |
| 2 | Простой местного вагона на станции (ч) | Среднее время нахождения местного вагона на станции от прибытия до отправления после выполнения грузовой операции |
| 3 | Простой вагона под одной грузовой операцией (ч) | Время от момента подачи вагона под грузовую операцию до уборки после её завершения |
| 4 | Число подач/уборок (рейсов/сут) | Количество маневровых рейсов для подачи и уборки вагонов под грузовые операции |
| 5 | Вагоно-часы на местной работе (ваг·ч/сут) | Суммарные затраты вагоно-часов на станции в процессе местной работы за сутки |
| 6 | Коэффициент использования маневровых локомотивов | Доля времени полезной работы маневрового локомотива в общем времени дежурства |

Табл. 2

Показатели надежности и готовности локомотивов [4]

| № п/п | Показатель | Определение |
|---|---|---|
| 1 | Коэффициент технической готовности | Доля времени, когда локомотив технически готов к работе |
| 2 | Средняя наработка на отказ | Средний пробег или время между последовательными отказами |
| 3 | Коэффициент полезной работы | Доля времени, затраченного на полезную тяговую работу в общем жизненном цикле локомотива |

Показатели находятся в тесной функциональной зависимости. Снижение коэффициента технической готовности локомотивов на 0,01 приводит к увеличению простоя местного вагона на 1,5–2,5%. Это вызывает рост числа подач, уборок и вагоно-часов на местной работе, что, в свою очередь, снижает коэффициент использования маневровых локомотивов на 8–12%. В результате увеличивается простой вагона под одной грузовой операцией, ухудшается оборот местного вагона и коэффициент местной работы станции. Таким образом, надёжность локомотивного парка является определяющим фактором всех эксплуатационных показателей

станции: чем выше коэффициент технической готовности и наработка на отказ, тем ниже простои вагонов и выше эффективность маневровой работы [4, 5].

Математическое моделирование является инструментом, позволяющим объективно обосновать сроки, очерёдность и экономическую целесообразность замены маневровых тепловозов в условиях ограниченного финансирования и высокого износа парка. Оно позволяет количественно оценить влияние каждой замены на все взаимосвязанные показатели, заранее рассчитать экономический эффект и обосновать инвестиции. Без такого моделирования обновление парка остаётся не эффективным и приводит к неоправданным потерям в вагонном обороте и снижению клиентоориентированности перевозок.

**Выводы**

Математическая модель процесса замены маневровых тепловозов должна комплексно учитывать несколько взаимосвязанных уровней системы, в противном случае она будет воспроизводить лишь упрощённую и практически неприменимую картину реальности.

Во-первых, она обязана учитывать текущее и прогнозируемое состояние каждого локомотива: данные телеметрии из «Умного локомотива» и единую систему мониторинга транспорта, остаточный ресурс главной рамы, вероятность отказа в ближайшие 6–18 месяцев, историю ремонтов и реальную наработку. Без этого модель просто не поймёт, когда машина действительно близка к критической точке.

Во-вторых, модель должна «видеть» станцию как живую систему: объём местной работы, вместимость путей, загрузку горловин, фактический простой местного вагона, число подач/уборок.

В-третьих, необходимо включить экономику: стоимость нового тепловоза, затраты на техническое обслуживание и ремонт старого, штрафы за сверхнормативный простой вагонов, потери от снижения коэффициента технической готовности, экономию топлива и рост производительности при переходе на более модернизированный тепловоз.

В-четвёртых, модель должна учитывать ограничения: годовой бюджет на обновление парка, сроки поставки новых машин, мощности депо по приёмке и обучению бригад.

Когда всё это собрано в единую модель, появляются ощутимые плюсы.

Вместо того чтобы ждать, пока рама треснет или дизель встанет, станция получает план замены на 12–24 месяца вперёд с расчётом, какие именно машины

нужно вывести первыми, чтобы простои вагонов выросли максимум на 5–7 %, а не на 25–30 %.

Появляется возможность заранее просчитать, сколько денег реально сэкономит каждая замена за счёт сокращения штрафов, топлива и вагоно-часов.

Можно сравнивать сценарии: менять ли сразу 20 старых ТЭМ2 на ТЭМ18 или сначала провести глубокую модернизацию части парка и растянуть инвестиции. Модель покажет, где точка оптимального баланса между затратами и надёжностью.

Наконец, при использовании предиктивной модели коэффициента технической готовности парка стабилизируется на уровне 0,95–0,97 вместо сегодняшних 0,89–0,94, а средний простой местного вагона сократится на 3–5 часов – это уже прямой рост пропускной способности станции без строительства новых путей.

Всё вместе превращает обновление маневрового парка в управляемый, просчитанный процесс, который можно обосновать цифрами. Именно поэтому без математической модели планировать замену тепловозов уже просто неэффективно.

**Список используемых источников**

1. Инфоко / [Электронный ресурс]. URL: https://infokom.org/ (дата обращения: 17.02.2026).

2. Инструкция по учету локомотивов: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 29.10.2012 № 2155р (с изм. от 21.03.2022) / [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/instrukciya/1/instruktsiya_po_uchetu_lokomotivov_utv_rasporyazheniem_oao.html (дата обращения: 18.02.2026).

3. Локомотивы. Порядок продления назначенного срока службы: стандарт ОАО «РЖД» СТО РЖД 1.09.003-2007: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 21.01.2008 № 67р (с изм. от 26.07.2012 № 1474р) / [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/70304644/ (дата обращения: 18.02.2026).

4. Методические положения для расчета показателей безотказности и готовности локомотивов по результатам их эксплуатации: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.11.2008 № 2367р. / [Электронный ресурс]. URL: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/metodicheskiepolozheniya/0/metodicheskie_polozheniya_dlya_rascheta_pokazateley.htm (дата обращения: 19.02.2026).

5. Михальченко Е. В. Показатели эксплуатационной работы. / [Электронный ресурс]. URL: http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/560/mihalchenko_ottps.pdf (дата обращения: 19.02.2026).

6. Положение о системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2016 № 2796р (с изм. от 10.10.2024) / [Электронный ресурс]. URL: https://prorzd.ru/2018/02/18/2796p (дата обращения: 15.02.2026).

7. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: утв. приказом Минтранса России от 23.06.2022 № 250 / [Электронный ресурс]. URL: https://base.garant.ru/405042985/ (дата обращения: 17.02.2026).

8. Промпредприятиям к 2035 году придется обновить тысячи маневровых локомотивов // Wagon-cargo.ru. 2023. 30 марта / [Электронный ресурс]. URL: https://wagon-cargo.ru/news/prompredpriyatiyam-k-2035-godu-pridetsya-obnovit-tysyachi -manevrovykh-lokomotivov (дата обращения: 15.02.2026).

9. РЖД болеют за 10 тысяч локомотивов. Дефицит маневровых машин // Vgudok.com. 2024. 7 авг. / [Электронный ресурс]. URL: https://vgudok.com/lenta/rzhd-boleyut-za-10-tysyach-lokomotivov-deficit-manevrovykh-mashin-nehvatka-mashinistov-ten (дата обращения: 15.02.2026).

10. РЖД приобрели 243 новых локомотива в первом полугодии 2025 года // РЖД-Партнер. 2025. 18 июля / [Электронный ресурс]. URL: https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/news/rzhd-priobreli-243-novykh-lokomotiva-v-pervom-polugodii-2025-goda (дата обращения: 15.02.2026).

11. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011): утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 № 710 (с изм. от 25.11.2022) / [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902293438 (дата обращения: 18.02.2026).

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА УЧАСТКАХ ЛИНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ, А ТАКЖЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ

*Громов В.Н. – д.т.н., профессор, Высшая инженерная школа компьютерных технологий и информационных систем ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

**Аннотация**

В статье рассматривается методика проведения широкомасштабной модернизации систем вентиляции первых метрополитенов на основе оценки текущего технического состояния инженерных систем и создания электронной версии геометрической модели тоннелей и сетей. Основной целью проведения работ является экономия электроэнергии и обеспечение требуемых параметров микроклимата. Предлагаемая методика параметрического управления тоннельной вентиляцией метро является перспективной для существующих и строящихся объектов.

Системы вентиляции (СВ) метрополитенов имеют важное значение для транспортной безопасности, обеспечения требуемых режимов проветривания и поддержания параметров микроклимата на станциях и в тоннелях скоростного городского транспорта.

В силу большого количества санитарных требований и норм проектирования, системы вентиляции метро относятся к разряду самых сложных и самых ответственных инженерных систем подземного транспортного комплекса.

Сегодня на повестке дня стоят вопросы по обеспечению требуемых по ГОСТу параметров микроклимата и максимальной комфортности для пассажиров и эксплуатационного персонала метрополитенов в повседневных условиях и при чрезвычайных ситуациях [1].

Существующие метрополитены ряда крупных городов функционируют больше 70 лет. Отдельные инженерные системы нуждаются в проведении аудита для оценки их текущего технического состояния и в выполнении широкомасштабной модернизации.

Необходимость проведения модернизации устаревших инженерных систем метрополитенов обусловлена рядом причин, а именно:

1. Типовые системы вентиляции первых метрополитенов строились на основе одномерных моделей для обеспечения 3х кратного часового воздухообмена

подаваемого воздуха во внутренние объемы, но без достаточного учета реальной геометрии сооружений, температурной депрессии и поршневых эффектов от движения поездов.

2. В период, прошедший с начала эксплуатации первых метрополитенов, существенно изменился целый ряд факторов, воздействующих на систему вентиляции, таких как:

– сезонные колебания влажности и температуры окружающей наружной среды;

– возрастание частоты движения метропоездов и значительное увеличение пассажиропотока;

– изменение технических характеристик подвижного состава, включая применение в вагонах систем кондиционирования воздуха;

– увеличение тепловыделений из-за возросших нагрузок в электрооборудовании, контактных тяговых сетях и в кабельных трассах;

– изменение внутренней архитектуры линий метрополитена в связи с добавлением новых станций и пересадочных узлов.

При планировании проведения работ по модернизации устаревших инженерных систем отдельных линий метро и проведении технического аудита возникает необходимость:

– выполнить визуально-инструментальное обследование тоннелей и сетей вентиляции метрополитена на пилотном участке с учетом реальных схем;

– проанализировать конструкторскую документацию и данные визуально-инструментального обследования тоннелей и сетей вентиляции с целью построения реальной геометрической модели тоннелей и сетей вентиляции;

– создать электронную версию геометрической модели тоннелей и сетей вентиляции с учетом отражения в базе данных реального энергетического баланса, параметров воздушной среды и метеоданных на пилотном участке;

– обосновать и составить план повышения энергоэффективности пилотного участка линии метрополитена с заменой устаревшего инженерного оборудования;

– обосновать замену устаревших моделей вентиляторов в вентшахтах на новые вентиляторы с регулируемой производительностью от частотных преобразователей.

В настоящее время в метрополитенах применяется традиционная система ступенчатого управления режимами работы систем вентиляции (рис.1).

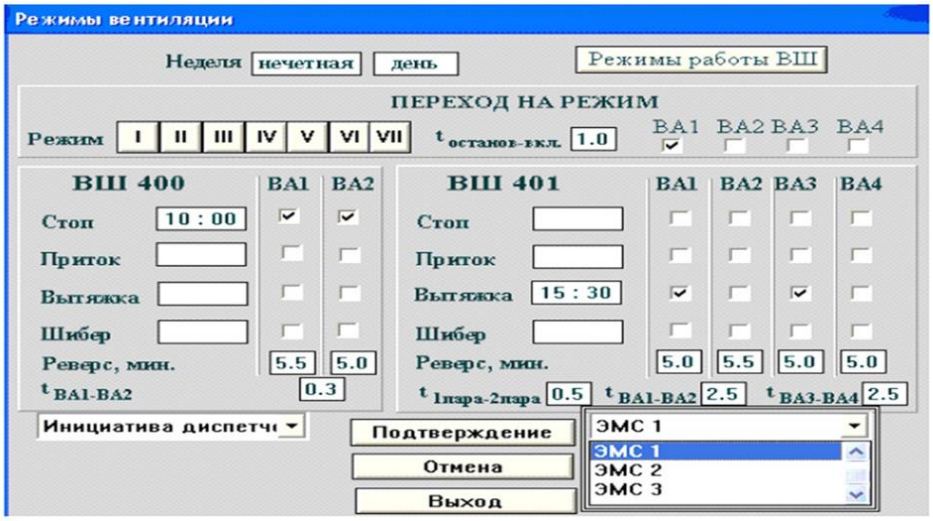



Рис 1. Традиционная система ступенчатого управления режимами работы СВ [2]

Система ступенчатого дискретного управления вентиляторами метро основана на применении традиционных вентагрегатов, которые обеспечивают только одну постоянную частоту вращения рабочего колеса и одну производительность, установленную заводом производителем.

Изменить производительность агрегатов возможно только вручную при условии больших трудовых и временных затрат, что нецелесообразно и на практике не выполняется. В настоящее время подобные вентустановки можно либо включить на приток или вытяжку, либо отключить.

При таких конструктивных ограничениях реализовать параметрическое (адаптивное) управление тоннельной вентиляцией, в соответствии с реальной температурой наружного окружающего воздуха, невозможно.

Отсутствие возможности адаптировать производительность таких вентиляторов к требованиям текущего момента определяет ряд недостатков, а именно:

– метод приводит к большому количеству дней в году, когда параметры микроклимата во внутренних объемах метро не могут соответствовать нормам, особенно, в аномально жаркие и аномально холодные дни;

– происходит перерасход потребляемой электроэнергии;

– система не поддерживает выполнения большинства эффективных решений, принимаемых операторами, для смягчения последствий, возникающих в экстремальных ситуациях.

Сегодня на повестке дня стоит остро вопрос по точному соблюдению параметров микроклимата и кратности воздухообмена во внутренних объемах метро.

Метод параметрического управления тоннельной вентиляцией метро создает возможность автоматически регулировать производительность вентустановок за счет изменения числа оборотов рабочего колеса агрегатов в зависимости от температуры наружного воздуха.

Метод параметрического управления тоннельной СВ метро позволяет обеспечивать:

– оптимальные параметры микроклимата, соответствующие требованиям действующих нормативных документов СП 2.5.3650-20 и СП 120.133330.2012, в зависимости от изменяющихся погодных условий окружающей среды, времени суток, парности движения поездов;

– круглогодичную экономию электроэнергии с учетом её количества и качества по каждой вентиляционной установке при всех режимах работы тоннельной вентиляции;

– максимально эффективное дымоудаление из очага задымления при возникновении пожароопасных ситуаций;

Метод параметрического управления тоннельной СВ универсален и может быть внедрён на всех вентиляционных шахтах метрополитенов при условии установки на них агрегатов с частотно-регулируемым электроприводом.

Предварительные подсчеты и проведенные эксперименты показали, что параметрическое управление СВ на одной линии метро из пяти вентшахт позволит сэкономить до 30% потребляемой электроэнергии по сравнению с традиционным способом ступенчатого управления режимами работы систем вентиляции.

На рис.2 представлена экспериментальная схема подключения вентагрегатов для реализации параметрического метода управления тоннельной СВ и мониторинга энергетических параметров вентагрегатов с применением универсального диагностического прибора BINOM-3M [2].

Прибор BINOM-3M (Рис.3) имеет встроенный web-сервер, позволяющий просматривать результаты измерений и вычислений в виде схем, таблиц, графиков, диаграмм.

Для анализа в режиме реального времени в приборе доступны оперативные данные по измерениям основных параметров электросети, данные результатов статистической обработки показателей качества электроэнергии и осциллографирования [3].

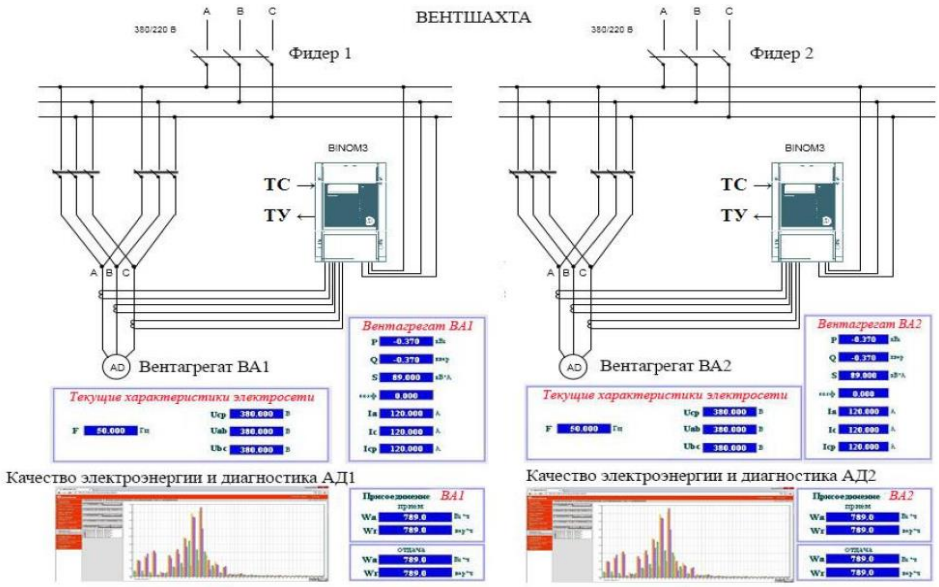



Рис.2. Схема подключения вентагрегатов при параметрическом методе управления СВ с применением приборов BINOM-3M [2]



Рис.3. Общий вид приборов типа BINOM-3M [3]

Предлагаемая методика выполнения работ по исследованию состояния вентиляционных сетей на проблемных участках линий метрополитенов и их модернизации, позволяет обеспечить экономию электроэнергии и требуемые параметры микроклимата для пассажиров и эксплуатационного персонала.

Метод параметрического управление тоннельной вентиляцией взамен традиционной системы ступенчатого управления режимами работы СВ – это реальное будущее метрополитенов.

Время простых изолированных решений закончилось, и для решения проблемы повышения энергоэффективности и надежности СВ необходим системный подход.

**Список используемых источников**

1. Громов В.Н. Обеспечение оптимальных параметров микроклимата для пассажиров и сотрудников метрополитена, соответствующих требованиям безопасности и нормативным документам. Журнал «Метро INFO International», Изд. ООО «Русгортранс», 2022, №1, 2022. С.30–35.

2. Громов В.Н. Влияние качества электроэнергии на работоспособность технических систем и технологического оборудования метрополитенов. Международная научно-методическая конференция (26-28.11.2014г.) г. Москва «Управление качеством электрической энергии» (Национальный исследовательский университет «МЭИ») / Сборник докладов конференции МЭИ. 2014. С.85–93.

3. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. РД 153-34.0-15.502-2002 / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200032472 (дата обращения: 01.02.2026).

4. Васильева О.А. Новый стандарт функциональности в промышленной автоматизации: интеллектуальные приборы BINOM3. «Автоматизация и IT в энергетике». № 12(77). 2015. С.54–59.

# ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОГО РЫНКА РОССИИ: АНАЛИЗ ВНЕДРЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ «ГОСЛОГ», СИСТЕМ ЭТРН И ОБЯЗАТЕЛЬНЫХ РЕЕСТРОВ

*Добротворская Т.В. – преподаватель, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

**Аннотация**

Статья посвящена анализу институциональных изменений на российском рынке грузоперевозок, связанных с внедрением национальной цифровой транспортно-логистической платформы «ГосЛог», переходом на обязательный электронный документооборот (ЭТРН) и созданием государственных реестров экспедиторов и перевозчиков. Статья развивает ранее предложенную автором концепцию эволюции распределенных организационных структур, демонстрируя, как внешнее институциональное регулирование становится катализатором перехода от гибридных моделей управления к платформенно-ориентированным архитектурам.

**Введение**

Ведущие игроки рынка (Деловые Линии, СДЭК, ПЭК, КИТ) осуществляют переход от жестко централизованных моделей к гибридным структурам, где сочетаются стратегический контроль центра и операционная автономия филиалов. Ключевыми драйверами этой трансформации были определены цифровизация, внедрение искусственного интеллекта и необходимость адаптации к изменяющимся внешним условиям.

Однако логика развития распределенных структур не исчерпывается внутрикорпоративными управленческими решениями. Следующий закономерный этап – формирование единого цифрового пространства взаимодействия между всеми участниками рынка, задающего новые «правила игры» для компаний любого масштаба и организационной архитектуры. Именно таким системным изменением становится запуск национальной цифровой транспортно-логистической платформы «ГосЛог», введение обязательного электронного документооборота и создание государственных реестров участников рынка [4].

Цель настоящей статьи – проанализировать институциональную реформу транспортного рынка России, выявить ее причины, сроки реализации, организационные последствия для компаний и спрогнозировать, как изменится структура рыночных игроков под влиянием новых требований. Особый интерес представляет вопрос: как внешнее регулирование трансформирует внутренние управленческие модели распределенных логистических структур, рассмотренные ранее?

## 1 Нормативно-правовые основания и сроки внедрения цифровой инфраструктуры

### 1.1 Платформа «ГосЛог»: архитектура и этапы создания

Национальная цифровая транспортно-логистическая платформа «ГосЛог» создается как государственная информационная система, определяющая единые стандарты цифрового взаимодействия для всех участников транспортно-логистической деятельности и органов государственного управления. Согласно проекту постановления Правительства РФ, размещенному на портале нормативно-правовых актов, создание платформы осуществляется поэтапно с завершением всего комплекса работ и вводом в эксплуатацию полноформатной платформы в 2030 году.

**Первая очередь** (запуск ожидается в 2026 году) включает подсистемы: «Цифровой профиль участника», «Единая база нормативно-справочной

информации», «Диагностика и администрирование», «Обеспечение безопасности информации», «Информационное взаимодействие».

**Вторая очередь** предусматривает создание подсистем: «Механизмы «единого окна», «Цифровой паспорт перевозки», «Ведение реестров объектов транспортно-логистической инфраструктуры и транспортных средств», «Единая геоинформационная система», «Придание юридической значимости», «Ведение транспортно-экономического баланса Российской Федерации».

**Третья и четвертая очереди** (до 2030 года) добавят функционал расчета вариантов перевозки, мониторинга приоритетной доставки социально-значимых грузов и отслеживания инцидентов.

### 1.2 Обязательный электронный документооборот: ЭТРН и экспедиторские документы

Ключевым элементом реформы выступает переход на обязательное оформление перевозочных документов в электронном виде. С 1 сентября 2026 года в России станет обязательным оформление экспедиторских документов для железнодорожных и авиаперевозок исключительно в электронном виде, что следует из Федерального закона № 140-ФЗ, подписанного Президентом РФ в июне 2025 года.

Обязательному электронному оформлению подлежат:

– транспортные накладные и заказы-заявки для автомобильных перевозок (ЭТрН);

– грузовые накладные для воздушных перевозок;

– транспортные железнодорожные накладные (ЭТРН);

– экспедиторские документы (экспедиторские и складские расписки, поручения экспедитору).

ЭТрН заменяет традиционную транспортную накладную, товарно-транспортную накладную и сопроводительную ведомость, консолидируя информацию обо всех участниках и условиях перевозки в едином цифровом документе.

### 1.3 Создание обязательных реестров экспедиторов и перевозчиков

Федеральным законом № 140-ФЗ вводится обязательная регистрация экспедиторов в реестре на платформе «ГосЛог». Срок: до 1 мая 2026 года все экспедиторы (юридические лица и индивидуальные предприниматели) обязаны зарегистрироваться в реестре экспедиторов [9]. Право на осуществление транспортно-экспедиционной деятельности предоставляется заинтересованным лицам со дня размещения соответствующей записи в указанном реестре.

В развитие этого регулирования в декабре 2025 года был подписан Федеральный закон «О допуске к осуществлению перевозок грузов автомобильным транспортом по территории Российской Федерации» (№ 422-ФЗ) [10], которым вводится аналогичный реестр перевозчиков грузов автомобильным транспортом. Допуск к предоставлению услуг предоставляется со дня регистрации уведомления о начале осуществления деятельности в реестре, который ведется Ространснадзором на платформе «ГосЛог» [4].

Важное исключение: действие закона не распространяется на перевозки транспортными средствами с максимальной массой не более 3,5 тонны, что сохраняет определенную свободу для сегмента малого коммерческого транспорта.

## 2 Причины введения новых регуляторных требований

### 2.1 Масштаб теневого сектора

Основным драйвером реформы выступает необходимость обеления отрасли. По данным Ассоциации автомобильных грузоперевозчиков и экспедиторов («АвтоГрузЭкс»), доля серых услуг на рынке грузоперевозок до сих пор превышает 60%. Недобросовестные участники демпингуют за счет уклонения от уплаты налогов и сборов, что создает неравные конкурентные условия.

Наиболее распространенные схемы включают оптимизацию подоходного налога и страховых взносов при выплате заработной платы, а также уклонение от уплаты НДС с использованием «бумажного» НДС, когда сделки оформляются формально, без реального товарооборота. Тарифы в серой зоне в среднем примерно на 20% ниже, чем у добросовестных грузоперевозчиков, что подрывает конкурентоспособность последних.

### 2.2 Обеспечение транспортной безопасности и контроля

Вторая ключевая причина – усиление контроля за перевозкой грузов, особенно ограниченных в обороте. Федеральный закон № 140-ФЗ закрепляет обязанность экспедитора при оказании услуг, связанных с перевозкой предметов и веществ, изъятых из гражданского оборота или ограниченно оборотоспособных, обеспечить соблюдение требований к их перевозке. В случае невозможности обеспечить соблюдение таких требований оказание экспедиционных услуг не допускается.

Экспедиторы обязаны хранить на территории РФ информацию о заключенных договорах в течение трех лет и предоставлять ее уполномоченным органам, осуществляющим оперативно-разыскную деятельность. Также закреплена обязанность передавать груз для проверки и изъятия при наличии оснований

полагать, что в составе груза содержатся запрещенные или ограниченные в обороте предметы.

Недостаточное регулирование предыдущих лет породило множество споров о том, нарушил ли экспедитор требования законодательства, поскольку не были обозначены конкретные критерии достаточности и разумности действий при проверке сведений о грузе. Новое регулирование устраняет этот правовой вакуум.

### 2.3 Повышение эффективности управления транспортной системой

Третья причина носит макроэкономический характер. Как отмечал замминистра транспорта Андрей Никитин, перевод всей транспортной документации в электронный вид позволяет в онлайн-режиме понимать, какой груз куда едет, видеть узкие места на транспортной сети, определять, какие дороги надо строить и как в реальности перемещаются грузы. Это создает основу для научно обоснованного планирования транспортной инфраструктуры и управления транспортно-экономическим балансом страны.

## 3 Организационные изменения для участников рынка

### 3.1 Трансформация документооборота и бизнес-процессов

Для логистических компаний переход на обязательный электронный документооборот означает необходимость полной перестройки операционных процессов. Если ранее электронный документооборот был конкурентным преимуществом отдельных игроков, то теперь он становится обязательным условием деятельности.

Ключевые организационные изменения включают:

– интеграцию информационных систем компании с государственной системой электронных перевозочных документов;

– обеспечение технической возможности формирования и подписания электронных документов усиленной квалифицированной или неквалифицированной электронной подписью;

– переобучение персонала работе в новых цифровых интерфейсах;

– пересмотр регламентов взаимодействия с контрагентами.

Как отмечают эксперты, участникам рынка потребуется период настройки систем, аналогичный тому, который был при внедрении ЭТрН. Операторы информационных систем электронных перевозочных документов имеют возможность протестировать работу с новыми форматами на тестовом контуре госсистемы до перехода на обязательность.

### 3.2 Изменение требований к управлению распределенными структурами

Здесь мы выходим на связь с предыдущим исследованием автора. Ранее было показано, что компании переходят к гибридным моделям управления, где филиалы обладают операционной автономией. Внедрение обязательных электронных реестров и документов создает новое измерение этой автономии.

С одной стороны, централизация данных о всех перевозках на платформе «ГосЛог» усиливает возможности головных офисов по контролю за деятельностью филиалов. Появляется единый источник достоверных данных о каждой перевозке, что снижает асимметрию информации между центром и периферией.

С другой стороны, региональные филиалы должны сохранять способность к оперативной работе с локальными клиентами и грузами, что требует децентрализованных компетенций по работе с электронными документами. Возникает новая задача: обеспечение единых стандартов цифровой грамотности и технического оснащения по всей распределенной сети.

Для компаний, использующих франчайзинговую модель (как СДЭК), возникает дополнительная сложность: ответственность за соблюдение новых требований несут франчайзи, но репутационные риски при нарушениях ложатся на головную компанию. Это потребует ужесточения контроля за франчайзинговыми партнерами и, вероятно, централизации некоторых функций цифрового документооборота.

### 3.3 Расширение ответственности и новые компетенции

Законодательство существенно расширяет ответственность экспедиторов. Помимо обязанности проверки грузов (которая существовала и ранее, но без четких критериев), добавляются требования по хранению информации и взаимодействию с правоохранительными органами.

Это требует от компаний развития новых компетенций:

– юридических (понимание границ ответственности и порядка взаимодействия с госорганами);

– комплаенс-контроля (обеспечение проверки контрагентов и грузов);

– информационной безопасности (защита данных, передаваемых в государственные системы).

## 4 Ожидаемые экономические эффекты

### 4.1 Снижение транзакционных издержек

Перевод документооборота в электронный формат позволяет резко сократить сроки оформления документов, создать комфортные условия для перевозчика с точки

зрения качества. По данным операторов электронного документооборота, количество электронных перевозочных документов в России за 2025 год увеличилось почти в 2 раза, что свидетельствует о готовности отрасли к цифровой трансформации.

Сокращение времени на оформление документов, исключение необходимости их физической передачи, снижение риска утери или порчи – все это создает прямой экономический эффект в виде ускорения оборачиваемости транспортных средств и сокращения административных расходов.

### 4.2 Обеление рынка и налоговая прозрачность

Введение обязательных реестров и электронного документооборота делает невозможным существование «серых» схем, основанных на неотражении операций в учете или использовании фирм-однодневок. Как отмечают эксперты, клиенты все чаще выбирают прозрачные транспортно-логистические компании, так как это снижает риск получения доначислений от налоговых органов, которые отслеживают всю цепь платежей.

Прогнозируется, что обеление отрасли приведет к следующим эффектам:

– увеличение налоговых поступлений от транспортно-логистического сектора;

– выравнивание конкурентных условий (исчезновение ценового преимущества «серых» игроков);

– повышение качества услуг за счет невозможности экономии на налогах и сборах.

### 4.3 Снижение рисков для клиентов

Для грузовладельцев «белый» сектор услуг – это гарантия безопасности и ответственности. Все процессы прозрачны и регулируются официальными договорами, перевозчик берет на себя полную ответственность за груз, предусмотрены механизмы страхования, контроль соблюдения сроков и качества.

Клиент получает уверенность, что его груз будет доставлен в целости и сохранности, а в случае непредвиденных ситуаций он получит предусмотренную компенсацию. Снижаются налоговые риски, связанные с взаимодействием с недобросовестными контрагентами.

## 5 Изменение структуры рыночных игроков

### 5.1 Усиление позиций крупных логистических операторов

Крупные компании, обладающие ресурсами для цифровой трансформации, получают дополнительные конкурентные преимущества. Они могут:

– инвестировать в интеграцию своих информационных систем с платформой «ГосЛог»;

– обеспечить обучение персонала и адаптацию бизнес-процессов;

– использовать свою репутацию прозрачных игроков как маркетинговое преимущество.

Анализ динамики показателей за 2024 год, представленный в предыдущей статье, показывает, что лидеры рынка (Деловые Линии, СДЭК, ПЭК) уже демонстрируют высокие темпы роста выручки (от 20% до 39%). Новое регулирование, вероятно, усилит их рыночные позиции.

### 5.2 Трансформация малого и среднего бизнеса

Для малых и средних предприятий ситуация складывается неоднозначно. С одной стороны, затраты на цифровую адаптацию могут быть обременительными. С другой стороны, появление единой государственной платформы снижает барьеры входа в части создания собственных цифровых решений.

Прогнозируется два сценария развития для малого бизнеса:

**Консолидация вокруг платформ.** Малые перевозчики и экспедиторы будут интегрироваться в экосистемы крупных логистических операторов или специализированных цифровых платформ, которые возьмут на функции взаимодействия с «ГосЛогом» как сервис.

**Сокращение числа микропредприятий.** Те игроки, которые не смогут или не захотят проходить регистрацию в реестрах и внедрять электронный документооборот, вынуждены будут покинуть рынок. Учитывая, что доля «серого» сектора оценивается в 60%, масштаб потенциального сокращения может быть значительным.

Важно, что закон № 422-ФЗ выводит из-под регулирования транспортные средства массой до 3,5 тонны, что сохраняет возможности для микробизнеса в сегменте малых перевозок. Однако для работы с корпоративными клиентами, требующими полного документального оформления, даже владельцы малотоннажного транспорта будут вынуждены входить в легальное поле.

### 5.3 Появление новых игроков – цифровых посредников

Новое регулирование создает нишу для операторов информационных систем электронных перевозочных документов. Эти компании предоставляют сервисы по работе с электронными документами, интеграции с государственными системами, обучению персонала.

Операторы имеют возможность протестировать работу с документами на тестовом контуре госсистемы до перехода на обязательность. Это создает рынок компетенций и технологических решений, на котором будут формироваться новые бизнесы.

### 5.4 Эволюция распределенных структур в условиях платформенной экономики

Возвращаясь к теме предыдущего исследования, можно прогнозировать, что под влиянием новых регуляторных требований гибридные модели управления региональными сетями будут эволюционировать в сторону **платформенно-ориентированных архитектур**.

Если ранее распределенные структуры управлялись через комбинацию централизованных стратегических решений и локальной операционной автономии, то теперь добавляется третий уровень – единая государственная платформа, задающая стандарты взаимодействия для всех участников рынка.

Это приводит к следующим изменениям в управленческих моделях:

1. Стандартизация данных. Центральные офисы получают возможность сопоставлять данные по всем филиалам в едином формате, что повышает качество управленческих решений.
2. Снижение транзакционных издержек внутри сети. Единые стандарты электронного документооборота упрощают взаимодействие между филиалами одной компании.
3. Прозрачность для внешнего контроля. Государство получает доступ к данным о перевозках, что снижает возможности для теневых операций, но одновременно создает новые требования к информационной безопасности.
4. Консолидация компетенций. Функции по работе с государственными информационными системами могут централизоваться на уровне головных офисов, а операционная работа с клиентами остается на местах.

### Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что российский транспортно-логистический рынок вступает в эпоху глубокой институциональной трансформации. Внедрение платформы «ГосЛог», переход на обязательный электронный документооборот и создание государственных реестров экспедиторов и перевозчиков формируют новые «правила игры», которые изменят структуру рынка и модели управления компаниями.

Ключевые сроки реформы: март 2026 года – вступление в силу основных положений о платформе «ГосЛог», май 2026 года – крайний срок регистрации экспедиторов в реестре, сентябрь 2026 года – переход на обязательный электронный документооборот, 2030 год – завершение создания полнофункциональной платформы.

Ожидаемые экономические эффекты включают обеление отрасли (сокращение теневого сектора с текущих 60%), выравнивание конкурентных условий, снижение транзакционных издержек и повышение транспортной безопасности. Для клиентов это означает снижение рисков и повышение качества услуг.

Структура рыночных игроков претерпит существенные изменения. Крупные логистические операторы укрепят свои позиции благодаря ресурсам для цифровой адаптации. Малый и средний бизнес будет консолидироваться вокруг цифровых платформ, а часть микропредприятий, не прошедших регистрацию в реестрах, покинет рынок. Одновременно появятся новые игроки – операторы информационных систем и цифровые посредники.

Развивая выводы предыдущего исследования автора, можно заключить, что гибридные модели управления распределенными структурами будут эволюционировать в сторону платформенно-ориентированных архитектур, где внутренние управленческие решения дополняются и опосредуются взаимодействием с единой государственной цифровой платформой. Компании, которые смогут эффективно интегрировать новые требования в свои управленческие модели, получат долгосрочные конкурентные преимущества.

Перспективными направлениями дальнейших исследований представляются анализ адаптационных стратегий логистических компаний различных размеров к новым регуляторным требованиям, оценка реальных экономических эффектов после завершения перехода на обязательный электронный документооборот, а также изучение трансформации бизнес-моделей в условиях платформенной экономики транспорта.

**Список используемых источников**

1. Аналитический отчет «Российский рынок логистики и грузоперевозок 2025-2027: цифровая трансформация и структурные изменения». НИУ ВШЭ, 2026. 180 с.

2. Бумажный парашют: Минтранс прописал, когда железной дороге можно сбросить электронные накладные / АО «Новая перевозочная компания».

[Электронный ресурс]. URL: https://www.npktrans.ru/media/novosti/bumazhnyi-parashyut-mintrans-propisal-kogda-zheleznoi-doroge-mozhno-sbrosit-elektronnye-nakladnye/ (дата обращения: 15.02.2026).

3. Выход из тени: цифровизация обеляет логистическую отрасль / Деловой Петербург. [Электронный ресурс]. URL: https://www.dp.ru/a/2025/09/12/vihod-iz-teni-cifrovizacija (дата обращения: 25.02.2026).

4. «ГосЛог»: масштабный проект цифровой транспортно-логистической платформы будет завершен к 2030 году / СРО Ассоциация «Промжелдортранс». [Электронный ресурс]. URL: https://associacia-pgdt.ru/news/goslog-masshtabnyj-proekt-cifrovoj-transportno logisticheskoj-platformy-budet-zavershen-k-2030-godu/ (дата обращения: 15.02.2026).

5. Иванов А.В., Петрова С.К. Управление распределенными организационными системами в цифровую эпоху. М.: ИНФРА-М, 2023. 256 с.

6. Кочетов А. Маршрут построен: Как логистическая отрасль адаптируется к вызовам // Эксперт. 2025. 6 ноября. [Электронный ресурс]. URL: https://expert.ru/expertise/arkhiv/infrastrukturnye-proekty/transport-pro/marshrut-postroen/ (дата обращения: 15.02.2026).

7. Не все экспедиторские документы будут переведены в электронный формат / АТИ-СМИ. [Электронный ресурс]. URL: https://news.ati.su/news/2025/09/17/ne-vse-ekspeditorskie-dokumenty-budut-perevedeny-v-elektronnyj-format-118900/ (дата обращения: 15.02.2026).

8. Об утверждении Положения о национальной цифровой транспортно-логистической платформе РФ «ГосЛог»: Проект постановления Правительства РФ (ID 162152) / Портал проектов нормативно-правовых актов. [Электронный ресурс]. URL: https://regulation.gov.ru/projects/162152/ (дата обращения: 25.02.2026).

9. О внесении изменений в Федеральный закон «О транспортно-экспедиционной деятельности» и отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 07.06.2025 № 140-ФЗ / Официальное опубликование правовых актов. [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202506070016 (дата обращения: 25.02.2026).

10. О допуске к осуществлению перевозок грузов автомобильным транспортом по территории Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от

29.12.2025 № 422-ФЗ / Гарант.ру. [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/413275472/ (дата обращения: 25.02.2026).

# СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА АВИАЦИИ: АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ И ОЦЕНКА ВЫБРОСОВ ПАРКА ВС РФ

*Канакин М.К. – инженер, Институт Энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

*Басати Панах М. – к.т.н., доцент, Институт Энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

*Матвеев Ю.В. – к.т.н., доцент, Институт Энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

**Аннотация**

В статье рассматривается проблема декарбонизации мировой авиации, ответственной за 2-3% антропогенных выбросов $CO_2$. Проведен анализ структуры выбросов вредных парка воздушных судов Российской Федерации, на основе данных ICAO. Выявлены наиболее экологически эффективные типы двигателей и самолетов (SSJ-100, CRJ-200) и обозначена проблема высоких выбросов NOx у современных двигателей (LEAP, GE90). Основное внимание уделено обзору устойчивых авиационных топлив (SAF): технологиям HEFA/HRJ, Фишера-Тропша, а также перспективам биоводорода и биометана.

## Введение

Растущая необходимость сокращения выбросов парниковых газов (ПГ) активизировала исследования в области устойчивых энергетических решений во многих секторах. Авиационная отрасль, ответственная примерно за 2–3% мировых выбросов углекислого газа ($CO_2$), сталкивается с уникальными проблемами в этом контексте из-за своей зависимости от жидкого топлива с высокой плотностью энергии и строгих требований к производительности авиационных двигателей, на рис. 1. представлены данные по выбросам углекислого газа в Российской федерации и мире [12].

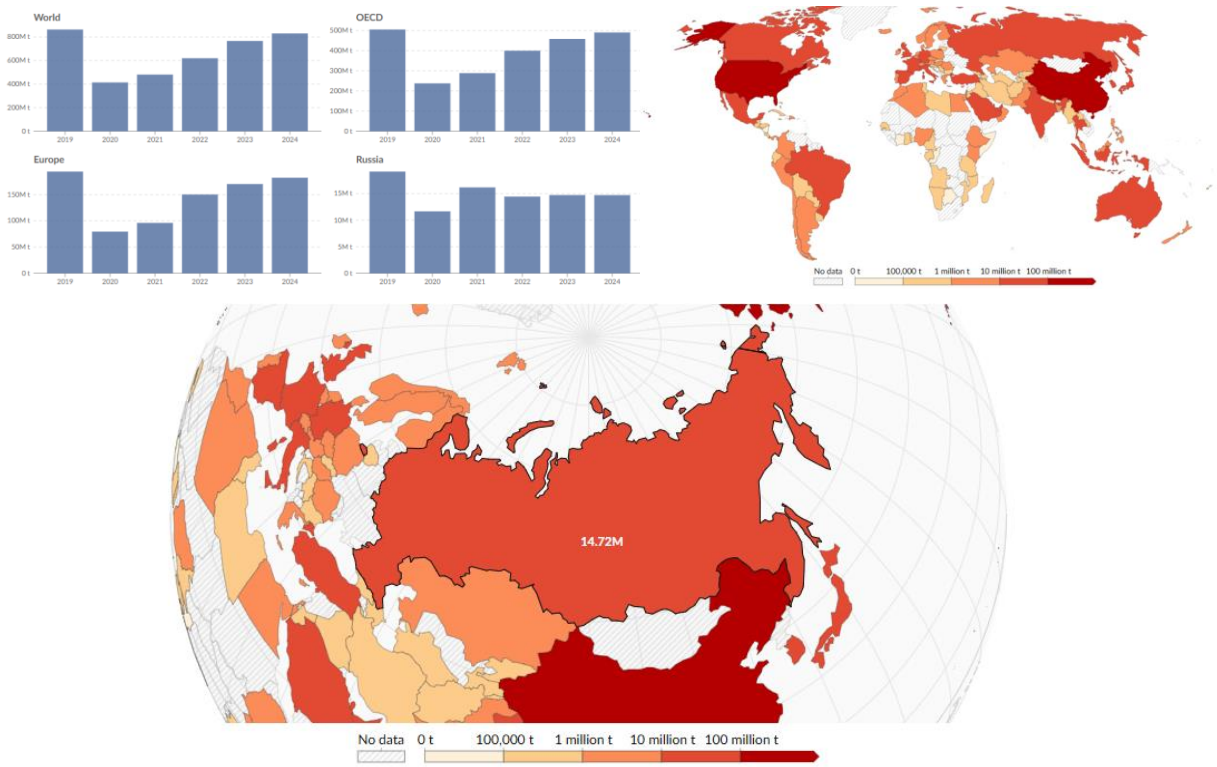



Рис. 1. Выбросы углекислого газа ($CO_2$) по миру [12].

По мере увеличения глобального воздушного движения решение проблемы воздействия авиации на окружающую среду стало критически важным приоритетом как для политиков, так и для заинтересованных сторон в отрасли. Альтернативные авиационные топлива (SAF), в частности биотоплива, предлагают многообещающий путь для сокращения углеродного следа авиации при сохранении роста отрасли и эксплуатационных стандартов [17, 19].

Исторически биотопливо циклично проходило через периоды интенсивных исследований, на которые влияли доступность ископаемого топлива, технологические разработки и геополитические факторы. Ранний интерес к биотопливу появился в 18 веке, когда Николя Карно предложил растительные масла в качестве потенциальных источников энергии. Впоследствии такие деятели, как Джордж Стефенсон и Рудольф Дизель, исследовали использование биотоплива в различных механических системах, заложив основу для исследований биодизеля [1]. Однако после Второй мировой войны доминирование топлива на основе нефти отодвинуло разработку биотоплива на задний план на несколько десятилетий.

В конце 20 века биотопливо вновь обрело спрос, поскольку росли опасения по поводу экологических последствий использования ископаемого топлива. С тех пор производство биотоплива значительно расширилось, особенно в таких регионах, как Северная Америка, Европа и Бразилия, где политические стимулы, технологическая

обеспеченность и экологическая осведомленность привели к его интеграции в различные секторы, включая авиацию [23]. Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA) поставила цели по достижению углеродно-нейтрального роста в авиации, что еще больше мотивирует разработку и внедрение биотоплива в качестве альтернативы традиционному реактивному топливу (рис. 2.) [17]. Растущая осведомленность об охране окружающей среды и приверженность авиационной отрасли принципам устойчивого развития стимулировали исследование биотоплива, специально разработанного для двигателей самолетов.

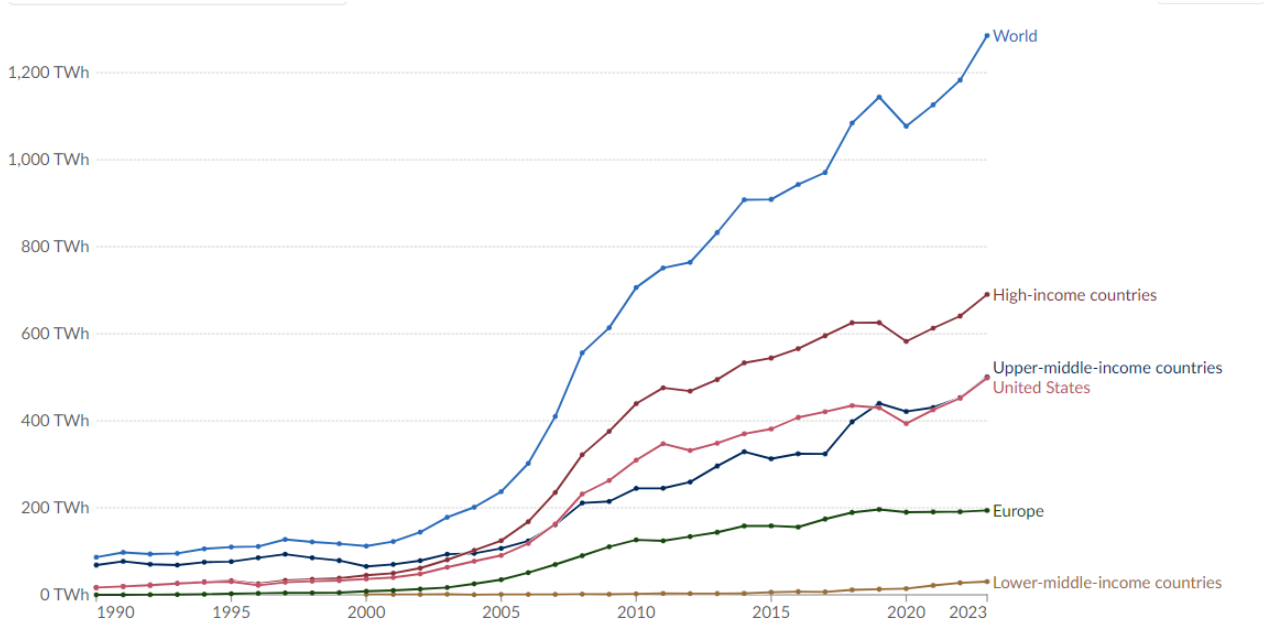



Рис. 2. Развитие использования биотоплива для производства энергии [6]

Анализ выбросов воздушных судов на РФ

Для оценки текущей ситуации и потенциала перехода на SAF необходимо понимать структуру выбросов эксплуатируемого парка. В табл. 1 и рис. 3. представлены данные по выбросам для наиболее распространенных типов воздушных судов в РФ [15, 2, 7, 6, 28].

Табл.1

Данные по выбросам от воздушных судов, эксплуатируемых в Российской Федерации [15, 2, 7, 6, 28].

| Авиакомпания | Самолет | Двигатель | Выбросы HC на взлете (г/кг) | Выбросы CO на взлете (г/кг) | Выбросы NO на взлете (г/кг) |
|---|---|---|---|---|---|
| | RRJ-95B (1) | SaM-146-1S17 | 0.03 | 0.26 | 16.37 |
| | RRJ-95LR-100(19) | SaM-146-1S18 | 0.02 | 0.3 | 17.36 |
| AZUR air | B-737-800 (1) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | B-757-2K2 (1) | Rolls Royce RB211-535 | 0.25 | 0.7 | 33.71 |
| | B757-2Q8 (6) | PW PW2040 | 0.01 | 0.32 | 35.04 |
| | B-757-28A (1) | RR RB211-535E4 | 0.25 | 0.7 | 33.71 |
| | B-767-3Q8 (2) | GE CF6-80C2B6F | 0.07 | 0.52 | 30.81 |
| | B767-3Q8ER (1) | GE CF6-80C2B6F | 0.07 | 0.52 | 30.81 |
| | B767-3YO (1) | PW PW4060 | 0.08 | 0.58 | 32.8 |
| | B-767-300ER (1) | Pratt & Whitney PW-4056s | 0.11 | 0.08 | 32.5 |
| | B767-306 (1) | Pratt & Whitney PW-4056s | 0.11 | 0.08 | 32.5 |
| | B777-31HER (1) | GE GE90-115B | 0.03 | 0.13 | 51.07 |
| IRAERO | A319-112 (1) | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | CRJ-200LR (1) | General Electric CF34-3B1 | 0.06 | 0 | 11.28 |
| | RRJ-95B (2) | SaM-146-1S17 | 0.03 | 0.26 | 16.37 |
| | RRJ-95LR-100 (4) | SaM-146-1S18 | 0.02 | 0.3 | 17.36 |
| | AN-24 (15) | AI-24 | 18 | 40 | 50 |
| | AN-26 (9) | AI-24VT | 18 | 40 | 50 |
| AEROFLOT | A320-214 (52) | CFM56-5B/4P | 0.2 | 0.9 | 28 |
| | A320-251N (2) | CFM LEAP-1A | 0.05 | 0.3 | 59.74 |
| | A321-211 (32) | CFM 56-5B1/2P | 0.1 | 0.8 | 23.3 |
| | A321-251NX (3) | CFM LEAP-1A/ Pratt&Whitney PW1000G | 0.05 | 0.3 | 59.74 |

Продолжение табл. 1

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | B-737-800 (35) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | A330-343 (11) | General Electric CF6-80E1A1 | 0.05 | 0.38 | 37.87 |
| | A350-941 (6) | RR Trent XWB-84 | 0 | 0.39 | 45.24 |
| | B777-300ER (21) | GE90-115B | 0.03 | 0.13 | 51.07 |
| NordStar | B-737-33R (1) | CFM56-3C1 | 0.03 | 0.9 | 20.7 |
| | B-737-8 (8) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| Pobeda | B-737-8 (42) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| Red Wings | B777-21H (3) | Rolls-Royce Trent 892 | 0.01 | 0.28 | 45.7 |
| | RRJ-95B (2) | SaM-146-1S17 | 0.03 | 0.26 | 16.37 |
| | RRJ-95LR-100(19) | SaM-146-1S18 | 0.02 | 0.3 | 17.36 |
| | Ty-204-100B (4) | ПС-90А | 0.1 | 0.38 | 35.69 |
| Ural Airline | A319-112 (4) | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | A320-214 (20) | CFM56-5B/4P | 0.2 | 0.9 | 28 |
| | A320-251N (3) | CFMI LEAP-1A | 0.05 | 0.3 | 59.74 |
| | A321-211 (5) | CFM 56-5B1/2P | 0.1 | 0.8 | 23.3 |
| | A321-231 (9) | CFM 56-5B1/2P | 0.1 | 0.8 | 23.3 |
| | A321-251NX (1) | CFM LEAP-1A/ Pratt& Whitney PW1000G | 0.05 | 0.3 | 59.74 |
| Russia Airline | A319-111 (14) | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | A319-114 (1) | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | A319-115 (1) | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | B-737-8 (12) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | B-737-900ER (2) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | B-747-446 (1) | GE CF6-80C2B1F | 0.08 | 0.52 | 28.06 |

Продолжение табл. 1

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | B777-31HER (4) | GE GE90-115B | 0.03 | 0.13 | 51.07 |
| | B777-312 (2) | RR Trent 892 | 0.01 | 0.28 | 45.7 |
| | RRJ-95B (69) | SaM-146-1S17 | 0.03 | 0.26 | 0.26 |
| | RRJ-95LR-100 (1) | SaM-146-1S18 | 0.02 | 0.3 | 17.36 |
| Nordwind | A321-251NX (1) | CFM LEAP-1A/ Pratt&Whitney PW1000G | 0.05 | 0.3 | 59.74 |
| | A321-211 (4) | CFM 56-5B1/2P | 0.1 | 0.8 | 23.3 |
| | A330-343 (4) | General Electric CF6-80E1A1 | 0.05 | 0.38 | 37.87 |
| | B-737-8 (9) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | B777-21H (1) | Rolls-Royce Trent 892 | 0.01 | 0.28 | 45.7 |
| | B777-31HER (2) | GE GE90-115B | 0.03 | 0.13 | 51.07 |
| S7 | A319-111 (2) | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | A320-251N (9) | CFMI LEAP-1A | 0.05 | 0.3 | 59.74 |
| | A320-214 (16) | CFM56-5B/4P | 0.2 | 0.9 | 28 |
| | A321-251NX (11) | CFM LEAP-1A/ Pratt&Whitney PW1000G | 0.05 | 0.3 | 59.74 |
| | B-737-8 (19) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | Embraer 170 (17) | GE CF34 | 0.02 | 0.66 | 15.09 |
| Utair | ATR 72 | Pratt & Whitney Canada PW100 | 0.5 | 6.3 | 10.3 |
| | B-737-8 (18) | CFM International CFM56-7B24 | 0.1 | 0.4 | 25.3 |
| | B-737-400 | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | B-737-500 | CFM56-5B6/P | 0.2 | 0.9 | 23.6 |
| | B-767-3Q8 (2) | GE CF6-80C2B6F | 0.07 | 0.52 | 30.81 |

Продолжение табл. 1

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Yamal airlines | A320-214 (6) | CFM56-5B/4P | 0.2 | 0.9 | 28 |
| | CRJ-200LR (1) | General Electric CF34-3B1 | 0.06 | 0 | 11.28 |
| | RRJ-95B (13) | SaM-146-1S17 | 0.03 | 0.26 | 0.26 |

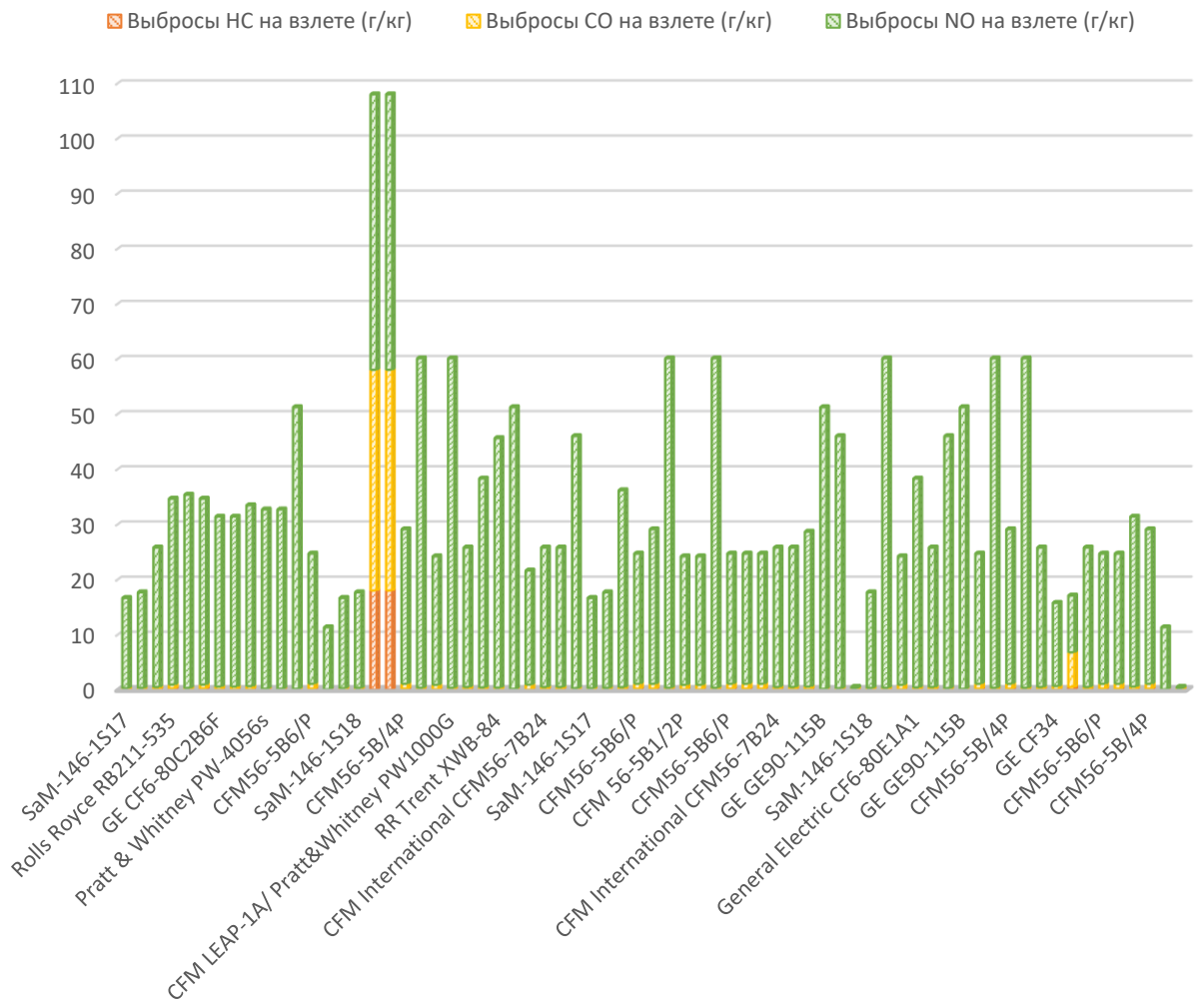



Рис. 3. График вредных выбросов для различных двигателей [15, 2, 7, 6, 28]

Проведенный анализ данных [15, 2] показывает, что самые низкие выбросы углеводородов (HC) демонстрируют самолеты RRJ-95B и RRJ-95LR-100, оснащенные двигателями SaM-146-1S17 и SaM-146-1S18 (0,02–0,03 г/кг), а также B777-300ER с двигателем GE90-115B (0,03 г/кг). Самые большие выбросы HC производят устаревшие самолеты АН-24 и АН-26 с двигателями АИ-24 и АИ-24ВТ – 18 г/кг, что значительно превышает показатели современных типов ВС.

По выбросам оксида углерода (CO) наилучшие показатели у CRJ-200LR (двигатель CF34-3B1) с нулевым значением CO. Низкие выбросы CO также у RRJ-95B (0,26–0,3 г/кг). Наибольшие выбросы CO (40 г/кг) вновь зафиксированы у АН-24 и АН-26.

Анализ выбросов оксида азота (NO) выявил более сложную картину. Самые низкие выбросы NO наблюдаются у региональных самолетов: CRJ-200LR (11,28 г/кг) и RRJ-95B (16,37–17,36 г/кг). Однако современные высокоэффективные двигатели, такие как CFM LEAP-1A (на A320neo/A321neo) и GE90-115B (на B777-300ER), демонстрируют рекордно высокие выбросы NO – до 59,74 г/кг. Это подтверждает известную проблему: снижение выбросов $CO_2$ и HC часто достигается ценой роста эмиссии NOx из-за более высоких температур и давлений в камере сгорания.

Таким образом, наиболее экологически сбалансированными являются двигатели SaM-146 и CF34. Устаревшие типы ВС (Ан-24/26) требуют скорейшего вывода из эксплуатации. Данный анализ подтверждает необходимость поиска комплексных решений, включая переход на альтернативные топлива, способные снизить эмиссию всех типов загрязняющих веществ.

**Устойчивые авиационные топлива: классификация, технологии и перспективы применения**

Биотопливо представляет собой разнообразный класс возобновляемых видов топлива, которые могут быть получены из различных органических материалов, включая растительные масла, животные жиры и сельскохозяйственные отходы. Эти виды биотоплива классифицируются на несколько поколений в зависимости от используемого сырья и технологий, применяемых при их производстве [20]. Для целей авиации биотопливо должно соответствовать строгим стандартам производительности, чтобы обеспечить совместимость с авиационными двигателями и правилами безопасности. SAF производятся из возобновляемого сырья, и их производство может следовать различным технологическим путям в зависимости от типа используемого сырья [26, 21].

Гидроочищенные растительные масла (HVO/HEFA). Гидроочищенные растительные масла (HVO), также называемые возобновляемым дизельным топливом, являются типом SAF, производимого путем гидрогенизации растительных масел, животных жиров и отработанных масел. Этот процесс гидрогенизации удаляет кислород из масел, в результате чего получается топливо, которое очень похоже по свойствам на обычное реактивное топливо [14]. HVO были тщательно

протестированы и сертифицированы для использования в авиации в соответствии с ASTM D7566, что означает их совместимость с существующими авиационными двигателями без модификаций [4]. Одним из наиболее существенных преимуществ HVO является их способность сокращать выбросы $CO_2$ за жизненный цикл до 80% по сравнению с традиционным ископаемым топливом [22].

Топливо Фишера-Тропша (FT). Топливо Фишера-Тропша (FT) – это синтетические углеводороды, получаемые из биомассы, природного газа или угля в ходе двухэтапного процесса: газификации с последующей каталитической конверсией [9]. Ключевым преимуществом топлива FT является его способность служить в качестве замены («drop-in»), то есть его можно легко смешивать с обычным ископаемым реактивным топливом без необходимости внесения каких-либо изменений в существующие авиационные двигатели или топливную инфраструктуру [8]. Помимо своей совместимости, топливо FT предлагает заметные экологические преимущества, производя значительно более низкие уровни выбросов твердых частиц и серы [25]. Однако процесс производства является очень энергоемким, а высокие капитальные затраты сдерживают его коммерциализацию [24].

Биодизель, биоводород и биометан. Биодизель широко используется в наземном транспорте, но его применение в авиации ограничено из-за высокой вязкости и температуры замерзания [18]. Биоводород, получаемый в результате биологических процессов, представляет собой путь к нулевым выбросам углерода при использовании в топливных элементах [13]. Низкая плотность энергии водорода требует криогенного хранения, что создает значительные инженерные проблемы для авиации [5]. Биометан, получаемый из органических отходов, может использоваться в модифицированных газовых турбинах, но также требует развития инфраструктуры [11].

Нормативно-правовая база и барьеры. Нормативные рамки имеют решающее значение для безопасной интеграции биотоплива в авиацию. ASTM International установила строгие правила сертификации SAF, гарантируя, что это топливо соответствует стандартам безопасности [4]. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) реализует программу CORSIA для стимулирования принятия SAF [16].

Однако широкое внедрение SAF сталкивается с рядом барьеров:

Экономические: более высокая стоимость производства по сравнению с ископаемым топливом [3];

Сырьевые: ограниченная доступность устойчивого сырья (отработанные масла) и конкуренция с пищевыми культурами [10];

Технические: необходимость обеспечения стабильности топлива при низких температурах и совместимости с материалами двигателей [27].

**Заключение**

Авиационный сектор вносит значительный вклад в антропогенные выбросы $CO_2$. Анализ парка ВС РФ показал, что, несмотря на успехи в снижении выбросов HC и CO у современных двигателей (LEAP, GE90, SaM-146), эмиссия NOx остается серьезной проблемой, особенно на крейсерских режимах полета. Устаревшие типы ВС (Ан-24/26) требуют скорейшей замены или модернизации.

Наиболее технологически готовыми решениями для ближайшей перспективы являются топлива HEFA/HRJ и FT, производимые по технологии «газ-в-жидкость». Они обеспечивают снижение жизненного цикла выбросов $CO_2$ до 80% и совместимы с существующей инфраструктурой («drop-in» решения).

Ключевыми барьерами для широкомасштабного внедрения SAF остаются: высокая себестоимость производства по сравнению с традиционным керосином, ограниченная сырьевая база (особенно для HEFA) и высокая энергоемкость процессов (для FT-топлива).

Перспективные виды топлива второго поколения (биоводород, биометан) могут обеспечить практически нулевой углеродный след, однако их коммерческое использование в авиации потребует революционных изменений в конструкции летательных аппаратов и наземной инфраструктуре, что отодвигает горизонт их внедрения за 2050 год.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию процессов газификации биомассы для FT-синтеза, разработку экономически эффективных методов очистки и поиск устойчивого непищевого сырья.

**Список литературы**

1. Биотопливо в авиации: текущие тенденции и будущие перспективы / Green.org. [Электронный ресурс]. URL: https://green.org (дата обращения:19.02.2026).

2. Реестр коммерческих перевозок / Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация). [Электронный ресурс]. URL: https://favt.gov.ru/dejatelnost-aviakompanii-reestr-komercheskie-perevozki/ (дата обращения: 19.02.2026).

3. Agusdinata D.B., Zhao F., Ileleji K., DeLaurentis D. Life cycle assessment of potential biojet fuel production in the United States // Environmental Science & Technology. 2011. Vol. 45. No. 21. P. 9133–9143.

4. ASTM International. ASTM D7566-20a: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. West Conshohocken, PA, 2020.

5. Baroutaji A., Wilberforce T., Ramadan M., Olabi A.G. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 106. P. 31–40.

6. Basati Panah M., Verhoglyadov I., Barskov V. Development of a digital twin for the TG-16 turbogenerator of AN-12 aircraft via reverse engineering // International Journal of Energy Research. 2025. P. 235–238. EDN NOJSBM.

7. Comprehensive Regression-Based Sensitivity Analysis of Geometric Parameter Effects on Gas Turbine Nozzle Performance and Stage Characteristics / M. Basati Panah, A. Balakin, M. Laptev [et al.] // International Journal of Energy Research. 2025. Vol. 2025, No. 1. P. 10.1155/er/7548518. DOI 10.1155/er/7548518. EDN SRJTHN.

8. Corporan E., et al. Emissions characteristics of a turbine engine and research combustor burning Fischer–Tropsch and conventional jet fuels // Energy & Fuels. 2011. Vol. 25. No. 3. P. 1057–1067.

9. Dry M.E. The Fischer–Tropsch process: 1950–2000 // Catalysis Today. 2002. Vol. 71. No. 3-4. P. 227–241.

10. Fargione J., Hill J., Tilman D., Polasky S., Hawthorne P. Land clearing and the biofuel carbon debt // Science. 2008. Vol. 319. No. 5867. P. 1235–1238.

11. Hagos F.Y., Aziz A.R.A., Sulaiman S.A. Trends and prospects of biogas as a sustainable fuel for aviation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 76. P. 971–984.

12. Hannah Ritchie, Pablo Rosado, and Max Roser (2023) – «$CO_2$ and Greenhouse Gas Emissions» / OurWorldinData.org. [Электронный ресурс]. URL: https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions (дата обращения: 19.02.2026).

13. Holladay J.D., Hu J., King D.L., Wang Y. An overview of hydrogen production technologies // Catalysis Today. 2009. Vol. 139. No. 4. P. 244–260.

14. Huber G.W., O'Connor P., Corma A. Processing biomass in conventional oil refineries: Production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils // Applied Catalysis A: General. 2007. Vol. 329. P. 120–129.

15. ICAO Aircraft Engine Emissions Databank / European Union Aviation Safety Agency. [Электронный ресурс]. URL: https://www.easa.europa.eu/en/domains /environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank (дата обращения: 19.02.2026).

16. International Civil Aviation Organization (ICAO). Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). Montreal, 2020.

17. Khujamberdiev, R.; Cho, H.M. Biofuels in Aviation: Exploring the Impact of Sustainable Aviation Fuels in Aircraft Engines // Energies. 2024. Vol. 17. No. 11. P. 2650.

18. Knothe G., Razon L.F. Biodiesel fuels // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 58. P. 36–59.

19. Madugu, F.U., Lea-Langton, A.R. Resource Options and Challenges for Sustainable Aviation Fuels // Key Themes in Energy Management / ed. by A. Yunusa-Kaltungo. Cham: Springer, 2024. P. 45–68.

20. Naik S.N., Goud V.V., Rout P.K., Dalai A.K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14. No. 2. P. 578–597.

21. Sims R.E., Mabee W., Saddler J.N., Taylor M. An overview of second generation biofuel technologies // Bioresource Technology. 2010. Vol. 101. No. 6. P. 1570–1580.

22. Stratton R.W., Wong H.M., Hileman J.I. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Jet Fuels. Cambridge, MA: Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction (PARTNER), 2010. 133 p.

23. Sustainable Aviation Fuels // U.S. Department of Energy. [Электронный ресурс]. URL: https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuels (дата обращения: 19.02.2026).

24. Tijmensen M.J., Faaij A.P., Hamelinck C.N., van Hardeveld M.R. Exploration of the possibilities for production of Fischer–Tropsch liquids and power via biomass gasification // Biomass and Bioenergy. 2002. Vol. 23. No. 2. P. 129–152.

25. Timko M.T., et al. Sulfur, nitrogen, and oxygen content of alternative jet fuels determines particulate matter emissions // Energy & Fuels. 2011. Vol. 25. No. 3. P. 1084–1095.

26. Wang W.C., Tao L. Bio-jet fuel conversion technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. P. 801–822.

27. Zabarnick S., Zachary J. West, Linda M. Shafer, Susan S. Mueller, Richard C. Striebich, Paul J. Wrzesinski Studies of the Role of Heteroatomic Species in Jet Fuel

Thermal Stability: Model Fuel Mixtures and Real Fuels Energy Fuels 2019, 33, 9, P. 8557–8565.

28. Zhaoren D., Basati Panah M., Okunev Y. Analyzing afterburner and turbine coordination: mechanisms of degradation and proposed enhancements for modern engines // Современные технологии и экономика в энергетике. 2025. P. 233–235. EDN LKQDXC.

## ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТРАНСПОРТА НЕФТИ

*Колбасов А.О. – магистрант, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»*

*Татаринцев В.А. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»*

**Аннотация**

Целью работы является повышение эффективности работы магистрального трубопровода транспорта нефти за счёт внедрения энергосберегающих и ресурсосберегающих технологий. Выполнен сравнительный анализ методов повышения энергоэффективности, произведены необходимые расчёты и предложено комплексное техническое решение, позволяющее достичь наилучших показателей по энергосбережению и надёжности системы транспорта нефти.

Магистральные нефтепроводы в России являются основным средством транспортировки нефти. Около 85 % всей нефти в стране транспортируется именно этим способом. В последнее время снижение объёмов перевозок нефти по железной дороге и внутренним водным путём, что связано с перераспределением грузопотоков и увеличением доли трубопроводного транспорта. Магистральные нефтепроводы (МН) остаются ключевым элементом транспортной инфраструктуры России, обеспечивая эффективную и надёжную доставку нефти от мест добычи до потребителей.

Одной из основных проблем при эксплуатации магистральных трубопроводов транспорта нефти остаётся высокая энергоёмкость процессов перекачки. Большая часть энергии расходуется на работу насосного оборудования, и значительные потери могут возникать из-за неэффективного регулирования, износа оборудования и гидравлических сопротивлений. Кроме того, цикличная работа насосов и неравномерные нагрузки снижают срок службы элементов системы и увеличивают

вероятность аварий. Поэтому актуальность приобретают современные технические решения, направленные на повышение энерго- и ресурсосбережения. К таким решениям относятся частотно-регулируемые приводы (ЧРП), применение противотурбулентных присадок (ПТП), а также регулярная внутритрубная очистка. Все эти методы позволяют не только сократить энергозатраты, но и продлить срок службы оборудования, улучшить гидравлические параметры системы и повысить её надёжность.

Исследованиями [1, 4, 5] установлено, что внедрение частотно-регулируемого привода (ЧРП) является наиболее эффективным способом повышения общей энергоэффективности системы магистральных нефтепроводов. Применение ЧРП позволяет снизить расход электроэнергии на перекачку более чем на 18 %, а также значительно увеличить межремонтные интервалы электродвигателей и трубопроводов [9]. За счёт сокращения количества пусков, стабилизации режима работы насосных агрегатов и уменьшения амплитуды колебаний давления срок службы оборудования увеличивается в среднем в 2,2 раза.

Однако для дальнейшего увеличения ресурсо- и энергосбережения целесообразно дополнительно использовать противотурбулентные присадки (ПТП). Применение ПТП способствует стабилизации потока нефти, снижению гидравлических сопротивлений и, как следствие, дополнительному сокращению энергозатрат. Следует отметить, что интеграция ПТП требует дополнительных расходов на закупку и введение присадки, что увеличивает стоимость проекта. Тем не менее, комплексное применение ЧРП и ПТП позволяет добиться максимального повышения эффективности работы трубопроводной системы и насосных агрегатов.

Совместное применение ЧРП и ПТП обеспечивает не только снижение энергозатрат, но и уменьшение потерь давления в системе, что особенно важно на длинных участках магистрали. Однако при объединении ЧРП и ПТП возникает проблемы координации их работы. К ним относится:

— ПТП без интеллектуального управления подаётся либо по фиксированному графику, либо вручную оператором;

— такая подача не учитывает текущие параметры потока – расход, вязкость, температуру, давление.

В условиях колебаний производительности, температуры нефти, сезонных изменений, режим постоянного дозирования ПТП может привести к:

— перерасходу дорогостоящей присадки;

— отсутствию эффекта от дозирования в неподходящие моменты;

— дисбалансу между режимами насоса и гидравликой трубопровода.

Чтобы ЧРП и ПТП работали как единая система, требуется комплексное автоматизированное управление. Эту функцию выполняет *SCADA*-система как центральное звено в системе управления [3]. *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*) – программно-аппаратный комплекс сбора данных и диспетчерского контроля, используемый для мониторинга и управления технологическими процессами. *SCADA*-система объединяет:

— частотно-регулируемые приводы (ЧРП);

— насос-дозаторы ПТП;

— систему датчиков (давление, температура, расход, вязкость);

— операторский интерфейс и архив.

С помощью *SCADA*-система реализуется адаптивный алгоритм, в ходе которого в реальном времени опрашиваются датчики, установленные на участке:

— давление (*PD*);

— температура (*TD*);

— расход (*FQ*);

— (опционально) вязкость.

На основе показаний определяет характеристики потока:

– если температура низкая, то вязкость увеличивается;

– если расход высокий, то усиливается турбулентность;

– если давление на выходе растёт, то возможны повышенные потери.

*SCADA*-система анализирует необходимость дозирования ПТП:

– при высоких потерях давления и повышенной вязкости система активирует насос-дозатор;

– при нормализации параметров – отключает дозирование.

Одновременно система регулирует частоту вращения насоса через ЧРП, чтобы:

– обеспечить нужный расход при минимальной затрате электроэнергии;

– поддерживать стабильное давление.

Связь между ЧРП и ПТП:

– если ЧРП увеличивает частоту (увеличивается расход), то *SCADA*-система автоматически увеличивает дозу ПТП;

– если ЧРП снижает частоту (падает производительность), то *SCADA*-система пропорционально снижает подачу ПТП.

Таким образом, дозирование и работа насоса находятся в прямой зависимости друг от друга. ЧРП и ПТП работают синхронно, а управление ими происходит централизованно [2]. Это позволяет избежать перерасхода присадки, снизить нагрузку на насосы, обеспечить стабильные параметры перекачки.

Выполним расчёт эффективности частотного привода и противотурбулентных присадок как единой системы под управлением *SCADA*-системы.

Примем, что энергия до внедрения (базовая): $E_0$ = 100 %, ЧРП снижает энергопотребление на $E_1$ (%), ПТП снижает энергопотребление на $E_2$ (%) от первоначального значения.

Тогда остаточная энергия после ЧРП будет равна:

$$E_{\text{ЧРП}} = 1 - E_1. \quad (1)$$

Оставшееся энергопотребление после ПТП применяется к результату после ЧРП, а не к исходному уровню:

$$E_{\text{ост}} = E_{\text{ЧРП}} \cdot (1 - E_2) \quad (2)$$

Тогда итоговая экономия:

$$E_{\text{сумм}} = 1 - (1 - E_1) \cdot (1 - E_2). \quad (3)$$

Снижение от ЧРП $E_1 = 28308/335000 = 0{,}08$; снижение от ПТП $E_2 = \frac{17523}{335000} = 0{,}05$

Суммарная эффективность

$E_{\text{сумм}} = 1 - (1 - 0{,}08) \cdot (1 - 0{,}05) = 1 - 0{,}8165 \cdot 0{,}9539 = 0{,}126$ или 12,6 %.

Для дальнейшего повышения энерго- и ресурсоэффективности целесообразно дополнительно использовать противотурбулентные присадки (ПТП). Добавление ПТП позволяет снизить коэффициент гидравлического сопротивления потока до 17,6 %, что дополнительно сокращает энергопотребление на 4…5 %. Влияние ПТП на ресурс оборудования проявляется в снижении вибраций и внутренних нагрузок в насосах и трубопроводах, что может привести к увеличению межремонтных интервалов примерно на 5…7 % относительно базового уровня эксплуатации без присадок.

Применение ПТП требует дополнительных эксплуатационных затрат на закупку и дозирование присадки, что увеличивает стоимость эксплуатации участка. Однако комплексное использование ЧРП и ПТП обеспечивает максимальное снижение энергозатрат, повышение надёжности системы и продление срока службы оборудования, что делает данный вариант наиболее эффективным с технической точки зрения.

Схема работы НПА с частотным приводом в совокупности с противотурбулентными присадками под управлением системы *SCADA* показана на рисунке.

1. Основная линия трубопровода:

– горизонтальная стрелка показывает направление потока транспортируемой среды (нефти) по магистральному трубопроводу – слева направо;

– на трубопроводе установлены датчики:

– *PD* – датчики давления (*Pressure Detector*), установлены до и после насоса для контроля перепада давления;

– *TD* – датчики температуры (*Temperature Detector*), позволяют отслеживать изменение вязкости среды;

– *FQ* – датчик расхода (*Flow Quantity*), определяет объём перекачиваемой жидкости.

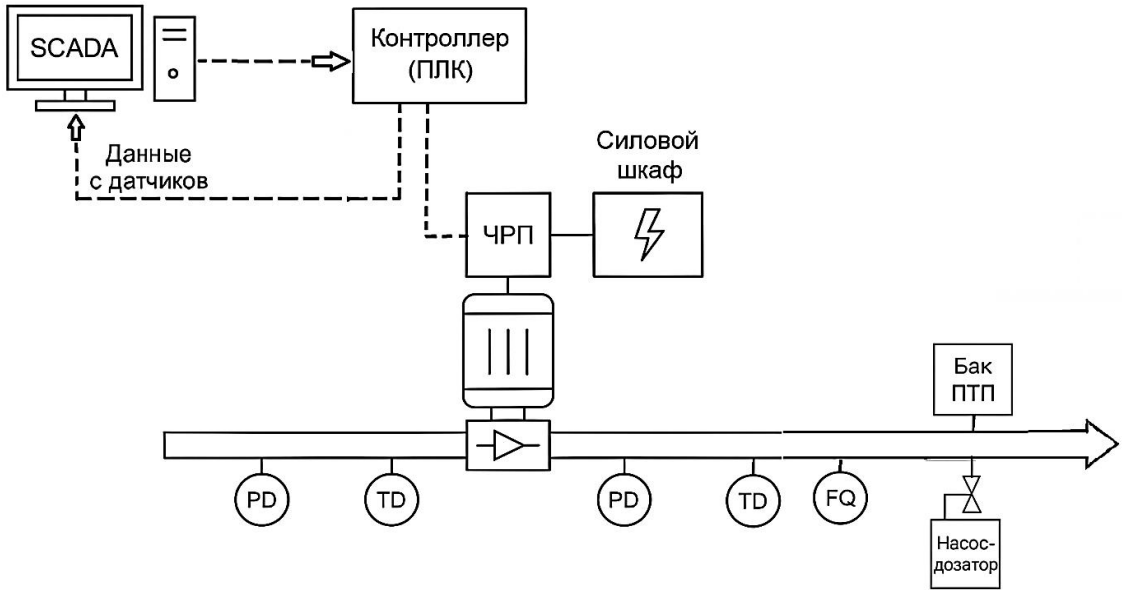



Рис. 1. Схема работы НПА с частотным приводом в совокупности с противотурбулентными присадками под управлением системы *SCADA* [2]

2. Насосный агрегат с частотно-регулируемым приводом (ЧРП):

— в центре схемы изображён магистральный насос, соединённый с электродвигателем;

— питание электродвигателя осуществляется через частотно-регулируемый привод (ЧРП).

ЧРП управляет частотой вращения двигателя, обеспечивая:

— поддержание нужного расхода и давления;

— снижение энергозатрат за счёт адаптации режима работы под фактические условия.

3. Силовой шкаф и контроллер (ПЛК):

— силовой шкаф обеспечивает питание ЧРП;

— ПЛК (программируемый логический контроллер) управляет ЧРП и насос-дозатором на основе сигналов с датчиков.

Связь между *SCADA* и ПЛК осуществляется по промышленному протоколу (например, *Modbus TCP/IP*).

ПЛК обменивается данными с:

— датчиками (*PD, TD, FQ*);

— ЧРП;

— насос-дозатором ПТП.

Пунктирные линии обозначают сигнальные линии – обмен данными и командами управления.

4. Система подачи противотурбулентных присадок (ПТП).

В правой части схемы изображена система дозирования ПТП, которая состоит из:

— бака ПТП – ёмкости с присадкой;

— насоса-дозатора – устройства, которое подаёт присадку в трубопровод в нужный момент.

Подача ПТП осуществляется после насоса, так как при прохождении через насос присадка теряет эффективность. Насос-дозатор получает команды от ПЛК, который решает, когда и в каком объёме подавать присадку – в зависимости от давления, температуры и расхода.

5. *SCADA*-система.

В левой части схемы – операторская станция *SCADA*, которая выполняет следующие действия:

— получает данные с датчиков (через ПЛК);

— отображает параметры в реальном времени;

— позволяет оператору управлять режимом работы насосов и дозаторов;

— архивирует данные и фиксирует аварийные события.

*SCADA*-система передаёт команды ПЛК для изменения частоты ЧРП и включения дозатора ПТП при необходимости.

Итоговая работа схемы:

— контроллер ПЛК является центром локального управления: он анализирует данные с датчиков и управляет оборудованием;

— *SCADA* – «мозг» всей системы, обеспечивает централизованный контроль, визуализацию и оптимизацию.

В нормальных условиях *SCADA* совместно с ПЛК:

— регулируют скорость насоса через ЧРП;

— управляют дозированием ПТП;

— обеспечивают энергоэффективную и устойчивую работу магистрального участка трубопровода.

Состав схемы магистрального нефтепровода с внедренным частотным приводом и дозатором противотурбулентных присадок в единую систему под управлением *SCADA*-системы представлен в табл. 1.

Табл. 1

Состав схемы нефтепровода в единой системе под управлением *SCADA* [2, 3]

| Элемент | Наименование | Основные характеристики | Стоимость |
|---|---|---|---|
| Насос | НМ 10000×210 | *Q* =1 0 000 м³/сут, *H*=210 м | Замена не требуется – уже в составе |
| Электродвигатель | СТД-8000-2РУХЛ4 | 8000 кВт, 3000 об/мин, 6 кВ | Замена не требуется – уже в составе |
| ЧРП | ПЧВ-8000-6 | 8000 кВт, 6 кВ, векторное управление | ≈25 млн руб. за 1 устройство |
| Датчик давления (*PD*) | ДД1000П-*P*-*Exd* | До 10 МПа, *Exd*-взрывозащита | 2 шт. на станцию (вход/выход) ≈ 45 000 руб./шт. |
| Датчик температуры (*TD*) | ТСП-0879 | От -40 до +200 °C | ТСП-0879 – 2 шт./станция ≈ 8 000 руб./шт. |
| Расходомер (*FQ*) | ПРЭМ-2 | Ультразвуковой, до 12000 м³/сутки | ПРЭМ-2 (ультразвуковой) ≈ 300 000 руб./шт |
| *SCADA* | «КРУГ-2000» (Россия) | Российская *SCADA*-платформа, *Modbus*, архив, визуализация | ≈ 12 млн руб. |

Оценим изменения межремонтных интервалов на ремонт трубопроводов при внедрении комплексного технического решения. Одним из критически важных аспектов эксплуатации магистральных нефтепроводов является обеспечение надёжности трубопроводной системы и продление срока её безопасного функционирования. Особенно это актуально в условиях циклического режима перекачки, при котором насосные станции работают с переменным числом включений (отключений) агрегатов [6, 7].

*Влияние циклического режима на состояние трубопровода.* При работе насосных станций в циклическом режиме происходят регулярные колебания давления на входе и выходе. Эти колебания вызывают переменные механические напряжения в стенках трубопровода. При незначительных амплитудах такие нагрузки могут быть безопасны. Однако в условиях высоких перепадов давления существует риск формирования микротрещин. Со временем эти дефекты могут прогрессировать, сокращая ресурс трубы и повышая вероятность аварийных ситуаций. Статистика показывает, что более 30% повреждений приходится на участки, проработавшие свыше 20 лет. Основной причиной служит накопление усталостных повреждений в материале. В этой связи стабилизация режима работы насосных агрегатов является важным фактором повышения надёжности.

*Воздействие ЧРП на нагрузочный режим трубопровода.* Применение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) позволяет устранить или существенно снизить амплитуду давления в трубопроводе. Постоянный режим перекачки снижает количество пусков и остановок насосов, а следовательно – и число циклов нагружения труб. Это замедляет развитие усталостных дефектов.

Согласно положениям РД-23.040.00-КТН-265-10, безопасный срок эксплуатации участка трубопровода определяется по формуле:

$$T_A = \frac{N_{\min} \cdot k}{N_g \cdot n}, \tag{4}$$

где $N_{\min}$ – число циклов до возникновения трещины;

$N_g$ – годовая цикличность нагружения;

$N$ – коэффициент запаса прочности,

$N = 10$;

$k$ – коэффициент долговечности, зависящий от условий эксплуатации.

*Сравнение сроков службы при внедрении и без ЧРП.* Если трубопровод эксплуатируется без ЧРП, в формуле используется фактическое значение цикличности нагружения за последний отчётный период:

$$T_{\text{А.Ф.}} = \frac{N_{min} \cdot k}{N_{\text{ф}} \cdot n},$$

При использовании ЧРП используется аналогичная формула, но с заменого параметра цикличности:

$$T_{\text{А.ЧРП}} = \frac{N_{min} \cdot k}{N_{\text{ЧРП}} \cdot n}.$$

При одинаковых значениях $N_{min}$, $k$ и $n$ из формул следует:

$$\frac{T_{\text{А.ЧРП}}}{\text{Т}_{\text{А.Ф}}} = \frac{N_{\text{ф}}}{N_{\text{ЧРП}}}.$$

Отношение $T_{\text{А.ЧРП}}/T_{\text{А.Ф}}$ – представляет собой коэффициент $k_{\text{Б.Э}}$. Отсюда примем исходя из прошлых расчетов что $k_{с.ц} \approx 2{,}2$; следовательно: $k_{\text{Б.Э}} = k_{\text{С.Ц}} = 2{,}2$

$$\frac{T_{\text{А.ЧРП}}}{T_{\text{А.Ф}}} = 2{,}2; \;\; T_{\text{А.ЧРП}} = 2{,}2T_{\text{А.Ф}}.$$

Срок эксплуатации участка трубопровода при внедрении ЧРП может быть увеличен примерно в 2,2 раза по сравнению с базовым циклическим режимом. Связь межремонтных интервалов с безопасным сроком эксплуатации.

Межремонтные интервалы напрямую связаны с долговечностью трубопровода. Если обозначить: $T$ – рассматриваемый временной интервал (например, 10 лет); $T_{\text{МР.Ф}}$ – средний межремонтный интервал при циклической работе (без ЧРП); $T_{\text{МР.ЧРП}}$ – межремонтный интервал при работе с ЧРП, то количество ремонтов трубы за период можно определить, как

$$n_{p1} = \frac{T}{T_{\text{МР.Ф}}} \text{(без ЧРП)}, \;\; n_{p2} = \frac{T}{T_{\text{МР.ЧРП}}} \text{(с ЧРП)}.$$

Поскольку межремонтный интервал пропорционален сроку безопасной эксплуатации, то

$$\frac{T_{\text{МР.ЧРП}}}{T_{\text{МР.Ф}}} = \frac{T_{\text{А.ЧРП}}}{T_{\text{А.Ф}}} = k_{\text{С.Ц}},$$

подставляя это соотношение, находим:

$$n_{p2} = \frac{n_{\text{р1}}}{k_{\text{с.ц}}} = \frac{T}{T_{\text{МР.Ф}} \cdot k_{\text{С.Ц}}}.$$

Таким образом, количество ремонтов участка трубопровода за определённый период эксплуатации снижается прямо пропорционально коэффициенту снижения цикличности нагружения. При $k_{\text{С.Ц}}$ = 2,2 число ремонтных операций также сокращается в 2,2 раза, что приводит к снижению затрат на обслуживание и повышает надёжность системы в целом [7].

**Список используемых источников**

1. Артюшкин В.Н., Тян В.К. Энергосбережение при эксплуатации магистральных насосных агрегатов: учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 112 с.

2. Белоглазов И.И. Совершенствование автоматизации процессов нефтепереработки с использованием *SCADA*-системы genesis // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 4-2 (23). С. 9–11.

3. Давыдов О.А., Коломыцев Н.В. Разработка системы диспетчерского контроля и сбора данных с установок нефтеперекачивающих станций // Вестник ТОГУ. 2023. № 3 (70). С. 89–98.

4. Коршак А.А. Ресурсо- и энергосбережение при транспортировке и хранении углеводородов: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2016. 410 с.

5. Самоленков С. В., Кабанов О. В. Исследование способов энергосбережения при транспорте нефти // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 81–84.

6. Татаринцев В.А. Анализ рисков и обоснование уровня надежности элементов трубопроводного транспорта // Нефтегазовый терминал: сборник научных трудов международной научно-технической конференции имени профессора Н.А. Малюшина; под общей редакцией М.А. Александрова. Тюмень, 2021. С. 171–178.

7. Татаринцев В.А., Васильев А.В. Обоснование рационального уровня надёжности элементов трубопроводного транспорта // Нефтегазовый терминал. Материалы международной научно-технической конференции. Тюмень. 2022. С. 202–207.

8. Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Калимгулов А.Р. Ревель-Муроз П.А. Оценка эффективности применения ЧРП на объектах магистральных нефтепроводов по снижению расхода электроэнергии // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 1. № 14. С. 130–138.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ В ЛОГИСТИКЕ КАК СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ УСЛУГ

*Пермовский А.А. – к.э.н., доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина»*

*Викулова Ю.В. – студент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный педагогический университет имени Козьмы Минина»*

**Аннотация**

В статье раскрыты сущность и целевые ориентиры инновационной логистики, а также актуальные требования, предъявляемые к логистической деятельности современных предприятий. Проведён анализ инновационных подходов в логистике, направленных на совершенствование транспортных услуг.

В условиях глобализации мировой экономики и экспоненциального развития технологических процессов объективно возрастает потребность в перманентном повышении качества транспортных услуг. Субъекты логистической деятельности сталкиваются с необходимостью не только оптимизации существующих операционных процессов, но и имплементации инновационных решений, предполагающих отход от традиционных методологических установок.

Институционализация инновационных подходов в транспортной логистике обеспечивает предприятиям существенные конкурентные преимущества, способствуя:

- повышению операционной эффективности;
- снижению издержек;
- улучшению качественных показателей предоставляемых услуг.

Согласно концептуальному подходу Н. Д. Ома, инновации представляют собой специфический вид научно-технической деятельности, сущностной характеристикой которого выступает целенаправленное совершенствование общественного производства. Ключевая цель такой деятельности – создание модернизированной продукции, обладающей качественно улучшенными эксплуатационно-техническими параметрами [1].

К числу релевантных показателей, отражающих инновационную составляющую продукта, относятся:

– надёжность (устойчивость к внешним воздействиям, длительный срок службы);

– качество (соответствие нормативным требованиям и ожиданиям потребителя);

– эргономичность (простота и комфорт эксплуатации);

– ремонтопригодность (возможность оперативного восстановления работоспособности);

– мощность (энергетическая эффективность и производительность);

– экологичность (минимизация негативного воздействия на окружающую среду);

– производительность (оптимизация соотношения затрат и результата).

В контексте логистики данный подход обретает особую значимость: инновационная логистика трактуется как системная деятельность, направленная на оптимизацию транспортно-логистических процессов при одновременном снижении издержек автотранспортных предприятий. Её целеполагание включает:

– совершенствование организации перевозок – за счёт внедрения интеллектуальных систем маршрутизации, прогнозирования транспортных потоков и мультимодальных решений, обеспечивающих минимизацию временных и финансовых затрат;

– оптимизацию погрузочно-разгрузочных операций – через автоматизацию складских процессов, применение робототехники и цифровых платформ для координации действий участников цепи поставок;

– снижение операционных издержек – путём интеграции технологий «умной» логистики (IoT, Big Data, блокчейн), позволяющих повысить прозрачность и управляемость процессов;

– повышение экологической устойчивости – посредством внедрения «зелёных» логистических практик (электромобильный транспорт, оптимизация топливных расходов, рециклинг упаковочных материалов) [2].

Инновационная логистика выходит за рамки узкотехнических улучшений, трансформируясь в стратегический инструмент конкурентоспособности. Её эффективность определяется способностью:

– интегрировать передовые технологические решения;

– обеспечивать баланс между качеством сервиса и экономической целесообразностью;

– адаптироваться к динамичным рыночным условиям и регуляторным требованиям.

В современных условиях ключевыми драйверами развития инновационной логистики становятся:

– цифровизация (искусственный интеллект, цифровые двойники логистических систем);

– устойчивое развитие (ESG-принципы);

– коллаборативные модели взаимодействия участников цепи поставок.

Это позволяет рассматривать инновационную логистику не только как средство оптимизации текущих операций, но и как фактор долгосрочной трансформации транспортно-логистического комплекса в целом.

Российские учёные активно исследуют новые методы в области логистики, уделяя особое внимание цифровизации, адаптации к санкциям и повышению устойчивости логистических систем. Среди этих исследователей выделяются Ю.В. Рагулина, М.А. Ушаков и М.А. Чаруйская [3,4].

В научной статье «Инновации в управлении логистическими процессами» Ю.В. Рагулина приходит к выводу, что вложения в инновационные логистические решения представляют собой стратегические инвестиции в перспективное развитие бизнеса. Такие инвестиции позволяют сформировать гибкую и адаптивную логистическую систему, которая эффективно реагирует на динамику рыночной конъюнктуры и эволюцию потребительского спроса. При этом автор подчёркивает: успешная автоматизация логистических процессов требует комплексного подхода, предполагающего не просто внедрение передовых технологий, но и переосмысление существующих бизнес-функций наряду с продуманным управлением организационными изменениями [3].

В исследованиях М.А. Чаруйской и М.А. Ушакова основное внимание сосредоточено на вопросах адаптации логистических систем к актуальным вызовам современности. Учёные подчёркивают значимость цифровых технологий и необходимость выработки стратегической линии развития логистики в условиях экономической нестабильности. Их работы демонстрируют ключевые тренды в области инновационных логистических решений – от внедрения передовых технологий до учёта ограничений, вызванных санкционным режимом [4].

По мнению авторов, на сегодняшний день развитие промышленной логистики в России формируется под влиянием комплекса факторов как внешнего, так и внутреннего порядка. Среди них – глобальные экономические сдвиги, действие санкционных ограничений, сбои в международных цепочках поставок, а также неуклонный рост логистических затрат. Анализ ситуации позволил выявить ряд существенных препятствий для прогресса в сфере промышленной логистики. К ним относятся: завышенная стоимость транспортных услуг, отставание в развитии инфраструктурной базы и трудности, связанные с импортозамещением. В качестве перспективных векторов совершенствования логистической сферы исследователи выделяют два ключевых направления: масштабную цифровизацию операционных процессов и выстраивание кооперационных связей между предприятиями в рамках логистических сетей.

Для достижения устойчивых результатов требуется системное стратегическое планирование и реализация комплексных мер, нацеленных на повышение эффективности логистических систем. Такой подход открывает возможности для существенного снижения рисков и издержек, а также способствует росту конкурентоспособности российских промышленных предприятий в изменившихся экономических условиях [4].

Таким образом, инновационная трансформация логистических процессов выступает ключевым фактором устойчивого развития транспортных предприятий в условиях современной рыночной конъюнктуры.

Выбор инновационных подходов в логистике для совершенствования транспортных услуг характеризуется комплексом специфических черт, обусловленных системной природой логистических процессов и динамикой современного рынка.

Ключевой особенностью выступает ориентация на системную оптимизацию. Инновации направлены не на фрагментарное улучшение отдельных операций, а на трансформацию всей цепочки создания ценности. Это подразумевает глубокую

синхронизацию транспортных, складских и информационных потоков, интеграцию участников цепи поставок в единую цифровую среду, а также целенаправленную минимизацию «узких мест» на межфункциональных стыках.

Существенную роль играет технологическая конвергенция – синергия прорывных решений, включающая искусственный интеллект для прогнозирования спроса и оптимизации маршрутов, интернет вещей (IoT) для мониторинга грузов в реальном времени, блокчейн для обеспечения прозрачности документооборота, роботизацию складских операций и аналитику Big Data. Подобное сочетание технологий формирует качественно новый уровень управления логистическими процессами.

Важнейшим аспектом остаётся адаптивность к внешним вызовам. Инновационные подходы позволяют оперативно реагировать на изменения рыночной конъюнктуры, снижать риски, связанные с геополитической нестабильностью, учитывать экологические нормативы (в том числе при переходе к «зелёной» логистике), а также соответствовать возрастающим требованиям клиентов к скорости и прозрачности услуг.

При этом экономическая эффективность выступает определяющим критерием отбора инноваций. Внедрение новых решений подчиняется принципу соотношения затрат и выгод. Автоматизация способствует снижению удельных логистических издержек, алгоритмическая оптимизация сокращает время доставки, а цифровизация контроля минимизирует потери от простоев и ошибок. Приоритет отдаётся проектам с доказанным возвратом инвестиций.

Не менее значим кадрово-организационный аспект. Успех инноваций напрямую зависит от переподготовки персонала, формирования культуры непрерывных улучшений и трансформации управленческих моделей в сторону большей гибкости. Без развития человеческого капитала технологические вложения рискуют остаться нереализованными.

Особую специфику придаёт регуляторная обусловленность. Выбор инноваций ограничен требованиями национального и международного законодательства (включая стандарты безопасности перевозок), необходимостью сертификации новых решений и требованиями к кибербезопасности цифровых платформ. Это обусловливает необходимость тщательного анализа нормативно-правовой среды на предварительном этапе.

Характер внедрения инноваций носит экспериментально-итеративный характер. От пилотных проектов для оценки эффективности – к масштабированию

успешных кейсов с последующей корректировкой решений на основе обратной связи. Такой поэтапный подход позволяет минимизировать риски крупномасштабных сбоев.

Особенность выбора инновационных подходов в логистике заключается в необходимости балансировать между технологическим потенциалом и экономической целесообразностью, глобальной интеграцией и локальными ограничениями, радикальными преобразованиями и постепенной адаптацией. Ключевым критерием выступает способность инновации обеспечить устойчивое повышение качества транспортных услуг при сохранении операционной устойчивости системы.

**Список используемых источников**

1. Ом Н.Д. Инновационные технологии в транспортной логистике // Наукосфера. 2022. № 11-2. С. 220–223.

2. Полянская В.А., Кутепова Л.И., Романова Ю.В. Цифровая трансформация экономики: оценка текущего состояния и перспективы развития // Экономика и предпринимательство. 2025. № 2(175). С. 377–383.

3. Рагулина Ю.В. Инновации в управлении логистическими процессами // Экономическая безопасность. 2025. Т. 8, № 4. С. 993–1006.

4. Ушаков М.А., Чаруйская М.А. Современные вызовы и перспективы развития промышленной логистики в Российской Федерации // Прогрессивная экономика. 2025. № 2. С. 84–97.

## РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ОБРАТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

*Сахаров С.М. – магистрант, Институт Энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

*Басати Панах М. – к.т.н., доцент, Институт Энергетики, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

**Аннотация**

Актуальность работы обусловлена критической зависимостью российского топливно-энергетического комплекса от импортного высокотехнологичного оборудования и необходимостью

обеспечения ремонтопригодности газотурбинных установок в условиях санкционных ограничений. Объектом исследования является лопатка входного направляющего аппарата (ВНА) осевого компрессора мощностью 11,6 МВт. Цель работы – разработка научно-обоснованной методики обратного проектирования, обеспечивающей геометрическую и функциональную адекватность воспроизводимой детали оригиналу. В ходе исследования применен комплексный подход, включающий прецизионную оптическую 3D-оцифровку, металлографический и спектральный анализы материала, конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния. Научная новизна заключается в адаптации метода «мастер-модели» для восстановления сложнопрофильной поверхности пера лопатки с контролем сопряжения G0/G1, а также в разработке критериев верификации цифрового двойника на основе сравнительного анализа с исходной полигональной моделью. Практическая значимость работы подтверждена изготовлением опытного образца, полностью идентичного оригиналу по геометрическим параметрам и прочностным характеристикам.

## Введение

Современное состояние российской экономики определяется развитием ключевых секторов промышленностей, среди которых особое место занимают электроэнергетический, топливно-энергетический, химический и нефтехимический сферы. Эффективность функционирования этих сфер оказывает непосредственное влияние на национальную безопасность, конкурентоспособность экономики и благополучие граждан.

В настоящий период экономика РФ оказалась под влиянием санкционных мер, последствия которых уже ощутимы и обостряют существовавшие проблемы зависимости от экспорта наукоемкого оборудования, высокого износа энергообъектов и инфраструктуры энергорынка, также ситуация осложняется прекращением поставок необходимого для надёжного функционирования электроэнергетического сектора оборудования и обслуживании эксплуатируемого оборудования на предприятиях [7, 13].

По причине медленного развития отрасли машиностроения нет возможности полностью отказаться от импорта оборудования. На рисунке 1 продемонстрированы объемы импорта в различных сферах за 2016-2025 гг. Импорт машиностроительной продукции на протяжении всего периода остаётся крупнейшей группой в структуре импорта, что составляет около 50% [11].

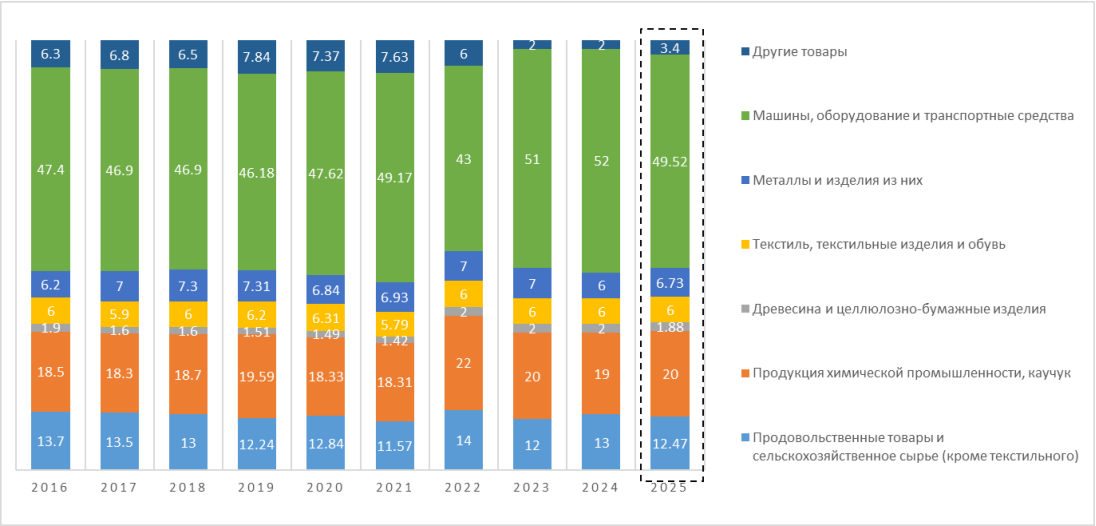
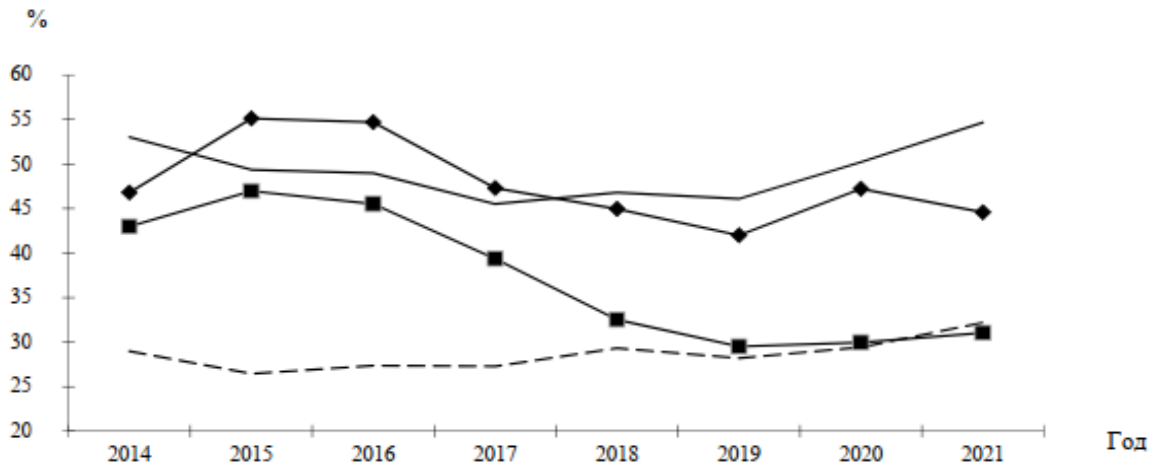



Рис. 1. Импорт в экономику РФ в различных сферах с 2016 по 2025 гг.

Источник: составлено автором

В различных секторах ТЭК уровень зависимости составляет 20–60%. На рисунке 2 скользящая средняя за 2014–2021 г.г. уровня зависимости от импортного оборудования в секторах ТЭК.




*– – –нефтегазовый сектор; —нефтедобывающий сектор; –■–электроэнергетика и теплоснабжение; –◆–угольный сектор и горнодобывающая промышленность*

Рис. 2. Среднее скользящее за три года значение уровня зависимости от импортного оборудования в секторах ТЭК за 2014–2021 гг. [5]

Наиболее острая ситуация в производстве газовых турбин – одной из наиболее высокотехнологических подотраслей энергетического машиностроения. Доля импорта в потреблении в 2014 г. по данным Минпромторга была 80–100%, и ситуация серьезно не изменилась в настоящее время [5].

Доля общего количества оборудования газовых турбин на объектах генерации и электросетевых объектах занимает 68% [1]. В газоперекачивающей области доля зарубежного оборудования приближается к 20% [4].

Можно выделить следующие ГТУ, находящиеся в эксплуатации у различных компаний топливо-энергетического комплекса, переработки нефти и газа и выработки тело-электроэнергии: Solar Turbines (Titan 130, Titan 250, Taurus 60s, Taurus 70, Centaur 50, Mars 100, Centaur 40), Siemens (SGT 400, SGT 600, SGT 700, SGT 800). В таблице 4 сведены данные по количеству эксплуатируемым ГТУ на основе данных из [6].

Табл. 1

Перечень наиболее часто встречающихся ГТУ иностранного производства на производствах РФ

| Наименование ГТД | Ед. |
|---|---|
| Solar Turbines Taurus 60s | 21 |
| Solar Turbines Taurus 70 | 5 |
| Solar Turbines Centaur 40 | 8 |
| Solar Turbines Centaur 50 | 6 |
| Solar Turbines Mars 100 | 11 |
| Solar Turbines Titan 130 | 13 |
| Solar Turbines Titan 250 | 1 |
| Siemens sgt 400 | 21 |
| Siemens sgt 600 | 3 |
| Siemens SGT-600 в составе ГПА «Балтика-25» | 6 |
| Siemens SGT 700 | 21 |
| Siemens SGT 800 | 55 |
| MS-5002E в составе ГПА «Ладога» | 90 |
| MS-3002 в составе ГТК-10 | 150 |

Источник: составлено автором

Ужесточение санкций со стороны европейский и американских партнеров, прерывание цепочек поставок оборудования и отсутствие квалифицированных специалистов по обслуживанию остро подсвечивает вопросы, связанные с обслуживанием эксплуатируемого оборудования на предприятиях топливоэнергетических, нефтеперерабатывающих и других ключевых предприятиях РФ. Отсутствия оригинальных ЗИП или возможности их закупки ввиду санкций, дороговизна оригинальных ЗИП по причине невозможности прямого импорта и прибегание к параллельному импорту приводит к необходимости в кротчайшие сроки решать вопросы, связанные с поддержание работоспособности оборудование.

Одним из методов решения данной задачи является применение технологий обратного проектирования. Реверс-инжиниринг или обратное проектирование – наиболее достоверный и быстрый метод воссоздания изделия. Обратный инжиниринг включает в себя комплекс технологий, аппаратных и программных средств, необходимых для анализа и получение объема данных об исходном объекте с целью получения изделий, не уступающим по параметрам работоспособности объекту исследования [12].

**Формирование методологии обратного проектирования**

В условиях ограниченного доступа к оригинальной конструкторской документации и комплектующим изделиям зарубежного производства обратный инжиниринг становится одним из ключевых инструментов инженерного анализа и воспроизводства машиностроительных агрегатов. Современное обратное проектирование представляет собой комплексный научно-технический процесс, направленный на восстановление конструктивной логики изделия, анализ применяемых материалов и технологий, а также адаптацию решений под требования действующей нормативной базы и производственные возможности.

Методологии обратного инжиниринга стоит рассматривать не как копирование изначальных решений, а подходить к решению вопроса воспроизводства копии с точки зрения многосторонних исследований. Ряд фундаментальных вопросов обратного проектирования, связанные с отсутствием данных о допусках изделия, отсутствием прослеживаемости в точности при оптическом сканировании, анализе геометрии изношенных деталей часто решаются, основываясь на опыте, что требует большой квалификации персонала, участия в процессах обратного проектировании профильных НИИ, а также проведения множества дополнительных исследования для отработки каждого из этапов [2, 3, 10].

В процессе обратного проектирование деталей машиностроительных агрегатов включает в себя следующие этапы:

- сбор исходной информации об объекте исследования;
- анализ конструкции и материалов объекта исследования;
- обработка данных и восстановление цифровой модели изделия;
- цифровое моделирование и виртуальная верификация.

**Верификация методики обратного проектирования ВНА осевого компрессора**

Первый этап носит подготовительно-исследовательский характер. Основная цель – получение максимально полной исходной информации об изучаемом объекте до начала активных аналитических и расчетных работ [8, 9, 14].

На данном этапе осуществляется сбор всей доступной оригинальной документации: эксплуатационная документация, руководства по эксплуатации, формуляры, схемы, чертежи и т.д. Наиболее важными является информация о трендах рабочих параметрах (температуры, давления, расход рабочего тела и т.д.). Параллельно необходимо собирать информацию об ответных частях, исследуемой детали (данная информация необходима для обеспечения взаимозаменяемости детали-копии).

На рисунке 3 представлен общий вид лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт.

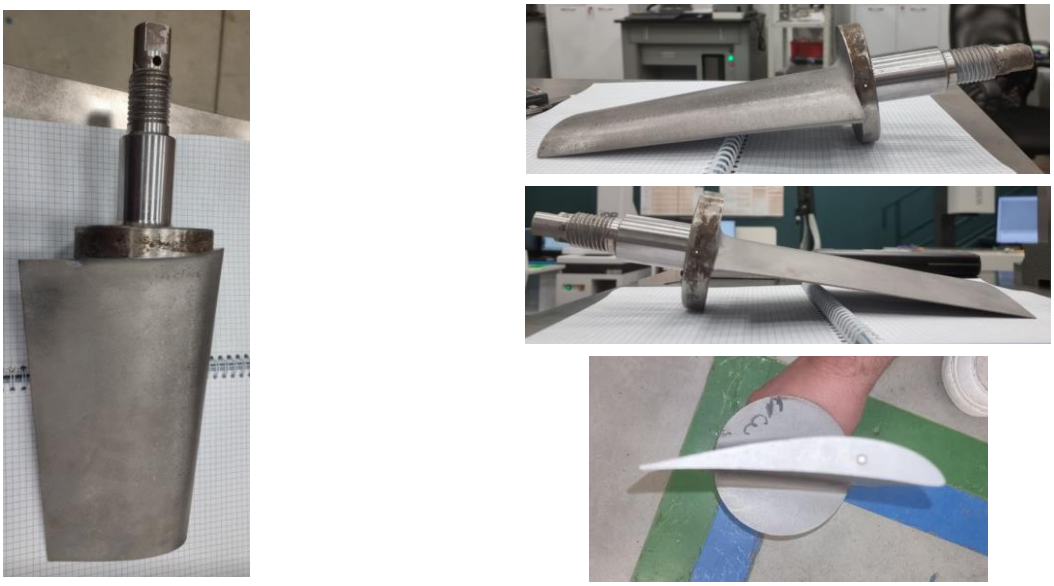


Рис. 3. Общий вид лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт

Источник: из личных архивов автора

Второй этап направлен на глубокое изучение конструкции, геометрии и материалов объекта исследования с использованием инструментальных и лабораторных методов.

Геометрический анализ включает проведение точных измерений с применением ручных средств (штангенциркулей, микрометров, нутромеров),

координатно-измерительных машин (КИМ), а также оцифровка геометрии с использованием 3D-сканирования контактными и бесконтактными методами.

Измерения с использованием ручных СИ производятся на основе карт измерения – эскиза измеряемой детали с указанием основных размеров для измерений и требований к точности измерения. Пример карты измерения на лопатку входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт приведено на рисунке 4.

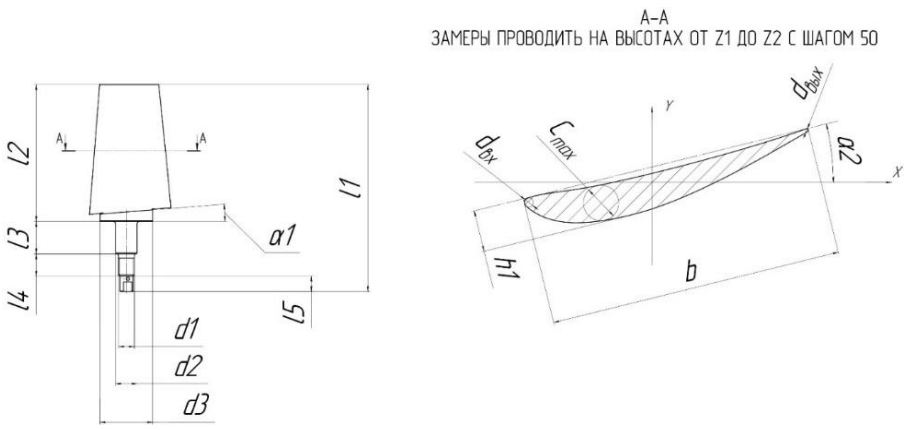



Рис 4. Карта замера на лопатку входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт

Источник: из личных архивов автора

Одним из ключевых моментов является оцифровка геометрии с использованием 3Д-сканеров. Оцифровка позволяет в кротчайшие сроки получить наиболее полную информации о геометрии исследуемой детали, расположения элементов друг относительно друга (угловое расположение отверстий относительно друг друга и относительно других элементов, положение пера лопатки относительно замковой части и т.д.).

Лопатки турбин являются одними из наиболее сложных и дорогостоящих в производстве элементов турбомашин и осевых компрессоров по причине высоких требований к точности изготовления, к материалу и высоким эксплуатационным свойствам. Точность лазерных систем часто бывает недостаточной при оцифровке лопаток, также на качестве поверхности сказывается шум, низкая детализация на маленьких участках (выходные кромки с радиусом 1 мм и меньше). Для решения данной задачи прибегают к использованию оптических сканирующих систем. К таким системам можно отнести XTOM Matrix-9M (разрешение 0,8–10 мкм, точность измерения до 10 мкм). Общий вид данной системы представлен на рисунке 5.

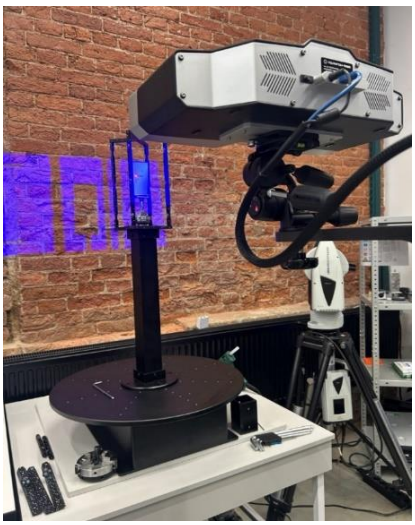


Рис. 5. Оптическая сканирующая система XTOM Matrix-9M

Источник: из личных архивов автора

Результатом оцифровки является облако точек, которое программными методами переводится в полигональную модель для дальнейшей обработки. На рисунке 6 показана полигональная модель оцифрованной лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт.

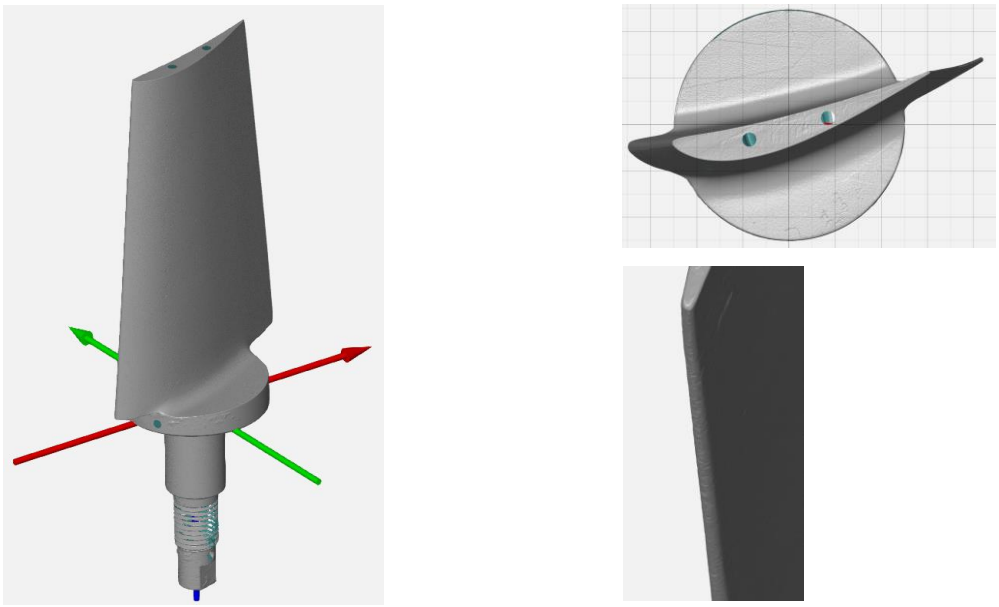


Рис. 6. Полигональная модель оцифрованной лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт

Источник: из личных архивов автора

Физико-химический анализ материалов является ключевым элементом этапа. Определение химического состава может выполняться с использованием оптико-

эмиссионной спектрометрии, рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) и т.д. Эти методы позволяют установить легирующие элементы, примеси и тип материала (сталь, чугун, алюминиевый или титановый сплав и т.д.).

Исследование механических свойств включает проведение испытаний на твердость (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу), растяжение, ударную вязкость, усталостную прочность. При необходимости выполняется металлографический анализ структуры: изучение зерна, фазового состава, наличия карбидов, пор, дефектов термообработки.

Дополнительно анализируются поверхностные слои и покрытия: методы нанесения (гальваника, напыление, т.п.), толщина и функциональное назначение (износостойкость, коррозионная защита, снижение трения).

Завершающей частью этапа является подбор отечественных или доступных аналогов материалов. Он выполняется на основе сравнения химического состава, механических и эксплуатационных характеристик с учетом требований к ресурсу, условиям работы и технологическим возможностям производства.

Третий этап представляет собой анализ полученной и переход к цифровой модели изделия.

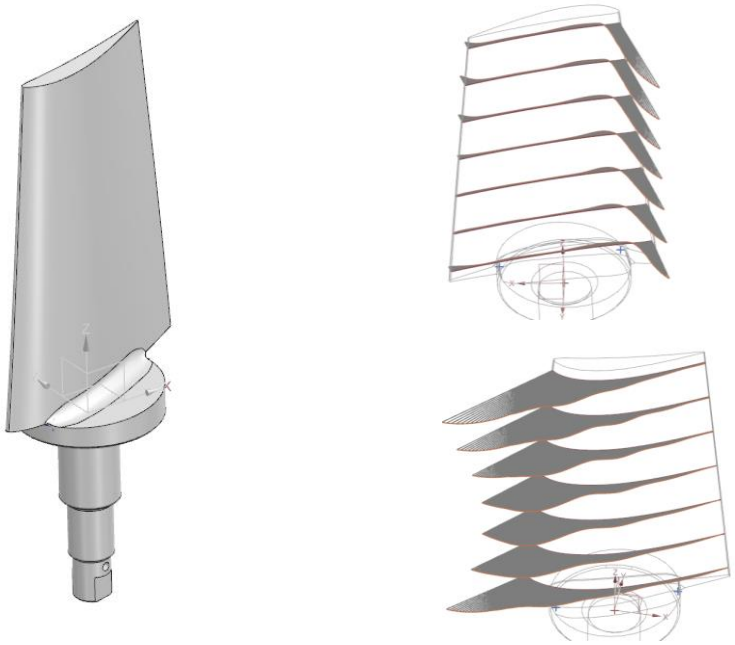


Рис. 7. 3D-модель лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт

Источник: из личных архивов автора

Наиболее важным моментом перед построением 3D-модели детали является подготовка полигональной модели. Полигональная модель очищается от шумов, удаляется попавшая на скан геометрия обстановки (тиски, стол, поддержки) и выполняется выставления в систему координат с помощью методов «3-2-1» и rps. Наибольшим функционалом для данных операций являются программные пакеты PolyWorks Inspector, GOM Inspect, ZEISS Inspect, Geomagic Design X. Благодаря выставлению лопаток становится возможным определение положения пера лопатки относительно хвостовика, исследование заложенного навала и смещения относительно СК, исследование закрутки пера по высоте.

Построение 3D-модели лопатки выполнялось в программном пакете NX 2024. Данный выбор был сделан по причине высокого уровня математического аппарата ПО по работе со сложными поверхностями, а также по углубленному внедрению принципа «мастер-модель» управления инженерными данными во всем жизненном цикле изделия. Полученная 3D-модели лопатки была построена в соответствии с требованиями для обработки на ЧПУ с учетом сопряжения поверхностей по G0 и G1, с соблюдением кривизны поверхности спинки и корыта по высоте для обеспечения обработки и дальнейшего функционирования изделия в машине.

Заключительный четвертый этап обратного проектирования направлен на проверку и верификацию полученной 3D-модели с использованием численных методов.

Проводятся прочностные расчеты методом конечных элементов, позволяющие оценить напряженно-деформированное состояние деталей и узлов при рабочих и предельных нагрузках. Анализируются коэффициенты запаса прочности, зоны концентрации напряжений, вероятность усталостного разрушения.

Выполняются численные газо- и гидродинамические исследования (CFD). Они позволяют изучить распределение скоростей, давлений, температур, потерь энергии и эффективность рабочих процессов.

Итогом цифрового моделирования становится подтверждение работоспособности восстановленного агрегата и формирование инженерной основы для создания его функционального аналога или копии.

Одним из преимуществ применения методов обратного проектирования является возможность частично отказаться от натурных испытаний в пользу цифрового двойника, так как оригинальное изделие было ранее сертифицировано зарубежными агентами. В некоторых же случаях при соблюдении полного геометрического подобия, материального исполнения и соблюдения физико-

механических свойств возможно считать изделия после обратного инжиниринга полным аналогом. На рисунке 8 приведена лопатка входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт на финальном этапе изготовления до удаления технологических баз.



Рис. 8. Изготовленный аналог лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора мощностью 11,6 МВт после проведения обратного проектирования

Источник: из личных архивов автора

**Заключение**

В ходе выполнения работы разработана и апробирована научно-обоснованная методика обратного проектирования лопатки входного направляющего аппарата осевого компрессора.

Основные выводы и результаты:

Применение высокоточной оптической системы 3D-сканирования (XTOM Matrix-9M) в комплексе с программными пакетами обработки данных (Geomagic, NX) позволяет воспроизводить сложнопрофильные поверхности лопаток с погрешностью, не превышающей 10-15 мкм, что соответствует требованиям авиационного и энергетического машиностроения.

Доказано, что обязательным элементом методологии является идентификация материала и его свойств. В исследуемом образце использована сталь 20Х13, что

позволяет при производстве аналогов полностью воспроизвести физико-механические характеристики детали.

Верификация методом конечных элементов подтвердила, что восстановленная лопатка обладает многократным запасом статической прочности (n>5), что гарантирует её безаварийную эксплуатацию в составе компрессора.

Изготовленный опытный образец полностью прошел геометрический контроль и готов к проведению опытно-промышленных испытаний в составе натурного компрессора.

Предложенная и апробированная методология может быть масштабирована на весь спектр деталей турбомашин (рабочие лопатки, диски, корпусные детали) и служить основой для организации импортозамещающего производства критически важных компонентов для эксплуатируемого в РФ парка газотурбинного оборудования.

**Список используемых источников**

1. Арифулова Д.Н., Решетова Е.С. Импортозамещение в энергетическом машиностроении // Развитие отраслевого и регионального управления. Вестник университета. 2017. №12. С. 64–71.

2. Басати Панах М., Рассохин В. А., Барсков В. В. [и др.]. Влияние характеристик потерь кинетической энергии на экономичность газотурбинных установок // Газовая промышленность. 2023. №6(850). С. 82–89.

3. Басати Панах М., Рассохин В. А., Барсков В. В. [и др.]. Подходы к повышению мощности и КПД газотурбинной установки TEEDA // X международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов атомной отрасли «Команда». Сборник тезисов. Санкт-Петербург, 2023. ООО «Издательский дом Недра». 2023. С. 147–148.

4. Забелин Н.А., Лыков А.В., Рассохин В.А. Эмиссия загрязняющих веществ от газотранспортной системы ОАО «ГАЗПРОМ» // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №3(178). С. 294–305.

5. Колпаков А.Ю., Саенко В.В. Анализ зависимости секторов топливно-энергетического комплекса России от импортного оборудования на основе публичных данных // Проблемы прогнозирования. 2023. № 1(196). С. 144–155.

6. Новости // Турбины и Дизели. [Электронный ресурс]. URL: http://www.turbine-diesel.ru/ (дата обращения 14.02.2026).

7. Оборин М.С. Импортозамещение как стратегическое направление развития машиностроения // Научный вестник: Финансы, банки, инвестиции. 2019. № 4. С. 172–178.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687600 Российская Федерация. Программа для теплового расчета параметров рабочего процесса энергетической установки по циклу Брайтона с регенерацией – ThermoCycle GTSCR : заявл. 26.08.2025 : опубл. 15.10.2025 / Н. С. Пиюренко, П. М. Басати, В. В. Барсков; заявитель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025687601 Российская Федерация. Программа для теплового расчета параметров рабочего процесса энергетической установки по циклу Брайтона – ThermoCycle GTSC : заявл. 26.08.2025 : опубл. 15.10.2025 / Н. С. Пиюренко, П. М. Басати, В. В. Барсков; заявитель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

10. Чу В., Басати Панах М., Суханов А.И. [и др.]. Выбор материала для аддитивного производства рабочего колеса закрытого типа высокоскоростного центробежного компрессора // Надежность и безопасность энергетики. 2024. №17(4). С. 272–279. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2024-17-4-272-279.

11. Экспорт и импорт Российской Федерации по товарам // ФТС. [Электронный ресурс]. URL: https://customs.gov.ru/folder/502 (дата обращения 11.02.2026).

12. Basati Panah M., Verhoglyadov I., Barskov V. Development of a digital twin for the TG-16 turbogenerator of AN-12 aircraft via reverse engineering / Современные технологии и экономика в энергетике. 2025. P. 235–238.

13. Basati Panah M., Balakin A., Laptev M. [et al.]. Comprehensive Regression-Based Sensitivity Analysis of Geometric Parameter Effects on Gas Turbine Nozzle Performance and Stage Characteristics / International Journal of Energy Research. 2025. Vol. 2025. No. 1. P. 10.1155/er/7548518. – DOI 10.1155/er/7548518.

14. Beliakova M. A., Basati Panah M. Evaluating the economic viability of magnetic bearing compressors in gas distribution stations / Современные технологии и экономика в энергетике. 2024. P. 77–79.

# РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПОВ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК – МАТЕРИАЛ – СРЕДА ОБИТАНИЯ» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕРАБОТАННОГО БЕТОНА В МОСТОСТРОЕНИИ

*Токарев В.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»*

*Кабалин М.Д. – аспирант, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»*

*Научный руководитель: Высоцкая М.А. – к.т.н., доцент кафедры автомобильных и железных дорог имени А.М. Гридчина, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова»*

**Аннотация**

Рассматриваются актуальные проблемы утилизации вторичного сырья из переработанного бетона и возможности их повторного использования для снижения экологической нагрузки и сохранения первичных природных ресурсов с точки зрения оптимизации системы «человек – материал – среда обитания». В статье раскрывается тема применения строительных отходов от сноса зданий и сооружений в мостостроении на основе анализа, обобщения и систематизации информации, полученной из открытых отечественных и зарубежных источников. Рассмотрен практический опыт применения вторичного бетонного сырья строительной отрасли для нужд транспортно-дорожного комплекса в качестве заполнителя.

Издревле человек стремился познавать саму суть окружающих его предметов и явлений. Главными вопросами научной мысли всегда было решение проблемы взаимоотношения мира и человека, разумное устройство и цели человеческой жизни. На начальной стадии философия, как прародительница множества наук, включала в себя все знания, накопленные на тот момент человеком. Далее, в связи с увеличением объема информации начинается выделение из философии отдельных наук. Человечество шло по пути создания все более и более узконаправленных научных знаний и дисциплин, пока в 1930–1940 годах не начинается обратное движение, нацеленное на объединение. Такие междисциплинарные исследования генерируют новые знания. Как следствие, формируются такие науки как геофизика, геохимия, биотехнология.

Одним из первых трансдисциплинарных направлений является кибернетика. Кибернетика – наука об общих законах управления в системах любой природы: биологической, технической, социальной. Основной объект кибернетики – кибернетические системы, рассматриваемые вне зависимости от их материальной

природы, способные воспринимать, хранить, перерабатывать информацию и использовать ее для управления и регулирования данными [5].

Направлениями геоники являются: оптимизация системы «человек-материал-среда обитания», архитектурная геоника, освоение и строительство подземных пространств, проблемы развития (существования) органического и неорганического мира, разработка алгоритмов, моделей создания и управления объектами неорганического мира, использование энергетики геологических и космических процессов, разработка новых технологий получения минералов и композитов (рис. 1.).




Рис. 1. Направления развития геоники [2]

На нынешнем этапе развития человечества оптимизация системы «человек – материал – среда обитания» является одной из первостепенных задач. В окружении материалов мы находимся более 80% своей жизни, поэтому их выбор играет определяющую роль. Производство материалов, их применение, разрушение, повторное использование рассматривается как элемент эволюции неорганического мира, постоянно изменяющегося под воздействием природных и техногенных процессов, что естественно отражается на системе жизнедеятельности человека. Оптимизация системы «человек – материал – среда обитания» способствует улучшению здоровья и продолжительности жизни человека, его эмоционально-психологического состояния, работоспособности, интеллекта. В этом же направлении

активно развивается в настоящее время так называемое «зеленое» строительство, при котором воздействие на окружающую среду минимально. «Зеленое» строительство активно внедряется в развитых странах мира [11,14], в том числе и в России [3,4].

Современная обстановка демонстрирует, что планета подвержена экологической деградации, основными факторами которой являются глобальное потепление и нехватка ресурсов [12]. Для борьбы с такими угрозами мировое сообщество принимает меры. Например, в 2015 году было подписано Парижское соглашение, направленное на сокращение выбросов парниковых газов. Европейский Союз установил европейские инициативы «Зеленого соглашения», согласно которым к 2050 году будет обеспечен нулевой уровень выбросов углерода, а экономический рост должен быть отделен от использования первичных ресурсов. Аналогичная политика была также реализована китайским правительством, согласно которому углеродная нейтральность будет достигнута к 2060 году. В России реализуется стратегия на основании распоряжения Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-р «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.». В Стратегии сказано, что для достижения выхода на траекторию развития с низким уровнем выбросов парниковых газов необходима разработка и освоение технологий улавливания, переработки, использования и (или) захоронения углекислого газа, выбросы которого образуются в процессах промышленного и энергетического производства. При этом развитие этих технологий требует дополнительных стимулирующих мер со стороны государств и институтов развития.

Бетон, как наиболее широко используемый материал в конструкциях и сооружениях, доминирует на рынке строительных материалов с 1900-х годов, и на его долю приходится около 8% от всего глобального выброса углекислого газа [16]. Бетон – это сложный материал, состоящий из крупных и мелких заполнителей, соединенных между собой цементным камнем. За последние два десятилетия мировое производство цемента выросло втрое с 1,10 миллиарда тонн до 3,27 миллиарда тонн. С увеличением объемов строительства, производство цемента может достичь 4,83 миллиарда тонн в 2030 году [8]. Это могло бы обеспечить производство большого объема бетона, что требует постепенного наращивания объёмов добычи ресурсов таких как природные заполнители, поскольку они составляют 60-75% от общего объема бетона.

Для снижения экологической нагрузки при производстве бетонных изделий предлагается использовать для их приготовления вторичный щебень, получаемый из

отходов строительства. За последнее десятилетие концепция и модель развития экономики замкнутого цикла привлекают все большее внимание общественности и специалистов. Она направлена на обеспечение альтернативы традиционной и доминирующей модели производства, характеризующейся потреблением первичных ресурсов и последующей их утилизацией. Циклическая экономика возникает благодаря трем основным постулатам, а именно: сокращению, повторному использованию и переработке [7]. От 30% до 40% твердых отходов в городах образуется в результате строительных работ и сноса зданий, при этом, огромное количество отходов производства и переработки в виде бетона вывозится на ограниченное пространство городских свалок [9]. Например, за год на свалки Китая выбрасываются строительные отходы, которые могут занимать половину общей площади Сингапура, если высота свалки составляет 20 м [15]. Использование вторичного щебня, получаемого путем сноса старых зданий и конструкций, комплексно решает проблемы уменьшения площади свалок, снижения выбросов парниковых газов и сохранения природных ресурсов.

Недостаточная информация о долговечности и устойчивости производства вторичного щебня является серьезной проблемой, требующей пристального внимания. Из-за неоднородности состава, сложно подсчитать перевешивают ли затраты на производство щебня в стандартных отраслях из природного сырья производство щебня из переработанного бетона и контроль его качества [17]. Ключевым объяснением медленной адаптации внедрения переработанного бетона является уже существующие предприятия по производству готового бетона и природных заполнителей [10].

Одним из вариантов применения переработанного бетона может является использование его в мостостроении. История строительства мостов насчитывает несколько тысяч лет. Мосты являются неотъемлемой частью инфраструктуры и сыграли ключевую роль в развитии цивилизации. С развитием технологий и возросшими требованиями к прочности и безопасности, инженеры все чаще ищут нестандартные решения и строительные материалы. Мосты являются одними из самых значимых инженерных сооружений, выступая в качестве важнейших компонентов транспортной инфраструктуры, облегчая доступ через естественные препятствия такие как: реки, долины и искусственные барьеры, - обеспечивая удобный и безопасный проход к населенным пунктам. Они являются основополагающим фактором в развитии общества, обеспечивая перевозку товаров и людей. Мостовые конструкции должны обладать устойчивостью и необходимой

несущей способностью для удовлетворения требований к интенсивности движения и нагрузке. Должны быть долговечными и безопасными для пользователей [1]. Следовательно, необходимо чтобы используемые строительные материалы соответствовали строгим требованиям прочности, включая устойчивость к переменным и динамическим нагрузкам, коррозии и погодным условиям [13].

Например, на дорогах регионального и межмуниципального значения Белгородской области расположено 424 мостовых сооружения. Бетонные сооружения составляют 86,6 % от общего количества (377 штук). Соответственно, применение вторичного заполнителя в мостостроении может быть востребовано, при достижении необходимых эксплуатационных характеристик материала.

Так, например, при строительстве моста Бэй-Бридж, находящимся между Сан-Франциско и Оклендом, в опорах мостового сооружения около 50% крупного заполнителя является переработанным бетоном. Комиссия обнаружила это только через несколько лет после производства работ. Подрядчик не оповестил власти об использовании новаторского подхода к строительству. Однако, после проведения соответствующих испытаний оказалось, что использование вторичного материала при строительстве не сказалось на технических характеристиках бетона и объекта в целом.

В работе [6] экспериментально исследуются сейсмические характеристики железобетонных опор моста, изготовленных из переработанного крупного заполнителя. В ходе эксперимента выполнялось тестирование мостовых опор, изготовленных на 100% и 50% из переработанного бетона, и сравнение их эксплуатационных характеристик с мостовыми опорами из 100% природного крупного заполнителя. Сравнение характеристик опор из переработанного заполнителя выполнялось с точки зрения поперечной несущей способности, выноса, пластичности, и способности рассеивать энергию по сравнению с обычными бетонными опорами. Тестирование показало, что качество вторичного материала было сопоставимо с первичным сырьем. Переработанный бетон показал снижение удельного веса и насыпной плотности порядка 8% и 14% соответственно. Образцы с использованием вторичного бетона показали сходное с контрольным образцом гистерезисное поведение, некоторые значение сдвига были на 1% и 10% выше, чем у контрольного образца. В целом, образцы с использованием вторичного щебня продемонстрировали адекватные сейсмические характеристики по сравнению с контрольным образцом.

Стоит отметить, что работ, посвященных данной тематике достаточно мало. Однако они демонстрируют возможность и целесообразность исследования технологии замкнутого цикла в вопросах строительства мостовых сооружений. Таким образом, в статье показана возможность внедрения в экономику замкнутого цикла переработанного бетона из отходов строительства и сноса зданий в качестве крупного заполнителя и его дальнейшее применение в формировании жизненного цикла мостовых сооружений. Препятствиями на пути внедрения вторичного щебня являются неопределенность источников вторичного сырья для принятия решений о надлежащем качестве материала, разрыв между академическими исследованиями и отраслевой практикой повторного использования бетона, недостаточно развитая система показателей для принятия решений о внедрении.

Потенциал использования переработанного бетона в мостостроении велик, однако на данном этапе необходимо решить ряд важных отраслевых вопросов. Дальнейшее развитие данного направления требует проведения дополнительных исследований по оптимизации составов и технологии производства таких бетонных изделий. Возможно, необходимо проведения более массового внедрения вторичного материала в областях дорожного строительства не несущих в себе таких больших рисков. Например, оптимальным вариантом является использование переработанного бетона для производства бетонных мелкоштучных изделий. И только потом, можно будет всерьез говорить о повсеместном внедрении переработанного бетона в мостостроении.

**Список используемых источников**

1. Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Кузнецов Д.А., Ткачева А.И. Одежда ездового полотна мостового сооружения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. №. 4. С. 21–35.

2. Высоцкая М.А., Курлыкина А.В., Токарев В.А. Использование битуминозных пород и природных битумов с точки зрения геоники // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 50. №. 4. С. 175–183.

3. ГОСТ Р 71392-2024 «Зеленые» стандарты. «Зеленое» индивидуальное жилищное строительство. Методика оценки и критерии проектирования, строительства и эксплуатации. Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2024. 36 с.

4. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований // Высшее образование в России. 2014. №. 3. С. 77–83.

5. Лесовик В.С., Шеремет А.А., Чулкова И.Л., Журавлева А.Э. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2021. Т. 18. №. 1 (77). С. 120–134.

6. AL-Hawarneh M., Alam M. S. Lateral cyclic response of RC bridge piers made of recycled concrete: Experimental study // Journal of Bridge Engineering. 2021. Т. 26. №. 5. P. 04021018.

7. Chen W. et al. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature // Construction and Building Materials. 2019. Т. 218. P. 483–496.

8. Deutscher N. Global Cement Production from 1990 to 2030 (in million metric tons). 2019. С. 25-31.

9. Duan H., Li J. Construction and demolition waste management: China's lessons //Waste Management & Research. 2016. Т. 34. №. 5. P. 397–398.

10. Makul N. et al. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: A review // Crystals. 2021. Т. 11. №. 3. P. 232.

11. Olubunmi O.A., Xia P.B., Skitmore M. Green building incentives: A review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Т. 59. P. 1611–1621.

12. Pierrehumbert R. There is no Plan B for dealing with the climate crisis //Bulletin of the Atomic Scientists. 2019. Т. 75. №. 5. P. 215–221.

13. Spyrowski M., Ostrowski K.A., Furtak K. Transition Effects in Bridge Structures and Their Possible Reduction Using Recycled Materials // Applied Sciences. 2024. Т. 14. №. 23. P. 11305.

14. Varma C.R.S., Palaniappan S. Comparision of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia // Habitat International. 2019. Т. 89. P. 101989.

15. Wang B. et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Т. 171. P. 105565.

16. Warburton R. Global Warming Has Concrete Problem When It Comes to CO2 // EcoRi News. 2019. Т. 25. С. 1-5.

17. Wu Z. et al. Quantifying construction and demolition waste: An analytical review // Waste management. 2014. Т. 34. №. 9. P. 1683–1692.

# МОДЕЛЬ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ДОСТАВКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ

*Утевский С.И. – аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный экономический университет»*

**Аннотация**

В статье предложена модель международной системы доставки, которая может быть положена в обоснование развития транспортно-логистической и таможенной инфраструктуры, а также является инструментом принятия решения о формировании эффективного варианта доставки металлургической продукции в условиях неопределенности спроса и экспортной зависимости отрасли.

Металлургическая отрасль является экспортно-зависимой, что обусловлено превышением объема производства над внутренним потреблением. Современные тенденции уменьшения потребности в металлургической продукции одних стран не компенсируется ростом потребностей других, что предопределяет актуальность исследований, направленных на формирование адекватной, соответствующей объемным значениям грузопотока инфраструктуры и поиском путей оптимизации распределения продукции.

Формирование международных систем доставки продукции определяется различными факторами, а именно:

– потребностями в различной номенклатуре продукции, а следовательно, необходимостью использования различного вида транспорта и типа транспортных средств;

– изменением географии поставок, что обусловлено в свою очередь влиянием санкционного давления, политики «торговых войн»;

– спецификой производственного процесса, невозможно оперативно изменять объем выпускаемой продукции под требования рынка и в целом можно считать, что объем продукции является постоянным в течении относительно длительного времени;

– часть позиций металлургической продукции попадает под экспортный контроль, а, следовательно, дополнительные ограничения в части оформления разрешительных документов и в рамках проверки таможенными органами документов и сведений при помещении под таможенную процедуру экспорт

оказывают влияние на суммарное время доставки и суммарные логистические издержки, связанные с совершение таможенных операций.

При исследовании тенденций формирования специализированной для металлургической продукции транспортно-логистической инфраструктуры, с учетом вводимых ограничений (например, в 2022 году вывоз лома металла был разрешен только через 9 морских портов), выделим, что основными морскими портами тяготения при формировании международных систем доставки стали Владивосток, Таганрог и Усть-Луга. В указанных направлениях формируются или уже действуют специализированные распределительные центры, которые позволяют сглаживать различие между предложением и спросом. Следует при этом помнить, что включение таких распределительных центров в системы доставки объективная необходимость из-за того, что производители не обладают достаточными мощностями для хранения всей выпущенной продукции. Дополнительно, местоположение производителя не позволят в кратчайшие сроки реагировать на изменение (увеличение спроса) для организации поставки, поэтому наличие запасов продукции на распределительных центрах должно быть необходимо-достаточным для удовлетворения потребности иностранных потребителей.

Графически модель международной системы доставки через морские порты приведена на рис.1, которая отражает, что суммарные логистические издержки, определяющие конечную, конкурентноспособную стоимость металлургической продукции будет складываться из:

– затрат на прямую транспортировку от производителя до *i*-го порта – $З_{произв \rightarrow порт i}$;

– затрат на транспортировку от производителя до *i*-го распределительного центра - $З_{произв \rightarrow РЦ i}$;

– затрат на транспортировку от производителя от *i*-го распорядительного центра до *i*-го порта – $З_{РЦ i \rightarrow порт i}$;

– затрат на хранение груза на *i*-го распределительном центре – $З_{хранРЦ i}$.

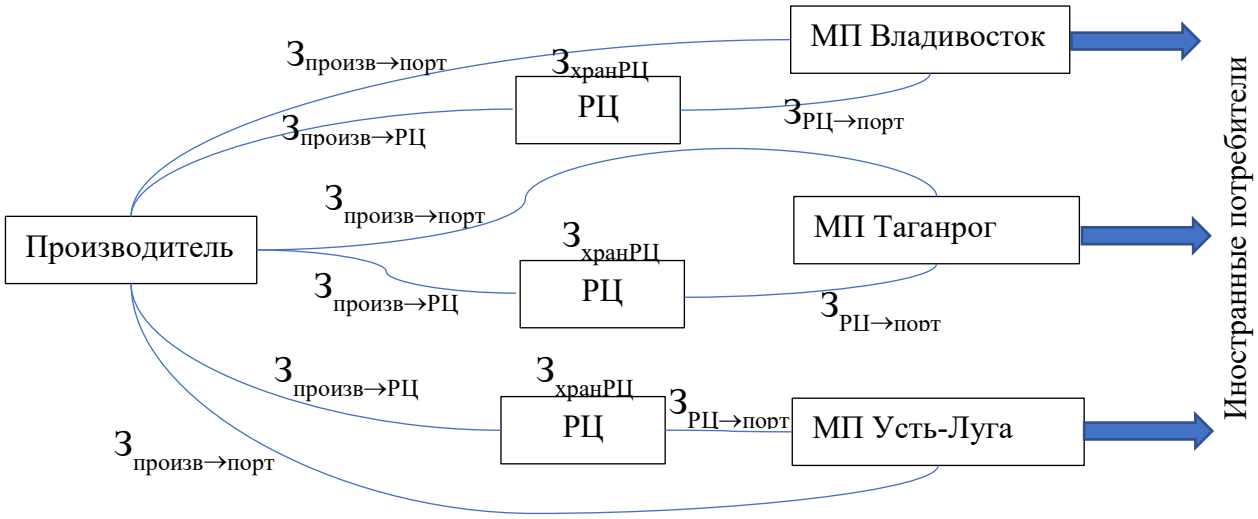



Рис. 1. Графическая модель идеальной международной системы доставки металлопродукции через морские порты

Источник: составлено автором

В модели приняты следующие допущения, которые делают ее идеальной:

– объемы поставок через *i*-ый морской порт спрогнозированы настолько точно, что не предполагают перераспределения груза между распределительными центрами;

– объемы поставок на распределительный центр не превышают размеры складских площадей;

– возвратные потоки отсутствуют, то есть груз перемещается строго только от производителя или на распределительный центр или непосредственно в морской порт;

– из-за относительно значительной удаленности всех элементов системы доставки друг от друга используются только обычные маятниковые маршруты.

Рассматриваемая модель может быть использована для моделирования поведения системы доставки, определения критичных ситуаций и выявления резервов повышения эффективности и предполагает решение следующих задач, определяющих направления дальнейшего нашего исследования:

1. Определение адекватной ситуации модели прогнозирования спроса отдельных сегментов экспортного рынка, с учетом тяготения к отдельному морскому порту. Модель должна не просто отражать текущую ситуацию, но и учитывать возможные изменения политической и торговой ситуации, рост потребности в металлургической продукции отдельных стран в рамках инфраструктурных

преобразований, развития промышленности и других факторов. Нами предлагается использовать синтез различных методов прогнозирования, алгоритм приведен, например, в работе [1].

2. Моделирование должно позволить оценить необходимо достаточные размеры специализированного распределительного центра для металлургической продукции, который расположен в приближении к морскому порту. Однако, следует дополнительно решать задачу о количестве таких распределительных центров по каждому направлению, возможности их использования не только для международных, но и внутренних систем доставки.

3. Наличие требований по экспортному контролю к части металлургической продукции свидетельствует о существовании рисков задержки партии продукции из-за непредставления соответствующих разрешений, появления риска использования товара в качестве продукции двойного назначения иностранными потребителями, что позволяет говорить о необходимости формирования цифрового профиля поставки для прозрачности поставки с точки зрения таможенного контроля.

4. Для выпуска значительных партий металлургической продукции таможенные органы должны обладать необходимой таможенной инфраструктурой, а при необходимости средствами таможенного контроля. Современные таможенные технологии должны найти отражение при моделировании времени на доставку партии продукции иностранным потребителям, учитывая, что время на морскую перевозку может быть принято в качестве константы.

**Список используемых источников**

1. Лукинский В.С., Лукинский В.В., Малевич Ю.В., Пластуняк И.А., Плетнева Н.Г. Модели и методы теории логистики: Учебное пособие. 2-е изд. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 448 с.

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ КОЛИЧЕСТВА ДТП С УЧАСТИЕМ ДИКИХ ЖИВОТНЫХ НА ПРИМЕРЕ СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ

*Чудинов С.А. – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой автомобильных дорог, мостов и тоннелей, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»*

*Антонова А.П. – аспирант 1 курса, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»*

**Аннотация**

В статье рассматривается актуальная проблема увеличения количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП) с участием диких копытных животных, вызванная фрагментацией их местообитаний. На основе статистических данных Департамента по охране животного мира Свердловской области за 2022–2024 гг. проведен анализ дорожно-транспортных происшествий, определены ключевые факторы риска (плотность популяций, интенсивность движения, характер инфраструктуры) и выявлены наиболее аварийные районы.

Рост уровня автомобилизации населения и расширения сети автомобильных дорог регионального и федерального значения, приводит к фрагментации естественных местообитаний диких животных. Одним из наиболее значимых негативных последствий данного процесса является устойчивый рост количества дорожно-транспортных происшествий с копытными животными крупного и среднего размера, что представляет угрозу для безопасности человека, зачастую приводит к гибели животных и приводит к существенному экономическому ущербу. Целью данного исследования является анализ закономерностей возникновения ДТП с участием диких животных на территории Свердловской области, определение ключевых факторов риска и формирование на этой основе предложений по организации мероприятий позволяющих снизить количество аварий с участием диких животных.

Исследование основано на официальных статистических данных Департамента по охране животного мира Свердловской области за период 2022–2024 годов [2]. Применялись методы статистического анализа для выявления динамики, пространственного распределения и временных закономерностей аварийности. В статистической выборке участвовали ДТП, свершенные на автомобильных дорогах регионального и федерального значения.

За исследуемый трехлетний период на дорогах Свердловской области было официально зафиксировано значительное количество ДТП с дикими животными. Наблюдается четкая тенденция к росту: если в 2022 году было зарегистрировано 322 подобных инцидента, то в 2024 году их число возросло до 358. Среднегодовой прирост составляет около 5%, что свидетельствует о положительной динамики роста дорожно-транспортных происшествий.

Абсолютное большинство происшествий (около 95%) связано с двумя видами копытных (рис. 1):

– косуля является участником примерно 65% (двух из трех) всех зарегистрированных ДТП;

– лось: участвует в 30% случаев;

– на долю прочих видов приходится лишь около 5% инцидентов (в основном фиксируют происшествия с кабаном, медведем, волком).

Такое распределение напрямую коррелирует с высокой численностью данных видов в регионе: по результатам учета 2024 года, популяция косули оценивается в 50 589 особей, лося – в 55 037 особей [5].

Для человека столкновение, особенно с лосем (животное массой 300-600 кг), часто имеет тяжелые последствия. Около 1% от общего числа ДТП с копытными заканчиваются гибелью людей. Анализ дорожно-транспортных происшествий со смертельным исходом для человека выявил стойкие закономерности: все они произошли при столкновении с лосем, на прямых участках дорог, проходящих через лесной массив, либо лесополосу, преимущественно в темное время суток или в сумерки (90% случаев), и чаще в августе-сентябре (также 90% случаев).

Для животных последствия носят почти тотальный характер. По имеющимся данным, непосредственно на месте ДТП погибает 94-96% сбитых животных. Даже особи, сумевшие покинуть место аварии, как правило, получают несовместимые с жизнью травмы или становятся легкой добычей хищников, что ставит под вопрос реальную выживаемость и этого небольшого процента.

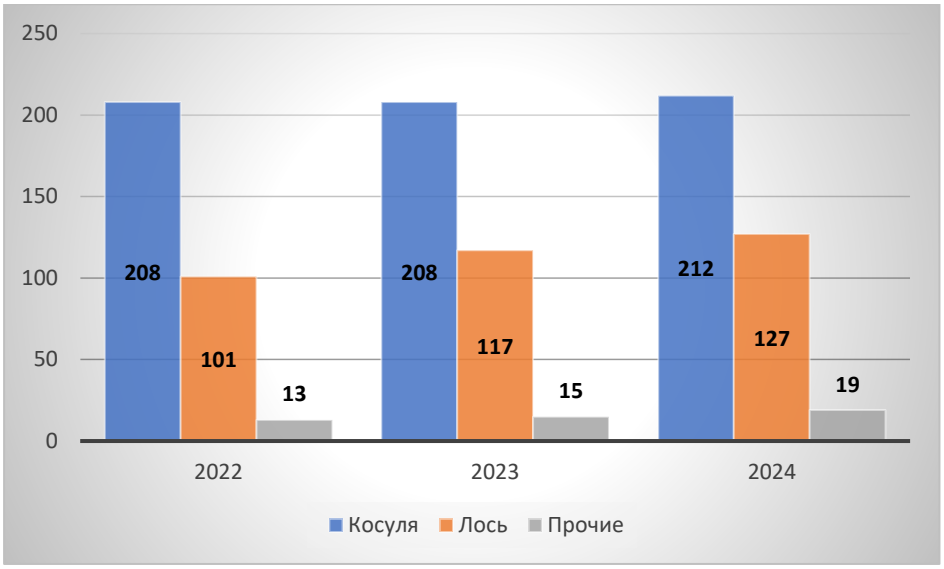



Рис. 1 Количество и вид животных-участников ДТП ща 2022-2024 года

Источник: составлено авторами

Определены автомобильные дороги с наибольшим количеством ДТП (табл.1). Четверть всех ДТП, зафиксированных на территории Свердловской области, приходится на автомобильную дорогу федерального значения Екатеринбург-Тюмень. Также присутствуют и другие трассы федерального и регионального значения. По результатам статистического анализа выявлено, что средняя интенсивность движения на участках концентрации ДТП с дикими животными варьируется от 8 до 20 тыс. автомобилей в сутки.

Табл. 1

Автомобильные дороги Свердловской области с наибольшим количеством ДТП

| Наименование дороги | Протяженность, км | Количество ДТП с участием диких за год, ед. | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 2022 | 2023 | 2024 |
| Екатеринбург-Тюмень | 289 | 84 | 72 | 83 |
| Екатеринбург-Нижний Тагил-Серов | 352 | 29 | 29 | 32 |
| Пермь-Екатеринбург | 192 | 22 | 20 | 34 |
| Красноуфимск-Арти-Касли | 105 | 17 | 18 | 7 |
| Екатеринбург-Шадринск-Курган | 131 | 13 | 14 | 13 |
| ЕКАД | 94 | 6 | 25 | 7 |
| Екатеринбург-Реж-Алапаевск | 145 | 14 | 10 | 14 |

Источник: составлено авторами

Опираясь на тот факт, что автомобильные дороги имеют различную протяженность, был определен коэффициент аварийности (табл. 2), зависящий от количества ДТП на рассматриваемой дороге и ее протяженности на территории

Свердловской области. Дороги с наибольшим коэффициентом аварийности Богданович-Ляпустино-Луч, Богданович – Гарашкинское находятся на территории Богдановичского района, автомобильная дорога федерального значения Екатеринбург – Тюмень так же проходит через этот район.

Табл. 2

Автомобильные дороги Свердловской области с наибольшим коэффициентом аварийности на 1 км

| Наименование дороги | Протяженность, км | Количество ДТП с участием диких за год, ед. | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 2022 | 2023 | 2024 |
| Богданович-Ляпустино-Луч | 20 | 0,34 | 0,24 | 0,39 |
| Богданович-Гарашкинское | 26 | 0,26 | 0,19 | 0,37 |
| Екатеринбург-Тюмень | 289 | 0,29 | 0,25 | 0,29 |
| ЕКАД | 94 | 0,06 | 0,27 | 0,07 |
| Красноуфимск-Арти-Касли | 105 | 0,16 | 0,17 | 0,07 |
| Пермь-Екатеринбург | 192 | 0,11 | 0,10 | 0,18 |
| Екатеринбург-Шадринск-Курган | 131 | 0,10 | 0,11 | 0,10 |

Источник: составлено авторами

Ключевым результатом исследования стало установление прямой зависимости между плотностью населения копытных и уровнем аварийности, при этом также имеет значение и разветвленность улично-дорожной сети.

Максимальная в области плотность популяции косули (около 40 особей на 1000 га) зафиксирована именно в Богдановичском районе, что и объясняет его лидерство по аварийности. В соседних районах (Камышловском, Белоярском, Талицком) плотность в 2-3 раза ниже (11–20 особей/1000 га), соответственно, ниже и количество ДТП. Через эти районы также проходит трасса Екатеринбург-Тюмень с интенсивностью движения 10–20 тыс. автомобилей в сутки, что создает «идеальные» условия для частых столкновений: высокая плотность животных + высокий транспортный поток.

Основные очаги повышенной плотности лося (4–9 особей/1000 га) расположены на западе области (Ачитский, Артинский, Нижнесергинский, Березовский, Ревдинский районы). Именно здесь концентрируется большинство ДТП с участием этого вида. При этом Ревдинский район является исключением. Имея самую высокую плотность лося (9 особей/1000 га), он демонстрирует один из минимальных в области показателей аварийности. Это можно пояснить протяженность дорожной сети в районе. Протяженность участка федеральной

автомобильной дороги Пермь–Екатеринбург с интенсивностью движения 26–28 тысяч автомобилей в сутки через Ревденский район составляет 20км, который проходит преимущественно в высоких насыпях и по путепроводам, протяженность дорог регионального значения составляет около 40км.

Пик аварийности с участием диких животных приходится на весенне-летний период (рис. 2). Его возникновение обусловлено двумя факторами:

1) повышенная биологическая активность копытных, связанная с расселением молодняка прошлого года рождения, ищущего собственные индивидуальные участки [1], [4];

2) рост интенсивности движения в летний период (дачный сезон, отпуска).

В период гона (брачного периода) у лосей (сентябрь–октябрь) и у косуль (июль–август) резкого увеличения количество ДТП не наблюдается.

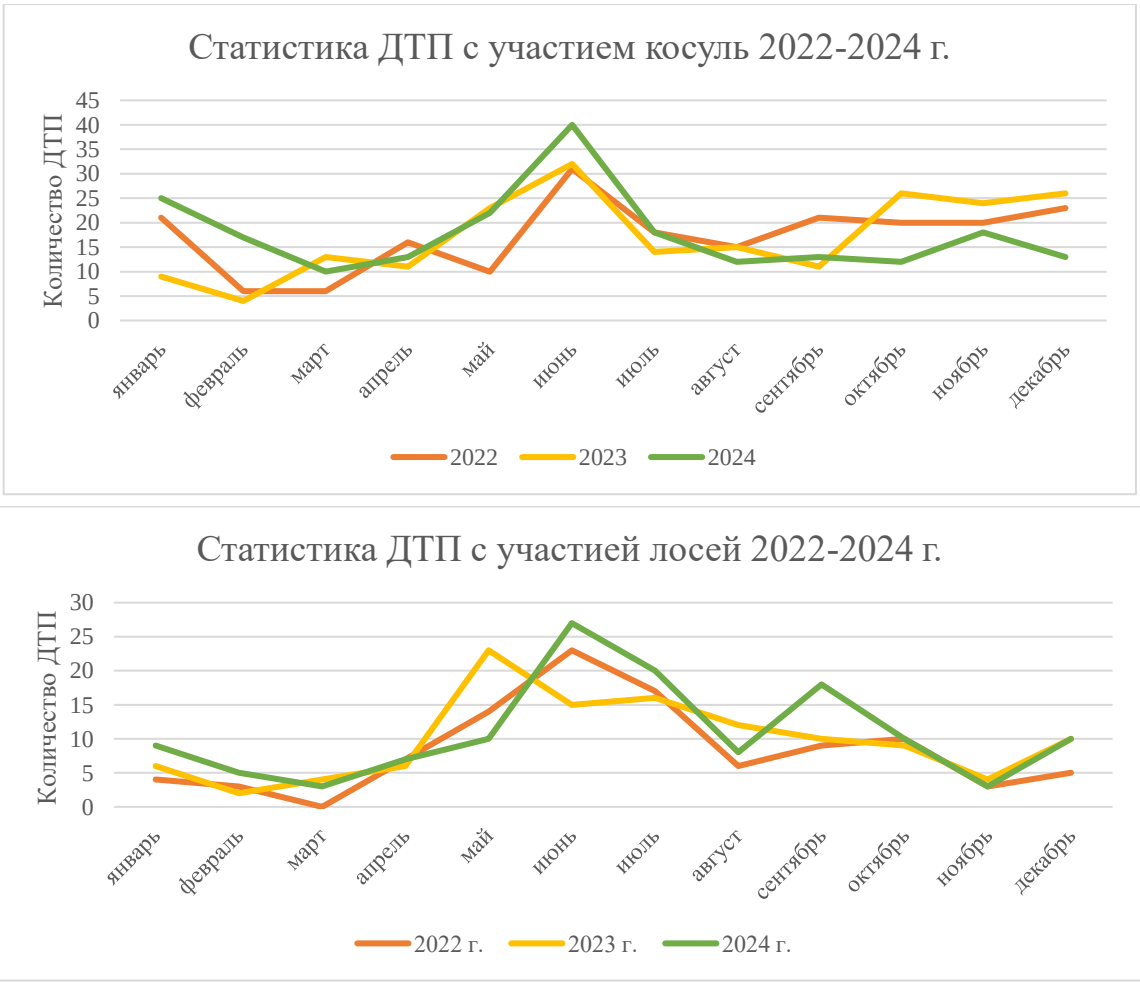



Рис. 2. Статистика ДТП с участием диких животных
в зависимости от времени года

Источник: составлено авторами

При анализе ДТП в разрезе половой принадлежности особи выявились следующие закономерности. Для косуль характерно, что в ДТП чаще попадают самцы. Основная причина этого, как уже отмечалось, – их поведенческая особенность, связанная с поиском и освоением новых территорий. В случае с лосями статистика иная: самцы и самки становятся участниками аварий примерно с равной частотой. Это объясняется сопоставимым уровнем активности: молодые самцы активно расселяются, а самки уходя в поисках мест пригодных для рождения лосят.

Порядка 70% ДТП с участием косуль и лосей происходит на участках автомобильных дорог, проходящих через лесные массивы, лесополосы, это объясняется тем, что для данного вида животных естественной средой обитания является лес.

Если рассмотреть статистику ДТП в разрезе расположения автомобильной дороги в плане, то 75% ДТП с участием копытнях приходится на участки автомобильной дороги, проходящей по прямой. Тут не выявлено ни каких закономерностей, потому что основных элементом автомобильной дороги в Свердловской области является прямая в плане [3].

В настоящее время основным комплексом мероприятий по предотвращению ДТП с дикими животными на большинстве дорог области является установка предупреждающего дорожного знака 1.27 «Дикие животные» и выборочное ограничение скорости на отдельных участках. Однако, как показывает рост цифр аварийности, этих мер явно недостаточно. Знаки, на которые водители со временем перестают обращать внимание («эффект привыкания»), и статичные ограничения скорости, не учитывающие реальное поведение животных и динамику риска, не могут кардинально повлиять на ситуацию.

Существующая обстановка автомобильной дороги косвенно влияет на снижения количество ДТП. Так, например, барьерное ограждение и шумозащитные экраны, препятствуют выходу животного на автомобильную дорогу. А существующие водопропускные сооружения, подмостовые пространства могут служить экологическими коридорами, обеспечивающими миграцию диких животных.

Проведенный анализ аварийности служит научной основой для планирования природоохранных мероприятий. При проектировании новых или реконструкции существующих автомобильных дорог данные о плотности населения животных, их вида, интенсивности движения должны использоваться как ключевой критерий для определения мест установки экодуков и систем оповещения водителей.

Что касается обширной сети уже существующих дорог, одной из наиболее действенных оперативных мер является внедрение дифференцированных ограничений скорости на участках с повышенным риском. Целевая скорость на таких отрезках должна рассчитываться на основе математической модели, учитывающей комплекс факторов: вид животных, расположение дороги в профиле, уровня видимости и других параметров.

**Список используемых источников**

1. Гештовт П., Гузней С. ДТП с участием диких животных: закономерности и сравнительный анализ // Наука и инновации. 2023. №8. С. 70–75.

2. Информация о ДТП с участием диких животных / Департамент по охране, контролю и регулированию использования животного мира. [Электронный ресурс] URL: https://old-dozhm.midural.ru/news/show/id/14 (дата обращения 15.09.2025).

3. Соколов Н.В. Перемещение лосей и причины, вызывающие эти перемещения// Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. 2012. 32. С. 31–34.

4. СП 34.13330.2021 Автомобильные дороги / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/573818172 (дата обращения 10.10.2025).

5. Учет численности охотничьих ресурсов / Департамент по охране, контролю и регулированию использования животного мира. [Электронный ресурс] URL: https://old-dozhm.midural.ru/article/show/id/1065 (дата обращения 12.01.2026).

## СЕКЦИЯ: ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

# СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

*Бойкин Д.Р. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Павличенко И.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты функционирования электроприемников в составе систем электроснабжения промышленных предприятий. На основе анализа учебно-методической литературы систематизированы классификационные признаки электроприемников по роду тока, напряжению, режимам работы и требуемой надежности. Особое внимание уделено категориям надежности электроснабжения как ключевому фактору, определяющему архитектуру системы.

Современное промышленное предприятие представляет собой сложный комплекс технологических установок, объединенных единым производственным циклом. Бесперебойное функционирование этих установок напрямую зависит от качества и надежности системы электроснабжения. Центральным звеном этой системы выступают электроприемники – устройства, преобразующие электрическую энергию в другие виды энергии (механическую, тепловую, химическую, световую) для производственного использования [1, 3].

В научной и учебной литературе, в частности в работах авторов Алтайского государственного технического университета, уделяется значительное внимание систематизации знаний об электроприемниках. Как отмечают Е.В. Шипицына и А.А. Грибанов, именно характеристики электроприемников определяют требования к питающим сетям, выбору оборудования и схемным решениям [2].

Актуальность темы обусловлена возрастающими требованиями к энергоэффективности и надежности промышленного производства, а также необходимостью оптимизации затрат на создание и эксплуатацию систем электроснабжения.

Целью данной статьи является комплексный анализ классификации электроприемников, исследование подходов к обеспечению требуемой надежности

электроснабжения и рассмотрение современных методов повышения энергоэффективности на примере частотно-регулируемого привода.

В научно-технической литературе принято разграничивать понятия «электроприемник» и «потребитель электроэнергии». Согласно определению, приведенному в учебно-методическом пособии А.А. Грибанова, Е.В. Шипицыной и В.И. Сташко, электроприемник (ЭП) – это электрическая часть производственной установки (аппарат, агрегат, механизм), получающая электроэнергию от источника и преобразующая ее в другие виды энергии для использования [3, 7].

Под потребителем электроэнергии понимается электроприемник или группа электроприемников, объединенных единым технологическим процессом и размещенных на определенной территории [2, 7]. Таким образом, для энергосистемы потребителем выступает предприятие в целом или его отдельный цех, в то время как для внутризаводских сетей объектом рассмотрения являются конкретные электроприемники.

По роду тока различают электроприемники переменного, постоянного и импульсного тока [2]. Основная масса промышленных приемников работает на переменном трехфазном токе промышленной частоты 50 Гц, что обусловлено простотой генерации, трансформации и распределения [2, 3].

Электроприемники постоянного тока широко используются на электрифицированном транспорте, в электролизных и гальванических производствах. Как отмечают авторы, такие приемники, как правило, питаются через индивидуальные или групповые преобразовательные агрегаты (полупроводниковые выпрямители, двигатель-генераторы), и с точки зрения системы электроснабжения они рассматриваются как приемники трехфазного тока [1, 2].

Электроприемники повышенной частоты (до 10 кГц и выше) применяются в установках индукционного нагрева, для питания высокоскоростных электродвигателей в деревообрабатывающей и текстильной промышленности. Для получения частоты до 10 000 Гц применяют тиристорные преобразователи, для частоты свыше 10 000 Гц – электронные генераторы [2]. Пониженная частота (16,6 Гц, 25 Гц) используется в некоторых системах тягового электропривода и в установках для перемешивания металла в печах [2].

По уровню номинального напряжения электроприемники разделяются на две основные группы: до 1 кВ и выше 1 кВ [2]. К первой группе относятся приемники малой и средней мощности (как правило, до 200-250 кВт), питающиеся от сети 380, 660 В. Ко второй группе – мощные приемники (выше 100-200 кВт), подключаемые к

сетям 6, 10 кВ и выше. Выбор напряжения питания определяется технико-экономическими расчетами и зависит от мощности приемника, удаленности от источника питания и требований к потерям электроэнергии [2].

Режим работы электроприемника существенно влияет на его нагрев и, следовательно, на выбор питающих линий и защитной аппаратуры. В соответствии с ГОСТ 183-74 различают три основных режима [1, 3]:

1) продолжительный режим характеризуется длительной работой с неизменной или мало меняющейся нагрузкой. За это время температура частей электроприемника достигает установившегося значения. К таким приемникам относятся двигатели насосов, вентиляторов, компрессоров, нагревательные печи;

2) кратковременный режим предполагает работу с номинальной нагрузкой в течение короткого времени, за которое температура не успевает достигнуть установившегося значения. Пауза при этом достаточна для охлаждения приемника до температуры окружающей среды. Примеры – приводы задвижек, вспомогательные механизмы;

3) повторно-кратковременный режим характеризуется чередованием рабочих периодов и пауз, причем длительность цикла не превышает 10 минут. Нагрев и охлаждение за цикл не достигают установившихся значений. Важнейшей характеристикой этого режима является продолжительность включения (ПВ), выражаемая в процентах или относительных единицах [1].

Стандартные значения ПВ составляют 15, 25, 40 и 60%. К приемникам этого режима относятся двигатели кранов, сварочные аппараты.

Одним из важнейших классификационных признаков является требуемая степень надежности электроснабжения. Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ, глава 1.2, п. 1.2.17–1.2.21), электроприемники разделяются на три категории [1, 2, 8]:

Первая категория – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству, повреждение дорогостоящего оборудования, массовый брак продукции или расстройство сложного технологического процесса [1, 2, 8]. Они должны обеспечиваться питанием от двух независимых взаимно резервирующих источников, а перерыв допускается лишь на время автоматического ввода резерва (АВР) – обычно в пределах 0,5–1 секунды [1, 3, 8].

Из состава первой категории выделяется особая группа – электроприемники, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства

с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров [2, 8]. Для них требуется третий независимый источник питания (например, дизель-генераторная установка или источник бесперебойного питания) [1, 2].

Вторая категория – электроприемники, перерыв питания которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих и механизмов, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей [2, 3, 8]. Допускается их питание от двух независимых источников, но перерыв может быть допущен на время, необходимое для включения резерва дежурным персоналом или выездной бригадой (до нескольких часов) [3, 8].

Третья категория – все остальные электроприемники, не подходящие под определения первых двух категорий [2, 3]. Для них достаточно одного источника питания, а перерыв может составлять до 24 часов подряд [1, 2].

Как отмечают исследователи, понятие «категория электроприемника по надежности электроснабжения» правомерно только в отношении индивидуального электроприемника, а для потребителя характерно сочетание в различных пропорциях электроприемников разных категорий [8]. Однако на практике часто наблюдается стремление завысить требования к надежности, что приводит к неоправданному удорожанию систем электроснабжения [8].

В современных условиях актуальным становится применение риск-ориентированного подхода к категорированию электроприемников. М.С. Ершов с соавторами предлагают методику, основанную на анализе факторов риска и их последствий [8]. Классификация рисков включает государственный риск, риск влияния на персонал, имущественный риск, производственно-экономический риск и экологический риск [8].

Особое значение при категорировании приобретает учет допустимого времени перерыва электроснабжения, которое должно быть обосновано инерционностью технологических процессов [8]. Предлагается дифференцировать электроприемники по группам в зависимости от допустимого времени перерыва: от недопускающих разрыва синусоиды питающего напряжения до допускающих неограниченный перерыв [8].

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Классификация электроприемников по роду тока, напряжению, режиму работы и требуемой надежности служит теоретической основой для проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий. Правильный учет этих

характеристик позволяет выбирать рациональные параметры питающих сетей, коммутационной аппаратуры и схемных решений.

2. Категория надежности электроснабжения является ключевым фактором, определяющим архитектуру системы. От правильного отнесения электроприемников к соответствующей категории зависят как бесперебойность технологического процесса, так и капитальные затраты на создание системы электроснабжения. Современные подходы к категорированию должны основываться на анализе рисков и учете допустимого времени перерыва питания.

3. Экономические последствия недостаточного резервирования могут быть весьма значительными, достигая миллионов рублей убытков за сутки простоя. В то же время избыточное резервирование приводит к неоправданному удорожанию системы.

4. Применение частотно-регулируемого привода является эффективным средством повышения энергоэффективности промышленных предприятий, позволяя экономить до 30–50% электроэнергии в насосных и вентиляторных установках. Однако требуется учет вопросов электромагнитной совместимости преобразователей частоты с питающей сетью.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на совершенствование методик оценки рисков при категорировании электроприемников, разработку алгоритмов оптимального резервирования, а также на исследование режимов работы частотно-регулируемого привода в условиях нестабильного качества электроэнергии.

**Список используемых источников**

1. Галушко В.Н., Додолев С.Г. Надёжность электроустановок и энергетических систем / М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2014. 140 с.

2. Грибанов А.А., Серебряков Н.А. Эффективность применения частотного регулирования скорости вращения асинхронного двигателя // Горизонты образования: 11-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2014» (г. Барнаул, АлтГТУ, апрель – июнь 2014 г.). Секция «Электроэнергетика». Подсекция «Электроснабжение промышленных предприятий». 2014. Выпуск 16. С. 5-20.

3. Грибанов А.А., Шипицына Е.В., Сташко В.И. Электроприёмники и потребители электрической энергии: учебно-методическое пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 74 с.

4. Ершов М.С., Комков А.Н., Мелик-Шахназарова И.А. Методика категорирования надежности электроприемников на основе анализа факторов риска и их последствий // Известия РАН. Энергетика. 2022. № 2. С. 16–26.

5. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. 115 с.

6. Расчет электрических нагрузок потребителей: учебное пособие / Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2018. 64 с.

7. Шипицына Е.В., Грибанов А.А. Приемники электрической энергии в системах электроснабжения: учебно-методическое пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 56 с.

8. Шипицына Е.В., Грибанов А.А. Приёмники электрической энергии в системах электроснабжения: учебно-методическое пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 74 с.

# ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ: ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ СОВОКУПНОЙ СТОИМОСТИ ВЛАДЕНИЯ

*Бойкин Д.Р. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Павличенко И.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В статье представлен углубленный экономический анализ эффективности внедрения силовых трансформаторов с сердечниками из аморфной стали в распределительном сетевом комплексе России. Обосновано применение методологии совокупной стоимости владения (LCC) как основного инструмента для принятия инвестиционных решений. Выполнен детальный расчет экономии на оплате потерь электроэнергии с использованием актуальных тарифных ставок 2025 года, дифференцированных по уровням напряжения и регионам.

Одной из ключевых проблем современного распределительного сетевого комплекса (РСК) России является высокий уровень потерь электрической энергии, который на протяжении последнего десятилетия стабилизировался на отметке 8,1–8,5% при доле затрат на их компенсацию в необходимой валовой выручке (НВВ) около 31% [1, с. 96].

Значительный вклад в технические потери вносит морально и физически устаревшее оборудование подстанций, в первую очередь силовые трансформаторы, значительная часть которых была установлена в 70-80-е годы XX века [2, с. 40].

Перспективным направлением решения проблемы является замена устаревших трансформаторов на современные энергоэффективные аналоги с магнитопроводами из аморфной стали (металлического стекла), позволяющие снизить потери холостого хода в 3-4 раза [2, с. 41–42]. Однако более высокая первоначальная стоимость таких трансформаторов (на 30–50% выше традиционных) требует тщательного экономического обоснования инвестиций.

Целью данной статьи является проведение углубленного экономического анализа эффективности внедрения энергоэффективных трансформаторов в распределительных сетях на основе методологии совокупной стоимости владения с использованием актуальных тарифных данных 2025 года и учетом комплекса факторов, влияющих на инвестиционную привлекательность.

Для объективной оценки экономической эффективности инвестиций в энергоэффективные трансформаторы необходимо применять методологию анализа совокупной стоимости владения (Life Cycle Cost, LCC) [8]. Данный подход учитывает не только первоначальные капитальные затраты (CAPEX), но и все эксплуатационные расходы (OPEX) на протяжении всего жизненного цикла оборудования, включая стоимость потерь электроэнергии, затраты на техническое обслуживание и утилизацию [2, с. 42].

Как показывают исследования, для силовых трансформаторов распределительных сетей наибольшую долю в совокупной стоимости владения (до 60–70%) составляют именно затраты на компенсацию потерь электроэнергии [2, с. 43]. Это делает снижение потерь ключевым фактором экономической эффективности.

Для корректного расчета стоимости потерь необходимо использовать актуальные тарифные ставки, утвержденные Федеральной антимонопольной службой. В соответствии с приказом ФАС России от 24.10.2024 № 766/24, на 2025 год установлены предельные уровни тарифов на услуги по передаче электрической энергии [7].

Особый интерес для расчета стоимости потерь представляет ставка на оплату технологического расхода (потерь) электрической энергии, которая дифференцирована по уровням напряжения и субъектам Российской Федерации [7].

Для потребителей, не относящихся к населению, тарифы дифференцированы по четырем уровням напряжения: ВН (110 кВ и выше), СН1 (35 кВ), СН2 (20-1 кВ) и НН (ниже 1 кВ) [9]. На 2025 год установлены следующие диапазоны тарифов [9]:

– ВН: 0,93–2,73 руб./кВт·ч;
– СН1: 2,05–3,07 руб./кВт·ч;
– СН2: 2,78–3,78 руб./кВт·ч;
– НН: 4,20–5,30 руб./кВт·ч.

Приведенные данные свидетельствуют о существенной дифференциации тарифов по уровням напряжения, что необходимо учитывать при расчете экономического эффекта от снижения потерь в трансформаторах различного класса.

Современные международные исследования подтверждают значительные преимущества аморфных трансформаторов с точки зрения оценки жизненного цикла. Согласно работе, опубликованной в журнале «Sustainable Materials and Technologies» (Elsevier, 2025), применение сердечников из аморфной стали позволяет снизить воздействие на окружающую среду на этапе «от производства до утилизации» почти на 50% по сравнению с традиционной электротехнической сталью [4].

Как показывают исследования, при высокой загрузке трансформатора (более 50%) и учете потерь короткого замыкания (которые также несколько ниже у аморфных трансформаторов за счет лучшей магнитной проницаемости) срок окупаемости может сокращаться до 5-8 лет [2, с. 44; 4].

Важно отметить, что исследование ВМФ США (Naval Civil Engineering Laboratory) еще в 1990 году показало, что для трансформаторов мощностью 1500 кВА при загрузке 90% и ценовой разнице 15% срок окупаемости составляет всего 2-3 года, а экономия за жизненный цикл достигает 75 000 долларов (в ценах 1990 года) [5; 10].

Экономическая эффективность внедрения энергоэффективных трансформаторов чувствительна к ряду факторов, анализ которых необходим для принятия обоснованных инвестиционных решений.

Как следует из данных таблицы 1, тарифные ставки существенно различаются по регионам. Наибольшая экономия достигается в регионах с высокими тарифами (Забайкальский край – 1 349 руб./МВт·ч для уровня ВН1), наименьшая – в регионах с относительно низкими тарифами.

Прогнозируемый рост тарифов на электроэнергию (с учетом инфляции и инвестиционных программ сетевых организаций) повышает инвестиционную привлекательность энергоэффективного оборудования. По данным [1], удельная стоимость 1% потерь в номинальном выражении стабильно растет, и, хотя в реальном выражении (с учетом дефлятора) рост незначителен, для инвестиционных расчетов следует использовать номинальные значения с прогнозным темпом роста 4–5% ежегодно.

Потери холостого хода не зависят от загрузки трансформатора и возникают всегда при подключении под напряжение. Поэтому экономия от их снижения достигается постоянно. Потери короткого замыкания пропорциональны квадрату тока нагрузки. При средней загрузке распределительных трансформаторов 30–50% [2, с. 44], доля потерь короткого замыкания в общих потерях составляет 50–70%, что также создает потенциал для экономии.

При высокой ставке дисконтирования (более 15%) срок окупаемости увеличивается, и проекты могут становиться непривлекательными для частных инвесторов. Однако для сетевых организаций с государственным участием и регулируемой доходностью приемлемыми считаются проекты со сроком окупаемости до 10–12 лет.

Помимо прямой экономии на оплате потерь, внедрение энергоэффективных трансформаторов дает ряд дополнительных эффектов, которые должны учитываться при комплексной оценке [2; 10]:

– экологический эффект: снижение выбросов парниковых газов за счет уменьшения потерь электроэнергии на 50–70% на этапе эксплуатации. По данным оценки жизненного цикла (LCA), аморфные трансформаторы являются наиболее экологичными по сравнению с традиционной технологией [4];

– социальный эффект: снижение уровня шума (аморфные трансформаторы работают тише благодаря меньшей магнитострикции), что важно при размещении в жилых зонах [2];

– эффект повышения надежности: более низкая температура нагрева сердечника увеличивает срок службы изоляции и межремонтные интервалы;

– макроэкономический эффект: снижение потерь в распределительном комплексе на 1% (с 8,1% до 7,1%) при объеме отпуска электроэнергии в сеть около 900 млрд кВт·ч позволит сэкономить 9 млрд кВт·ч ежегодно, что при средней цене 3,5 руб./кВт·ч составляет 31,5 млрд руб. в год [1, с. 96–97].

На основе проведенного анализа можно сформулировать следующие рекомендации:

– для распределительных сетей 6-10/0,4 кВ с высокой загрузкой (свыше 40%) и расположенных в регионах с высокими тарифами на электроэнергию, замена устаревших трансформаторов на аморфные является экономически обоснованной со сроком окупаемости 5-8 лет [2, с. 44];

– для трансформаторов собственных нужд подстанций, работающих круглосуточно с постоянной низкой загрузкой, применение аморфных трансформаторов также эффективно, так как потери холостого хода составляют основную долю общих потерь [8];

– при формировании инвестиционных программ сетевых организаций целесообразно включать показатели совокупной стоимости владения (LCC) в критерии конкурсного отбора поставщиков трансформаторного оборудования, а не ориентироваться исключительно на минимальную цену приобретения;

– необходим учет тарифных последствий: снижение потерь в сетях приводит к уменьшению необходимой валовой выручки (НВВ) в части затрат на компенсацию потерь, что создает предпосылки для сдерживания роста тарифов для конечных потребителей.

Проведенный углубленный экономический анализ позволяет сделать следующие выводы:

– применение методологии совокупной стоимости владения (LCC) является необходимым условием для объективной оценки эффективности инвестиций в энергоэффективное оборудование, поскольку традиционный подход, ориентированный на минимизацию первоначальных затрат, не учитывает доминирующую роль эксплуатационных расходов (до 60-70% в LCC);

– несмотря на более высокие первоначальные капитальные затраты (на 30-50%), трансформаторы с сердечниками из аморфной стали обеспечивают существенную экономию на протяжении жизненного цикла за счет кратного снижения потерь холостого хода;

– при актуальных тарифных ставках 2025 года (от 0,93 до 5,30 руб./кВт·ч в зависимости от уровня напряжения) дисконтированный срок окупаемости дополнительных инвестиций составляет 5–12 лет при нормативном сроке службы 30 лет, что соответствует критериям эффективности инвестиционных проектов в электроэнергетике;

– наибольший экономический эффект достигается при комплексной замене парка трансформаторов в масштабах распределительного сетевого комплекса, позволяя снизить потери электроэнергии на 0,5–1,0 процентный пункт и получить макроэкономический эффект в десятки миллиардов рублей ежегодно;

– для практической реализации рекомендуется включение критериев LCC в инвестиционные программы сетевых организаций и конкурсные процедуры отбора поставщиков трансформаторного оборудования.

Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на разработку методики оптимального планирования замены трансформаторного парка с учетом возраста оборудования, режимов загрузки и территориальной дифференциации тарифов.

**Список используемых источников**

1. Приказ ФАС России от 24.10.2024 № 766/24 «Об утверждении предельных уровней тарифов на услуги по передаче электрической энергии по электрическим сетям, принадлежащим на праве собственности или ином законном основании территориальным сетевым организациям, на 2025 год» / СПС «Гарант». [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/410881228/ (дата обращения: 03.02.2026).

2. Приказ ФАС России от 24.10.2024 № 767/24 «Об утверждении предельных уровней тарифов на услуги по передаче электрической энергии для населения и приравненных к нему категорий потребителей на 2025 год» / СПС «Гарант». [Электронный ресурс]. URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/410881230/ (дата обращения: 03.02.2026).

3. Приказ ФАС России от 24.07.2025 № 570/25 «О внесении изменений в приказ ФАС России от 24.10.2024 № 766/24» / Официальное опубликование правовых актов. [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202507250039 (дата обращения: 03.02.2026).

4. Применение теории полного жизненного цикла при выборе аморфных трансформаторов для подстанций // Shaanxi Electric Power. 2018. Vol. 46, Issue 4. P. 63–69.

5. Хомутов С.О., Белицын И.В., Сабельников А.С. Сравнительный анализ структуры потерь электрической энергии в распределительном сетевом комплексе

России // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 2 (244). С. 92–98. DOI: 10.53083/1996-4277-2025-244-2-92-98.

6. Хомутов С.О., Белицын И.В., Сабельников А.С., Степанов О.А., Литвинова Н.А., Шлык Ю.К. Синтез альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2025. № 3. С. 39–45. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.039-045.

7. Хомутов С.О., Сташко В.И., Родт С.А. Интеллектуальная энергетика – 2022 // Развитие энергетики Алтайского края и актуальные вопросы энергосбережения, повышения энергетической эффективности и внедрения новых технологий. – Барнаул: ООО «МЦ ЭОР», 2022. DOI: 10.57112/22022.

8. Comparative life cycle sustainability of transformer cores with metallic glass alloys // Sustainable Materials and Technologies. Elsevier, 2025. Vol. 43. e00245.

9. Life cycle assessment and inrush currents measurement of amorphous transformers // IET Conference Publications. – 2013. – Vol. 2013, Issue 624 CP.

10. Life-cycle costs of non-PCB distribution transformer alternatives. Final report. – Naval Civil Engineering Laboratory, USA, 1990. OSTI ID: 6490869.

## ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ МАКЕТА ПРОМЫСЛОВОГО КАТАМАРАНА ДЛЯ ТРАЛОВОГО ПРОМЫСЛА

*Волошин А.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»*

*Недоступ А.А. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»*

*Ражев А.О. – к.т.н., ведущий научный сотрудник отдела НИОКР УНИД, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»*

**Аннотация**

Переход на электроэнергию способствует повышению эффективности производственных процессов в различных сферах деятельности, в частности в рыбохозяйственном комплексе. Промышленное рыболовство должно развиваться по этому пути, поскольку большинство промысловых операций на рыбодобывающих судах выполняется вручную. Исследователи данной статьи работают над повышением мощности макета промыслового катамарана, работающего на электротяге, с целью достижения достаточной тяговой способности судна при буксировке трала.

## Введение

Электроэнергия становится все более востребованным источником энергии, позволяющим создавать современные системы управления, инструменты с повышенной точностью измерения и различные механизмы с высоким уровнем автоматизации. Преобразование электрической энергии в механическую работу имеет высокий потенциал внедрения во все производственные сферы. Работа электродвигателя в совокупности с элементами трансмиссии, передающими крутящий момент к ведущему элементу, позволяет создавать и внедрять инновационные методы и технологии в процессы производства различных предприятий. Такое направление упрощает физический труд сотрудников, что ведет к сокращению трудовых ресурсов с целью удешевления стоимости производства, что является приоритетом для любых коммерческих организаций. В то же время такая тенденция ведет к развитию инфраструктуры и увеличению количества квалифицированных кадров – среднего класса общества. Так или иначе, любое государство идет по пути развития и для этого на сегодняшний день актуально использование электроэнергии.

Для промышленного рыболовства механизация и автоматизация промысловых процессов всегда были актуальны ввиду тяжелых условий труда. Согласно источнику [1], уровень механизации существующих промысловых схем не превышает 40%, что является низким показателем. По этой причине следует активнее внедрять электропривод в промысловое оборудование рыбодобывающих судов, разрабатывая программные продукты по мониторингу и регулированию выходных параметров. При всем этом требуется учитывать условия окружающей среды, поскольку во время эксплуатации орудий лова возникают динамические процессы, влияющие на выходные параметры. Траловый лов, как наиболее продуктивный вид добычи гидробионтов, во время траления подвергается агрегатному сопротивлению, которое с увеличением скорости судна также возрастает. Чтобы траулер мог развивать достаточную скорость и тягу необходимо проектировать судно с высокой мощностью главного двигателя и подбирать наилучшие варианты конструкции трала, обладающие минимальным агрегатным сопротивлением.

## Объекты и методы

Цель данной статьи заключается в увеличении мощностных характеристик промысловых судов маломерного флота, работающих на электротяге, для надежной и эффективной буксировки траловых конструкций в различных морских и прибрежных условиях. Проблема заключается в том, что наибольшее распространение получили

суда на дизельном топливе, поэтому требуется тщательное проведение исследований по данному направлению. Дизель-электрический двигатель широко применяется на промысловых судах, генерируя электроэнергию от механической работы дизельного топлива. Однако ввиду множества недостатков двигателей внутреннего сгорания, к которым относятся низкий коэффициент полезного действия (КПД), большие габариты, неэкологичность, регулярное и комплексное обслуживание, внушительные затраты на топливо [2], более разумно использовать электроэнергию для питания как главного двигателя, так и промысловых механизмов, и судовых систем.

При облове косяка рыбы и разряженных скоплений судно обязано иметь достаточную тягу и скорость при тралении, чтобы промысловый объект аккумулировался в траловом мешке. При малой скорости целевой объект соответственно не будет облавливаться, а при большой скорости – будет просачиваться сквозь большую ячею, не успевая отпугиваться от стенок траловой сети. Таким образом, требуется достижение достаточной и сбалансированной тяги для буксировки траловой конструкции с накапливаемым в кутке уловом. Для этого следует проектировать суда со значительной мощностью и возможностью регулирования выходной мощности благодаря внедрению систем управления. Наиболее актуальна реализация автоматизированных систем, которые затрагивают IT-сферу. Проектирование судов также относится к другой сфере деятельности – судостроению. Так, на пути к разработке автоматизированных систем траления, промышленное рыболовство сталкивается с междисциплинарностью, что затрудняет развитие данной отрасли. Тем не менее кафедра промышленного рыболовства КГТУ работает в этом направлении, проводя экспериментальные испытания с физической моделью, представленной на рисунке 1.



Рис.1. Макет промыслового катамарана

Источник: из личных архивов авторов

Исследователи данной статьи работают над повышением мощности главного двигателя для увеличения тяги макета катамарана. На выходную мощность можно повлиять несколькими способами. Во-первых, проще всего использовать электромоторы с изначально высоким номинальным значением мощности. Во-вторых, большое значение имеет схема подключения (рис. 2). Последовательное подключение в таком случае нерационально, оно понижает мощность каждого двигателя, но в то же время уменьшает энергопотребление, что увеличивает время потребления электроэнергии от аккумуляторной батареи. Для повышения конкретно мощности следует подключать их параллельно или искать баланс между мощностью и потреблением электроэнергии, используя комбинированную схему подключения.

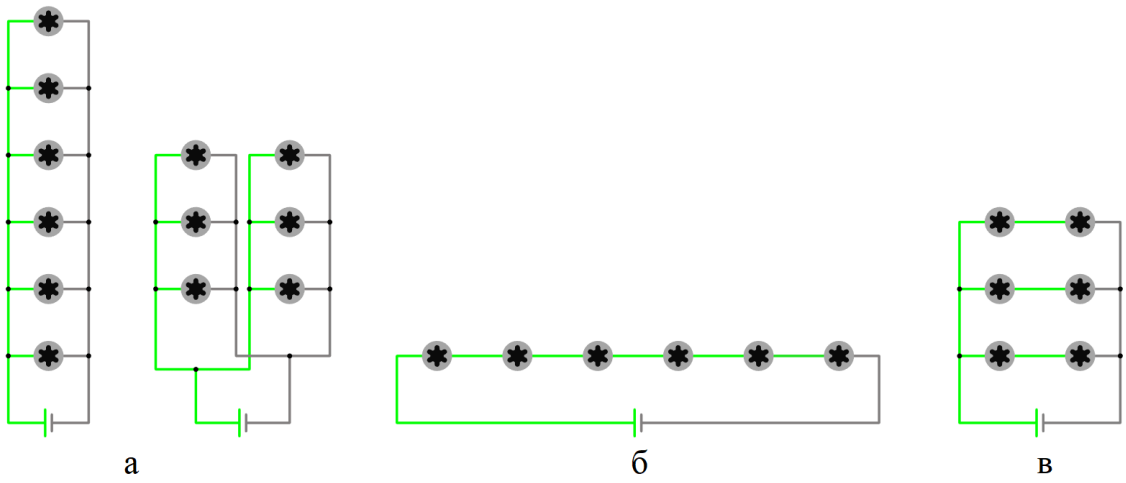



Рис. 2. Схемы подключения электродвигателей:

а) параллельное; б) последовательное; в) комбинированное [3]

Кроме использования мощных электродвигателей и подключения их параллельно, повысить мощность возможно благодаря оснащению схемы дополнительными аккумуляторными батареями (рис. 3). Если использовать одинаковые по техническим характеристикам заряженные аккумуляторные батареи, то при подключении их последовательно кратно их количеству повышается напряжение в сети, что многократно увеличивает мощность системы. Но при этом электроемкость цепи не увеличивается, и следует принимать во внимание технические характеристики используемых электродвигателей, превышение их номинальных характеристик приведет к поломке или уменьшению срока эксплуатации. При тех же условиях параллельное соединение не дает увеличения напряжения сети, но позволяет повысить электроемкость, что крайне важно для длительной эксплуатации в промысловой обстановке.

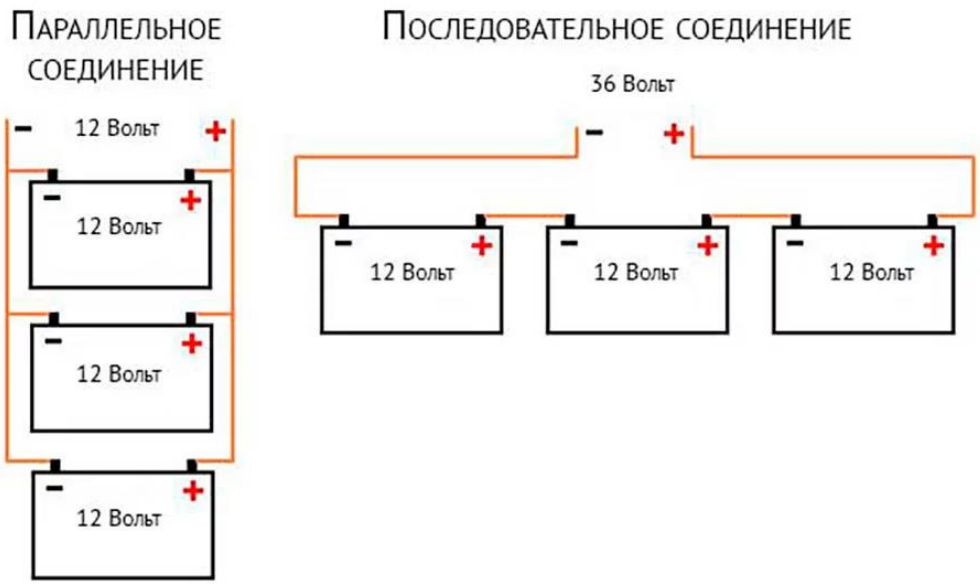



Рис. 3. Параллельное и последовательное соединение аккумуляторных батарей [4]

Возможно также комбинированное соединение аккумуляторных батарей. Например, если у нас есть шесть аккумуляторных батарей, мы можем подключить по три пары аккумуляторных батарей последовательно, а далее соединить выходные положительные контакты между собой и точно так же – выходные отрицательные, получая уже параллельное соединение с одним положительным и одним отрицательным выходом для дальнейшего подключения к какой-либо нагрузке

(электродвигателю). В таком случае, при условии, что аккумуляторные батареи идентичны по техническим параметрам и степени зарядки, напряжение повысится в два раза, а электроемкость – в три раза. Рассматривая тот же пример с шестью идентичными аккумуляторными батареями, можно было бы также соединить по три аккумуляторных батареи последовательно, а полученную пару соединить между собой параллельно с выводом фазы и нуля. Выходное напряжение теперь будет увеличено в три раза, но электроемкость увеличится лишь в два раза. Таким образом, в зависимости от поставленной задачи выбирается подходящее подключение.

При объединении нескольких аккумуляторных батарей необходимо следовать определенным мерам предосторожности. Наилучшим решением является использование батарей, идентичных по напряжению, емкости и состоянию заряда. Также желательно, чтобы производитель был один и тот же. Объединение аккумуляторных батарей с разными техническими характеристиками чревато неравномерной работой, что приведет к повреждениям или ускорит процесс износа. Кроме того, следует применять провода с одинаковым сечением и обеспечивать надежное крепление контактов, чтобы избежать аварийной ситуации. Необходимо, чтобы сопротивление на проводниках не вносило существенного дисбаланса в работу системы. Для обеспечения более надежной работы с аккумуляторными батареями предпочтительно использовать защитную электронику (BMS) [5].

**Экспериментальная часть**

На рисунке 4 изображены испытания с макетом промыслового катамарана. Производилось снятие показаний по выходным значениям силы тока и напряжения, силы тяги и частоты оборотов. Представленный макет представляет собой две модели лодки, объединенные платформой, что имеет важную конструкторскую роль. Эта платформа предназначена для вмонтирования в нее кабельно-сетного барабана, что позволяет работать с тралом. Инновационность разработки заключается в том, что можно вмонтировать и другие промысловые механизмы под соответствующие методы добычи водных биологических ресурсов. Кроме того, сама платформа может быть демонтирована, что упрощает процесс транспортировки и делает его более надежным. Вдобавок демонтаж платформы дает возможность, к примеру, для работы с близнецовым методом лова или кошельковым, где по двухботной схеме два судна сходятся вместе, заметывая невод.



Рис. 4. Проведение опытов с макетом промыслового катамарана

Источник: из личных архивов авторов

В качестве главного двигателя макета катамарана вмонтировано две площадки с тремя комплектами ременной передачи электродвигателей. Комплекты каждой платформы передают крутящий момент на соответствующий вал. Он, в свою очередь, передает крутящий момент на карданный вал, а тот – на выходной вал, к которому крепится гребной винт. Таким образом, происходит преобразование электрической энергии электродвигателей в механическую работу движителя.

На рисунке 5 представлена наглядная схема подключения двигателей для каждой модели лодки катамарана. Для обеспечения высокой выходной мощности была выбрана параллельная схема подключения. Она включает в себя шесть электродвигателей модели HANPOSE 895 с номинальным напряжением 24 В.

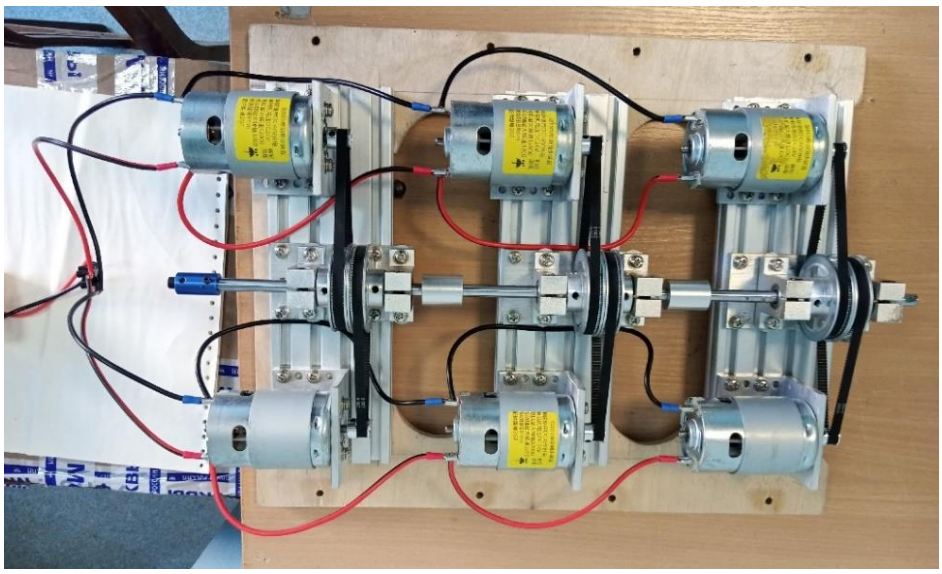


Рис. 5. Параллельное подключение электродвигателей

Источник: из личных архивов авторов

На рисунках 6–7 представлены электрические схемы подключения двигателей для каждой модели лодки с одной и шестью аккумуляторными батареями.

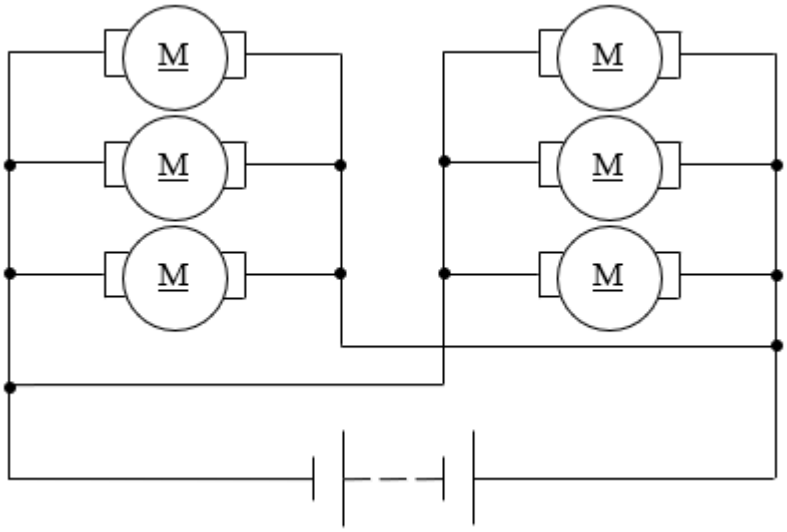



Рис. 6. Параллельное подключение двигателей с аккумуляторной батареей

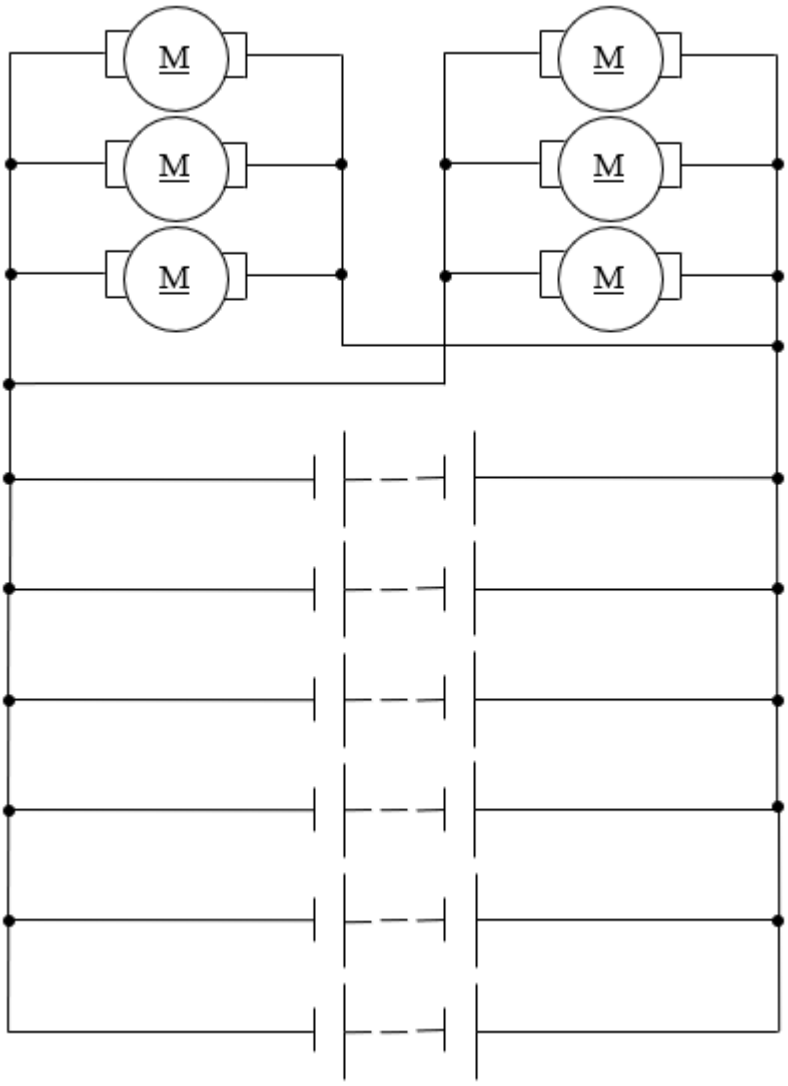



Рис. 7. Параллельное подключение с шестью аккумуляторными батареями
Источник: составлено авторами

На данный момент были проведены испытания только с одной аккумуляторной батареей на каждую лодку. Батарея является литий-ионной и состоит из аккумуляторов, соединенных по комбинированной схеме 5S4P. В дальнейшем планируется задействовать в общей сложности двенадцать таких батарей, номинальное напряжение которых составляет 21 В.

Как видно из рисунка 7, для подключения шести батарей выбрана параллельная схема, поскольку нельзя превышать номинальное напряжение электродвигателей. В последующих исследованиях кафедрой промышленного рыболовства будут проводиться испытания с более мощными электродвигателями. Это позволит использовать последовательное и комбинированное соединение для аккумуляторных батарей.

Наглядная схема подключения, с которой производились эксперименты в опытовом бассейне КГТУ, изображена на рисунке 8 и, помимо электродвигателей и аккумуляторной батареи, включает в себя цифровой вольтметр-амперметр, а также двухканальный модуль дистанционного управления. Испытания с данным модулем требуются для дальнейшей разработки автоматизированной системы траления. Получаемые наработки послужат фундаментом для реализации автоматики промысловых операций на отечественных рыбодобывающих судах.

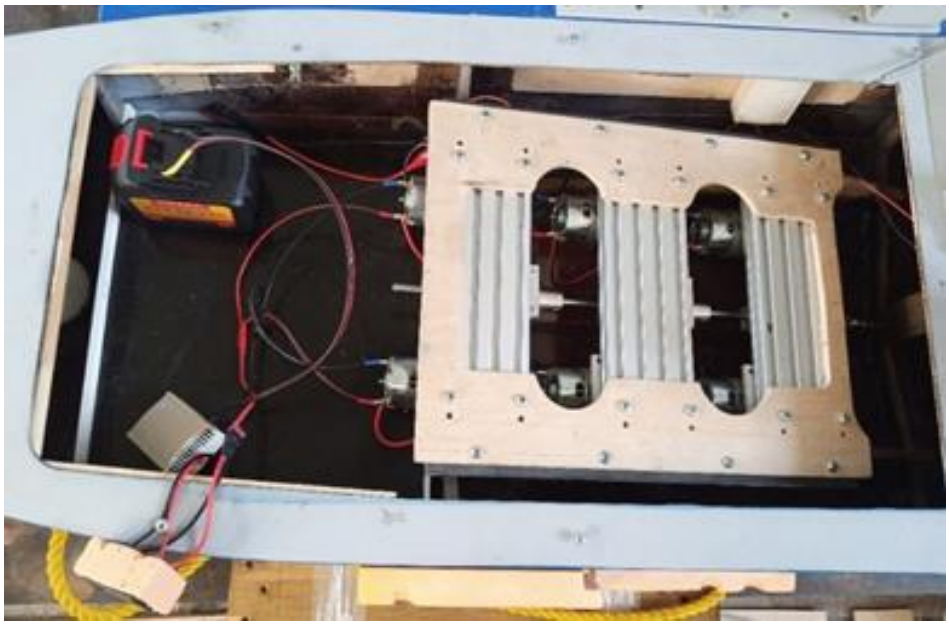


Рис. 8. Экспериментальная схема подключения с модулем дистанционного управления

Источник: из личных архивов авторов

На рисунке 9 отображена та же схема, что и на рисунке 8, но в более доступном для понимания виде. Авторы статьи не стали перегружать статью сложными электрическими схемами.

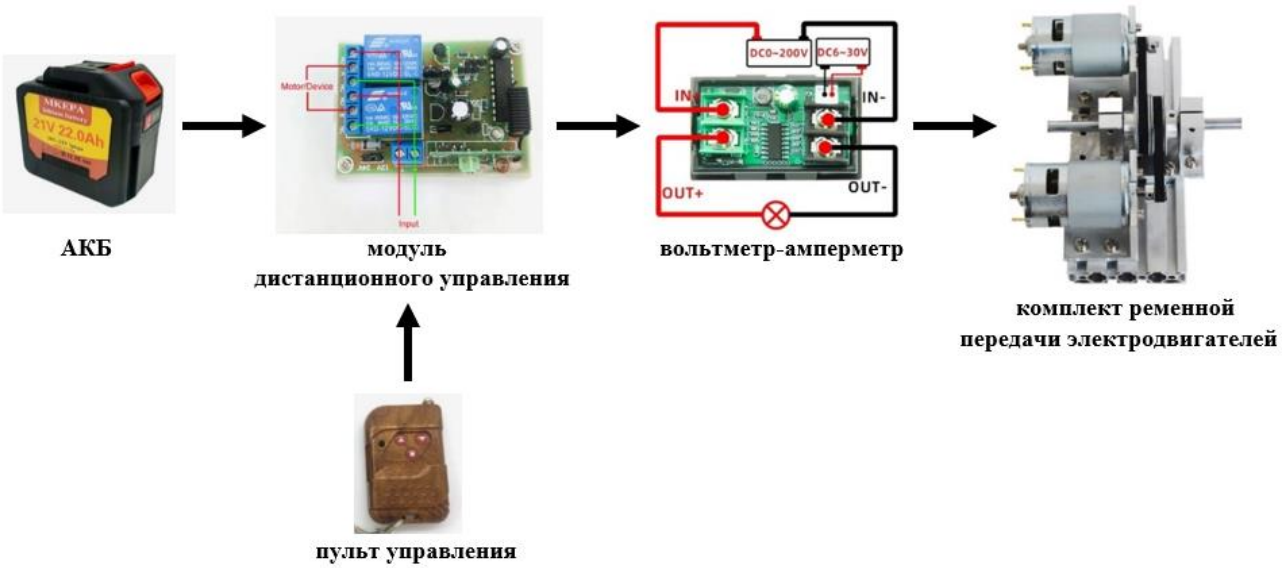



Рис. 9. Экспериментальная схема подключения с модулем дистанционного управления

Источник: из личных архивов авторов

Также эксперименты с макетом промыслового катамарана производились по несколько иной схеме (рис. 10), где был задействован модуль широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

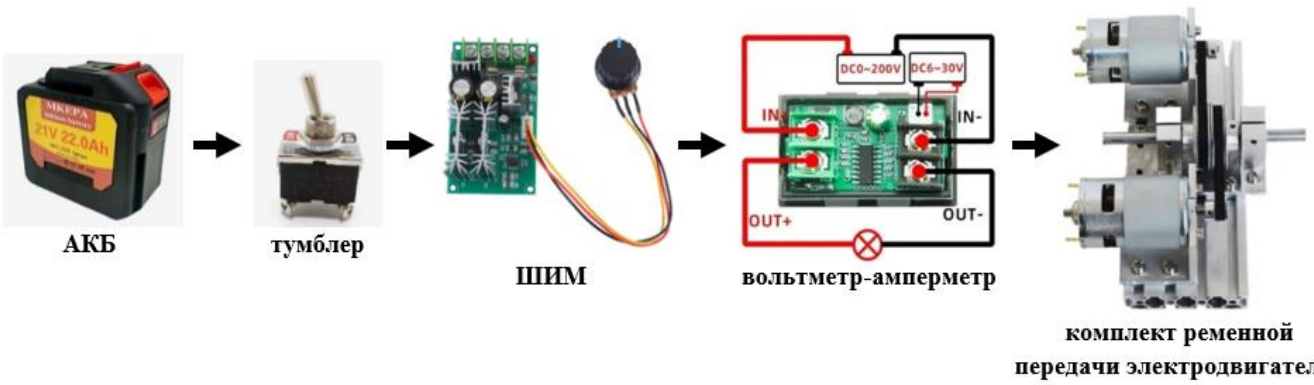



Рис. 10. Экспериментальная схема подключения с модулем ШИМ

Источник: из личных архивов авторов

Модуль ШИМ позволяет регулировать выходное напряжение, что влияет на силу тока, мощность и скорость в зависимости от характера нагрузки. Управление выходной мощностью особенно значимо в рамках данной научной статьи.

**Результаты и их обсуждение**

Поскольку главный двигатель макета промыслового катамарана работает от ременной передачи, то отключение электродвигателей (один из способов регулирования выходной мощности) следует производить парами, чтобы обеспечивать равномерную нагрузку на них. Перегрузка на отдельный электродвигатель может негативно сказаться на его работе и, соответственно, на работе всей системы. Особенно это касается последовательного соединения моторов, где любое отклонение в нагрузке приведет к несинхронной работе.

По поводу повышения мощности следует добавить, что важное значение имеет КПД. Чем меньше элементов в системе, тем больше электроэнергии уходит на полезную механическую работу. Поэтому необходимо свести к минимуму количество узлов и механизмов, передающих крутящий момент от электродвигателя к движителю. Сами элементы должны обладать высоким КПД и своевременно технически обслуживаться.

**Заключение**

Исследователи данной статьи работают над разработкой промысловой единицы на электротяге с высокой мощностью, что сможет обеспечить достаточную тяговую способность и скорость буксировки трала. Это необходимо для развития маломерного рыболовного флота, который нуждается в автоматизации. Авторы статьи ставят долгосрочную цель – сконструировать безэкипажную систему, промысловые операции которой будут контролироваться оператором с берега, а управление может быть как ручным, так и автоматическим. Помимо программирования, планируется внедрение в промысловые процессы искусственного интеллекта, который с недавних пор стал всеобъемлющим источником технического прорыва. Кроме того, кафедра промышленного рыболовства КГТУ нацелена на разработку программного обеспечения по автоматизированному проектированию (САПР) траловых систем.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме «Разработка беспроводной системы контроля параметров трала с элементами искусственного интеллекта “Автотрал”».

**Список используемых источников**

1. Бабинцев А.Ю., Суконнов А.В. Оценка работоспособности промысловых схем // Известия КГТУ. 2022. №66. С. 11–18.
2. Сравнение электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания / Inner.su. [Электронный ресурс]. URL: https://inner.su/articles/sravnenie-elektrodvigatelya-i-dvigatelya-vnutrennego-sgoraniya/?ysclid=mk1fvgydeb722157689 (дата обращения: 12.01.2026).
3. Симулятор электронных схем / Falstad.com. [Электронный ресурс]. URL: https://falstad.com/circuit/ (дата обращения: 20.01.2026).
4. Установка и подключение тяговых аккумуляторных батарей / Forklift.blog. [Электронный ресурс]. URL: https://www.forklift.blog/blog/ustanovka-i-podklyuchenie-tyagovykh-akkumulyatornykh-batarej (дата обращения: 25.01.2026).
5. Параллельное соединение Li-Ion аккумуляторов различной емкости / Wybor-battery.com. [Электронный ресурс]. URL: https://wybor-battery.com/blog/stati/parallelnoe-soedinenie-li-ion-akkumulyatorov-razlichnoy-emkosti?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera (дата обращения: 25.01.2026).

## ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

*Пономарева З.Р. – старший преподаватель, аспирант, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»*

*Вахнина В.В. – д.т.н., профессор, зав. кафедрой, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»*

**Аннотация**

Статья анализирует механизмы и последствия насыщения трансформаторов тока при переходных и установившихся режимах короткого замыкания, оценивает влияние апериодических составляющих и схем вторичных соединений на погрешности преобразования и селективность защит.

В переходных и установившихся режимах короткого замыкания (КЗ) трансформаторы тока (ТТ), используемые в цепях токовой защиты, нередко заходят в область насыщения магнитопровода, что существенно искажает форму вторичного

тока и приводит к заметному увеличению погрешностей преобразования. При проектировании и наладке релейных защит обычно ориентируются на требование: в установившемся режиме КЗ суммарная погрешность преобразования ТТ не должна превышать порядка десяти процентов. Однако реальная рабочая ситуация зачастую далека от идеальной синусоиды: в переходных процессах в первичном токе появляются апериодические составляющие с определёнными постоянными времени затухания, а мгновенные амплитуды токов повреждения могут многократно превосходить номинальные значения. В таких условиях точность преобразования определяется совокупностью факторов – кратностью тока КЗ, параметрами апериодической компоненты и её временем затухания, выбранной схемой включения вторичных обмоток ТТ и релейной аппаратуры, а также величиной и характером нагрузки вторичной цепи трансформатора; в пиковые моменты неустановившихся процессов погрешности способны резко возрасти и в наихудших сценариях приблизиться к практически полному искажению сигнала.

Практический анализ поведения ТТ имеет смысл вести через два выделяемых по физике процесса сценария. В первом случае насыщение инициируется выраженной апериодической (постоянной) составляющей первичного тока: трансформатор быстро выходит из линейной области, апериодика во вторичном токе подавляется или меняет знак, и в спектре резко возрастает содержание высших гармоник (в частности – второй и третьей порядков), тогда как амплитуда первой гармоники заметно уменьшается. Во втором случае насыщение наступает при отсутствии апериодики – например, при чрезмерной величине периодической составляющей или при неправильно подобранной вторичной нагрузке; здесь во вторичном токе доминируют нечётные гармоники, и суммарная погрешность остаётся относительно стабильной по времени, прежде всего изменяясь по амплитуде, а не по качеству формы. В реальных трёхфазных группах оба механизма часто взаимодействуют: трансформаторы разных фаз насыщаются с разной глубиной и в разное время, отчего фазно-зависимые искажения взаимно накладываются и значительно усложняют оценку поведения смежных защит.

Характер переходного процесса и длительность насыщения зависят от параметров защищаемой линии. На кабельных участках, где активная составляющая цепи относительно велика при малой индуктивности, постоянные времени затухания апериодики, как правило, невелики, и переходный процесс быстрее переходит в установившийся режим. На воздушных линиях апериодическая компонента может

сохраняться дольше, что удлиняет период насыщения ТТ и, соответственно, интервал повышенных погрешностей. Эволюция вторичного тока при наличии апериодики условно проходит стадии: начальная – линейная (вторичный ток адекватно воспроизводит первичный, включая апериодику), переход в насыщение (при экстремальных токах – уже в первый полупериод; в иных условиях – на втором-третьем периоде) с подавлением апериодики и ростом высших гармоник, и этап восстановления линейности по мере затухания апериодической составляющей.

Появление высших гармоник существенно искажает интегральные характеристики несинусоидального вторичного тока (действующее, среднее, амплитудное значения), что влечёт за собой расхождения показаний разных типов измерительных органов. Электромеханические реле, ориентирующиеся на квадратичную зависимость действующего значения, воспринимают все составляющие «как есть», что делает их более чувствительными к броскам и способно расширять зоны срабатывания. МПУ опираются на цифровую обработку: интегральные значения могут быть средними, действующими или амплитудными, вычисляемыми с различной дискретизацией; многие приборы выделяют первую гармонику через цифровые фильтры (например, ортогональное преобразование), поэтому при синусоидальном входе методы дают сопоставимые результаты, а в переходных условиях их показания расходятся – осложняет сравнительный анализ и согласование смежных защит.

Практические методы уменьшения влияния насыщения имеют разную эффективность в зависимости от сценария. Снижение вторичной нагрузки часто помогает при насыщении без апериодики, но при выраженной апериодике такое снижение может оказаться малоэффективным, поскольку насыщение может проявиться даже при закороченной вторичной обмотке. Цифровые алгоритмы реконструкции исходного сигнала по искажённым данным способны восстановить первую гармонику и апериодику, однако для их внедрения требуются повышенные вычислительные ресурсы и частота дискретизации. Аппаратной альтернативой является применение первичных преобразователей типа катушек Роговского: отсутствие ферромагнитного сердечника устраняет проблему насыщения, обеспечивает высокую точность передачи формы тока (включая апериодику) и низкую отдаваемую мощность, что потенциально позволяет уменьшать выдержки селективности между смежными ступенями. Практическая интеграция таких

датчиков требует предварительной отработки вопросов электромагнитной совместимости и накопления эксплуатационного опыта в конкретных сетях.

Для повышения прикладной ценности оценки влияния насыщения и снижения риска ложных и неселективных срабатываний предлагается в обязательном порядке проводить вычислительный эксперимент «сеть – ТТ – защита» на этапе проектирования или модернизации. В качестве простого числового примера влияния эффекта: при первичном токе короткого замыкания порядка 8000 А и коэффициенте трансформации ТТ 1000:1 идеальным значением вторичного тока будет 8 А; если вследствие насыщения эффективное вторичное значение падает до 4 А, относительная ошибка преобразования составит (8 – 4) / 8 = 0,5, то есть 50 %, – это иллюстрирует, как даже частичное подавление вторичного тока приводит к масштабному изменению реального сигнала, на который ориентируются реле. На практике такие оценки необходимо проводить в наборах сценариев с разной кривизной апериодики и разными значениями времени её затухания, чтобы получить статистически обоснованные поправки к уставкам и временным координатам защиты.

С учётом специфики региональных сетей целесообразно дополнительно предусмотреть локальные мероприятия. Для распределительных сетей средней напряжённости, характерных для ряда территорий, где широко распространены устаревшие электромеханические элементы и где кабельные и воздушные участки чередуются, рекомендовано внедрять комбинированную стратегию: моделирование критических точек сети с учётом реальных параметров линии, пилотная установка катушек Роговского на наиболее уязвимых участках и адаптация алгоритмов МПУ с учётом фактической реакции цифровых фильтров на высшие гармоники. Практическая валидация таких мер должна опираться на полевые измерения переходных процессов и на настройку селективности (Δt) с учётом реального возможного снижения вторичных токов при насыщении, а не только по расчётным действующим значениям установившегося режима.

Насыщение ТТ представляет особую угрозу для быстродействующих ступеней и максимальных токовых защит с обратно зависимой выдержкой времени: уменьшение тока в реле вследствие насыщения увеличивает время срабатывания смежных защит и может нарушать требование селективности, в результате чего проектировщики вынуждены увеличивать ступень селективности Δt, что замедляет ликвидацию аварий; при глубоком насыщении возможно даже падение тока ниже

тока возврата и отсутствие срабатывания вообще. В отличие от этого, МПУ благодаря цифровой фильтрации демонстрируют более стабильную зону срабатывания и меньшую чувствительность к броскам тока намагничивания, возникающим при включениях силовых трансформаторов или восстановлении напряжения после внешних КЗ.

Вывод. Высокая собственная точность микропроцессорных устройств релейной защиты не реализуется полностью при использовании традиционных трансформаторов тока, склонных к насыщению; это ведёт к увеличению вероятности замедленного или неселективного отключения повреждений. Полноценный учёт влияния насыщения ТТ, особенно объединённых в трёхфазные группы, требует комплексного подхода: моделирования «сеть – ТТ – защита» методом вычислительного эксперимента, внедрения реконструктивных алгоритмов в МПУ, а там, где целесообразно, - практической проверки и внедрения катушек Роговского. Только сочетание моделирования, полевых замеров и продуманной модернизации измерительной части позволит обоснованно выбирать уставки и типы преобразователей с учётом реальных переходных процессов и повысить надёжность и селективность защит.

**Список используемых источников**

1. Бурянина Н.С., Лесных Е.В., Лесных А.С., Суслов К.В., Артемьева М. Л. Алгоритм фильтрации апериодической составляющей в сигнале тока короткого замыкания // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. №2. С.97–104.

2. Глазырин В.Е., Осинцев А.А., Фролова Е.И., Ледовских А.А. Влияние погрешностей трансформаторов тока на работу цифровых токовых защит // Вестник КГЭУ. 2019. №2 (42). С.83–90.

3. Колобанов П.А., Куликов А.Л. Совершенствование аналитических методов исследования внутренних замыканий в двухобмоточных трансформаторах для целей релейной защиты // Вестник ИГЭУ. 2019. №1. С. 18-30.

4. Румянцев Ю.В., Романюк Ф.А., Румянцев В.Ю., Новаш И.В. Цифровой измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. №6. С. 483–393.

5. Темников Е.А., Никитин К.И. Применение искусственных нейронных сетей для коррекции насыщения трансформаторов тока и напряжения // ОНВ. 2025. №2 (194). С. 89–95.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ОДНОСТОРОННЕГО МАГНИТНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ В ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОМ ДВИГАТЕЛЕ

*Шевкунова А.В. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»*

*Мамруков А.И. – студент, ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»*

**Аннотация**

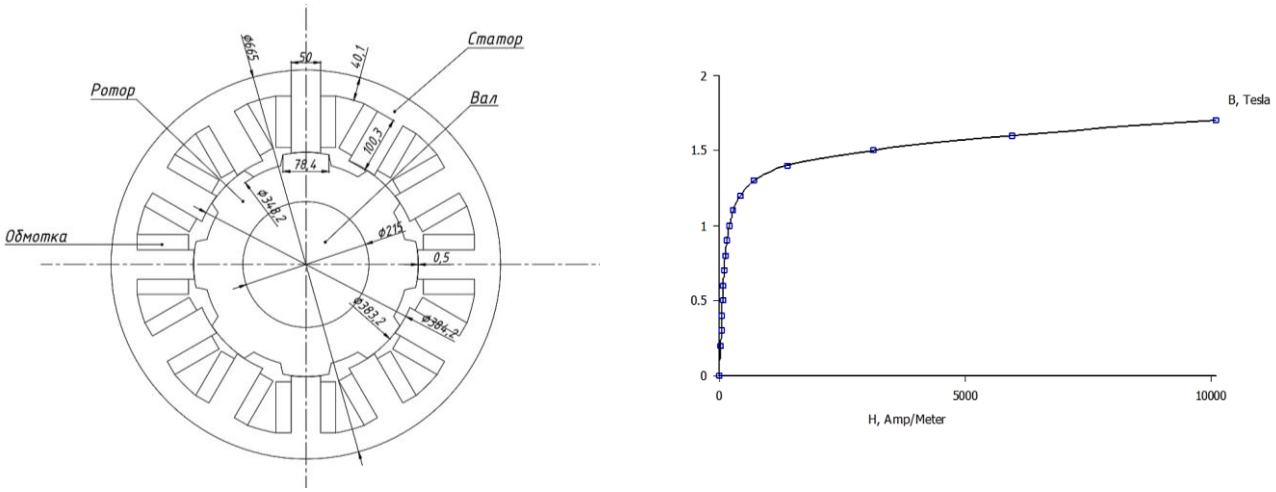
В статье исследуется влияние смещения ротора на возникновение сил одностороннего магнитного притяжения в вентильно-индукторном двигателе конфигурации 12/8. Методом конечных элементов проанализированы три характерных случая: комбинированное, чисто радиальное и чисто тангенциальное смещение. Установлено, что радиальное смещение создаёт максимальные пиковые нагрузки на подшипники, а тангенциальное – значительный постоянный опрокидывающий момент. Полученные данные важны для оценки механической прочности и виброакустических характеристик тяговых приводов. Результаты работы могут послужить основой для рекомендаций по проектированию надёжных двигателей вентильно-индукторного типа для железнодорожного транспорта.

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД) благодаря своей конструктивной простоте, высокой надежности и эффективности работы в широком диапазоне скоростей находят всё более широкое применение в различных типах приводов, включая авиационную технику, электромобили, станкостроение и железнодорожный транспорт. Однако одной из ключевых проблем, ограничивающих их эксплуатационный ресурс, является радиальное смещение ротора относительно статора, возникающее из-за технологических допусков, износа подшипников или внешних динамических нагрузок [2, 3]. Такое смещение может происходить по любой из осей ($x$, $y$) или иметь комбинированный характер, существенно искажая распределение магнитного поля в воздушном зазоре. Данные силы носят негативный характер, поскольку возникающее эксцентриситетное притяжение стремится увеличить первоначальное смещение, что ведет к росту вибраций, акустического шума и ускоренному износу подшипников. В условиях современных требований к электрическим двигателям, где рабочие зазоры сокращаются, а плотность магнитного

потока растет, влияние сил одностороннего магнитного притяжения (ОМП) становится особенно значимым.

Целью данной работы является исследование значений сил ОМП при различных вариантах смещения ротора ВИД. Для тягового привода электровозов или моторвагонного подвижного состава это исследование имеет первостепенное значение, так как постоянные ударные и вибрационные нагрузки, износ подшипников и прогиб вала приводят к появлению эксцентриситета. Возникающие при этом пульсирующие радиальные силы резко повышают вибрацию и шум, что напрямую влияет на механическую целостность двигателя, безопасность и комфорт.

Объектом исследования выступил ВИД с конфигурацией магнитной системы 12/8 (рис. 1, *а*), спроектированный по методике [5]. В соответствии с рисунком, величина воздушного зазора составила 0,5 мм. Материалом ротора и статора послужила электротехническая сталь марки 1411, кривая намагничивания которой показана на рисунке 1, *б*.




*а* *б*

Рис. 1. Активная часть исследуемого ВИД 12/8 (*а*)
и кривая намагничивая стали 1411 (*б*)

Источник: составлено авторами

Исследования проводились посредством программы FEMM 4.2, которая приобрела популярность для быстрого и бесплатного решения множества

прикладных инженерных задач в электротехнике [1–3]. Выбор вариантов смещения ротора был обоснован необходимостью охватить критически важные для анализа вибраций, шума и радиальных сил режимы.

В качестве первого случая был рассмотрен вариант смещения ротора с параметрами $x$ = 0,25 мм, $y$ = 0,30 мм как общий случай произвольного смещения, некая исходная точка. Второй вариант смещения – $x$ = 0,4 мм, $y$ = 0,0 мм – чисто радиальное смещение вдоль оси полюса статора. Наихудший случай для одностороннего притяжения, при котором один из воздушных зазоров минимален (0,1 мм при δ = 0,5 мм), а противоположный – максимален (0,9 мм). Сила магнитного притяжения обратно пропорциональна квадрату зазора [4], поэтому дисбаланс сил будет максимальным, что критически важно для оценки пиковых нагрузок на подшипники и прогиба вала. Третий вариант – $x$ = 0,0 мм, $y$ = 0,4 мм – чисто тангенциальное смещение. Его исследование интересно для оценки возникновения силы, стремящейся «закрутить» ротор в тангенциальном направлении помимо основного момента. Данная сила может влиять на угловые колебания ротора и динамику переключения фаз.

Исследуемым периодом являлся период в 180° (а не 360°), т.е. половина электрического периода, поскольку рассматриваемый объект имеет парное число полюсов.

Полученные результаты приведены в таблице 1 [Источник: составлено автором] и на рисунке 2. Они представляют собой силы ОМП (составляющая силы ОМП по оси $x$, по оси $y$ и результирующая сила) в функции угла поворота ротора $F_{ОМП} = f(\theta)$ в пределах полюсного деления при фиксированном значении тока в обмотке ($i$ = const) и смещении ротора относительно оси симметрии статора.

Табл. 1

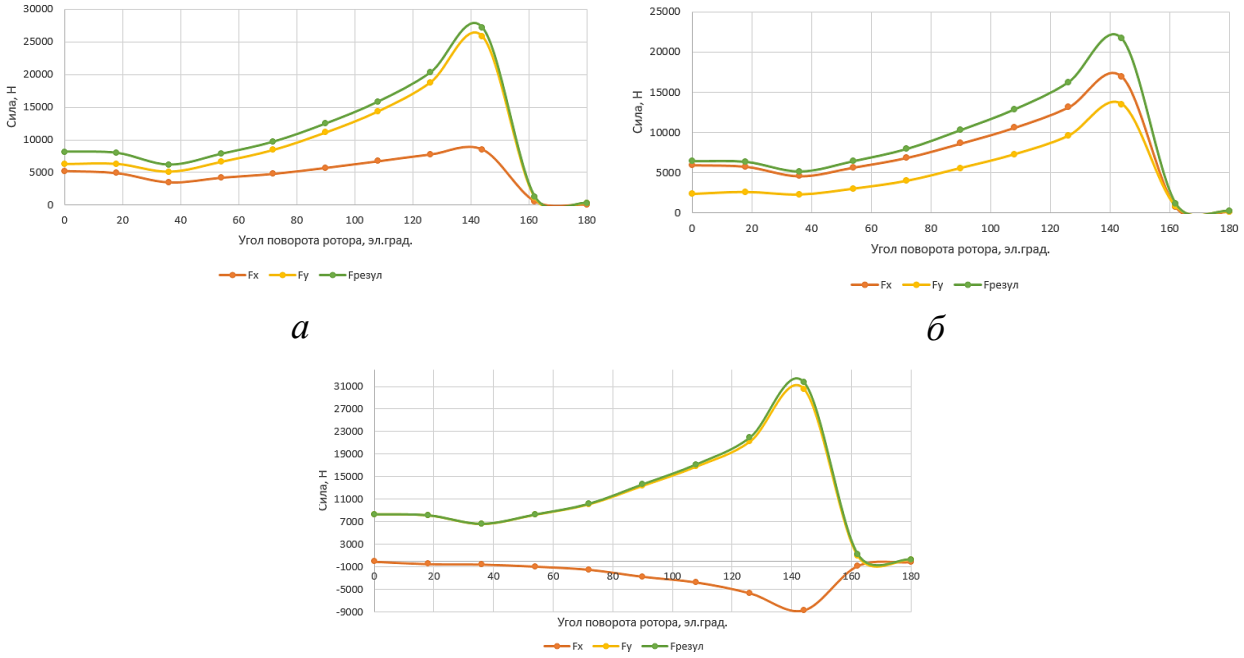
Численные значения сил ОМП

| Угол поворота ротора θ, эл. град. | $x$ = 0, 25 и $y$ = 0,3 мм | | | $x$ = 0,4 и $y$ = 0,0 мм | | | $x$ = 0,0 и $y$ = 0,4 мм | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $F_x$ | $F_y$ | $F_{рез}$ | $F_x$ | $F_y$ | $F_{рез}$ | $F_x$ | $F_y$ | $F_{рез}$ |
| 0 | 5235 | 6272 | 8170 | 5976 | 2358 | 6424 | -50 | 8304 | 8304 |
| 18 | 4902 | 6296 | 7979 | 5785 | 2604 | 6344 | -484 | 8116 | 8130 |
| 36 | 3480 | 5100 | 6174 | 4604 | 2287 | 5140 | -552 | 6592 | 6615 |
| 54 | 4203 | 6617 | 7839 | 5681 | 3012 | 6430 | -925 | 8230 | 8281 |
| 72 | 4791 | 8446 | 9710 | 6892 | 3996 | 7966 | -1475 | 10075 | 10182 |
| 90 | 5714 | 11108 | 12491 | 8666 | 5585 | 10309 | -2719 | 13367 | 13640 |

Продолжение табл. 1

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 108 | 6729 | 14337 | 15838 | 10628 | 7283 | 12883 | -3727 | 16778 | 17186 |
| 126 | 7774 | 18757 | 20304 | 13143 | 9569 | 16257 | -5655 | 21225 | 21965 |
| 144 | 8529 | 25791 | 27165 | 16963 | 13498 | 21678 | -8690 | 30579 | 31789 |
| 162 | 591 | 1123 | 1269 | 776 | 832 | 1137 | -833 | 989 | 1293 |
| 180 | 55 | 275 | 280 | 158 | 159 | 224 | -126 | 256 | 285 |

Источник: составлено авторами




*а* *б*

*в*

*а) x* = 0,25 мм, *y* = 0,30 мм; *б) x* = 0,4 мм, *y* = 0,0 мм; *в) x* = 0,0 мм, *y* = 0,4 мм;

Рис. 2. Графики сил ОМП при смещении ротора

Источник: составлено авторами

Проанализируем графики для первого случая смещения. Смещение по оси *y* (0,3 мм) при столь малом воздушном зазоре (0,5 мм) является очень большим – оно составляет 60% от номинального зазора, что приводит к дисбалансу магнитных сопротивлений по разные стороны ротора. Магнитный поток, стремящийся замкнуться по пути наименьшего сопротивления, концентрируется в области уменьшенного зазора. В результате сила притяжения в этой зоне возрастает не линейно, а обратно пропорционально квадрату зазора. Отрицательные пики (при 144°) – это моменты, когда зуб ротора проходит мимо зубца статора со стороны уменьшенного воздушного зазора (*y* = -0,3 мм). В этот момент локальный зазор минимален, магнитная цепь сильно насыщена, и сила притяжения максимальна.

Положительные пики (при 162°) – это моменты, когда зуб ротора находится напротив зубца статора со стороны увеличенного воздушного зазора ($y$ = +0.3 мм). Здесь локальный зазор, наоборот, максимален (0,5 + 0,3 = 0,8 мм), и сила притяжения слаба. Более того, на ротор действует возвращающая сила от противоположной стороны магнитопровода (где в этот момент зазор меньше), что и проявляется как небольшой положительный «горб». Экстремально низкие значения около 180° соответствуют рассогласованному положению (зубец статора напротив паза ротора). Магнитное сопротивление максимально для всех путей, потоки и силы минимальны. Значение 280 Н является силой, создаваемой полями рассеяния. Амплитуда $F_x$ (около 8,5 кН) значительно меньше амплитуды $F_y$ (около 26 кН), что логично, так как радиальное смещение создает намного больший дисбаланс, чем тангенциальное. Асимметрия в амплитудах положительных и отрицательных пиков (например, 6272 Н при 0° и 8446 Н при 72°) также вызвана исходным смещением ротора, которое нарушает симметрию магнитного поля в тангенциальном направлении.

Исходя из результатов для второго случая ($x$ = 0,4, $y$ = 0 мм) видно, что силы ОМП также демонстрируют выраженную зависимость от угла поворота ротора с ярко выраженным пиком. Максимальная нагрузка на подшипники и вал возникает в диапазоне 126–144 электрических градусов, где результирующая сила достигает экстремальных значений (около 16–22 кН), что почти на два порядка превышает минимальные силы в зоне 160–180 градусов. Данное обстоятельство указывает на возникновение сильной пульсирующей силы ОМП за каждый электрический цикл. Особенно критичен резкий, почти скачкообразный спад силы после 144 градусов, что может приводить к значительным возмущениям и вибрациям. Таким образом, данный режим смещения подтверждается как наихудший с точки зрения пиковых динамических нагрузок, создающий серьезный риск для механической целостности и являющийся источником сильного низкочастотного шума.

Анализ результатов для чисто тангенциального смещения ($x$ = 0, $y$ = 0,4 мм) показывает картину сил, радикально отличающуюся от второго случая – радиального смещения.

Во-первых, доминирующей компонентой во всем диапазоне углов является вертикальная сила $F_y$, которая достигает экстремального значения свыше 30 кН. При этом горизонтальная сила $F_x$, хотя и на порядок меньше, имеет отрицательное значение на всем протяжении цикла. Она направлена постоянно в одну сторону (влево), стремясь «сдвинуть» ротор по горизонтали. Такое поведение демонстрирует

прямое следствие чисто вертикального смещения, когда магнитное поле искажается так, что результирующая сила притяжения имеет постоянную горизонтальную составляющую, создавая значительный опрокидывающий момент на вал и подшипники.

Во-вторых, форма кривой результирующей силы $F_{\text{резул}}$ повторяет случай радиального смещения, т.е. резкий пик (около 31,8 кН) в зоне 144 электрических градуса с последующим проседанием. Однако абсолютные значения сил $F_x$ и $F_y$ здесь другие и это указывает на то, что пиковая нагрузка по модулю сравнима, но ее вектор в системе координат статора ориентирован иначе. Пиковая нагрузка на подшипники остается критически высокой.

Главный вывод из рассмотренного случая смещения заключается в том, что чисто тангенциальное смещение порождает сильно асимметричное силовое поле: мощная вертикальная сила притяжения ($F_y$) сопровождается значительной и постоянной боковой силой ($F_x$). Данное явление создает не только радиальную, но и значительную тангенциальную нагрузку, которая в роторной системе координат будет проявляться как переменная радиальная сила и дополнительный момент сопротивления.

В качестве полученных результатов по итогам исследования можно выделить следующие:

– установлен наихудший вариант для подшипникового узла. Чисто радиальное смещение ротора (0,4 мм по оси полюса) вызывает максимальные пиковые радиальные силы (до 22 кН), что в два раза превышает силы в оптимальном положении. Данный факт приводит к экстремальной циклической нагрузке на опоры вала, многократно ускоряя их износ в условиях тяговой службы;

– выявлена опасность тангенциального смещения. Чисто тангенциальное смещение (0,4 мм перпендикулярно оси полюса) создает не только высокую вертикальную силу (свыше 30 кН), но и постоянную значительную боковую силу, что порождает постоянный опрокидывающий момент, который может привести к перекосу в подшипниках, неравномерному износу и дополнительным потерям, что критично для надежности длительной работы;

– подтверждена высокая чувствительность ВИД к эксцентриситету. Даже умеренное комбинированное смещение (0,25 и 0,3 мм) вызывает значительный дисбаланс сил (амплитуда $F_y$ до 26 кН), демонстрируя, что в условиях реальной

эксплуатации с уменьшенным воздушным зазором силы ОМП будут существенным дестабилизирующим фактором.

Таким образом, для обеспечения надежной работы ВИД в качестве тягового привода железнодорожного транспорта его конструкция должна обладать повышенной механической прочностью, рассчитанной на выявленные нагрузки от сил ОМП. Внедрение систем мониторинга состояния ротора и учет влияния эксцентриситета на этапе электромагнитного расчета являются необходимыми мерами для снижения вибраций, предотвращения ускоренного износа и обеспечения долговечности привода.

**Список используемых источников**

1. Гребенников Н.В., Шевкунова А.В., Ольховатов Д.В. Определение магнитных потерь в реактивных индукторных машинах с фазным взаимодействием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 4. С. 364–367.

2. Мирошниченко Е.Е. Оценка сил одностороннего магнитного притяжения вентильно-индукторного тягового двигателя // Инновационные транспортные системы и технологии. 2025. Т. 11, № 4. С. 625–640.

3. Мирошниченко Е.Е., Шевкунова А.В. Исследование асимметрии магнитной системы вентильно-индукторного двигателя // Эксплуатация морского транспорта. 2024. № 2(111). С. 126–137.

4. Петрушин А.Д. Моделирование вентильно-индукторного электродвигателя при неравномерном воздушном зазоре // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66, № 4. С. 40–45.

5. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 56 с.

## СЕКЦИЯ: ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ

*Абрамов В.А. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Смышляев М.О. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

В статье предложена модель переработки отходов в альтернативное топливо по отношению его к стандартным видам. Альтернативное топливо, получается путём переработки вторичного сырья, содержащую в отходах энергию можно регенерировать различными способами, при одновременном снижении потребления стандартных видов топлива, таких как древесина, уголь, газ, нефть.

Всем известно, отходы можно утилизировать двумя способами: термической обработкой или биологическими процессами. Термические методы – это все высокотемпературные процессы, начиная с устаревшего их сжигания. Но и существуют более безопасные методы для окружающей среды, такие как: пиролиз, дегазация, плазменные методы. Пиролиз – термическое разложение органических и многих неорганических соединений. Дегазация – удаление нежелательных растворённых газов или захваченных газовых пузырьков из приборов (например, вакуумных установок и лабораторного оборудования) и веществ. Плазменные методы точнее, плазмохимическая переработка – способ, при котором полимеры расщепляются до газообразных углеводородов и оксида углерода. Под биологическими процессами понимается переработка отходов с использованием биохимических процессов, направленных на производство биогаза, который используется в энергетике [1, 4]. Оно включает в себя анаэробную и аэробную обработку за счёт разложения отходов микроорганизмами в контролируемых условиях. В конечном итоге получаем органическое вещество или метан, то есть биогаз. Термическая обработка отходов используется уже давно, на протяжении нескольких десятилетий, и за это время технология прошла долгий путь эволюции от простых мусоросжигательных печей до сложных энергоутилизационных комплексов. Однако даже без специальной переработки на полигонах происходят естественные процессы: разлагаемые компоненты отходов или всей биомассы под действием бактерий образуют так называемый свалочный газ, который теоретически можно

собирать и использовать. Такой газ, образующийся на свалках стихийно, представляет собой серьезную проблему: во-первых, он является мощным источником вредоносных выбросов в атмосферу, поскольку содержит метан, который в десятки раз активнее влияет на парниковый эффект, чем углекислый газ, что наносит колоссальный вред окружающей среде и климату планеты. Во-вторых, накопление метана в толще отходов ведёт к увеличению опасности возгорания или даже взрыва на полигоне, поэтому свалку необходимо постоянно контролировать, устанавливать газодренажные скважины и системы мониторинга. В то же время, добыча свалочного газа, образованного на мусорных хранилищах, может быть эффективно организована и использована в энергетических целях, что является хорошим стимулом для отказа от пассивного сжигания этого газа на факелах «просто для безопасности» в пользу строительства установок для выработки из него электроэнергии и тепла. Свалочный газ, как возобновляемый источник энергии, при правильном подходе принесёт не только финансовые выгоды за счет продажи энергии, но и значительные экологические выгоды, так как позволяет сократить выбросы метана и заместить ископаемое топливо [5].

Предприятия и муниципалитеты, которые хотят создать современные станции утилизации отходов в энергию, имеют в своем распоряжении очень большой спектр оборудования, который тщательно адаптирован к количеству и типу поступающих отходов, требуемой потребляемой энергии, установленной мощности станции и ожидаемой конечной продукции. Например, существуют компактные реакторы пиролиза, которые могут обеспечить термическую газификацию специфических отходов «например, резины или пластиков» без вредных выбросов в атмосферу, превращая их в синтез-газ и жидкое топливо. С другой стороны, доступны модульные контейнерные решения для производства биогаза, которые позволяют эффективно работать даже с небольшими биогазовыми установками, адаптируясь к переменной подаче сырья, что особенно актуально для сезонных сельскохозяйственных предприятий или небольших пищевых производств, где объемы отходов колеблются в течение года.

**Биогазификация – это процесс превращения органических материалов** «сельскохозяйственных отходов, городских отходов, производственных отходов» в биогаз. А биогаз в свою очередь это смесь газов, содержащий в своём составе метан, углекислый газ и другие компоненты. Принцип биогазификации основан на биологическом разложения органических материалов в специальных реакторах при

отсутствии кислорода. Это происходит под воздейсвием температуры и специальных бактерии. Огромным преимуществом биогазификации является ее масштабируемость. Если мусоросжигательный завод или крупная пиролизная установка экономически эффективны только при переработке сотен тонн отходов в сутки, то биогазовая станция может быть, как промышленным гигантом, так и небольшой локальной установкой. Это делает технологию доступной для отдельной фермы, небольшого поселка или пищевого производства. Контейнерные биогазовые установки, о которых шла речь, позволяют наращивать мощность модульно, добавляя новые контейнеры по мере роста объемов отходов. Это делает технологию биогазификации доступной для отдельной фермы, небольшого поселка, удаленного туристического комплекса или пищевого производства, где нет доступа к централизованной энергосети и остро стоит проблема утилизации навоза или отходов. Современные контейнерные биогазовые установки, о которых шла речь выше, позволяют наращивать мощность модульно, просто добавляя новые контейнерные модули по мере роста объемов отходов или потребности в энергии, что делает инвестиции в такие проекты более предсказуемыми и менее рискованными.

Однако биогазификация ценна не только получаемым биогазом как источником «зеленой» энергии. Второй, не менее важный и экономически значимый продукт, который производит биогазовая установка – это дигестат. В отличие от исходного сырья, которое может иметь неприятный запах, содержать патогенные микроорганизмы и семена сорняков, дигестат представляет собой стабильное, полностью обеззараженное, практически не имеющее запаха и экологически безопасное органическое удобрение. В процессе длительного анаэробного сбраживания в контролируемых условиях семена сорняков полностью теряют свою всхожесть и не прорастают при внесении в почву, а яйца гельминтов и патогенная микрофлора (например, сальмонелла или кишечная палочка) гарантированно погибают под воздействием температур и агрессивной среды. При этом все ценные макро- и микроэлементы, такие как азот, фосфор, калий, а также микроэлементы, необходимые растениям, полностью сохраняются в дигестате, причем переходят в минерализованную, легкоусвояемую для растений форму, что повышает их доступность по сравнению с внесением свежего навоза. Таким образом, биогазификация замыкает экологический и сельскохозяйственный цикл: отходы животноводства и растениеводства превращаются в энергию и высокоэффективное

удобрение, которое возвращается на поля для выращивания новых кормов и продуктов питания [2, 3].

Эта технология позволяет перерабатывать отходы, образованные в процессе пиролиза в виде альтернативного топлива, отходов производства пластмасс или биомассы, или иных типов отходов в энергетические продукты, такие как: газ, пиролизное масло полукокс. Их можно будет использовать на более поздних стадиях как энергоносителей. Данные продукты в зависимости от местных потребностей, могут быть использованы в качестве топлива в двигателе внутреннего сгорания, котле или в иных энергоблоков в качестве химических продуктов, которые подходят для производства компонентов твёрдого, газообразного или даже жидкого топлива. Такое топливо может быть использовано и для транспорта, так называемое биотопливо.

У использования энергии из отходов есть преимущества: замена не возобновляемых ресурсах ископаемого топлива, уменьшение проблем, связанных с хранением топлива, повышения уровня утилизации отходов, экономические и экологические выгоды.

Опыт некоторых западноевропейских стран показывает, что существует технология, которая избавляется от большинства отходов эффективным и экологичным способом, а также восстанавливает большое количество энергии для отопления или промышленных целей. Речь идёт о современных мусоросжигательных заводах, которые используют в своей деятельности осциллирующие и вращающиеся печи. Принцип работы таких типах установок заключается в том, что к ним поступают правильно сортированные отходы и затем сжигаются в печи с наклонной камерой. Такая конструкция устройства позволяет лучше перемешивать отходы. Также инновационная технология гарантирует минимальные выбросы газа в атмосферу и отсутствие неприятных запахов и производства полностью экологичной энергии.

В заключении, хочется сказать, что производимая энергия из отходов более экономична и экологична так как сейчас отходы храниться на свалках или сжигаются в пустую, загрязняя окружающую среду, это не просто способ «избавиться от мусора». Это переход к экономике замкнутого цикла, где отходы становятся ценным ресурсом. Современные технологии, будь то высокотемпературный пиролиз для сложных промышленных отходов или «живая» биогазификация для влажной органики, позволяют не только минимизировать нагрузку на полигоны и экологию, но и создавать локальные источники энергии и удобрений. Инвестиции в такие

станции – это вклад в устойчивое развитие, энергетическую независимость и здоровье будущих поколений.

**Список используемых источников**

1. Бобович Б.Б., Рывкин М.Д. Биогазовая технология переработки отходов животноводства // Вестник Московского государственного индустриального университета. №1. 1999. С. 2-9.

2. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 2. С. 84–92.

3. Менделеев Д.И., Марьин Г.Е., Ахметшин А.Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3(43). С. 47–56.

4. Плыкин В.Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / сост. В.Д. Плыкин. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2013. 172 с.

5. Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб.пособие / сост. М.Ю. Сибикин, Ю.Д. Сибикин. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2014. 229 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Абрамов В.А. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Смышляев М.О. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Заравняев М.И. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

В статье рассказывается о том, как можно применять технологии каталитического горения или католического окисления для газотурбинных двигателей. Какие преимущества в их использовании и как данная технология повлияет на будущее развитие данной области.

Газотурбинные установки (ГТУ) играют ключевую роль в современной индустрии, выступая в качестве основного двигателя в авиационной тяге, наземной энергетике (газотурбинные электростанции), газоперекачке и даже в составе комбинированных циклов на теплоэлектростанциях. Их высокая удельная мощность и способность к быстрому выходу на рабочий режим делают их незаменимыми. Однако, перед инженерами и проектировщиками всегда стояли две сложные задачи: повышение топливной производительности (КПД) и жесткое ограничение вредных выбросов, таких как оксиды азота (NOx), угарный газ (CO) и несгоревшие углеводороды. В последние годы технология каталитического сжигания привлекает все более пристальное внимание научного и инженерного сообщества как перспективное решение, способное преодолеть традиционный компромисс между эффективностью и экологией. Данная статья детально осветит фундаментальные аспекты, схемотехнические решения и потенциальные преимущества интеграции каталитического горения в газотурбинные двигатели.

Каталитическое горение представляет собой процесс окисления топлива, который интенсифицируется на поверхности специальных веществ – катализаторов. В отличие от традиционного пламенного горения, где реакция протекает в объеме при высоких температурах (часто выше 1800–2000°C), каталитическое горение позволяет проводить реакцию при существенно более низких температурах (в диапазоне 800–1300°C в зависимости от типа катализатора и зоны реакции) и с меньшей энергией активации [2].

Катализаторы, обычно состоящие из благородных металлов (платина, палладий) или оксидов металлов (оксиды марганца, кобальта, лантана), нанесенных на керамическую или металлическую матрицу с развитой поверхностью (например, кордиерит или нихром), способствуют адсорбции молекул топлива и кислорода. Это приводит к следующим эффектам:

1. **Гетерогенная активация:** реакция протекает на поверхности катализатора, что позволяет контролировать скорость выделения тепла.
2. **Снижение температуры горения:** поддержание реакции при температурах ниже порога термического образования NOx (термический механизм Зельдовича начинает активно работать выше 1400-1500°C).
3. **Улучшение образования смеси:** каталитические блоки способствуют более равномерному распределению топливовоздушной смеси по сечению камеры, исключая локальные перегревы.

Рассматривается модернизированная схема газотурбинного двигателя, оптимизированная для работы с каталитическим горением. Базовая конфигурация включает в себя несколько ключевых элементов: компрессор (низкого и высокого давления), систему подачи топлива, камеру каталитического сгорания, турбину и рекуперативный теплообменник.

**Подробное описание цикла:**

1. **Сжатие воздуха:** компрессор засасывает атмосферный воздух и сжимает его до высокого давления (часто 15–30 атмосфер и выше), в результате чего температура воздуха повышается до 300–600°C.

2. **Предварительный подогрев (Рекуперация):** сжатый воздух направляется в рекуператор. Здесь он нагревается за счет тепла выхлопных газов, покидающих турбину. Это критически важный этап для каталитических систем, так как позволяет поднять температуру воздуха на входе в камеру сгорания до уровня, необходимого для инициации каталитической реакции (обычно 500–700°C).

3. **Смесеобразование:** подогретый воздух тщательно смешивается с топливом (природный газ, синтез-газ, биогаз и др.) в специальном смесителе, обеспечивающем гомогенность смеси для предотвращения местных перегревов катализатора.

4. **Каталитическое сжигание:** топливовоздушная смесь поступает в камеру каталитического сгорания. Она состоит из нескольких зон:

– *зона стабилизации/воспламенения:* часть смеси (или отдельный запальник) может воспламеняться гомогенно для быстрого разогрева каталитического блока до рабочих температур;

– *основная каталитическая зона:* смесь проходит через каналы монолитного катализатора. На поверхности происходит гетерогенное окисление. Температура процесса поддерживается на уровне 1100–1300°C, что достаточно для высокого КПД, но недостаточно для массового образования термических NOx.

5. **Расширение в турбине:** образовавшиеся горячие газы (под высоким давлением и температурой) направляются в турбину. Расширяясь, газы вращают лопатки турбины, передавая механическую энергию на вал, который приводит в действие компрессор и полезную нагрузку (электрогенератор или винт).

6. **Рекуперация тепла:** отработавшие газы, все еще имеющие высокую температуру (около 500–700°C), проходят через рекуператор, отдавая свое тепло воздуху от компрессора.

7. **Рециркуляция выхлопа (EGR):** дополнительно, для тонкой настройки процесса, часть охлажденных выхлопных газов может направляться обратно на всас компрессора. Это увеличивает концентрацию CO2 и H2O в смеси, повышая теплоемкость и дополнительно снижая пиковую температуру горения, что еще больше подавляет образование NOx, а также влияет на температуру смеси на выходе из компрессора, подготавливая её для катализа.

Применение данной технологии выводит характеристики установок на качественно новый уровень:

– **рост эффективности и экономия топлива:** каталитическое сжигание обеспечивает практически полное окисление топлива (сверхглубокое выгорание) при более низких избытках воздуха, что в сочетании с рекуперацией тепла позволяет достичь КПД, недостижимых для простых циклов. Снижаются потери тепла, связанные с диссоциацией продуктов сгорания при высоких температурах;

– **радикальное сокращение вредных выбросов:** это главный экологический аспект. Концентрации NOx могут быть снижены до суб-ppm уровней (<5-10 ppm), что на порядок ниже требований современных норм. Также катализаторы дожигают CO и несгоревшие углеводороды непосредственно в камере, исключая необходимость в дорогостоящих системах пост-обработки (нейтрализаторах);

– **расширение топливной универсальности:** каталитические системы менее чувствительны к сорту топлива. Они способны эффективно сжигать обедненные смеси, низкокалорийные газы (биогаз, шахтный метан, синтез-газы после газификации угля или биомассы) и топлива с переменным составом, что критически важно для децентрализованной энергетики и утилизации попутных газов;

– **стабильность работы:** устраняется проблема пульсаций и вибрационного горения, характерная для бедных предварительно перемешанных смесей в классических камерах. Каталитическая стабилизация обеспечивает широкий диапазон устойчивой работы без срыва пламени [4].

Активно ведутся исследования, направленные на совершенствование катализаторов для обеспечения их долговечности и эффективности в экстремальных условиях, характерных для работы ГТУ. Основные научные направления включают:

– разработку катализаторов на основе оксидов переходных металлов с добавлением редкоземельных элементов (церий, лантан) для повышения термостойкости и устойчивости к отравлению примесями (сера, фосфор);

– создание градиентных структур каталитических блоков, где в начале слоя используется высокоактивный катализатор для запуска реакции, а в глубине термостабильный для выдерживания высоких температур;

– изучение кинетики гетерогенно-гомогенного горения, где реакция начинается на поверхности и заканчивается в объеме, что позволяет оптимизировать длину камеры и выравнивание температурного поля.

Применение каталитического горения в камерах сгорания ГТУ является прямым ответом на ужесточающиеся экологические требования (директивы Европейского Союза, стандарты EPA и российские ГОСТы) и глобальную потребность в низкоэмиссионных энергетических системах. Такой подход позволяет:

– **дестимулировать образование оксидов азота (NOx)** за счет понижения температуры горения при сохранении высокой стабильности скорости потока газов и возможности работы в широком диапазоне соотношений топливо/воздух (бедные смеси);

– **уменьшать концентрацию угарного газа (CO)** за счет интенсификации реакции окисления на поверхности катализатора, даже при умеренных температурах, где объемное догорание было бы неэффективным;

– **обеспечивать более равномерное распределение температур** в камере сгорания, что снижает термические напряжения на лопатках турбины и продлевает ресурс горячей части двигателя.

В заключение, внедрение каталитического горения в газотурбинные двигатели открывает новые горизонты для достижения синергии между высокой топливной эффективностью и минимизацией вредного воздействия на окружающую среду. Это вносит значительный вклад в концепцию устойчивого развития и энергосбережения. Несмотря на существующие вызовы, связанные с необходимостью дальнейших разработок в области материаловедения, масштабирования производства каталитических блоков и оптимизации переходных режимов работы, данная технология обладает колоссальным потенциалом для инноваций. В ближайшие десятилетия мы можем ожидать постепенного замещения традиционных диффузионных и гомогенных камер сгорания в стационарной энергетике и, возможно, в авиационных двигателях будущего на гибридные или полностью каталитические системы, что станет новым этапом в развитии газотурбостроения.

**Список используемых источников**

1. Арутюнов В.С., Крылов О.В. Окислительные превращения метана. – Наука, М.: 1998. 369 с.

2. Кирилов В.А., Кузин Н.А., Киреенков В.В. и др. Применение синтез-газа в качестве добавки к основному топливу в транспортных средствах: состояние и перспективы // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45. №2 С. 139–154.

3. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 2. С. 84–92.

4. Менделеев Д.И., Марьин Г.Е., Ахметшин А.Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3(43). С. 47–56.

# ОГРАНИЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 0,4 кВ КАК БАРЬЕР РАЗВИТИЯ МИКРОГРИДОВ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

*Авдеев Я.В. – студент 2 курса магистратуры, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»*

*Паскарь И.Н. – старший преподаватель кафедры ЭГПП, ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»*

**Аннотация**

В статье рассмотрены ограничения распределительных сетей напряжением 0,4 кВ, препятствующие развитию микрогридов и интеллектуальных режимов электроснабжения. Показано, что традиционная радиальная структура, эксплуатационные и нормативные ограничения низковольтных сетей не позволяют реализовать потенциал распределённой генерации и гибкого управления. Обоснована необходимость интеллектуальной реконфигурации сетей 0,4 кВ с учётом требований эксплуатационной надёжности. Сформулированы требования к коммутационным решениям, обеспечивающим управляемое изменение конфигурации сети и допустимость их применения в реальных условиях эксплуатации.

**Введение**

Распределительные электрические сети напряжением 0,4 кВ являются завершающим уровнем систем электроснабжения и непосредственно определяют качество и надёжность электроснабжения основной массы потребителей, включая жилую застройку, объекты социальной инфраструктуры, а также предприятия малого и среднего бизнеса. Особенностью сетей данного класса напряжения является их высокая социальная значимость: аварийные отключения в сетях данного класса напряжения, как правило, приводят к значительным социально-экономическим последствиям из-за непосредственного воздействия на конечного потребителя электроэнергии. При этом длительность восстановления электроснабжения нередко определяется не только характером повреждения, но и структурными особенностями сетей 0,4 кВ: большой разветвленностью с многочисленными отпайками, ограниченной наблюдаемостью режимов, а также необходимостью выполнения коммутационных операций по упрощенным сценариям либо же в ручном режиме. В совокупности эти факторы приводят к тому, что даже локальные повреждения могут сопровождаться длительным перерывом электроснабжения значительной доли нагрузки.

Традиционными способами повышения надёжности электроснабжения в сетях 0,4 кВ являются секционирование и резервирование. Секционирование направлено на локализацию зоны аварийного отключения путём разделения сети на отдельные участки, а резервирование обеспечивает возможность восстановления питания части нагрузки за счёт альтернативного источника, второго ввода или межсекционной связи. В типовых решениях данные функции реализуются с использованием устройств автоматического ввода резерва (АВР) и коммутационных аппаратов ограниченной функциональности. Однако по мере усложнения топологии сети, появления нескольких секций, перемычек и распределённых источников питания задача восстановления электроснабжения перестаёт сводиться к одиночному переключению и фактически превращается в задачу выбора допустимой конфигурации сети и выполнения безопасной последовательности коммутационных операций.

Существенным ограничением для распределительных сетей 0,4 кВ является необходимость строгого соблюдения эксплуатационных и режимных требований при выполнении коммутаций. В частности, должны быть исключены режимы параллельной работы независимых источников питания в штатных условиях,

конфигурации, приводящие к коротким замыканиям, перегрузкам элементов сети и недопустимым путям протекания токов. Кроме того, при выполнении переключений важную роль играет прохождение через безопасные промежуточные состояния с контролем фактического положения коммутационных аппаратов, что существенно усложняет автоматизацию управления.

Отдельное значение для практического применения интеллектуальных решений в сетях 0,4 кВ имеет фактор эксплуатации и технического обслуживания оборудования. В условиях отсутствия предусмотренных обходных режимов вывод коммутационного узла из работы для обслуживания или ремонта может сопровождаться отключением значительной доли потребителей. В результате автоматизация и усложнение структуры сети без учёта эксплуатационных аспектов способны привести не к повышению, а к снижению фактической надёжности электроснабжения. По этой причине возможность временного обхода интеллектуальных коммутационных узлов следует рассматривать не как дополнительную функцию, а как обязательное условие их допустимого применения в сетях 0,4 кВ.

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к микрогридам и распределённой генерации, обусловленный развитием возобновляемых источников энергии, накопителей электроэнергии и цифровых технологий управления. Концепции интеллектуальных электрических сетей предполагают повышение гибкости, надёжности и эффективности электроснабжения за счёт адаптивного управления режимами работы сети. Несмотря на активное развитие интеллектуальных решений на уровнях среднего и высокого напряжения, распределительные сети напряжением 0,4 кВ во многом остаются наименее цифровизированным и управляемым элементом системы электроснабжения. Именно этот уровень непосредственно взаимодействует с конечными потребителями и является базовой средой для интеграции микрогридов [10, 14]. Возникает противоречие между потенциальными возможностями микрогридов, предполагающих многоканальное питание и изменение конфигурации сети, и фактическими возможностями распределительных сетей 0,4 кВ, которые в большинстве случаев не обеспечивают таких режимов. Это противоречие определяет актуальность анализа ограничений сетей 0,4 кВ и поиска направлений их интеллектуализации [11, 13].

Таким образом, распределительные сети 0,4 кВ в настоящее время выступают в качестве системного ограничителя для развития микрогридов и интеллектуальных режимов электроснабжения. Преодоление данного ограничения требует перехода от локальных решений к формированию требований к средствам интеллектуальной реконфигурации сети, учитывающих как режимные, так и эксплуатационные аспекты. Анализ указанных ограничений и формирование таких требований и составляют предмет настоящей работы.

**Структурные и эксплуатационные различия сетей среднего класса напряжения (6-10 кВ) и распределительных сетей 0,4 кВ**

Традиционно, все разработки в сфере автоматизации, секционирования и интеллектуализации сети создавались и апробировались на сетях среднего уровня напряжения (6–10 кВ). Для сетей данного класса характерно относительно небольшое количество присоединений, а также широкое применение автоматизированных коммутационных аппаратов, обеспечивающих дистанционное управление, АПВ и секционирование сети. В этих условиях интеллектуализация сети в значительной степени опирается на развитие устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики [3, 15].

В свою очередь, распределительные сети 0,4 кВ принципиально отличаются по своей структуре и условиям эксплуатации. Они характеризуются высокой плотностью и разветвлённостью, большим числом конечных потребителей и сравнительно низким уровнем оснащённости средствами автоматического управления. Коммутационные операции в таких сетях во многих случаях выполняются вручную, а наблюдаемость режимов ограничивается отдельными точками учёта. Это существенно снижает возможность прямого переноса решений, применяемых в сетях среднего напряжения, на уровень 0,4 кВ [4, 9].

В научных работах по данной тематике показано, что интеллектуализация распределительных сетей связана, в первую очередь, с управляемой реконфигурацией и использованием многофункциональных коммутационных решений. Однако для сетей 0,4 кВ данные подходы требуют адаптации с учётом жёстких требований к непрерывности электроснабжения и обслуживаемости оборудования. Это обусловливает необходимость разработки специализированных решений, ориентированных именно на низковольтный уровень, а не прямого заимствования практик, применяемых в сетях среднего напряжения. Игнорирование этих отличий

приводит к снижению практической применимости решений, заимствованных из сетей среднего напряжения, и формирует барьер для развития микрогридов на низковольтном уровне [3].

**Секционирование и резервирование в сетях 0,4 кВ как постановка инженерной задачи. Ключевые ограничения эксплуатации**

Распределительные сети напряжением 0,4 кВ в их типовом исполнении слабо приспособлены к работе в режимах, характерных для микрогридов. Радиальная структура, отсутствие развитых средств секционирования и ограниченные возможности изменения конфигурации сети приводят к тому, что перераспределение потоков мощности между источниками и нагрузками фактически невозможно без ручных коммутаций. В результате потенциал микрогридов, предполагающий многоканальное питание и адаптивное управление, не может быть реализован на уровне низковольтной сети [7, 13].

Существенным ограничением являются эксплуатационные и нормативно-технические требования, такие как запрет параллельной работы независимых источников питания и необходимость обеспечения однозначных и безопасных режимов коммутации. В условиях недостаточной наблюдаемости сети и отсутствия автоматизированного контроля промежуточных состояний выполнение переключений, связанных с реконфигурацией сети, сопровождается повышенным риском возникновения недопустимых режимов. Это существенно сужает набор допустимых конфигураций и ограничивает возможности автоматизации [6].

В сетях низкого напряжения важно, что возможность применения той или иной конфигурации определяется не только ее «целевым состоянием», но и промежуточными состояниями в процессе переключений. Некоторые комбинации коммутационных положений могут создавать аварийные режимы, например, короткие замыкания, в связи с чем существует ряд эксплуатационных ограничений:

– недопустимо производить замыкания сети 0,4 кВ «в кольцо» между разными центрами питания. В правилах переключений и диспетчерского управления фиксируется прямой запрет на включение «в кольцо» сети 0,4 кВ между различными центрами питания; допускаются лишь специально оговорённые исключения (например, для разгрузки перегружающихся трансформаторов при питании от одной линии);

– коммутационные операции должны обеспечивать однозначное отделение части сети, корректное управление и предсказуемое состояние аппаратов (включая возможность контроля/подтверждения состояния), а также соответствие выбранным функциям (отключение, отделение, переключение, управление);

– запрещены опасные переключения при наличии короткого замыкания или неустраненного повреждения на резервируемом участке. К примеру, алгоритм работы АВР вводит запрет на включение резерва при наличии признаков КЗ на резервируемом участке, поскольку в ином случае восстановление может приводить к повторным аварийным воздействиям. Для задачи self-healing это означает, что восстановление сети из аварийного состояния не может быть безусловным: оно должно включать в себя проверку признаков повреждения, а также условия отказа от рискованных действий;

– управление конфигурацией сети должно опираться не на одиночные команды «Включить/выключить», а на план переключений, в котором каждый шаг прошел проверку на допустимость, а запрещенные конфигурации исключены на всем пути перехода от исходного состояния к целевому. Научные работы по автоматизации восстановления электроснабжения подчеркивают необходимость алгоритмического поиска схем восстановления на основе, например, графовой модели сети и учета ограничений при построении плана переключений [3, 8].

Дополнительным фактором, сдерживающим развитие микрогридов в сетях 0,4 кВ, является высокая чувствительность конечных потребителей к перерывам электроснабжения. Внедрение дополнительных интеллектуальных узлов без учёта требований обслуживаемости и обходных режимов питания может приводить к увеличению числа и продолжительности отключений при отказах или техническом обслуживании оборудования. В совокупности указанные ограничения формируют системный барьер для развития микрогридов на низковольтном уровне и определяют необходимость специализированных подходов к интеллектуализации сетей 0,4 кВ [1, 5].

Анализ ограничений распределительных сетей 0,4 кВ показывает, что развитие микрогридов на низковольтном уровне невозможно без перехода от статической структуры сети к управляемой конфигурации. В этом контексте интеллектуальная реконфигурация рассматривается как способность сети изменять топологию и режимы питания в зависимости от текущей ситуации, включая аварийные, эксплуатационные и режимные состояния. Реализация таких возможностей

предполагает наличие управляемых коммутационных элементов и информационного обмена, позволяющих формировать и контролировать допустимые конфигурации сети.

Таким образом, интеллектуальная реконфигурация сетей 0,4 кВ должна рассматриваться не как набор отдельных функций, а как системный подход, сочетающий управляемое изменение конфигурации, соблюдение нормативных ограничений и учёт эксплуатационных требований, включая необходимость обходных режимов питания. Именно в таком виде она может служить основой для развития микрогридов и интеллектуальных режимов электроснабжения на низковольтном уровне.

**Формирование требований к коммутационным решениям в распределительных сетях 0,4 кВ**

Анализ темы показывает, что решение проблем, связанных с ограничениями распределительных сетей 0,4 кВ, а также создание условий для развития микрогридов невозможно без внедрения специализированных коммутационных решений, ориентированных именно на низковольтный уровень сетей. При этом ключевым является не столько расширение функциональности отдельных устройств, сколько формирование набора требований, обеспечивающих эксплуатационную допустимость интеллектуальной реконфигурации сети [1, 3].

В первую очередь такие решения обязаны обеспечивать возможность управляемого изменения конфигурации сети с учетом нормативных и эксплуатационных ограничений, например, вышеупомянутые запрет на параллельную работу независимых источников питаний и исключение заведомо недопустимых состояний, вызванных некорректными переключениями. Управление конфигурацией должно рассматриваться как последовательность допустимых коммутационных операций, в которой контролируются как целевые, так и промежуточные состояния сети. Это требует однозначной идентификации положений коммутационных элементов и подтверждения факта выполнения операций.

Не менее важным требованием является сохранение эксплуатационной надежности сетей 0,4 кВ. Коммутационные решения обязаны предусматривать возможность обслуживания и вывода отдельных участков или узлов из работы без прекращения электроснабжения конечных потребителей. Наличие так называемой

байпас-системы (обходных режимов питания по примитивной, но однозначно рабочей конфигурации сети) является не дополнительной функцией, а обязательным условием практического применения новой интеллектуальной коммутационной системы на низковольтном уровне [12, 15].

Дополнительным требованием является интеграция коммутационных решений с системами мониторинга и управления, обеспечивающими сбор информации о состоянии сети, параметрах режима и результатах выполненных переключений. Такая интеграция необходима для повышения наблюдаемости сетей 0,4 кВ и создания основы для последующей автоматизации процессов восстановления электроснабжения и адаптивного управления режимами.

Таким образом, требования к коммутационным решениям для сетей 0,4 кВ должны формироваться с учётом совокупности топологических, нормативных и эксплуатационных ограничений. Их реализация должна быть направлена не только на расширение возможностей реконфигурации сети, но и на обеспечение предсказуемого и надёжного поведения системы в реальных условиях эксплуатации. Конкретные технические подходы к реализации указанных требований являются предметом дальнейших исследований и будут рассмотрены в последующих работах.

**Заключение**

В работе показано, что распределительные сети напряжением 0,4 кВ в их текущем типовом исполнении являются системным ограничителем для развития микрогридов и интеллектуальных режимов электроснабжения. Выявлены ключевые топологические, нормативные и эксплуатационные ограничения, препятствующие реализации гибкой реконфигурации сети на низковольтном уровне. Интеллектуализация сетей 0,4 кВ требует перехода от локальных решений к формированию требований к коммутационным решениям, учитывающих как режимные, так и эксплуатационные аспекты, включая необходимость обходных режимов питания. Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, направленных на разработку и формализацию интеллектуальных коммутационных систем для распределительных сетей 0,4 кВ.

**Список используемых источников**

1. Авдеев Я.В. Крышные солнечные электростанции в городской среде: от микрогенерации к вызовам для сетевой инфраструктуры // Материалы VIII

Международной молодежной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСТАРТ». Кемерово, 2025. С. 202.

2. Авдеев Я.В. Предпосылки создания умных сетей на 0,4 кВ // Материалы Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции «ЭНЕРГОСТАРТ». Кемерово, 2022. С. 201.

3. Виноградов А. В. Новые мультиконтактные коммутационные системы и построение на их базе структуры интеллектуальных распределительных электрических сетей // Агроэкотехника и энергообеспечение. 2018. № 3 (20). С. 7–19.

4. Короткевич М.А. Надёжность систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 2010. 304 с.

5. Кудряков А.В. Распределительные электрические сети низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 2011. 256 с.

6. ПУЭ. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. М.: Энергосервис, 2019. 760 с.

7. Brown R. Electric Power Distribution Reliability. CRC Press, 2008. 384 p.

8. CIGRE WG C6.22. Microgrids 1: Engineering, Economics, and Experience. CIGRE Technical Brochure, 2015. 123 p.

9. Gellings C. W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. CRC Press, 2009. 312 p.

10. Hatziargyriou N. et al. Microgrids: Architectures and Control. Wiley-IEEE Press, 2014. 472 p.

11. Hatziargyriou N., Meliopoulos A. Distributed Energy Sources: Technical Challenges // IEEE Power & Energy Magazine. 2008. Vol. 6, No. 1. P. 26–29.

12. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources. 138 p.

13. Jenkins N. et al. Embedded Generation. IET, 2010. 320 p.

14. Lasseter R. H. Microgrids // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2002. Vol. 1. P. 305–308.

15. Short T. A. Electric Power Distribution Handbook. CRC Press, 2014. 1200 p.

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ГАЗОВОЙ МИКРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕЛИЯ

*Баранов В.В. – аспирант, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

**Аннотация**

Произведен вариантный расчет тепловой схемы газовой микротурбинной установки замкнутого цикла малой мощности с применением гелия в качестве рабочего тела. В ходе изучения полученных результатов определено, что наиболее оптимальными начальными параметрами являются: $T_к$ = 100 К, $p_к$ = 0,1 МПа, $\pi_к$ = 6. Расчет при оптимальных параметрах без использования рекуперации и контура с подогревом воды показал, что эффективный КПД установки равняется 35–42%. Использование когенерации (контура с подогревом воды) позволяет достичь эффективного КПД установки 65–70%.

Развитие современных энергетических систем в России и мире характеризуется одновременно тенденциями к повышению централизованной выработки электроэнергии и стремительным ростом доли децентрализованных, автономных источников питания. Для России, с её значительными протяжёнными территориями, низкой плотностью населения в ряде регионов и суровыми климатическими условиями, задача обеспечения устойчивого энерго- и теплоснабжения удалённых и труднодоступных объектов приобретает особое значение. В таких условиях традиционные схемы централизованного электроснабжения нередко экономически или технически нецелесообразны, а резервирование мощностей требует установки компактных, надёжных и долговечных агрегатов, способных работать в изолированном режиме. Одним из наиболее перспективных направлений – использование систем децентрализованного электроснабжения, в которых устройства выработки и преобразования энергии максимально приближены к потребителям [5].

В области автономной энергетики активно развивается исследование газовых микротурбинных установок (МГТУ), работающих по замкнутому циклу с внешним подводом тепла. Такие установки позволяют использовать широкий спектр источников тепловой энергии – от сжигания органического топлива (природный газ, дизельное топливо, сжиженные углеводороды) до возобновляемых источников (солнечные концентраторы, геотермальные системы) и отходящего тепла промышленных процессов (АЭС, металлургическое производство, МПЗ).

Повышенный интерес представляет использование ядерных источников тепла. Для замкнутого цикла могут применяться различные рабочие тела – азот, углекислый газ, гелий, водород, аргон и т.д., – выбор которых определяется целевыми параметрами, условиями эксплуатации и требованиями к оборудованию [6, 12].

В ряде случаев применение МГТУ в замкнутом цикле позволяет реализовать когенерационные схемы, при которых тепловая энергия от охлаждения рабочего тела после турбины используется для отопления, технологических нужд или подготовки горячей воды. Такая компоновка особенно востребована в объектах, где одновременно требуется и электрическая, и тепловая мощность, а общий топливный расход должен быть минимизирован. В маломощных диапазонах (десятки киловатт) чисто электрический КПД установки может быть сравнительно невысоким по сравнению с крупными газотурбинными или парогазовыми установками открытого цикла, однако при когенерации суммарный коэффициент использования топлива возрастает до 60–70% и более [12].

В совокупности эти факторы определяют актуальность исследований по оптимизации тепловых схем микротурбинных установок в замкнутом цикле на гелии. Реалистичная оценка эффективности и параметров таких установок должна основываться на инженерных ограничениях: теплопередача в компактных теплообменниках, допустимые температуры и давления, характеристики уплотнений и роторов, повышенное количество ступеней в компрессоре, а также экономическая целесообразность для конкретных областей применения [8]. Вариантные расчёты цикла с учётом этих факторов позволяют определить, в каких условиях и при каких параметрах применение гелия действительно оправдано, а также выработать рекомендации по дальнейшей разработке и внедрению таких систем в рамках стратегии распределённой энергетики и импортозамещения.

В замкнутых газовых циклах микротурбинных установок выбор рабочего тела определяет не только термодинамические показатели установки, но и её конструктивные параметры, надёжность, стоимость и эксплуатационные ограничения. Теплофизические характеристики – такие как удельная теплоёмкость при постоянном давлении, отношение теплоёмкостей, теплопроводность и плотность в рабочих условиях – влияют на эффективность цикла, размеры и габариты теплообменных аппаратов, а также на масштаб и компоновку проточной части турбомашин. В одном из предыдущих исследований уже было проведено сравнение различных рабочих тел, в котором было выяснено, что гелий является одним из

наиболее перспективных. Также стоит отметить, что Россия является обладателем наибольшего объема разведанных запасов гелия во всем мире, поэтому развитие гелиевой промышленности имеет приоритетный характер [1, 2, 3].

Гелий в действительности является одним из наиболее часто рассматриваемых рабочих тел. Он химически инертен, обладает высокой теплоёмкостью и теплопроводностью, что способствует эффективному теплообмену и снижению температурных градиентов. Тем не менее, в микротурбинных установках малой мощности эти преимущества нивелируются конструктивными ограничениями. Низкая плотность гелия требует тщательной проработки проточной части для максимального снижения возможных утечек [10]. Высокая склонность к утечкам и возросшая стоимость газа требуют повышенной герметичности, что отражается в конструкции. Поэтому гелий применяется там, где ценится долговечность, низкий износ оборудования и работа при высоких температурах, например, в ядерных и когенерационных системах [4]. В иностранных исследованиях практикуется применение смеси He-Xe (гелий-ксенон) для корректировки физических свойств рабочего тела, однако эффективный КПД достигается при использовании чистого гелия [9].

На рисунках 1 и 2 продемонстрированы схемы микротурбинных газовых установок замкнутого цикла [7, 11].

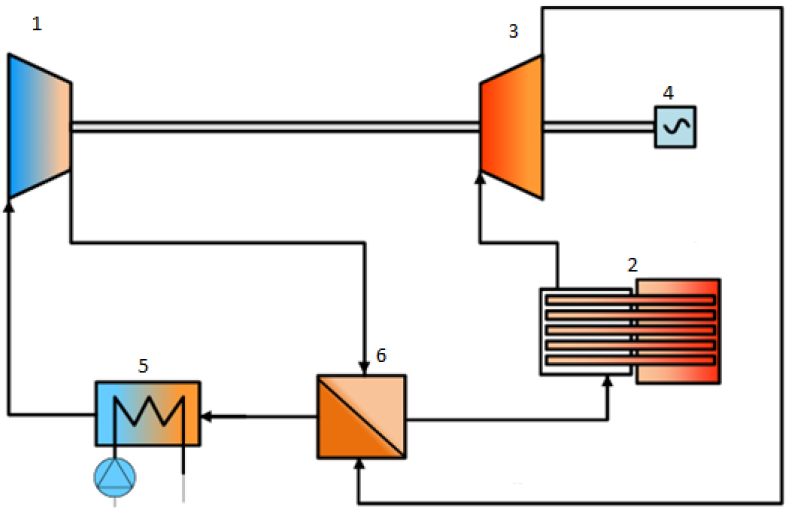



Рис. 1. Схема простого замкнутого цикла газотурбинной установки с рекуператором [7, 11]

1 – компрессор; 2 – высокотемпературный теплообменник; 3 – турбина; 4 – генератор; 5 – низкотемпературный теплообменник, 6 – рекуператор

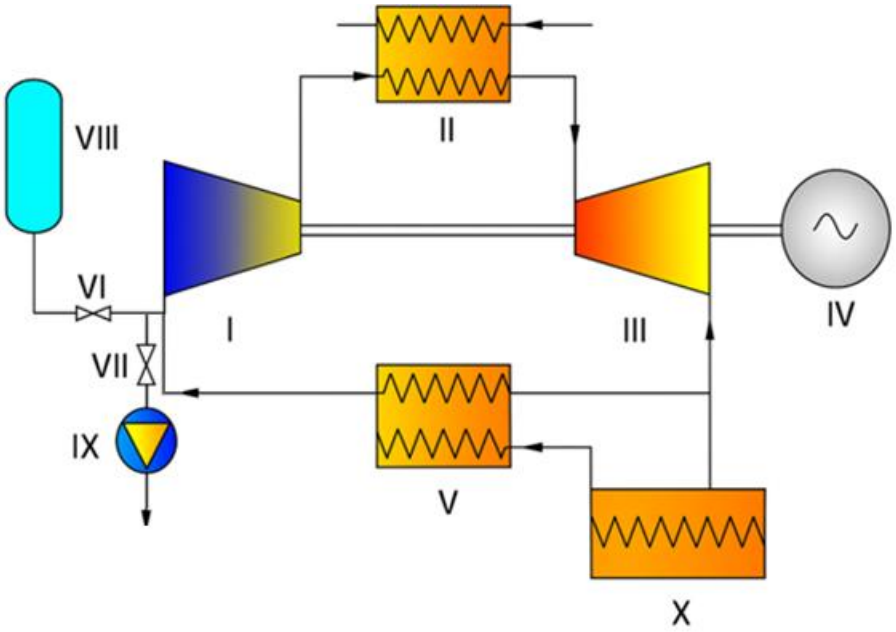



Рис. 2. Схема простого замкнутого цикла газотурбинной установки с подогревательным контуром [7, 11]

I – компрессор, II – высокотемпературный теплообменник, III – турбина, IV – генератор, V – низкотемпературный теплообменник, VI – VII – клапаны, VIII – расширительный бак для газа (ресивер) и IX – эжектор, X – теплообменник для водонагревательного контура.

Последовательность процессов (рабочее тело – гелий; $T_1 \approx 100$ K, $T_3 \approx 1000$ K):

1. Сжатие. Из охладителя V гелий поступает в компрессор I при $T_1 \approx 100$ K. В компрессоре I происходит сжатие до давления $p_2$ и температуры $T_2$. Режимы подбираются по ограничениям окружной скорости и допустимой температуре на выходе.

2. Внешний подвод тепла. Сжатый гелий поступает в высокотемпературный теплообменник II, где нагревается до $T_3 \approx 1000$ K от внешнего источника тепла (камера сгорания во внешнем контуре, высокотемпературный электрический/ядерный/солнечный нагреватель – по конкретной реализации).

3. Расширение. Нагретый гелий расширяется в турбине III до давления, близкого к $p_1$, совершая работу на валу; механическая мощность передаётся на компрессор I и генератор IV. Температура на выходе из турбины – $T_4$.

4. Съём части тепла на горячее водоснабжение. Теплообменник X. Поток гелия из турбины сначала проходит через теплообменник, где подогревает воду (или контур бака-накопителя ГВС) до необходимого уровня. Это повышает суммарный коэффициент использования тепла установки и разгружает низкотемпературный охладитель.

5. Глубокое охлаждение. После съёма тепла на ГВС гелий поступает в низкотемпературный теплообменник V, где охлаждается до $T_1 \approx 100$ K. Вариант исполнения охладительного контура определяется проектными ограничениями.

**Расчеты**

Для достижения наибольшего приближения к реальным термодинамическим процессам, происходящим внутри замкнутого контура, общие расчеты тепловой схемы производились с учетом изменения различных параметров (теплоемкость, плотность, потери).

Расчёт выполнен для замкнутого цикла Брайтона на гелии с внешним подводом тепла (высокотемпературный теплообменник II), турбиной III, компрессором I и низкотемпературным охладителем V. Дополнительно учтён теплообменник ГВС X после турбины, что позволило рассмотреть режим когенерации. Термофизические свойства гелия вычислялись в пакете REFPROP (NIST) с зависимостями $C_p(T, p)$, $\gamma(T, p)$, динамической вязкости и теплопроводности. Это принципиально, так как в диапазоне $T_1 \sim 100$ K и переменных давлений предположение «идеального газа с постоянным $C_p$ даёт заметную неопределенность. Для каждой точки цикла вычислялись энтальпии/энтропии из уравнений состояния.

Компрессор и турбина заданы через политропные КПД; механические потери и КПД генератора учитывались в совокупном множителе.

Постановка вариантного расчёта. Проведён параметрический перебор по степени повышения давления $\pi_k$ и начальному состоянию на входе в компрессор ($T_1$, $p_1$) при фиксированной температуре перед турбиной $T_3$. Для каждой комбинации ($T_1$, $p_1$, $\pi_k$, $T_3$).

Основными допущениями являются: достижимость $T_1 \approx 100$ K в реальной ВРУ (воздухораспределительная установка), утечки гелия, точные падения давления и реальная эффективность малых теплообменников. Без верификации с помощью эксперимента эти вводные остаются источником неопределённости.

Поскольку часть эффектов (утечки гелия, реальные изменения давления, частотное регулирование, нестационарные пуски/остановы) в расчёте не моделировалась, итоговые значения КПД следует трактовать как оптимистичную оценку. Для практической применимости необходима калибровка модели по опытным данным: сопоставление температурных полей и мощностей с прототипами

и данными открытых публикаций по микротурбинам замкнутого цикла на гелии/s-$CO_2$, а также проверка контура охлаждения.

Данные и графики. Основные зависимости $\eta(\pi_k)$ получены по следующему принципу: совместное изменение $T_1$ и $p_1$; фиксированная $T_1$ с вариацией $p_1$; фиксированное $p_1$ с вариацией $T_1$. Везде прослеживается единый тренд: снижение $T_1$ и $p_1$ повышает $\eta$; добавление теплофикации увеличивает совокупный КПД до ~ 0,68–0,70, но электрический КПД при глубоком охлаждении остаётся ограниченным и чувствительным к исполнению ВРУ.

В таблице 1 приведены результаты при использовании оптимальных начальных параметров. При увеличении начального давления (расчет проведен до значения, равного 20 МПа) эффективный КПД установки снижается, при уменьшении температуры перед турбиной КПД также снижается.

Табл. 1

Результаты расчетов при варьировании основных параметров

| Наименования параметров | Значения параметров | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Давление перед компрессором, МПа | 0,1-0,5 | 0,1-0,5 | 0,1-0,5 | 0,1-0,5 | 0,1-0,5 | 0,1-0,5 | 0,1-0,5 |
| Температура перед компрессором, К | 100 | 200 | 250 | 288 | 300 | 350 | 400 |
| Степень повышения давления в компрессоре | 6 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| Температура перед турбиной, К | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Полезная вырабатываемая мощность, кВт | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Эффективный КПД | 42% | 27% | 23% | 19% | 18,5% | 15% | 12% |

Источник: составлено автором

Последовательность в подписях на рисунках 3, 4, 5 означают следующее: значение давления в МПа, температуры перед компрессором в К, температуры перед турбиной в К. На рисунке 3 представлены зависимости эффективного коэффициента полезного действия микротурбинной установки замкнутого цикла на гелии от степени повышения давления при фиксированной температуре перед турбиной и варьируемых параметрах на входе в компрессор: температура изменялась от 100 до 400 К, давление – от 0,1 до 0,5 МПа. Изменение давления в малом диапазоне не дает ощутимой разницы в эффективности, поэтому графики сливаются. Анализ полученных зависимостей показывает, что наибольшие значения КПД достигаются

при минимальных значениях температуры и давления перед компрессором. Так, при $T_1$ = 100 К и $p_1$ = 0,1 МПа эффективность установки превышает 42% при $\pi_k \approx 6$. С увеличением $T_1$ кривые $\eta(\pi_k)$ смещаются вниз, а оптимальное значение степени повышения давления уменьшается. Это связано с ростом затрат на сжатие рабочего тела и снижением полезного теплоперепада в турбине при высоких начальных параметрах.

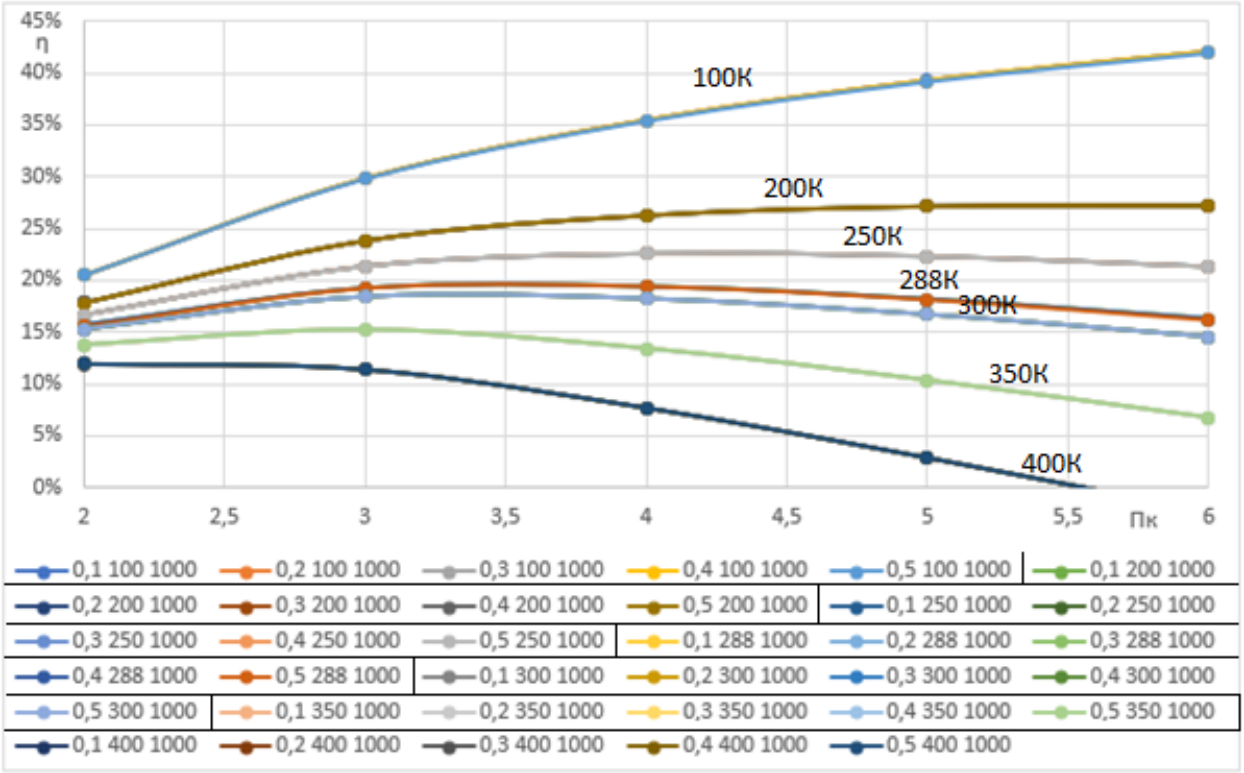



Рис. 3. Зависимость эффективного КПД установки от степени повышения давления, начального давления и начальной температуры

Источник: составлено автором

На рисунке 4 для постоянной температуры на входе в компрессор ($T_1$ = 100 К) и постоянной температуры перед турбиной ($T_3$ = 1000 К), при этом варьировалось давление на входе в компрессор от 0,1 до 20,0 МПа. Результаты показывают, что максимальная эффективность установки достигается при минимальном давлении $p_1$ = 0,1 МПа, а с увеличением давления КПД уменьшается на 1–2 процента при одинаковых степенях сжатия. При этом при низких давлениях оптимальная степень повышения давления выше и достигает значений $\pi_k \approx 6$, в то время как при высоких давлениях этот показатель снижается до 2–4. Таким образом, для повышения

эффективности цикла в данных условиях целесообразно минимизировать давление на входе в компрессор, сохраняя высокую температуру перед турбиной.

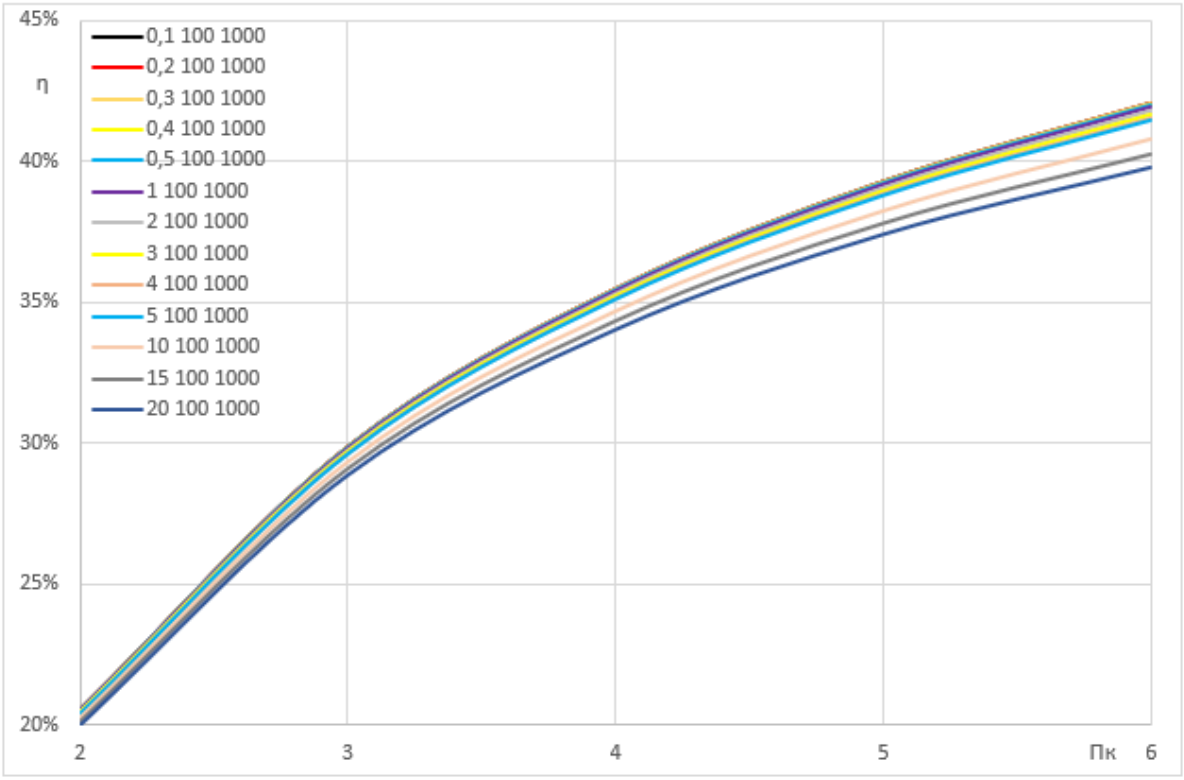



Рис. 4. Зависимость эффективного КПД установки от степени повышения давления и начального давления

Источник: составлено автором

На рисунке 5 построен график для постоянного давления перед компрессором $p_1 = 0{,}1$ МПа и температуры перед турбиной $T_3 = 1000$ К, при изменении температуры $T_1$ на входе в компрессор от 100 до 400 К. Результаты показывают, что наибольший КПД (свыше 42 %) достигается при минимальной температуре $T_1 = 100$ К, а с её ростом эффективность резко падает. Уже при $T_1 \geq 300$ К наблюдается снижение КПД более чем на 10 процентов, а при $T_1 = 400$ К эффективность снижается практически до нуля при $\pi_k > 5$. Это связано с уменьшением полезного теплоперепада и увеличением работы на сжатие при более тёплом рабочем теле.

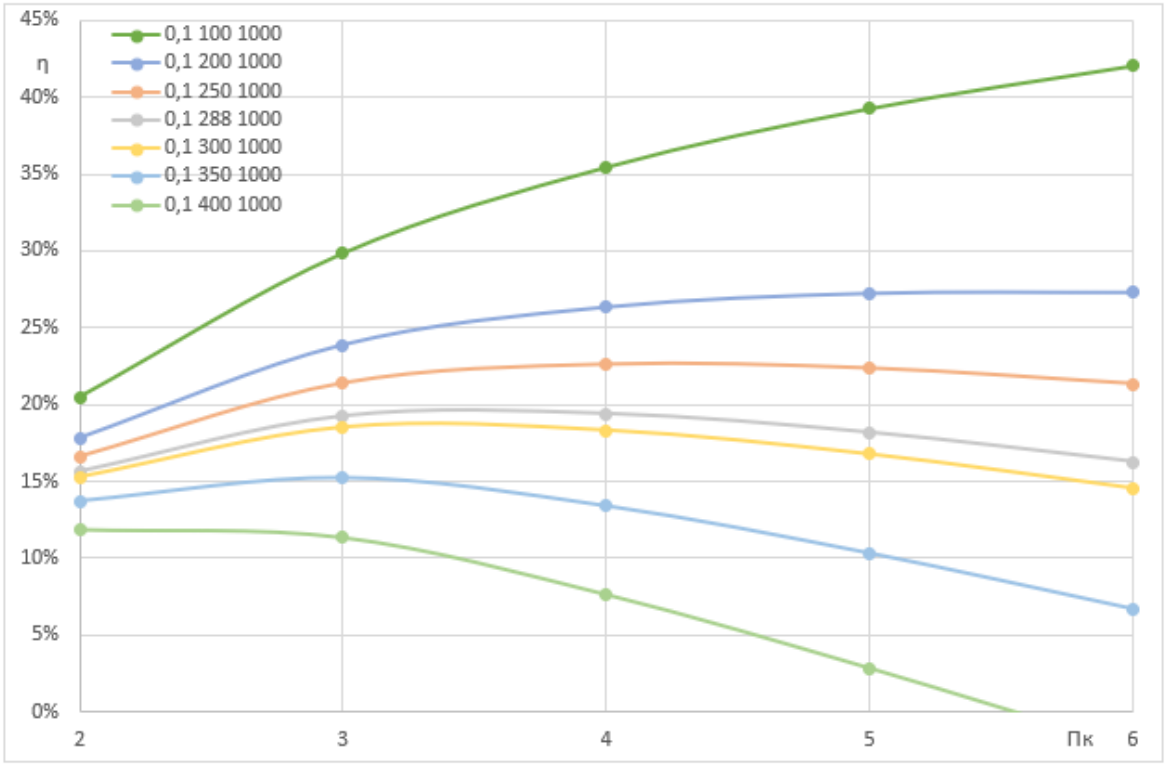



Рис. 5. Зависимость эффективного КПД установки от степени повышения давления и начальной температуры

Источник: составлено автором

**Выводы**

Проведённый расчёт эффективности микротурбинной установки замкнутого цикла на гелии показал, что диапазоны степеней повышения давления и температурного режима существенно влияют на общий КПД установки. Графический анализ зависимости $\eta$ от $\pi_к$ показал рост эффективного КПД вплоть до области оптимальных степеней повышения давления, за пределами которых проявляется падение эффективности вследствие возрастания удельных потерь и ограничений по числу Маха. В целом достигнутые значения $\eta \approx 0{,}35–0{,}42$ можно рассматривать как реалистичные для рассматриваемых условий при соблюдении ограничений по входным температурам и давлению.

Дополнительное рассмотрение схемы с утилизацией тепла (теплофикация) позволило установить, что подключение теплообменника после турбины даёт прирост совокупного эффективного КПД установки до 65–70 %. При этом электрическая эффективность остаётся ограниченной рамками 40–42 %. Отдельно проанализировано влияние установки ВРУ: расчёты показывают, что при охлаждении рабочего тела до 100 К затраты на ВРУ при реалистичных значениях коэффициента эффективности, оказываются сравнимы или выше выработки турбины, что

полностью нивелирует выигрыш по электрическому КПД. Исключение составляет использование внешних источников холода (например, жидкого азота), где электрический баланс сохраняется, но возникает значительный расход криогенной жидкости.

Таким образом, результаты работы подтверждают, что реализация теплофикации радикально улучшает КПД, но практически не решает проблему низкой электрической эффективности при глубоком охлаждении.

Главным ограничением для практической реализации цикла остаётся вопрос обеспечения холода: либо необходимо смягчать требования к минимальной температуре на входе в компрессор, либо переносить затраты на внешний технологический контур.

В совокупности проведённое исследование демонстрирует потенциал замкнутых гелиевых циклов для автономной энергетики и когенерации, одновременно подчёркивая ключевые технологические барьеры, требующие дальнейших проработок: оптимизация геометрии проточной части, интеграция установок в качестве дополнительного контура, повышение реального КПД охлаждающих машин и разработка схем интеграции с внешними источниками холода.

**Список используемых источников**

1. Баранов В.В., Барсков В.В. Газотурбинная установка замкнутого цикла мощностью 30 кВт с использованием азотного охлаждения // Газовая промышленность. 2024. № 7 (868). С. 66–70.

2. Баранов В.В., Барсков В.В., Матвеев Ю.В. Газотурбинная установка замкнутого цикла мощностью 500 кВт с различными рабочими телами // Надёжность и безопасность энергетики. 2024. Т. 17. № 2. С. 137–143.

3. Власова Г.В. Тенденции совершенствования переработки гелия в России // Вестник АГТУ. 2024. № 1. С. 54–60.

4. Лескин И.О. Расчётно-аналитический анализ контура преобразования энергии энергоблока АЭС с замкнутым циклом Брайтона // Теплофизика реакторов нового поколения: материалы конференции. Обнинск: ИППЭ, 2024. Вып. 1. С. 45–51.

5. Румянцев М.Ю., Сигачев С.И. Автономные системы электроснабжения малой мощности на основе высокоскоростных турбогенераторов // Технический оппонент. 2021. № 1 (7). С. 21–26.

6. Geng X., Wang J. Simplified reactor model for microreactor coupled with helium closed Brayton cycle // Annals of Nuclear Energy. 2025. Vol. 218. Article 111389.

7. Kosowski K., Piwowarski M. Design analysis of micro gas turbines in closed cycles // Energies. 2020. Vol. 13, No. 21. Article 5790.

8. Ma W., Yang X., Wang J. Thermodynamic performance and optimization of the helium–xenon Brayton cycle for gas-cooled micro-reactors // Applied Thermal Engineering. 2025. Vol. 267. Article 125804.

9. Malik A., et al. Effect of helium–xenon as working fluid on centrifugal compressor of power conversion unit of closed Brayton cycle power plant // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. Vol. 46. P. 7546–7557.

10. McDonald C. F. Helium turbomachinery operating experience from gas turbine power plants and test facilities // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 44. P. 108–142.

11. Qian Y., Gu Z., Song M., et al. Multi-objective optimization and configurations comparison of closed-air Brayton cycle // Progress in Nuclear Energy. 2023. Vol. 166 Article 104941.

12. Rovense F., Sebastián A., Abbas R., et al. Performance map analysis of a solar-driven and fully unfired closed-cycle micro gas turbine // Energy. 2023. Vol. 263. Article 125778.

# О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПУНКТОВ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЁТА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ДИАГНОСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Белов А.В. – к.т.н., доцент, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

*Батовская Е.К. – д.б.н., зав. кафедрой, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

*Скородумова Н.В., – ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»*

**Аннотация**

В статье рассмотрена проблема диагностики потребительских силовых трансформаторов в процессе эксплуатации. Предложено использовать для диагностики межвитковых замыканий в обмотках силовых трансформаторов пункты коммерческого учета электроэнергии. Описана технология производства измерений и обработки результатов измерений.

Надежность электроснабжения предприятий АПК во многом зависит от работоспособности понижающих трансформаторов 6–10/0,4 кВ. Статистика показывает, что число отказов таких трансформаторов составляет более 9% ежегодно [1,2]. Наиболее распространенной причиной отказов являются межвитковые замыкания в обмотках. Повреждение развивается постепенно, охватывая всё большее количество витков. При этом в начальной стадии повреждения токи в обмотках изменяются незначительно, токовая защита на них не реагирует. Когда же повреждение охватит большое количество витков с образованием электрической дуги, то срабатывает газовое реле (в трансформаторах типа ТМ) или мановакуумметр (в трансформаторах типа ТМГ), однако стоимость ремонта трансформатора после такого повреждения обойдется уже в сумму, соизмеримую со стоимостью нового трансформатора [3]. Если бы была возможность выявлять повреждения на ранней стадии их развития, то ремонт обошелся бы значительно дешевле. Это свидетельствует об актуальности диагностики трансформаторов в процессе их эксплуатации.

Разработано несколько способов диагностики межвитковых замыканий в обмотках силовых потребительских трансформаторов на ранней стадии развития межвитковых замыканий. К сожалению, в настоящее время ни один из них на практике не применяется. Это связано с тем, что применение средств диагностики требует определенных капитальных затрат. Покупая новый трансформатор, собственник не задумывается над тем, что со временем прочность изоляции обмоток будет нарушена и возникнет опасность выхода из строя трансформатора. Тратить при покупке трансформатора средства ещё на диагностику, которая возможно окупится когда-то в будущем, собственник не готов. Дело в том, что наиболее эффективным способом обнаружения межвитковых замыканий в обмотках трансформаторов является анализ токов холостого хода трансформатора, а широко распространенные комплектные трансформаторные подстанции (КТП), как правило, не имеют измерительных средств со стороны высшего напряжения трансформатора. Для анализа токов холостого тока трансформатора необходимо, как минимум, оборудовать КТП дополнительно трансформаторами тока со стороны высшего напряжения, в то время как обычно все измерительные средства КТП сосредоточены со стороны низшего напряжения – 0,4 кВ.

Идеальным представляется случай, когда диагностику можно было бы осуществлять без дополнительных затрат на специальные средства диагностики.

И такая возможность, на наш взгляд, представляется в связи с широким распространением пунктов коммерческого учета электроэнергии (ПКУ). ПКУ были созданы для совершенствования учета электроэнергии, а также для того, чтобы выявить случаи хищения электроэнергии [6]. Низковольтные счетчики электроэнергии обычно располагаются в доступной для потребителя зоне и часто подвергаются воздействию со стороны потребителей с целью искажения показаний счетчика. Поэтому сетевые компании стали практиковать учет электроэнергии со стороны высшего напряжения 6 или 10 кВ.

Пример подключения ПКУ к комплектной трансформаторной подстанции показан на рисунке 1. Пункт коммерческого учета (ПКУ) размещен на концевой опоре 1. Пункт состоит из двух блоков: высоковольтного блока 2 и блока учета электроэнергии 3. В высоковольтном блоке находятся трансформаторы тока 4 и трансформаторы напряжения 5. Сигналы от трансформаторов тока и напряжения поступают в блок учета электроэнергии 3, где находится счетчик электроэнергии и предающее устройство. Счетчик электроэнергии суммирует электроэнергию, проходящую через трансформатор подстанции 6, и передает показания в диспетчерский пункт. К подстанции подключены потребители, расход электроэнергии которых контролируется счетчиками, подключенными со стороны низшего напряжения.

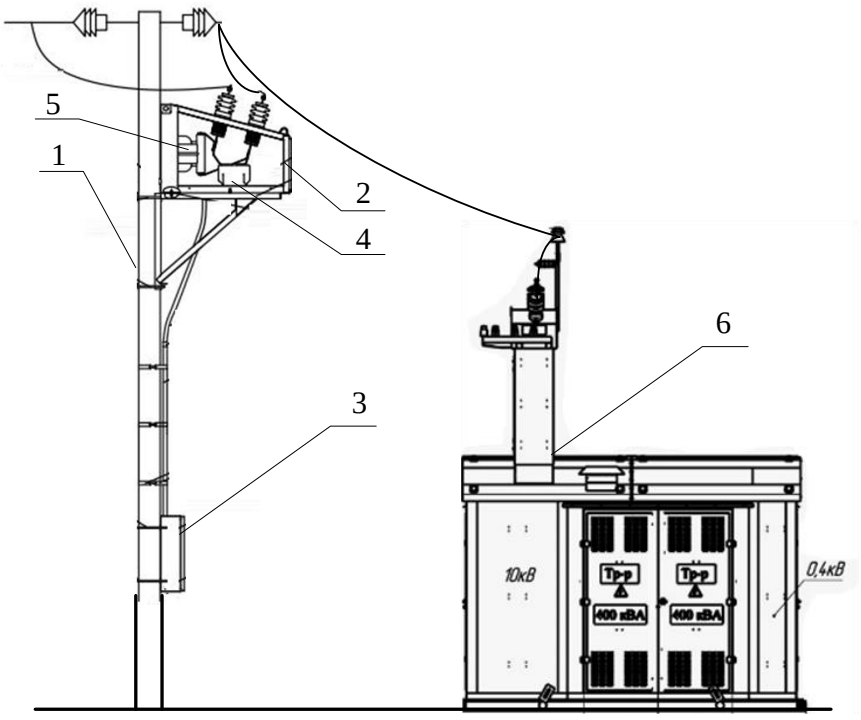



Рис. 1. Схема подключения ПКУ [5, 6]

Рассмотрим возможность использования ПКУ для целей диагностики трансформаторов.

Наиболее простым, на наш взгляд, способом выявления межвитковых замыканий является способ, при котором отслеживаются изменения токов холостого хода трансформатора в процессе эксплуатации [5, 6]. Схема измерения токов холостого хода представлена на рисунке 2.

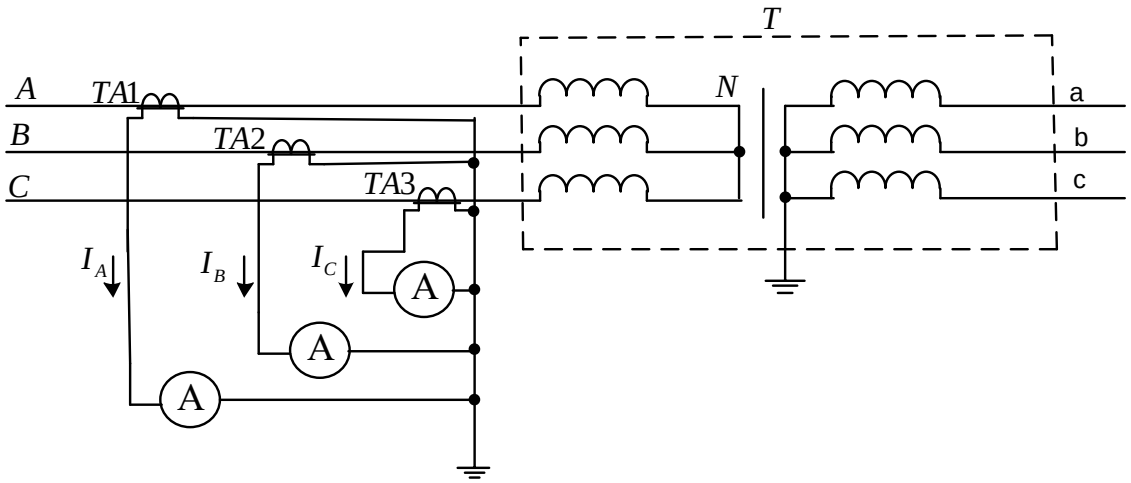



Рис. 2. Схема измерения токов холостого хода трансформатора [5, 6]

В фазы первичной обмотки трансформатора А, В и С включены измерительные трансформаторы тока ТА1, ТА2 и ТА3. Трансформатор находится под номинальным напряжением, но нагрузка не подключена (режим холостого хода). Вторичные обмотки трансформаторов тока замкнуты на амперметры. Токи холостого хода в фазах неодинаковы, что обуславливается плоской конструкцией магнитопровода. Однако сумма абсолютных значений токов холостого хода во всех трех фазах остается примерно стабильной во время эксплуатации трансформатора при сохранении целостности изоляции обмоток. Если же изоляция между соседними витками обмотки нарушена, то образуется так называемый короткозамкнутый виток. В короткозамкнутом витке индуцируется электродвижущая сила (ЭДС), под действием которой в витке начинает циркулировать ток короткого замыкания. Таким образом, если даже короткозамкнутый виток являлся ранее частью первичной обмотки, он превращается во вторичную обмотку, нагружая трансформатор. Ток короткозамкнутого витка приводит к повышению его температуры, что в свою очередь, приводит к разрушению изоляции соседних витков, по которым также

начинают циркулировать токи короткого замыкания. Повреждение обмотки постепенно расширяется, приводя к разрушению трансформатора.

Уже при возникновении первого короткозамкнутого витка можно отметить увеличение токов холостого хода трансформатора (суммы их абсолютных значений). Способ выявления межвитковых замыканий в обмотках трансформатора реализуется следующим образом. До начала эксплуатации, на заведомо исправном трансформаторе производят первое измерение токов холостого хода. Трансформаторы тока, включенные в фазы первичной обмотки трансформатора, передают на амперметры абсолютные значения токов холостого хода. При первом измерении сумму этих значений фиксируют в оперативном журнале, либо на цифровом носителе. Затем, в ходе эксплуатации трансформатора, периодически повторяют измерение, предварительно отключив нагрузку (поскольку однотрансформаторные подстанции, как правило, осуществляют электроснабжение потребителей третьей категории надежности электроснабжения, отключение нагрузки на несколько минут в подавляющем большинстве случаев допустимо). Если в процессе эксплуатации в обмотках трансформатора произойдет межвитковое замыкание, то сумма абсолютных значений фазных токов увеличится. Сумму абсолютных значений фазных токов сравнивают с ранее полученным значением при первом измерении. О наличии межвитковых замыканий в обмотках трансформатора можно судить по величине превышения суммы абсолютных значений фазных токов, измеренных в процессе эксплуатации, по сравнению со значением, полученным при первом измерении.

Такой способ можно было бы легко реализовать, используя пункты коммерческого учета. Затруднение заключается в том, что для реализации способа необходимо, чтобы в ПКУ находилось три трансформатора тока, в то время как на практике имеется чаще всего только два трансформатора тока. Дело в том, что для целей коммерческого учета (а именно для этого и создан ПКУ) достаточно иметь только два трансформатора тока. И хотя изготовители предлагают различные схемы ПКУ, в том числе и с тремя трансформаторами тока, на практике потребители чаще выбирают схему с двумя трансформаторами тока из соображений экономии.

Для преодоления этого затруднения предлагается использовать измерительный прибор – вольтамперфазометр (ВАФ). В нашем случае предлагается использовать вольтамперфазометр типа ВФМ-3 производства ООО «Челябэнергоприбор» [7]. Этот прибор позволяет не только измерять величины токов и напряжений, но и углы между

их векторами. Для измерения токов в проводниках он оснащен измерительными клещами, а для измерений напряжений – щупами с магнитами для фиксации положения щупа. Сам прибор также имеет магниты для его крепления к любой стальной поверхности (рисунок 3).




а)



б)

Рис. 3. Вольтамперфазометр типа ВФМ-3 [7]:

а) общий вид; б) закрепление прибора на дверце блока учета электроэнергии

На рисунке 4 показана схема подключения прибора ВАФ к блоку учета электроэнергии.

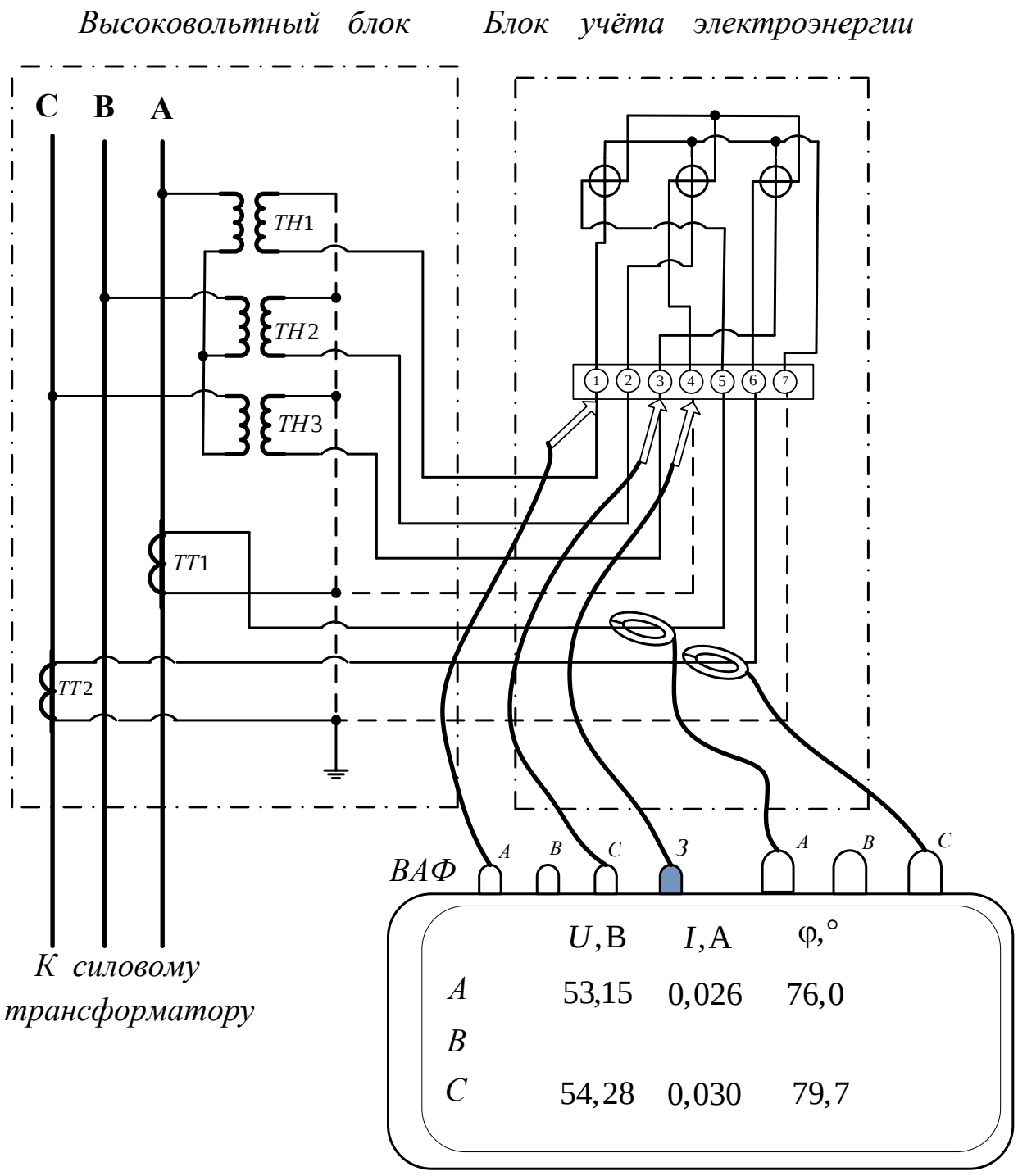



Рис. 4. Схема подключения прибора ВАФ к блоку учета электроэнергии
Источник: составлено авторами

Щупы для измерения напряжения фаз А и С прикладываются к клеммам, соединенным с выходными зажимами трансформаторов напряжения ТН1 и ТН3. Токоизмерительные клещи токов фаз А и С прибора ВАФ охватывают проводники, идущие от трансформаторов тока ТТ1 и ТТ2. Кроме того щуп заземляющего проводника соединяется с клеммой заземления. При проведении измерений на экране

прибора ВАФ отражаются значения фазных напряжений в фазах А и С, значения токов в фазах А и С, а также углы между напряжениями и токами соответствующих фаз.

Полученные в результате измерений данные изобразим в виде векторной диаграммы (рисунок 5).

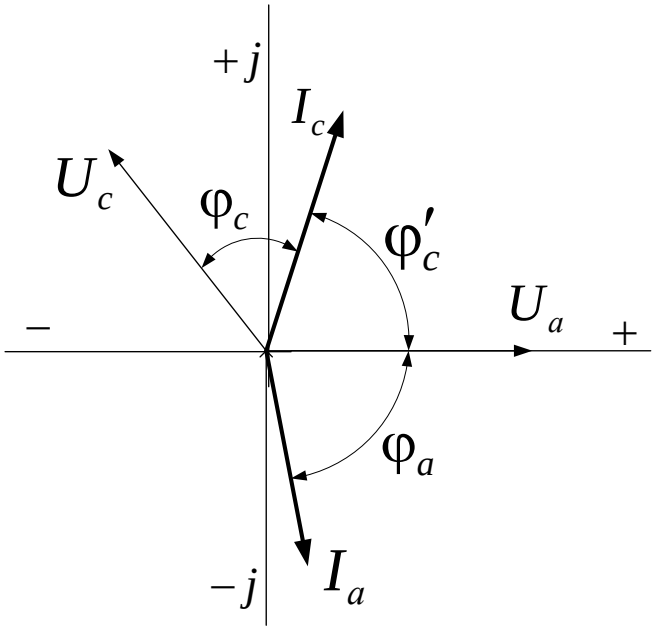



Рис. 5. Векторная диаграмма токов и напряжений

Источник: составлено авторами

Примем условно, что направление вектора напряжения $U_a$ совпадает с положительным направлением действительной оси абсцисс на комплексной плоскости. Угол между напряжением $U_a$ и током $I_a$ составляет $\varphi_a$ в абсолютном значении. Известно, что вектор тока в цепях с индуктивностью отстает от вектора напряжения, следовательно, угол между напряжением и током будет отрицательным, т.е. значение вектора тока фазы А в комплексном выражении будет:

$$\dot{I}_a = I_a \cdot e^{-j\varphi_a}. \quad (1)$$

Угол между напряжением $U_c$ и током $I_c$ составляет $\varphi_c$ в абсолютном значении. Учитывая, что вектор тока в цепях с индуктивностью отстает от вектора напряжения, и что вектор напряжения $U_c$ опережает вектор напряжения $U_a$ на 120°, значение вектора тока фазы С в комплексном выражении будет:

$$\dot{I}_c = I_c \cdot e^{j(120° - \varphi_c)}. \quad (2)$$

Из 1-го закона Кирхгофа следует, что сумма векторов токов, сходящихся в одном узле, равна нулю, т.е.

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0. \quad (3)$$

Отсюда найдем значение вектора тока фазы В в комплексном выражении как сумму векторов токов фаз А и С, взятую с обратным знаком:

$$\dot{I}_b = -(\dot{I}_a + \dot{I}_c) = -(I_a \cdot e^{-j\varphi_a} + I_c \cdot e^{j(120° - \varphi_c)}). \quad (4)$$

Зная комплексное выражение тока фазы В, нетрудно найти его абсолютное значение:

$$\left|\dot{I}_b\right| = I_b.$$

Таким образом, мы можем получить абсолютные значения всех трех фазных токов трансформатора.

При проведении испытаний необходимо пользоваться калькулятором или ноутбуком для расчетов и фиксации результатов измерений.

Выявление межвитковых замыканий в обмотках трансформатора по описанному способу производится следующим образом.

Первое измерение производят до начала эксплуатации на заведомо исправном трансформаторе, переведенном в режим холостого хода. Измерение производят с помощью ПКУ, используя два встроенных в ПКУ измерительных трансформатора тока, а также используя встроенные в ПКУ трансформаторы напряжения и временно подключённый к блоку учета электроэнергии ПКУ вольтамперфазометр. Сигналы, полученные с помощью вольтамперфазометра, обрабатывают. Обработка заключается в том, что токи двух фаз А и С переводят в комплексную (векторную) форму записи и рассчитывают вектор тока фазы В как сумму векторов токов фаз А и С, взятую с обратным знаком. Из комплекса вектора тока фазы В находят его абсолютное значение.

Затем производят сложение абсолютных значений токов всех трех фаз:

$$\sum I = I_a + I_b + I_c. \quad (5)$$

Полученное значение запоминают (фиксируют). Предполагается, что сумма фазных токов, измеренных в режиме холостого хода, в исправном трансформаторе является практически постоянной величиной. Затем, в ходе эксплуатации трансформатора, периодически повторяют измерение. Если в какой-то момент в обмотках трансформатора произойдет межвитковое замыкание, то сумма абсолютных значений фазных токов, измеренных в режиме холостого хода трансформатора, увеличится. Сумму абсолютных значений фазных токов сравнивают с ранее полученным значением при первом измерении. О наличии межвитковых замыканий в обмотках трансформатора можно судить по величине превышения суммы абсолютных значений фазных токов, измеренных в процессе эксплуатации, по сравнению со значением, полученным при первом измерении.

Применение ПКУ позволит без дополнительных капитальных вложений осуществлять диагностику межвитковых замыканий в обмотках силовых трансформаторов на ранней стадии развития повреждений, что в свою очередь, позволит избежать крупных аварий.

Анализ токов холостого хода трансформаторов с использованием ПКУ позволит осуществлять не только описанный выше способ диагностики, но и другие, более сложные и перспективные способы диагностики (например, на основе исследования токов обратной последовательности). Таким образом, использование ПКУ для целей диагностики позволит расширить область диагностики трансформаторов на большое количество потребительских трансформаторов, диагностика которых в ходе эксплуатации в настоящее время не производится.

**Список используемых источников**

1. Белов А.В., Ильин Ю.П., Скородумова Н.В. Устройство для диагностики межвитковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2022. № 1. С.18–21.

2. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.

3. Иванова З.Г., Ахметшин Р.А., Макарова Н.Л. Анализ причин отказов трансформаторов 10/0,4 кВ за 10 лет // Актуальные проблемы энергетики АПК: матер.

III междунар. науч.- практ. конференции / под ред. А. В. Павлова. Саратов: Кубик, 2012. С. 95–99.

4. Патент на полезную модель RU 205505 U1, 19.07.2021. Заявка № 2021108508 от 29.03.2021.

5. Пункты коммерческого учета / Сайт интернет-магазина «ТМ ЭНЕРГИЯ». [Электронный ресурс] URL: https://tmnrg.ru/manual--punkty-kommercheskogo-ucheta (дата обращения 20.11.2025).

6. Рыбаков Л.М. Диагностика и надежность в системах электроснабжения: монография / Л. М. Рыбаков, Н. Л. Макарова, В. П. Калявин; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», Электроэнергетический факультет. - Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т, 2016. 318 с.

7. Трехфазный вольтамперфазометр ВФМ-3 / Руководство по эксплуатации. ООО «Челябэнергоприбор», г. Челябинск [Электронный ресурс] URL: https://saltako.by/upload/iblock/d08/Трехфазный%20вольтамперфазометр%20ВФМ-3%20-%20Руководство%20по%20эксплуатации.pdf?ysclid=m3y8y1kwuy348369768 (дата обращения 20.11.2025).

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКАХ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

*Белов А.В. – к.т.н., доцент, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

*Батовская Е.К. – д.б.н., зав. кафедрой, ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

*Скородумова Н.В., – ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»*

**Аннотация**

Предложено устройство, позволяющее выявлять межвитковые замыкания в обмотках трехфазного трансформатора на ранней стадии развития повреждения, что даёт возможность избежать серьезных аварий.

В сельских распределительных сетях напряжением 6–10 кВ эксплуатируется более 600 тысяч трансформаторных подстанций [9]. Их состояние во многом определяет надежность электроснабжения отечественного аграрно-промышленного

комплекса. Отказы трансформаторов составляют более 9% в год, при этом наиболее частой причиной отказов являются короткие замыкания между витками в обмотках трансформаторов [6,8].

Чаще всего короткие замыкания между витками в обмотках (межвитковые замыкания) наблюдаются в обмотке высшего напряжения. Несмотря на то, что ЭДС, возникающая в одном короткозамкнутом витке, имеет сравнительно небольшую величину, ток в короткозамкнутом витке достигает большой величины ввиду малого сопротивления провода и малой его длины. В итоге виток разогревается, нагревает соседние витки, постепенно разрушая их изоляцию. Повреждение охватывает всё большее количество витков, при этом температура в месте повреждения нарастает, в итоге приводя к появлению обширного внутреннего короткого замыкания в обмотках трансформатора.

Выявление межвиткового замыкания на ранней стадии возникновения, когда поражены всего несколько витков, обнаружить трудно, поскольку ток в подводящих проводах почти не изменяется и максимальная токовая защита на эти изменения не реагирует. Позднее, когда возникает внутреннее обширное короткое замыкание обмотки трансформатора, от возникшей дуги закипает трансформаторное масло и срабатывает газовое реле (в герметичных трансформаторах типа ТМГ срабатывает мановакууметр). Но в этом случае повреждение трансформатора будет настолько большим, что стоимость ремонта такого трансформатора окажется соизмеримой со стоимостью нового трансформатора [5]. Поэтому важно не доводить ситуацию до критической, а обнаружить межвитковое замыкание не ранней стадии его развития, что поможет избежать крупных аварий и существенно снизить стоимость ремонта трансформатора.

Исследования по выявлению межвитковых замыканий ведутся с 70-х годов 20-го века. Работы ведутся в разных странах и в разных направлениях. Обзор разработок представлен в [10, 6]. Следует отметить их недостатки. Часть разработок предполагает проведение исследования при полностью отключенном от питающей сети трансформаторе в стационарных условиях, что предполагает проведение диагностики только при ремонтах. Другая часть, напротив, ставит своей целью диагностику в процессе работы трансформатора под нагрузкой. Известно, что при межвитковых замыканиях ток в первичной обмотке трансформатора несколько увеличивается по сравнению с током при нормальном режиме работы. Однако это увеличение тока в начале повреждения обмоток настолько мало по сравнению с

рабочим током, что получить достаточно точные данные для диагностики при работе под нагрузкой не представляется возможным. Напомним, что целью диагностики является обнаружение повреждения на ранней стадии развития.

В результате проведенного анализа был выбран компромиссный вариант: проведение диагностики без отключения трансформатора от сети, но с отключением нагрузки. Периодическое отключение нагрузки с целью диагностики в условиях сельских электрических сетей, на наш взгляд, вполне допустимо [1]. Такое допущение вполне возможно в сельских сетях, где основную нагрузку составляют потребители третьей категории по надежности электроснабжения, кратковременное отключение которых от электроэнергии не создает критической ситуации.

Исследовались признаки межвитковых замыканий в режиме холостого хода трансформатора. Строго говоря, при наличии межвиткового замыкания нельзя говорить о холостом ходе трансформатора, поскольку короткозамкнутый виток уже создает нагрузку и по сути своей является дополнительной вторичной обмоткой трансформатора. Но для упрощения терминологии будем считать этот режим работы трансформатора холостым ходом по причине того, что к выходным зажимам трансформатора не подключена внешняя нагрузка.

**Признаки межвитковых замыканий**

Наиболее просто межвитковые замыкания в обмотках трансформатора можно выявить, исследуя токи в фазах трансформатора в режиме холостого хода. Для более точного исследования измерялись не только абсолютные значения токов, но и углы между векторами токов, а также относительно произвольно выбранной оси. Величины измеренных токов записывались в комплексной форме. Для этих измерений была разработана специальная методика [3]. Межвитковые замыкания имитировались намоткой двух дополнительных витков поверх основных обмоток, эти витки можно было замыкать или размыкать без повреждения трансформатора. Два дополнительных витка к обмотке высшего напряжения не создавали существенной погрешности измерений, поскольку общее количество витков обмотки высшего напряжения во взятом для исследования трансформаторе (858) намного превышало количество короткозамкнутых витков.

Было установлено, что при межвитковом замыкании углы между векторами токов в фазах питающей линии существенно изменяются (при том, что углы между векторами напряжений оставались прежними). Установлено также, что сумма

абсолютных значений фазных токов при появлении межвиткового замыкания увеличивается, хотя отдельные токи могут даже уменьшиться.

Величина увеличения суммы абсолютных значений токов достаточна для того, чтобы выявить наличие межвитковых замыканий.

За основной признак наличия межвитковых замыканий для разработки устройства диагностики было принято именно то свойство, что сумма абсолютных значений токов фаз при межвитковом замыкании увеличивается. Однако электрически сложить сумму токов фаз на переменном токе, измеренном трансформаторами тока, невозможно, так как она по закону Кирхгофа всегда равна нулю.

**Схема устройства диагностики межвитковых замыканий**

Чтобы получить электрическим способом сумму фазных токов, их необходимо предварительно выпрямить и складывать уже постоянные токи, пропорциональные токам фаз. Однако просто вставить диод в цепь трансформатора тока невозможно, этого не допускают требования по эксплуатации трансформатора тока. По условиям эксплуатации, трансформатор тока должен работать либо под нагрузкой, либо в режиме короткого замыкания. Если в выходную цепь трансформатора тока включить диод, то он каждые полпериода будет перекрывать эту цепь, создавая режим холостого хода трансформатора тока. Режим холостого хода недопустим, поскольку в результате возникают перенапряжения и перегрев трансформатора тока. Поэтому в устройстве диагностики [4] предложено использовать двухполупериодный трехфазный выпрямитель, собранный по схеме Ларионова (рис. 1).

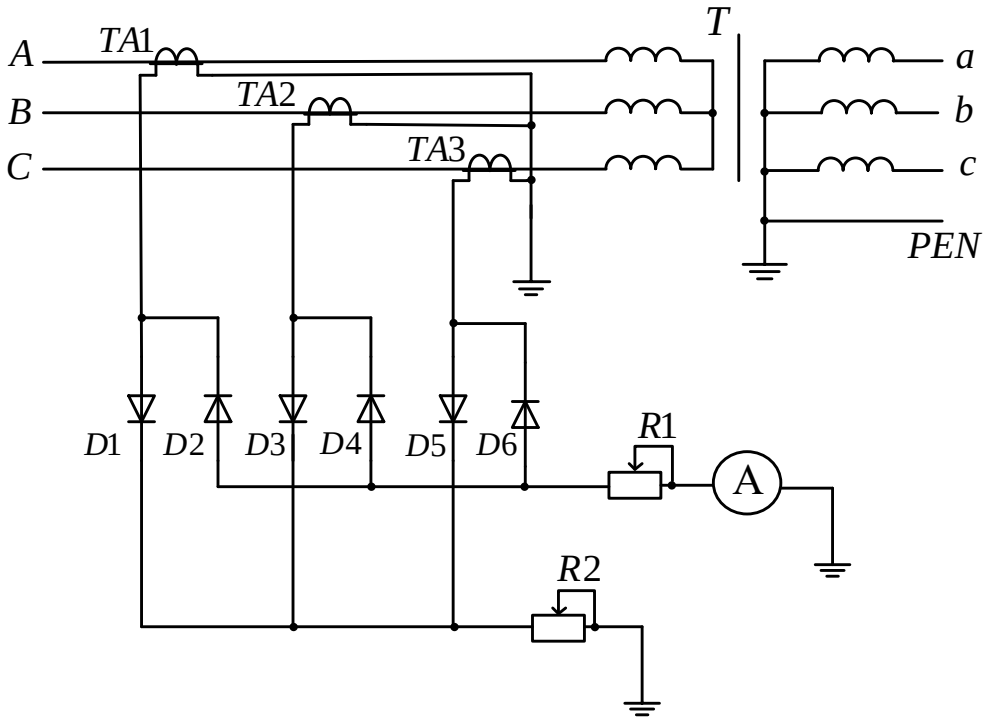



Рис. 1. Схема устройства для диагностики межвитковых замыканий [9]

При включении трансформатора Т на холостой ход, на выходе трансформаторов тока ТА1, ТА2 и ТА3 появляются сигналы, пропорциональные фазным токам силового трансформатора. Эти сигналы выпрямляются с помощью диодов D1–D6, соединенных по схеме Ларионова. Через амперметр А проходит ток, пропорциональный сумме фазных токов. При этом не возникает режима холостого хода трансформаторов тока, поскольку схема Ларионова пропускает токи свободно в обоих направлениях.

Работоспособность устройства подтверждена испытаниями на электронной модели [2].

Проверка устройства проводилась с помощью среды программирования Matlab, включающую в себя графическую среду имитационного моделирования Simulink.

Данная модель представлена на рис 2.

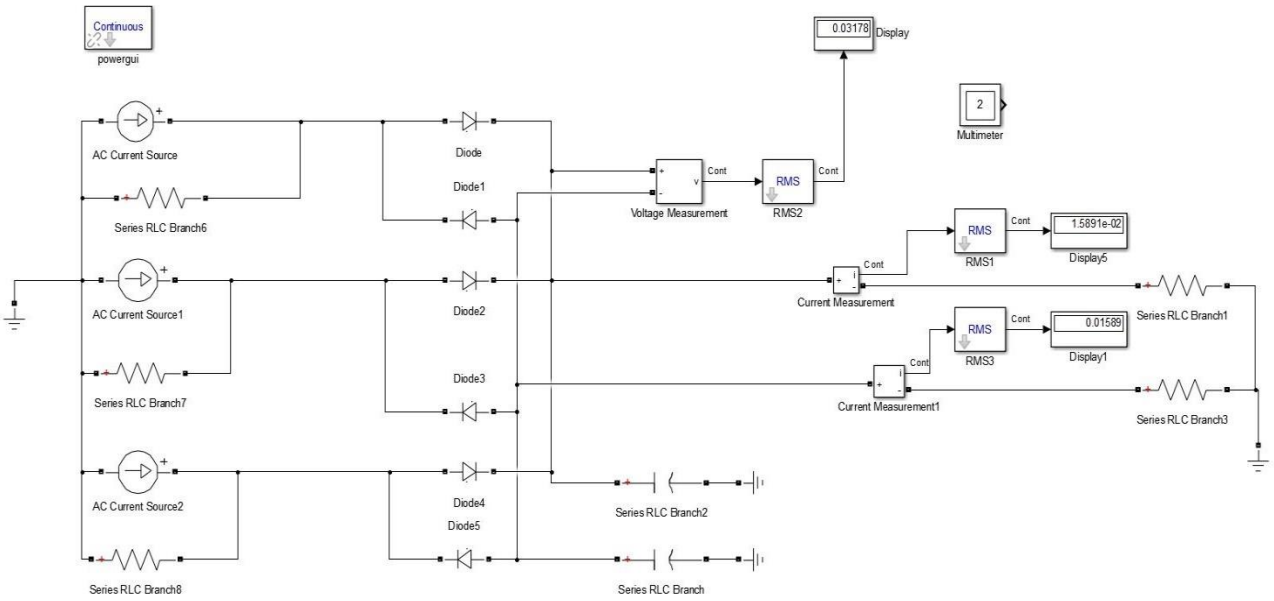



Рис. 2. Модель устройства обнаружения межвитковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора [10]

В данной модели трансформаторы тока были представлены как источники переменного тока AC Current Source. Результаты измерений в лабораторных условиях на реальном трансформаторе (величины токов в комплексной форме) были взяты в качестве исходных данных. Блоками Diode производилось двухполупериодное выпрямление токов трех фаз. Блоки Series RLC Branch1 и Series RLC Branch3 выполняли роль нагрузки с сопротивлением равным 1 Ом. Series RLC Branch и Series RLC Branch2 – специальные конденсаторы, применение которых позволяло сглаживать пульсации тока. Измерение токов прямого и обратного направления производилось с помощью элементов Current Measurement – амперметр, результат с амперметра выводился на Display. Блок Multimeter – это осциллограф, позволяющий на экране наблюдать за токами.

Рассмотрим работу устройства с использованием конкретных результатов измерений тока.

Лабораторный трансформатор, выбранный для испытаний, имел следующие параметры: $S_н$ = 120 В·А; $U_{ВН}$ = 220 В; $U_{НН}$ = 20 В, количество витков первичной обмотки $w_1$ = 858; количество витков вторичной обмотки $w_2$ = 78.

В ходе эксперимента измерялись в фазах первичной обмотки в режиме холостого хода трансформатора и в том же режиме, но при создании короткозамкнутых витков в одной из фаз первичной обмотки трансформатора

В режиме холостого хода **неповрежденного** трансформатора токи в фазах трансформатора распределялись следующим образом:

$$\dot{I}_a = 15,8 - j1,4 = 15,86 \cdot e^{j354,94^\circ} \text{ мА};$$
$$\dot{I}_b = -6,59 - j11,5 = 13,25 \cdot e^{j240,19^\circ} \text{ мА};$$
$$\dot{I}_c = -9,2 + j12,9 = 15,85 \cdot e^{j125,49^\circ} \text{ мА}$$

Полученные графики значений суммы трех фаз после выпрямления по схеме Ларионова представлены на рис. 3. Здесь верхний график показывает ток в ветви, проходящий через резистор R1 (см. схему рис.1), а нижний график показывает ток в ветви, проходящий через резистор R2. Как видно из графиков, эти токи равны по величине и противоположны по направлению. Амперметр А можно включить в любую из этих ветвей, и он будет показывать величину, пропорциональную сумме фазных токов трансформатора.

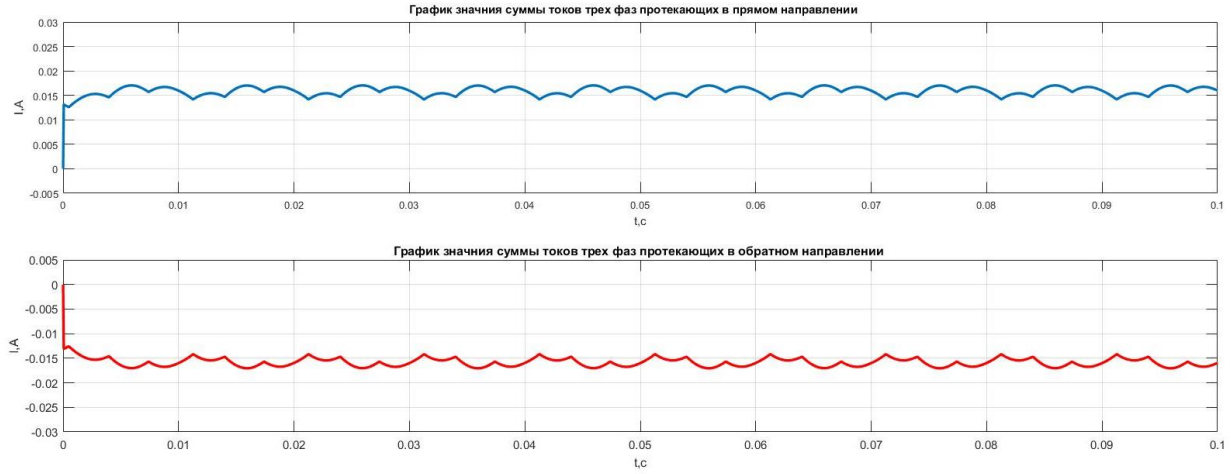



Рис. 3. Графики суммы токов трех фаз после двухполупериодного выпрямления [10]
(верхний рисунок – ток в прямом направлении, нижний – в обратном направлении)

Среднее абсолютное значение суммы токов фаз в режиме холостого хода неповрежденного трансформатора равно **15,89 мА**. Это значение примем в качестве **базового**. Проследим, как будет изменяться это значение при коротких замыканиях в витках обмоток фаз.

**Короткозамкнутые витки в фазе А**

При создании двух короткозамкнутых витков в обмотке фазы А токи в фазах трансформатора в режиме холостого хода изменились и распределились следующим образом:

$$\dot{I}_a = 28,0 - j12,18 = 30,53 \cdot e^{j336,49^\circ} \text{ мА};$$

$$\dot{I}_b = -11,9 - j1,2 = 11,96 \cdot e^{j185,79^\circ} \text{ мА};$$

$$\dot{I}_c = -16,1 + j13,3 = 20,88 \cdot e^{j140,44^\circ} \text{ мА}.$$

Графики суммы токов трех фаз после выпрямления представлены на рис. 4.

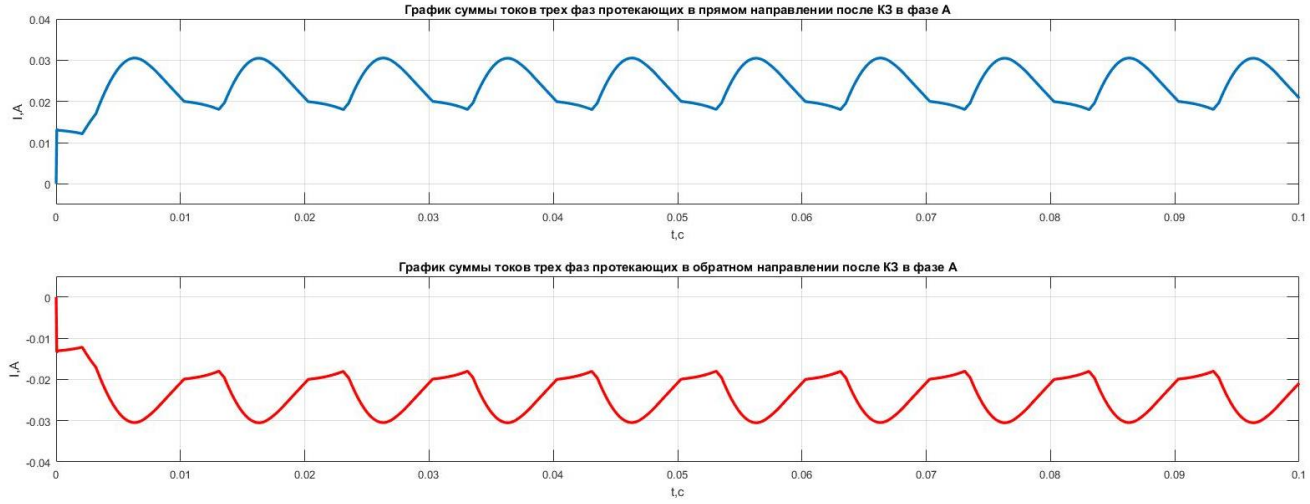



Рис. 4. Графики суммы токов трех фаз при создании короткозамкнутых витков в фазе А

Источник: составлено авторами

Среднее значение суммы фазных токов при создании короткозамкнутых витков в фазе А после выпрямления равно 24,44 мА.

Сумма фазных токов увеличилась по сравнению с неповрежденным трансформатором примерно **на 8,55 мА**, что является существенным признаком повреждения обмоток.

**Короткозамкнутые витки в фазе В**

При создании двух короткозамкнутых витков в фазе В токи в фазах трансформатора в режиме холостого хода распределились следующим образом:

$$\dot{I}_a = 19,93 + j4,19 = 20,36 \cdot e^{j11,87^\circ} \text{ мА};$$

$$\dot{I}_b = -13,31 - j23,45 = 26,96 \cdot e^{j240,42^\circ} \text{ мА};$$

$$\dot{I}_c = -6,61 + j19,25 = 20,35 \cdot e^{j108,95^\circ} \text{ мА}$$

Графики суммы токов трех фаз после выпрямления представлены на рис. 5.

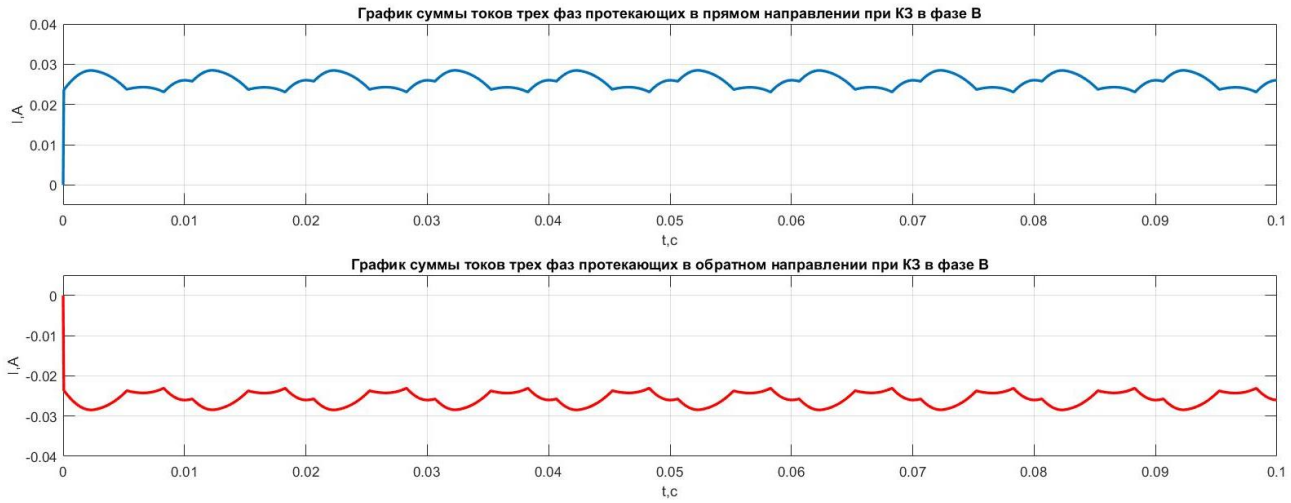



Рис. 5. Графики суммы токов трех фаз при создании короткозамкнутых витков в фазе В

Источник: составлено авторами

Среднее значение суммы фазных токов при создании двух короткозамкнутых витков в фазе В равно 25.75 мА.

Сумма фазных токов увеличилась по сравнению с неповрежденным трансформатором примерно **на 9.86 мА**, что является существенным признаком повреждения обмоток.

**Короткозамкнутые витки в фазе С**

При создании двух короткозамкнутых витков в фазе С трансформатора, токи в фазах трансформатора в режиме холостого хода распределялись следующим образом:

$$\dot{I}_a = 23,09 - j10,2 = 25,24 \cdot e^{j336,17^\circ} \text{ мА};$$

$$\dot{I}_b = -2,3 - j18,25 = 18,39 \cdot e^{j262,82^\circ} \text{ мА};$$

$$\dot{I}_c = -20,7 + j28,45 = 35,18 \cdot e^{j126,04^\circ} \text{ мА}$$

Графики суммы токов трех фаз после выпрямления представлены на рис. 6.

Среднее значение суммы фазных токов при создании двух короткозамкнутых витков в фазе С при после выпрямления равно 31 мА.

Сумма фазных токов при создании двух короткозамкнутых витков в фазе С увеличилась по сравнению с неповрежденным трансформатором примерно на **15,11 мА**, что является существенным признаком повреждения обмоток.

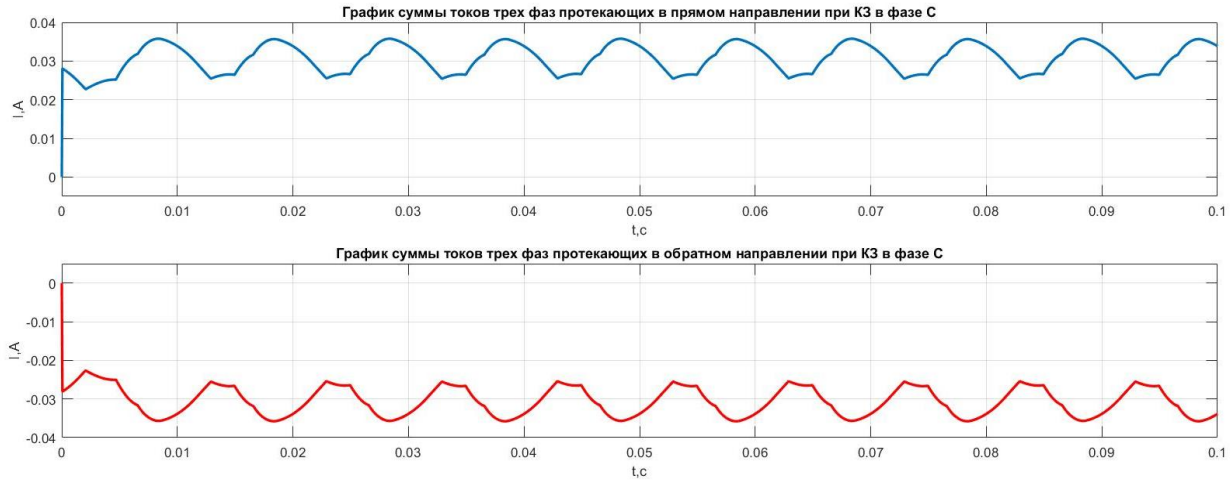



Рис. 6. Графики суммы токов трех фаз при создании короткозамкнутых витков в фазе С

Источник: составлено авторами

**Применение устройства**

Перед началом эксплуатации трансформатора при его тестировании необходимо измерить абсолютное значение суммы фазных токов в режиме холостого хода с помощью предлагаемого устройства по показаниям амперметра данного устройства. Само устройство должно находиться непосредственно на подстанции и являться его неотъемлемой частью для того, чтобы в любой момент им можно было воспользоваться. Значение первого измерения (на заведомо неповрежденном трансформаторе), необходимо запомнить.

В процессе эксплуатации необходимо периодически повторять измерение суммы токов в режиме холостого хода трансформатора и сравнивать с запомненным значением. О наличии межвитковых замыканий в обмотках трансформатора можно судить по величине превышения суммы абсолютных значений фазных токов по сравнению с запомненным значением, полученным до начала эксплуатации.

**Вывод**

Предложенное устройство позволяет обнаруживать межвитковые замыкания в обмотках трехфазного трансформатора на ранней стадии развития повреждения, что даёт возможность избежать серьезных аварий и дает возможность снизить стоимость ремонта трансформатора.

**Список используемых источников**

1. Белов А.В., Ильин Ю.П., Банин Р.В. Выявление признаков межвитковых замыканий в обмотках потребительских трансформаторов. АПК России, 2017. Т. 24, №4. С. 970–979.

2. Белов А.В., Ильин Ю.П., Захахатнов В.Г., Кадышева А.Г. Модернизация устройства диагностики межвиткового замыкания в обмотках силовых трансформаторов и его исследование на электронной модели. В сборнике: Инновационные технологии в агропромышленном комплексе. Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии. Под редакцией Н.С. Низамутдиновой. Челябинск, ФГБОУ ВО ЮУрГАУ 2020, С. 162–175.

3. Белов А.В., Ильин Ю.П., Скородумова Н.В., Шаймухаметова О.Р. Повышение точности определения фазных углов в трехфазной системе. В сборнике: Современные тенденции агроинженерных наук и инновационные технологии в сельском хозяйстве. Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии. Челябинск, 2021. С. 196–202.

4. Белов А.В., Кадышева А.Г., Ильин Ю.П., Скородумова Н.В. Устройство для диагностики межвитковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора. Патент на полезную модель № 205505, приоритетом от 29.03.2021, дата регистрации 19.07.2021.

5. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.

6. Иванова З.Г., Ахметшин Р.А., Макарова Н.Л. Анализ причин отказов трансформаторов 10/0,4 кВ за 10 лет // Актуальные проблемы энергетики АПК: матер. III междунар. науч.- практ. конференции / под ред. А. В. Павлова. Саратов: Кубик, 2012. С. 95–99.

7. Иванова З.Г., Макарова Л.Н., Разработка устройств для выявления витковых замыканий в обмотках сухих силовых трансформаторов / З.Г. Иванова, Н.Л. Макарова. Вестник ФГОУ ВПО вып. № 1 (57/20), 2013. С. 30–31.

8. Идрис И. И., Жексимбиева Н. С. Дефекты силовых трансформаторов // Актуальные проблемы энергетики АПК: матер. междунар. науч.-практ. конференции. Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2012. С. 158–164.

9. Макарова Н.Л. Разработка метода и технических средств диагностики изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей: автореф. дис. … – Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т, 2012. 227 с.

10. Файфер Л.А. Существующие методы мониторинга силовых трансформаторов. Молодой учёный. 2016. №12 (116). С. 412–415.

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

*Бойкин Д.Р. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Павличенко И.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются актуальные вопросы энергоэффективности распределительного сетевого комплекса (РСК) России. На основе анализа структуры РСК и динамики потерь электроэнергии за период 2014-2024 гг. выявлены ключевые проблемы, связанные с высокой долей затрат на компенсацию потерь в необходимой валовой выручке (НВВ). Проведен анализ структуры парка силовых трансформаторов и обоснована необходимость их замены на энергоэффективные аналоги с аморфными сталесердечниками.

Энергоэффективность является одним из ключевых приоритетов развития современной электроэнергетики России. Особое значение эта проблема приобретает для распределительного сетевого комплекса (РСК), который непосредственно обеспечивает передачу электроэнергии конечным потребителям. Величина затрат на функционирование РСК прямо влияет на стоимость электрической энергии для промышленных и бытовых потребителей [1, с. 92].

Одним из основных видов затрат сетевых организаций является оплата потерь электрической энергии при ее транспортировке. Для минимизации этих затрат необходимо эффективное снижение величины потерь, что требует глубокого понимания их структуры и причин возникновения [1, с. 92–93].

Параллельно с проблемой потерь остро стоит вопрос морального и физического устаревания основного оборудования электрических сетей, в первую очередь силовых трансформаторов. Значительная часть парка трансформаторов была установлена в 70-80-е годы прошлого века и характеризуется низкой энергоэффективностью [2, с. 40].

Целью данной статьи является комплексный анализ текущего состояния распределительного сетевого комплекса России, выявление ключевых проблем в части потерь электроэнергии и обоснование перспективных направлений их решения, включая внедрение энергоэффективных трансформаторов.

Распределительный сетевой комплекс России характеризуется разветвленной структурой с преобладанием сетей низшего и среднего классов напряжения. Согласно исследованиям С.О. Хомутова, И.В. Белицына и А.С. Сабельникова, в РСК России 97% сетей составляют линии напряжением 6-10 кВ и 0,4 кВ, в то время как на сети 35 кВ приходится 3%, а на сети 110 кВ – 2% [1, с. 94].

Такая структура исторически сложилась и обусловлена необходимостью охвата распределительными сетями значительных территорий с относительно невысокой плотностью нагрузки. Однако именно сети 6-10/0,4 кВ являются наиболее протяженными и, как следствие, вносят наибольший вклад в общие потери электроэнергии. В категории 6-10 и 0,4 кВ нормативно допускается самая большая величина потерь по сравнению с прочими категориями – на уровне 10% [1, с. 94].

Проведенный авторами сравнительный анализ структуры потерь электрической энергии за период с 2014 по 2024 год позволил выявить ряд важных тенденций [1, с. 95–97].

Во-первых, за исследуемый период отпуск электрической энергии в сеть снизился на 13,7%, что может быть связано с общими тенденциями энергопотребления и структурными изменениями в экономике. При этом доля затрат на оплату потерь в структуре необходимой валовой выручки (НВВ) сетевых организаций составила около 31% и значительных изменений за период исследования не претерпела [1, с. 96].

Во-вторых, относительная величина потерь за период исследования снизилась незначительно – с 8,5 до 8,1%, что можно считать статистически незначимым изменением на фоне естественных флуктуаций. При этом удельная стоимость 1% потерь в денежном выражении стабильно росла.

Для проверки гипотезы о влиянии инфляции на рост стоимости потерь авторами были выполнены расчеты с приведением всех денежных показателей к ценам 2014 года с помощью индексов-дефляторов. В результате было выявлено, что удельная стоимость покупки потерь электроэнергии за исследуемый период в сопоставимых ценах изменилась незначительно [1, с. 97]. Это свидетельствует о том, что наблюдаемый номинальный рост затрат обусловлен преимущественно инфляционными процессами, а не изменением тарифной политики или структуры потерь.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о недостаточной эффективности реализуемых мер по снижению потерь – относительная величина потерь остается практически неизменной на протяжении длительного времени, несмотря на значительные затраты сетевых организаций на их компенсацию.

Перспективным направлением решения проблемы является замена устаревших трансформаторов на современные энергоэффективные аналоги. Наибольший интерес представляют трансформаторы с магнитопроводами из аморфной стали (металлического стекла).

Как показано в работе [2, с. 41–42], применение аморфной стали позволяет снизить потери холостого хода в 3-4 раза по сравнению с традиционной электротехнической сталью. Это достигается благодаря уникальным свойствам аморфных сплавов – отсутствию кристаллической решетки и, как следствие, низким потерям на перемагничивание.

Простое сравнение по критерию минимума первоначальных затрат недостаточно для обоснования инвестиций в энергоэффективные трансформаторы. Необходим комплексный многокритериальный подход, учитывающий технические, экономические и эксплуатационные факторы на протяжении всего жизненного цикла оборудования [2, с. 42–43].

Авторами [2, с. 43–44] предлагается использовать следующую систему критериев:

1. Технические критерии:
   - уровень потерь холостого хода и короткого замыкания;
   - масса и габаритные размеры;
   - уровень шума;
   - надежность и вероятность отказа.

2. Экономические критерии:

– капитальные затраты (цена приобретения);
– затраты на монтаж и пусконаладку;
– затраты на техническое обслуживание и ремонт;
– стоимость потерь электроэнергии за срок службы;
– дисконтированный срок окупаемости;
– чистая приведенная стоимость (NPV).

3. Эксплуатационные критерии:
– возможность работы с перегрузками;
– требования к квалификации персонала;
– доступность сервисного обслуживания;
– совместимость с существующим оборудованием.

Для синтеза альтернатив и выбора оптимального решения предлагается использовать метод анализа иерархий (МАИ), позволяющий структурировать сложную проблему выбора и учесть как количественные, так и качественные факторы [2, с. 44].

Процедура выбора включает следующие этапы:

1. Формирование множества альтернатив (различные типы трансформаторов от разных производителей).

2. Построение иерархии критериев.

3. Попарное сравнение критериев и альтернатив с привлечением экспертов.

4. Расчет глобальных приоритетов альтернатив.

5. Анализ чувствительности решения к изменению весов критериев.

Применение данного подхода позволяет обоснованно выбрать наиболее эффективный вариант с учетом специфики конкретного узла нагрузки и условий эксплуатации. Расчеты показывают, что для трансформаторов мощностью 250–1000 кВА со среднегодовой загрузкой 30–50% применение аморфных сердечников экономически оправдано и обеспечивает срок окупаемости в пределах 5–8 лет при последующей существенной экономии на оплате потерь [2, с. 44].

Повышение энергоэффективности распределительного комплекса невозможно без внедрения элементов интеллектуальной энергетики (Smart Grid). Как отмечается в работе [3], развитие энергетики Алтайского края и других регионов России неразрывно связано с вопросами энергосбережения, повышения энергетической эффективности и внедрения новых технологий.

Основные направления интеллектуализации распределительных сетей включают:

– внедрение автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) для точного определения структуры потерь;

– применение систем мониторинга и диагностики силовых трансформаторов в реальном времени;

– использование цифровых подстанций с программным управлением режимами;

– внедрение систем управления спросом (Demand Side Management).

Сочетание замены устаревшего оборудования на энергоэффективное с внедрением цифровых технологий позволяет достичь максимального эффекта. Например, установка энергоэффективных трансформаторов в сочетании с системами мониторинга их загрузки позволяет оптимизировать режимы работы и дополнительно снизить потери за счет выбора оптимальных точек секционирования сети и управления перетоками мощности [3].

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Проблема потерь сохраняет актуальность. Несмотря на снижение абсолютного отпуска электроэнергии, относительная величина потерь в распределительном сетевом комплексе России остается стабильной на уровне 8–8,5%, а доля затрат на их компенсацию в НВВ составляет около 31%. Это свидетельствует о недостаточной эффективности реализуемых мер и необходимости поиска новых подходов.

2. Ключевым резервом снижения потерь является обновление парка силовых трансформаторов. Замена устаревших трансформаторов с сердечниками из электротехнической стали на современные энергоэффективные модели с сердечниками из аморфной стали позволяет снизить потери холостого хода в 3–4 раза. Несмотря на более высокую первоначальную стоимость (130–150% от базового уровня), такие трансформаторы обеспечивают снижение совокупной стоимости владения на 30–40% за жизненный цикл.

3. Необходим комплексный многокритериальный подход к выбору оборудования. Принятие решений о замене трансформаторов должно основываться не на минимуме цены приобретения, а на анализе совокупности технических,

экономических и эксплуатационных факторов с применением методов анализа иерархий и оценки эффективности инвестиций.

4. Важна интеграция с элементами интеллектуальной энергетики. Наибольший эффект достигается при сочетании замены оборудования с внедрением систем мониторинга, автоматизированного учета и управления режимами. Это позволяет не только снизить потери, но и повысить надежность электроснабжения потребителей.

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку типовых решений по модернизации распределительных сетей с учетом региональной специфики, совершенствование методов прогнозирования потерь и создание экономических стимулов для ускоренного внедрения энергоэффективного оборудования.

**Список используемых источников**

1. Воротницкий В.Э., Калинкина М.А. Потери электроэнергии в электрических сетях и пути их снижения. – М.: Энергоатомиздат, 2020. 320 с.

2. ГОСТ Р 54961-2012. Системы газораспределительные. Сети газопотребления. Требования к эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2013.

3. Грибанов А.А., Шипицына Е.В., Сташко В.И. Электроприёмники и потребители электрической энергии: учебно-методическое пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. 74 с.

4. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

5. Хомутов С.О., Белицын И.В., Сабельников А.С. Сравнительный анализ структуры потерь электрической энергии в распределительном сетевом комплексе России // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2025. № 2 (244). С. 92–98. DOI: 10.53083/1996-4277-2025-244-2-92-98. [Электронный ресурс]. URL: http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1950 (дата обращения: 18.02.2026).

6. Хомутов С.О., Белицын И.В., Сабельников А.С., Степанов О.А., Литвинова Н.А., Шлык Ю.К. Синтез альтернатив по внедрению энергоэффективных трансформаторов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2025. № 3. С. 39–45. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.039-045. [Электронный ресурс]. URL: http://vestnik.ispu.ru/taxonomy/term/114# (дата обращения : 18.02.2026).

7. Хомутов С.О., Сташко В.И., Родт С.А. Интеллектуальная энергетика – 2022 // Развитие энергетики Алтайского края и актуальные вопросы энергосбережения, повышения энергетической эффективности и внедрения новых технологий. – Барнаул: ООО «МЦ ЭОР», 2022. – DOI: 10.57112/22022. URL: http://mceor.ru/22022

# СПЕЦИФИКА БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

*Бугаев К.В. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Мартко Е.О. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В представленной статье рассматривается балансировка мощности и частоты в изолированной энергосистеме Алтайского края. Анализированы методы регулирования: управление генерацией (Бийская ТЭЦ), спросом (DSM) и сетевыми режимами, а также влияние Кош-Агачской СЭС. Для оптимизации баланса предложено внедрение накопителей энергии и адаптированной автоматики частотной разгрузки (АЧР)».

Энергетический комплекс Алтайского края, выступающего ключевым аграрно-индустриальным центром Южной Сибири, характеризуется высокой степенью изоляции от магистральных сетей. Соединение с Объединенной энергосистемой (ОЭС) Сибири реализовано лишь через одну линию электропередачи напряжением 220 кВ, проходящую через Барнаул, Бийск и Заринск. Подобная конфигурация ставит регион в прямую зависимость от внутреннего равновесия выработки и потребления, а нарушение этого равновесия способно спровоцировать критические колебания частоты вплоть до полного обесточивания [1].

## Ключевые факторы неравномерности электропотребления

Основная сложность функционирования региональной энергосистемы кроется в ярко выраженной нестабильности графиков нагрузки, что продиктовано следующими обстоятельствами:

1. **Цикличность агропромышленного производства**: активные фазы сельскохозяйственных работ (посевная, уборочная кампании) вызывают всплески

энергопотребления из-за функционирования ирригационных установок, зернохранилищ и предприятий переработки.

2. **Природно-климатический фактор**: зимой фиксируется максимум нагрузок за счет интенсивной работы отопительных систем, летом – из-за применения кондиционеров и насосного оборудования для орошения.

3. **Суточные колебания**: присутствуют классические утренние и вечерние пики потребления, характерные для коммунально-бытового сектора.

Исходя из этого, цель настоящей работы заключается в комплексном исследовании специфики выравнивания нагрузок в энергосистеме Алтайского края и выработке практических рекомендаций по укреплению ее стабильности.

В ходе исследования применялись инструменты системного анализа, статистической обработки сведений о фактических нагрузках (предоставленных Алтайским РДУ – филиалом АО «СО ЕЭС»), а также методы математического моделирования мощностных балансов. Дополнительно был проведен сопоставительный анализ действенности различных подходов к регулированию частоты [2].

**Основные результаты и наблюдения**

1. **Динамика годового и суточного потребления**. Обработка массивов данных зафиксировала два отчетливых сезонных пика: зимний (декабрь–январь) с максимумом до 1250–1300 МВт и летний (июль–август) на уровне 1100–1150 МВт, обусловленный преимущественно нуждами агропрома. В течение суток сохраняются два характерных всплеска – утренний (8–10 ч) и вечерний (19–21 ч), разделенных глубоким ночным спадом.

2. **Роль традиционных генерирующих мощностей**. Основной объем работ по регулированию частоты и покрытию пиковых нагрузок ложится на Бийскую ТЭЦ. При этом тепловая генерация преимущественно обеспечивает базовую часть графика и обладает ограниченной маневренностью.

3**. Специфика интеграции возобновляемых источников**. Кош-Агачская СЭС, будучи крупнейшим солнечным генератором в регионе, частично перекрывает дневной максимум. Однако стохастическая природа ее выработки (прямая зависимость от погодных условий) вносит дополнительные сложности в диспетчеризацию, вынуждая держать резервные источники (в частности, дизель-генераторы в Республике Алтай) для парирования внезапных просадок генерации.

4. **Перспективы управления потребительским спросом**. Наиболее результативными для условий Алтайского края представляются следующие направления:

– **косвенные механизмы**: Внедрение тарифных планов с дифференциацией по временным интервалам для мотивации предприятий (особенно промышленных и аграрных) смещать часть нагрузки на ночной период;

– **прямые механизмы**: Формирование систем автоматического отключения второстепенных нагрузок у крупных абонентов по команде диспетчера либо при снижении частоты (автоматическая частотная разгрузка) [3].

**Рекомендации по повышению устойчивости**

Для кардинального улучшения ситуации требуется реализация комплекса взаимоувязанных мер:

1. **Наращивание маневренных мощностей**: Модернизация действующих ТЭЦ с расширения их регулировочного диапазона, а также проработка вопроса о возведении пиковой гидроаккумулирующей или газотурбинной электростанции.

2. **Внедрение систем накопления энергии**: Запуск пилотных проектов с применением накопителей (литий-ионных или проточных батарей) единичной мощностью 5–10 МВт в точках наибольшей волатильности нагрузок (Бийск, Рубцовск). Это позволит сглаживать пики, запасать излишки солнечной энергии и повысить общую надежность.

3. **Совершенствование автоматики предотвращения аварий**: Модернизация устройств автоматической частотной разгрузки с учетом категорирования потребителей по значимости. Социально важные объекты (медучреждения, объекты жизнеобеспечения) должны отключаться в самую последнюю очередь.

4. **Разработка гибкой тарифной политики**: Активное продвижение среди потребителей опций тарифов, стимулирующих перенос энергоемких процессов на ночные часы и выходные дни [3].

В результате проведенного анализа был сделан вывод о том, что энергосистема Алтайского края ввиду своей обособленности и специфики профиля нагрузок нуждается в нестандартных подходах к балансированию. Решение проблемы не может опираться исключительно на традиционные способы регулирования со стороны генерации. Критически важным становится внедрение интеллектуальных компонентов (элементов smart grid), накопительных мощностей и активное

вовлечение потребителей в процесс управления спросом. Предложенный в работе комплекс мероприятий способен значительно повысить надежность и экономичность энергоснабжения региона, создав прочную основу для его дальнейшего социально-экономического прогресса.

**Список используемых источников**

1. Данные филиала АО «Системный оператор Единой энергетической системы» Алтайское РДУ / List.org. [Электронный ресурс]. URL: https://www.list-org.com/company/3404351 (дата обращения: 02.02.2026).

2. Петров В.К., Сидоров А.А. Перспективы интеграции накопителей энергии в энергосистемы регионов Сибири // Энергетик. 2022. № 5. С. 25–30.

3. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Алтайского края на 2023-2027 гг / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/406038369/titles/2H4IHIN (дата обращения: 02.02.2026).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОТВЕТВЛЕНИЙ РПН ПОНИЗИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЗАМКНУТОЙ СЕТИ 110 КВ

*Валиев Д.З. – аспирант, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»*

*Горшков К.Е. – к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»*

**Аннотация**

В статье приведены результаты исследования влияния ответвлений РПН трансформаторов с учетом изменения их сопротивлений на суммарные потери в электрической сети 110 кВ с целью нахождения оптимальных положений и комбинаций этих ответвлений. Исследования основаны на расчете сопротивлений трансформаторов и расчете режимов сети методом простой итерации в среде Python. Учет полученных результатов при планировании сезонных изменений характера нагрузок, а также при модернизации сети и изменении ее топологии, позволит более эффективно управлять электросетевым комплексом.

**Определение сопротивления трансформатора при изменении положения ответвления РПН**

Известно, что предельное снижение напряжения на шинах трансформаторной подстанции вызывает такие негативные последствия, как падение производительности асинхронных двигателей, уменьшение светового потока, сокращение выделения тепла электропечей и т.п., а критическое его повышение снижает срок службы изоляции всего электрооборудования.

Одним из самых простых и удобных способов регулирования напряжения у потребителя является изменение положения ответвления РПН понизительного трансформатора. В практическом смысле это означает, что изменение ответвления РПН изменяет не только коэффициент трансформации, и как следствие изменяет напряжения на стороне вторичного напряжения, но и еще изменяет параметры сопротивления на стороне регулирования, а конкретно – напряжение короткого замыкания $u_{\text{к}}^{\%}$. Известно, что перестановка положения РПН на трансформаторах 110 кВ в сторону увеличения коэффициента трансформации, приводит к росту величины $u_{\text{к}}^{\%}$, а в сторону уменьшения напряжения к падению $u_{\text{к}}^{\%}$, и такая зависимость изменения напряжения короткого замыкания имеет линейных характер.

Стоит отметить, что напряжение короткого замыкания, индуктивное сопротивление обмоток, потери холостого хода в трансформаторе зависят от множества факторов: мощности трансформатора, его конструкции, числа обмоток, конструкции магнитопровода, типа РПН, связи РПН с основной обмоткой и т.д. Так, например, существует вариант РПН, реализованный таким образом, что устройство не участвует в создании общего магнитного потока в трансформаторе.

В конструкциях трансформаторов, эксплуатируемых десятки лет, у которых регулирование напряжения под нагрузкой осуществлялось изменением числа витков обмотки ВН с помощью ответвлений, выведенных от этой обмотки, индуктивное сопротивление рассеяния трансформатора изменяется примерно пропорционально квадрату витков его обмоток [1, 4]. Что подтверждается опытными данными. Зависимость напряжения на первичной стороне трансформатора от положения РПН можно определить по формуле:

$$U_{\text{вн}i} = U_{\text{вн}} \cdot \left(1 + \frac{dU_{\text{рпн}}^{\%}}{100} \cdot N_i\right), \qquad (1)$$

где, $N_i$– номер положения ответвления РПН;

$dU^{\%}_{\text{рпн}}$ – единичная ступень регулирования положения.

При этом $\Delta U_i^{\%} = dU^{\%}_{\text{рпн}} \cdot N_i$ – это диапазон регулирования напряжения *i*-ого положения РПН.

Как уже было сказано выше, для трансформаторов 110 кВ характерно, что при увеличении номера ответвления РПН линейно растет напряжение короткого замыкания (ГОСТ 12965-85), однако для трансформаторов с первичным номиналом 220 кВ характерна другая, обратная зависимость, так согласно ГОСТ 17544-72 с увеличением номера ответвления РПН величина $u_{\text{к}}^{\%}$ уменьшается.

В результате, при изменении положения РПН, в сети сопротивление регулируемой части может изменяется как в большую, так и в меньшую сторону при увеличении коэффициента трансформации. Поэтому, для того чтобы описать зависимости изменения напряжения короткого замыкания от положения РПН, применяется величина $k_i^*$ которая является некоторой допустимой аппроксимимирующей функцией, полученной через анализ статистических данных испытанных трансформаторов [2]:

$$k_i^* = (1 + \frac{\Delta U_i^{\%}}{100}) . \quad (2)$$

С учетом (2) напряжение короткого замыкания для *i*-го ответвления это:

$$u_{\text{к}i} = u_{\text{к}} \cdot (k_i^*)^n, \quad (3)$$

где *n* – коэффициент, отображающий технические особенности данного трансформатора;

$u_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания для среднего положения.

Выразим коэффициент *n* из формулы (3):

$$n = \log \frac{u_{\text{к}i}}{u_{\text{к}}} / \log k_i^* . \quad (4)$$

Полученный коэффициент рассчитывается для верхнего и нижнего предела РПН с целью установления зависимости соответственно $U_{\text{к}i}^{+} = f(n+)$ и

$U_{\text{к}i}^{-} = f(n-)$. Запишем выражение для расчета индуктивного сопротивления двухобмоточного трансформатора с учетом полученного коэффициента:

$$X_{\text{тр}i} = \frac{u_{\text{к}i} \cdot U_{\text{вн}\,i}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{u_{\text{к}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_i^{\%}}{100}\right)^{n+2} \cdot U_{\text{вн}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = x_{\text{тр ср}} \left(1 + \frac{\Delta U_i^{\%}}{100}\right)^{n+2}. \quad (5)$$

В работе [4] для анализа токов короткого замыкания и составления схемы замещения приводится другой вариант этой формулы:

$$x_{\text{тр}} = x_{\text{тр ср}} \cdot \left(1 \pm \frac{\Delta U_{\text{рпн}}^{\%}}{100}\right)^{n}, \quad (6)$$

где, $x_{\text{тр ср}}$ – сопротивление трансформатора при среднем положении регулятора РПН;

$\Delta U_{\text{рпн}}^{\%}$ – половина полного диапазона регулирования под нагрузкой.

Вместо нахождения всех индивидуальных значений сопротивлений трансформаторов, находят сразу крайние, и для различных групп трансформаторов приводится приблизительный диапазон значения *n*. Так, например, ранее считалось, что *n* это величина близкая к 2.

На основании анализа различных материалов (ГОСТ, паспорта трансформаторов) можно отметить, что значение *n* может находиться в довольно широких пределах (от 0 до 4) в зависимости от конструктивного исполнения устройств регулирования. Наименьшее значение $n \approx 0$ характерно для трансформаторов и автотрансформаторов 330 кВ. Их сопротивление практически неизменно при любом положении регулятора РПН.

У трансформаторов 35 кВ мощностью 1…2,5 МВА значение $n \approx 1$, т. е. при $\Delta U_{\text{рпн}}^{\%} = \pm 9\%$ их сопротивления незначительно отличаются друг от друга. Наибольшие значения *n* имеют место у трансформаторов 35 кВ мощностью 4…6,3 МВА ($n \approx 3$), трансформаторов 110 кВ ($n \approx 2{,}5\ldots3$) и у некоторых трансформаторов и автотрансформаторов 220 кВ [3, 5].

Стоит отметить, что на момент публикации [3] сопротивления, которые приводятся в ГОСТ 17544-85, ГОСТ 12965-85, ГОСТ 11920-85, содержали несколько

другие значения напряжений короткого замыкания, чем в редакции источника от 1974 г., что и отразилось в значениях коэффициента *n*.

**Алгоритм расчета установившегося режима сети с учетом ответвлений РПН трансформаторов**

В рамках проводимого исследования была разработана и реализована на языке программирования *Python* программа для расчета устранившихся режимов замкнутой сети 110 кВ методом простой интеграции. Исходными данными в программе являются: матрица инцидентности схемы сети M, диагональные матрицы сопротивлений $\dot{Z}_M$ и проводимостей ветвей $\dot{Z}_N$, матрица собственных узловых мощностей $\dot{S}_{уз.}$, записанная с учетом направления мощностей в узлах.

На первом шаге алгоритма вычисляется матрица узловых проводимостей узлов $\dot{Y}_{уз.}$ по формуле:

$$\dot{Y}_{уз.} = \dot{Y}_M + \dot{Y}_N, \tag{7}$$

где:

$$\dot{Y}_M = M \times \dot{Z}_M^{-1} \times M^T, \tag{8}$$

$$\dot{Y}_N = M \times \dot{Z}_N^{-1} \times M^T. \tag{9}$$

На втором шаге выполняется численный расчет напряжений в узлах методом простой итерации, путем решения системы узловых уравнений вида:

$$\dot{Y}_{уз.} \times \dot{U}_{уз.} = \frac{\ddot{S}_{уз.}}{\ddot{U}_{уз.}} + \left[\dot{Y}_{iб} \cdot \dot{U}_б\right], \tag{10}$$

где $\ddot{S}_{уз.}$ и $\ddot{U}_{уз.}$ – вектора комплексно сопряженных значений;

$\left[\dot{Y}_{iб} \cdot \dot{U}_б\right]$ – вектор произведения напряжения балансирующего узла на проводимости, образующих его ветвей.

Непосредственно в алгоритме расчета ответвления РПН трансформаторов учитываются на этапе формирования матрицы $\dot{Z}_M$, через коэффициенты трансформации $K_T$ и формулы (4)–(6). Изменение этих ответвлений приводит к

перерасчету матрицы и, следовательно, требует повторения алгоритма расчета. Поэтому исследование влияния ответвлений РПН и поиск их оптимальных положений – это задача многократного расчета режимов с разными комбинациями сопротивлений и коэффициентов трансформации трансформаторов.

**Анализ комбинаций ответвлений РПН трансформаторов на примере замкнутой сети 110 кВ**

В качестве примера рассмотрим замкнутую электрическую сеть 110 кВ с пятью понизительными трансформаторами 110/10 кВ. Граф сети с введенными параметрами линий и трансформаторов приведен на рис. 1. При составлении и вводе графа использовалась программа NetWorks, разработанная на кафедре ЭССиСЭ ЮУрГУ. С помощью этой же программы выполнялись выборочно и проверочные расчеты, с целью контроля правильности разработанного алгоритма.

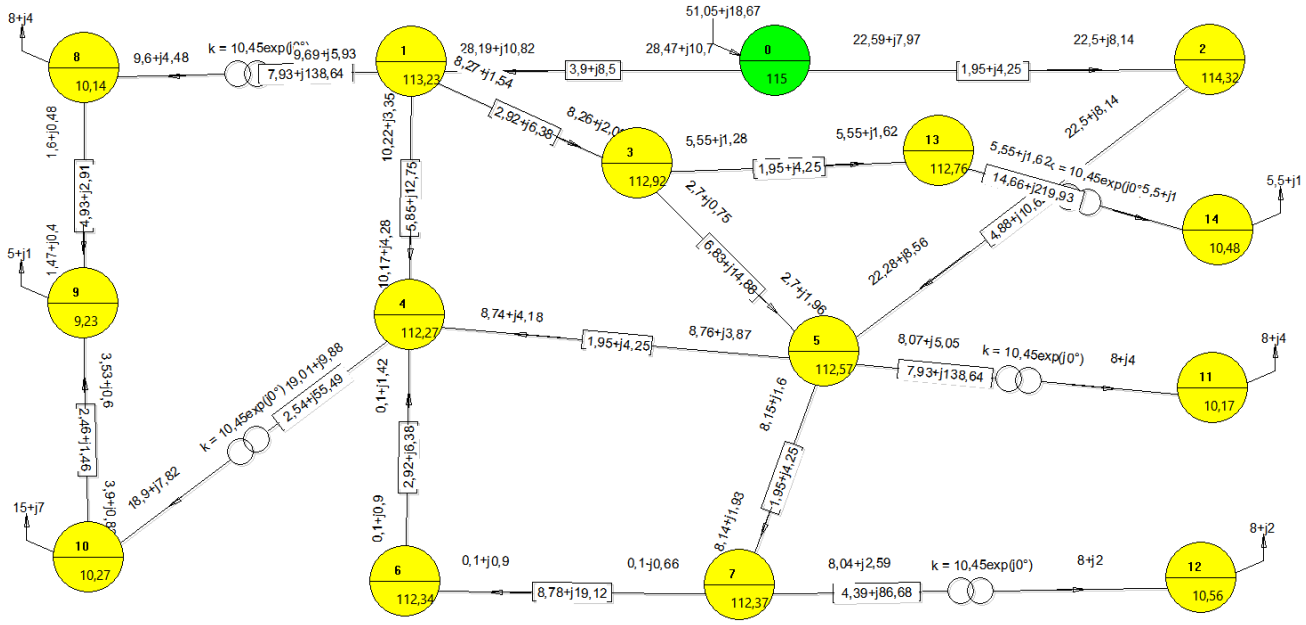



Рис.1. Исследуемая электрическая сеть 110 кВ

Источник: составлено авторами

Для учета возможных положений ответвлений РПН трансформаторов заранее были рассчитаны все комбинации их коэффициентов трансформации и индуктивных сопротивлений. Эти значения приведены в табл. 1 и 2.

Табл.1

Индуктивные сопротивления и коэффициенты трансформации
при отрицательных ответвлениях РПН трансформаторов

| Тип тр-ра | Ответ. РПН | | -9 | -8 | -7 | -6 | -5 | -4 | -3 | -2 | -1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ветвь | $K_T$ | 8,78 | 8,97 | 9,15 | 9,34 | 9,52 | 9,71 | 9,90 | 10,08 | 10,27 |
| ТДН-10000/110 | 1–8 | $X_T$, Ом | 81,15 | 86,56 | 92,20 | 98,10 | 104,24 | 110,63 | 117,29 | 124,21 | 131,40 |
| | | $n$ | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
| ТДН-25000/110 | 4–10 | $X_T$, Ом | 36,72 | 38,59 | 40,52 | 42,50 | 44,54 | 46,63 | 48,77 | 50,97 | 53,23 |
| | | $n$ | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| ТДН-16000/110 | 7–12 | $X_T$, Ом | 57,13 | 60,07 | 63,10 | 66,22 | 69,42 | 72,72 | 76,10 | 79,57 | 83,13 |
| | | $n$ | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| ТДН-10000/110 | 5–11 | $X_T$, Ом | 81,15 | 86,56 | 92,20 | 98,10 | 104,24 | 110,6 | 117,3 | 124,2 | 131,4 |
| | | $n$ | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 | 1,08 |
| ТМН-6300/110 | 13–14 | $X_T$, Ом | 138,62 | 146,7 | 155,2 | 163,7 | 172,7 | 181,9 | 191,5 | 201,4 | 211,6 |
| | | $n$ | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |

Источник: составлено авторами

Табл.2

Индуктивные сопротивления и коэффициенты трансформации
при положительных ответвлениях РПН трансформаторов

| Тип тр-ра | Ответ. РПН | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ветвь | $K_T$ | 10,64 | 10,83 | 11,01 | 11,20 | 11,39 | 11,57 | 11,76 | 11,94 | 12,13 |
| ТДН-10000/110 | 1–8 | $X_T$, Ом | 146,66 | 154,75 | 163,14 | 171,83 | 180,83 | 190,15 | 199,7 | 209,7 | 220,0 |
| | | $n$ | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| ТДН-25000/110 | 4–10 | $X_T$, Ом | 58,30 | 61,13 | 64,05 | 67,06 | 70,16 | 73,35 | 76,63 | 80,00 | 83,46 |
| | | $n$ | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 | 0,74 |
| ТДН-16000/110 | 7–12 | $X_T$, Ом | 91,08 | 95,50 | 100,05 | 104,74 | 109,57 | 114,54 | 119,6 | 124,9 | 130,3 |
| | | $n$ | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 |
| ТДН-10000/110 | 5–11 | $X_T$, Ом | 146,66 | 154,75 | 163,14 | 171,83 | 180,83 | 190,15 | 199,8 | 209,7 | 220,0 |
| | | $n$ | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 |
| ТМН-6300/110 | 13–14 | $X_T$, Ом | 233,06 | 244,35 | 255,99 | 267,97 | 280,30 | 292,99 | 306,0 | 319,4 | 333,2 |
| | | $n$ | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,73 |

Источник: составлено авторами

Для сравнения режимов электрической сети в описанный выше алгоритм расчета были добавлены формулы для вычисления потерь в ее элементах, а также суммарных сетевых потерь активной и реактивной мощности по общеизвестным выражениям. С их помощью были рассчитаны общесетевые потери при разных положениях ответвлений РПН силовых трансформаторов. Выборочно результаты расчетов представлены в табл. 3.

Табл. 3

Зависимость модуля полных потерь $\Delta S$, МВА в сети от коэффициентов трансформации трансформаторов $K_Т$ с учетом ответвлений РПН

| $K_Т$ | Номер трансформаторной ветви | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1–8 | 4–10 | 7–12 | 5–11 | 13–14 |
| 8,78 | 2,876 | 4,333 | 1,632 | 1,735 | 1,648 |
| 9,15 | 2,419 | 3,344 | 1,621 | 1,700 | 1,634 |
| 9,52 | 2,082 | 2,617 | 1,611 | 1,664 | 1,619 |
| 9,90 | 1,830 | 2,084 | 1,600 | 1,630 | 1,605 |
| 10,27 | 1,652 | 1,720 | 1,590 | 1,599 | 1,591 |
| *10,45* | *1,585* | *1,585* | *1,586* | *1,585* | *1,585* |
| 10,64 | 1,530 | 1,465 | 1,580 | 1,573 | 1,578 |
| 11,01 | 1,465 | 1,292 | 1,571 | 1,556 | 1,567 |
| 11,20 | **1,456** | 1,237 | 1,566 | 1,552 | 1,562 |
| 11,39 | 1,465 | 1,205 | 1,562 | 1,551 | 1,558 |
| 11,57 | 1,495 | **1,200** | 1,559 | 1,555 | 1,555 |
| 11,76 | 1,546 | 1,223 | 1,555 | 1,565 | 1,552 |
| 12,13 | 1,715 | 1,358 | 1,551 | 1,602 | 1,550 |

Источник: составлено авторами

В табл. 3 для каждого трансформатора рассчитывался режим, при котором коэффициент трансформации менялся только у одного из трансформаторов, а у других находился в среднем положении. Целью такого расчета была оценка влияния конкретного трансформатора на общие потери в сети при отсутствии или незначительном влиянии остальных, а также поиск диапазона номеров положений РПН, изменение которых приводит только к расходованию коммутационного ресурса регулятора при незначительных или несущественных изменениях потерь в сети.

**Обобщение результатов исследования и получение искомых зависимостей**

Зададимся функцией, связывающей коэффициент трансформации $i$-го трансформатора, регулируемый при помощи ответвлений РПН, с потерями мощности в электрической сети:

$$\Delta S_i^* = f(K_{Тi}^*), \quad (11)$$

где $\Delta S_i^*$ – суммарные потери мощности в относительные единицах,

$K_{Тi}^*$ – коэффициент трансформации в относительных единицах.

Переход от табличных значений к непрерывным функциям $\Delta S_i^*(K_{\text{т}i}^*)$ удобнее всего выполнить путем их аппроксимации. Результаты можно увидеть на рис. 2.

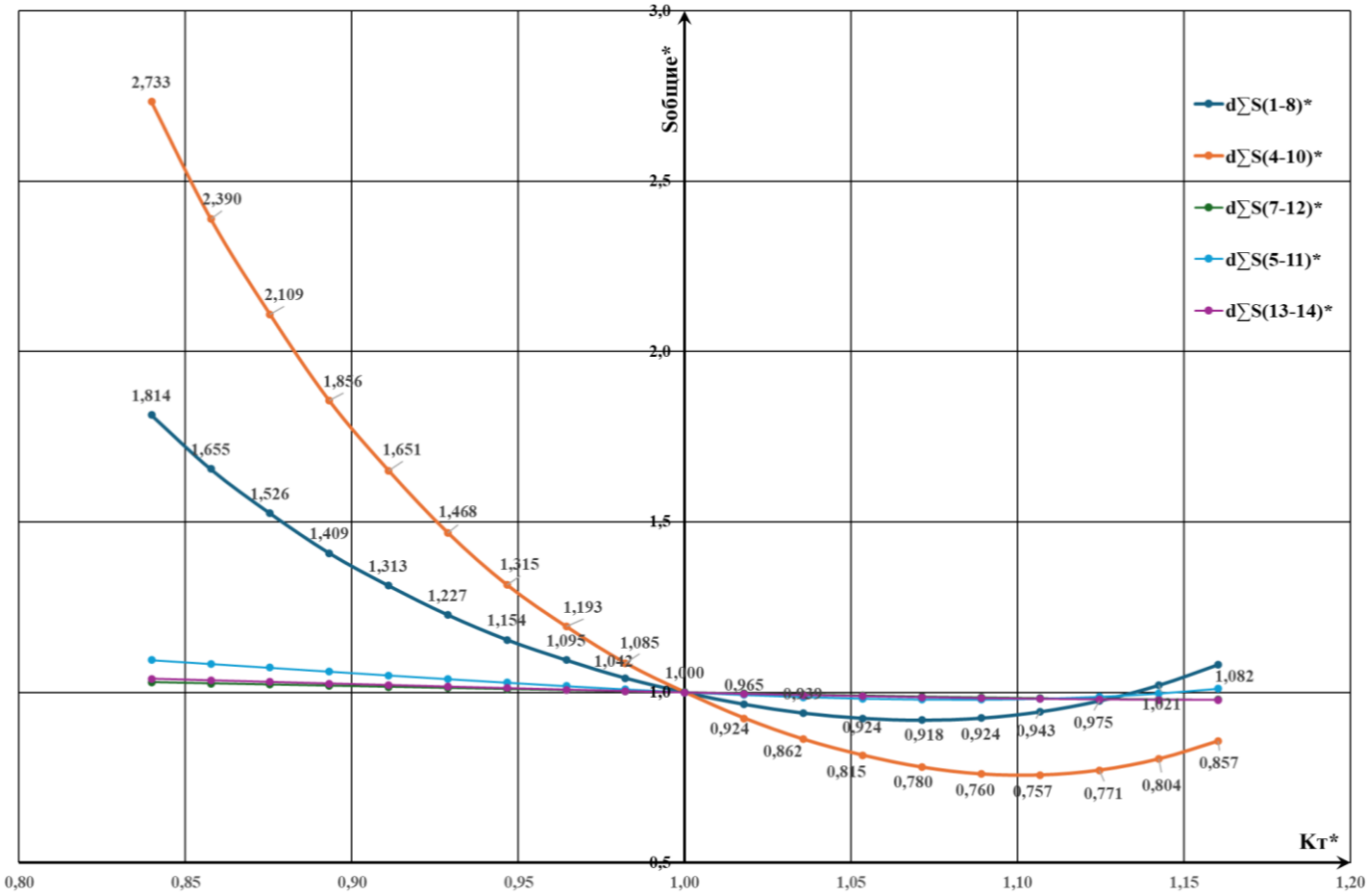



Рис. 2. Графики аппроксимированных зависимостей $\Delta S_i^*(K_{\text{т}i}^*)$

Источник: составлено авторами

За базисные величины $\Delta S_{\text{б}}^*$ и $K_{\text{тб}}^*$ при построении зависимостей были приняты значения суммарных потерь мощности и коэффициента трансформации из табл. 2, при которых эти потери одинаковы. В таблице выше это $\Delta S_{\text{б}}^* = 1{,}585$ при $K_{\text{тб}}^* = 10{,}45$.

Анализ зависимостей $\Delta S_i^*(K_{\text{т}i}^*)$ позволяет численно оценить влияние конкретного регулирующего устройства РПН на суммарные потери мощности в сети и выполнить ранжирование силовых трансформаторов по степени их регулирующего эффекта. Для этого можно ввести коэффициент влияния вида:

$$R = \frac{1 - \Delta S_{min}^{\ *}}{1 - K_{\text{т}min}^{\ *}}. \qquad (12)$$

На рис. 3 показано, как данный коэффициент может быть определен графически для двух трансформаторных ветвей: 1–8 и 4–10. Отношение отрезков на графиках дает $R_{1-8} = 1{,}171$ для первой ветви и $R_{4-10} = 2{,}4$ для второй, что означает, что вторая ветвь обладает большим регулирующий эффектом, чем первая.

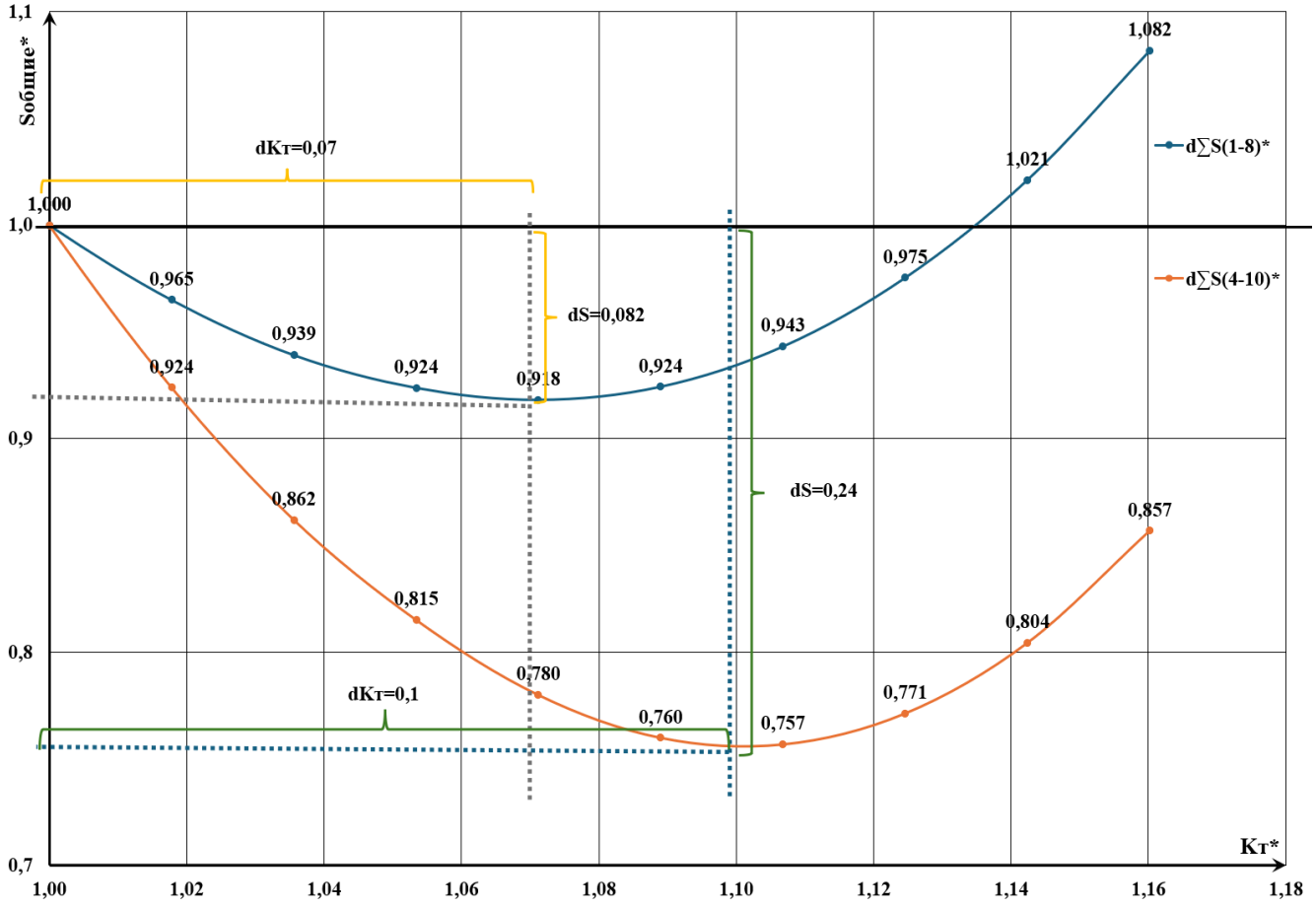



Рис. 3. Расчет коэффициента влияния $R$ по графикам

Источник: составлено авторами

Очевидно, что трансформаторы с малым значением этого коэффициента обладают регулирующим эффектом, не приводящим к значительным изменениям потерь в сети. Поэтому на практике следует выявлять и учитывать в первую очередь те трансформаторы, у которых данный коэффициент наибольший.

**Заключение**

Оценивая полученные результаты, можно сделать вывод, что индуктивные сопротивления понизительных трансформаторов значительно зависят от положения ответвлений РПН, что, в свою очередь, влияет на потокораспределение мощностей и суммарные потери мощности в сети.

Предложенная оценка этого влияния с помощью коэффициента R и полученные результаты анализа на примере замкнутой сети 110 кВ могут быть использованы в инженерной практике. При этом разработанный подход может быть распространён не только на сети с трансформаторами одного класса напряжения, но и на системы с большим числом номинальных уровней напряжения.

Дополнительно стоит отметить, что применение описанной методики позволяет обосновать выбор оптимальных положений ответвлений РПН с точки зрения снижения потерь и повышения энергоэффективности сетевого комплекса. Это создаёт предпосылки для более рационального планирования режимов работы сети, а также для принятия решений при её модернизации и реконфигурации.

**Список используемых источников**

1. Авербух А.М. Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Ленинград : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1975. 416 с.

2. Беляков Ю.С. Расчетные схемы замещения трансформаторов и автотрансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой и особенности расчета токов короткого замыкания с их учетом : конспект лекций. Санкт-Петербург., 1995. 57 с.

3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.-Л., «Энергия», 1966. 172 с.

4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.-Л., «Энергия», 1964. 703 с.

5. Шабад М.А. Защита трансформаторов распределительных сетей. Ленинград: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. 136 с.

## БУДУЩЕЕ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА КАК ТОПЛИВА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ (ГТУ)

*Газизуллин К.Ф. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Нырков И.Е. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Редель А.Е. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Научный руководитель: Марьин Г.Е. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

Проведено инженерное исследование применения водорода и метано-водородных смесей в стационарных газотурбинных установках энергетического назначения. Выполнены количественные расчёты изменения массового расхода топлива, оценены влияние на выходную мощность и эффективный КПД, проанализированы тепловые нагрузки, выбросы NOx и требования к материалам. Разработана поэтапная стратегия внедрения водородного топлива в парогазовые энергетические установки Российской Федерации.

## Введение

Глобальная задача сокращения выбросов CO2 ставит энергетику на путь перехода к низкоуглеродным топливам и технологиям. Водород рассматривается как ключевой энергетический носитель, способный обеспечить нулевые прямые выбросы CO2 при сгорании. Для энергетики, основанной на газотурбинных установках (ГТУ), применение водорода имеет особое значение: ГТУ обладают высокой манёвренностью, подходят для комбинированных циклов и могут быть адаптированы к работе на топливах с различными свойствами. Вместе с тем переход на водород сопряжён с техническими барьерами: иные характеристики продуктов сгорания, высокая скорость пламени, изменение теплофизических свойств рабочего тела, риски водородной хрупкости материалов и вопросы логистики и хранения топлива. Данная работа фокусируется на инженерно-технической оценке перехода энергетических ГТУ на водородное топливо в российских условиях, анализе практических ограничений и предложении шагов для безопасного и эффективного внедрения.

## Объекты и методы

Объект исследования – стационарные энергетические ГТУ промышленного класса (20–300 МВт). Методология включает: обзор доступной литературы и экспериментальных данных по работе ГТУ на H2; термодинамические приближённые расчёты массовых расходов топлива и влияния на КПД при фиксированной температуре газа перед турбиной; использование эмпирических коэффициентов, полученных при натурных испытаниях; анализ конструктивных и

материальных требований. Источники данных включают отечественные и зарубежные исследования по термодинамике и испытаниям ГТУ на водороде, методики расчёта конвертированных двигателей и обзоры стратегий развития водородной энергетики.

**Экспериментальная часть**

**1. Исходные допущения и принятые параметры**

Для примера рассмотрим типичный энергетический режим: тепловая нагрузка на камеру сгорания $Q_{th}$ = 100 МВт (100 МДж/с). Примем нижние теплоты сгорания (LHV): для метана $LHV_{CH4}$= 50 МДж/кг, для водорода $LHV_{H2}$ = 120 МДж/кг. Температура газа перед турбиной принята $T_t$= 1400 К.

**2. Численный пример массового расхода**

Массовый расход метана:

$$m_{CH4} = Q_{th} / LHV_{CH4} = 100 / 50 = 2 \text{ кг/с} \quad (1)$$

Массовый расход водорода:

$$m_{H2} = Q_{th} / LHV_{H2} = 100 / 120 = 0{,}833 \text{ кг/с} \quad (2)$$

Отношение:

$$m_{H2} / m_{CH4} = 0{,}833 / 2 = 0{,}4167 \quad (3)$$

Следовательно, массовый расход водорода ≈41.67% от расхода метана; по массе требуется в 2.4 раза меньше топлива (снижение на ≈58.33%).

**3. Основные формулы**

Тепловая мощность:

$$Q_{th} = m_{fuel} \cdot LHV \quad (4)$$

Удельная работа газовой турбины (упрощённо):

$$w = C_p \cdot T_t \cdot [1 - (1/\pi)\hat{}((\gamma - 1)/\gamma)] \quad (5)$$

где $\pi$ – ступень расширения (отношение полных давлений),

$C_p$ – средняя теплоёмкость продуктов сгорания,

$\gamma$ – показатель адиабаты.

Поскольку $C_p$ и $\gamma$ зависят от состава, замена топлива меняет $w_{spec}$. Полный электрический КПД ГТУ с генератором: $\eta_e \approx \eta_{thermal} * \eta_{generator}$, где $\eta_{thermal}$ определяется отношением полезной механической работы к тепловой подаче. В расчётах приняты типичные значения КПД установок: $\eta_{thermal} \approx 0.36$ при работе на метане.

**4. Результаты и их обсуждение**

При фиксированной температуре газа перед турбиной и постоянной геометрии ступеней, специфическая работа турбины определяется теплофизическими свойствами продуктов сгорания (ср, γ) и массовым расходом рабочего тела. Замена метана на водород влияет на молекулярную массу газовой смеси и на ср. Эмпирические исследования и моделирование показывают, что переход на чистый водород может повысить выходную мощность на 5–7% и эффективный КПД на 3–4% при прочих равных (в том числе за счёт пониженного массового расхода и более благоприятных теплофизических свойств) [1]. В настоящем расчёте для оценочных целей принято увеличение мощности на 6% и КПД на 3.5%.

Механизм образования NOx при высокотемпературном горении преимущественно термический (механизм Зельдовича) и зависит экспоненциально от максимальной температуры пламени и наличия свободного кислорода в зоне горения. При сгорании водорода температура пламени выше, что потенциально увеличивает образование NOx. Практически наблюдаемые значения в полевых испытаниях составляют порядка 40–60 ppm при стандартном горении; однако современные технологии (обеднённая смесь, предварительное разбавление инертным газом, водяное охлаждение/паровое разбавление) позволяют снижать NOx до 20–30 ppm, а при специальных малоэмиссионных камерах – ниже 20 ppm [3]. Рекомендуемые меры: использование обеднённых диффузионных горелок, применение парового разбавления и управление температурой пламени по профилю, интеграция систем селективного каталитического восстановления (SCR) в критических случаях.

Образование NOx при сжигании водорода определяется температурой пламени и временем пребывания газов в зоне высокой температуры. При увеличении температуры на 100–150 К концентрация NOx возрастает экспоненциально [1]. Для снижения выбросов применяются обеднённые смеси, паровое и азотное разбавление, а также каталитические системы. Применение обеднённого горения ($\lambda > 2$) позволяет снизить NOx до 20–30 ppm [3].

**5. Материалы, водородная хрупкость и техническая надёжность**

Водородная хрупкость (hydrogen embrittlement) проявляется в виде уменьшения пластичности и повышения хрупкости ряда металлических сплавов при насыщении водородом под давлением. Для элементов топливной системы, трубопроводов и деталей турбин это означает повышенные требования к материалам: применение легированных сталей, никелевых и хромистых сплавов, защитных покрытий и корректного контроля эксплуатационных напряжений. Также рекомендуется проводить специальную подготовку поверхностей и учитывать коррозионные факторы, особенно при наличии примесей в водороде (влага, сернистые соединения).

Водородная хрупкость обусловлена диффузией атомарного водорода в металл и снижением его пластичности. Наиболее устойчивыми являются никелевые и хромоникелевые сплавы. Для повышения надёжности применяются защитные покрытия и регулярный контроль состояния лопаточного аппарата [3].

**6. Инфраструктура, хранение и безопасность**

Хранение и транспортировка водорода требуют решения вопросов: сжатие/жидкое хранение, материалы резервуаров, стандарты качества топлива и совместимость газотранспортной инфраструктуры. На начальном этапе реальным решением является локальное производство водорода (электролиз/пиролиз) и использование его в энергетических кластерах рядом с потребителями, что минимизирует логистику и риск. Безопасность требует: мониторинга утечек (водород невидим и легче воздуха), взрывозащитного электрического оборудования, системы нейтрализации и вентиляции, а также обучения персонала. Правовое обеспечение и стандартизация в России требуют ускоренного развития для поддержки внедрения [1].

Развитие инфраструктуры требует создания локальных кластеров производства и потребления водорода. Особое значение имеют стандарты качества топлива и

системы обнаружения утечек. Интеграция с существующими энергетическими объектами позволяет минимизировать инвестиционные затраты [3].

**7. Поэтапная стратегия внедрения**

Этап 1 (2025–2030): локальные пилотные проекты с использованием смесей CH4+H2 до 20–30% объёма; проведение испытаний модернизированных горелок, разработка регламентов и стандартов. Этап 2 (2030–2038): расширение на 40–60% H2 в сетях, реализуются меры по обновлению топливоподачи, систем охлаждения и ремонту; массовое внедрение в промышленных кластерах. Этап 3 (2040 и далее): переход на 100% H2 в новых энергоустановках и возможная реконструкция существующих при экономической целесообразности и развитой логистике водорода. Инвестиционная модель должна учитывать потери при конверсии (электролиз, хранение), стоимость инфраструктуры и вопросы тарифного регулирования.

На первом этапе используется смесь до 30% H2 без глубокой реконструкции оборудования. При увеличении доли до 60% требуется модернизация камер сгорания и систем управления. Переход на 100% H2 возможен при наличии развитой инфраструктуры и подтверждённой надёжности оборудования [1].

**Рекомендации для НИОКР**

Разработка малоэмиссионных камер сгорания, устойчивых к высоким скоростям горения H2.

Материаловедение: исследования по стойким к водородной хрупкости сплавам и покрытиям.

Системы управления горением для поддержания обеднённого режима и уменьшения NOx.

Пилотные проекты по интеграции водородных ГТУ в комбинированные циклы с увеличением общей эффективности.

**Заключение**

Проведённый расчётный и аналитический обзор подтверждает техническую реализуемость использования водорода в энергетических ГТУ в российских условиях при соблюдении ряда инженерных мер. Ключевой практический вывод: наиболее реалистичен поэтапный подход с применением метано-водородных смесей на

начальных этапах и постепенной адаптацией коммунальной и энергетической инфраструктуры [1]. Комплекс мер по модернизации горелок, применению жаропрочных материалов и системе управления горением позволит обеспечить эффективность и безопасность при минимально возможных рисках.

**Список используемых источников**

1. Бакланов А.В. Возможность использования метано-водородного топлива в конвертированных газотурбинных двигателях. Сибирский аэрокосмический журнал, 2021. Т.22, № 1. С. 82–93.

2. Ратушняк П.С. Текущее состояние и перспективы развития водородной энергетики // Правовой энергетический форум. 2021. №1. С. 47–54.

3. Фролов Ю.Ю., Медведев В.А. Анализ термодинамических параметров газотурбинной установки при использовании водорода в качестве топлива // Пермский политехнический университет. 2022. С.4-6.

3. Chiesa P., Lozza G., Mazzocchi L. Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. ASME, 2005. P.73–80.

4. International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2021. Paris: IEA, 2021. 223 p.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

*Доставалов Н.А. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Павличенко И.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются возможности применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для электроснабжения объектов транспортной инфраструктуры. На основе анализа работ Мартко Е.О., посвященных развитию альтернативной энергетики в России и мире, обосновывается актуальность внедрения ВИЭ на транспорте. Выполнен обзор современных технологий солнечной и ветровой генерации применительно к задачам транспортного комплекса. Проведен сравнительный анализ эффективности различных типов ВИЭ для питания зарядных станций электромобилей, железнодорожной

инфраструктуры и объектов дорожного сервиса. Рассмотрены существующие барьеры и предложены пути их преодоления.

## Введение

Развитие транспортного комплекса в современных условиях неразрывно связано с ростом потребления электрической энергии [2]. Электрификация железных дорог, внедрение электротранспорта, оснащение автодорог системами освещения и автоматизации приводят к увеличению нагрузки на распределительные сети [1]. Одновременно с этим возрастают требования к надежности электроснабжения объектов транспорта, многие из которых относятся к первой категории [4].

В работах Мартко Е.О. [3, 5] проведен детальный анализ современного состояния и перспектив развития альтернативной энергетики в России и мире. Автором показано, что, несмотря на значительные запасы традиционных углеводородов, в России складывается устойчивая тенденция к внедрению возобновляемых источников энергии [3]. Отмечается, что использование ВИЭ особенно целесообразно в удаленных и труднодоступных регионах, а также для автономных потребителей [5]. Транспортная инфраструктура, включающая удаленные участки железных дорог, автозаправочные станции на трассах, объекты дорожного сервиса, может рассматриваться как перспективная область применения ВИЭ [6].

Целью настоящей статьи является анализ возможностей использования солнечной и ветровой энергетики для электроснабжения объектов транспортной инфраструктуры и оценка перспектив такого внедрения в условиях Российской Федерации.

## Современное состояние и тенденции развития ВИЭ на транспорте

Мировой опыт свидетельствует о растущем интересе к применению возобновляемых источников энергии в транспортном секторе [8]. В странах Европейского союза, США и Китае реализуются проекты по оснащению железнодорожных станций солнечными электростанциями, созданию «зеленых» зарядных станций для электромобилей, использованию ветрогенераторов для питания систем сигнализации и связи [7].

Как отмечает Мартко Е.О. [3], к началу XXI века страны – лидеры в области ВИЭ предприняли массированные инвестиции в альтернативную энергетику, что привело к созданию мощного комплекса «зеленых производств». При этом в России,

несмотря на наличие нормативной базы (постановление Правительства № 449 от 28.05.2013 г.), доля ВИЭ в энергобалансе остается незначительной [5]. Однако именно в транспортной сфере, характеризующейся рассредоточенностью объектов и сложностью подключения к централизованным сетям, применение автономных энергоустановок на базе ВИЭ может дать максимальный эффект [1].

**Солнечная энергетика для объектов транспорта**

Солнечные электростанции являются наиболее доступным и технологически отработанным видом ВИЭ [7]. Для объектов транспортной инфраструктуры возможны следующие варианты применения [2, 6]:

– питание зарядных станций для электромобилей, особенно расположенных вдали от мощных электрических сетей;

– электроснабжение железнодорожных платформ, остановочных пунктов и вокзалов;

– обеспечение работы систем освещения автодорог, тоннелей, пешеходных переходов;

– питание систем автоматики, связи и телемеханики на железнодорожном транспорте;

– энергоснабжение объектов дорожного сервиса (кафе, гостиницы, АЗС) на трассах.

Преимуществом солнечной генерации является модульность и масштабируемость – от маломощных установок для освещения остановок до крупных солнечных парков, способных питать тяговые подстанции [8]. Кроме того, пик выработки солнечной энергии часто совпадает с пиком нагрузки в дневное время, что актуально для большинства транспортных объектов [1].

**Ветроэнергетика в транспортной инфраструктуре**

Ветроэнергетические установки также могут найти применение на транспорте, особенно в регионах с устойчивыми ветровыми режимами [6]. Как показано в работе Мартко Е.О. [3], ветроэнергетика является одним из наиболее распространенных видов альтернативной энергетики в мире благодаря относительной простоте и доступности.

Для транспортной инфраструктуры ветрогенераторы могут использоваться [2, 7]:

– в составе гибридных энергокомплексов на железнодорожных станциях;

– для питания систем сигнализации на перегонах;

– в качестве резервных источников питания на объектах, где требуется повышенная надежность;

– для зарядки аккумуляторных батарей систем управления движением.

Важным преимуществом ветрогенераторов является возможность круглосуточной выработки энергии в отличие от солнечных панелей [8]. В сочетании с аккумуляторными накопителями ветроустановки способны обеспечивать автономное питание ответственных потребителей [1].

**Сравнительный анализ эффективности ВИЭ для транспортных объектов**

Для обоснования выбора типа ВИЭ при проектировании энергоснабжения объектов транспортной инфраструктуры целесообразно провести сравнительный анализ различных технологий. В основу сравнения положены данные, представленные в работах Мартко Е.О. [5], где приведены технико-экономические показатели альтернативной энергетики, а также результаты зарубежных исследований в области применения ВИЭ на транспорте [6, 8]. Дополнительно учитывались отраслевые отчеты по развитию возобновляемой энергетики [7]. На основе обобщения этих источников составлена сравнительная характеристика, представленная в таблице 1.

Табл. 1

Сравнительная характеристика ВИЭ
для объектов транспортной инфраструктуры [5, 7]

| Параметр | Солнечные электростанции | Ветроэнергетические установки |
|---|---|---|
| Зависимость от времени суток | Работают только днем | Возможна круглосуточная работа |
| Зависимость от погоды | Облачность снижает выработку | Требуется ветер определенной силы |
| Прогнозируемость выработки | Высокая (суточные циклы) | Средняя (зависит от погоды) |
| Требуемая площадь | Значительная (для наземных СЭС) | Средняя (одна опора) |
| Уровень шума | Отсутствует | Присутствует (может быть ограничением) |
| Возможность интеграции в городскую среду | Высокая (кровли, навесы) | Низкая (требуется удаление от жилья) |
| Срок окупаемости | 5–8 лет | 7–10 лет |

| Параметр | Солнечные электростанции | Ветроэнергетические установки |
|---|---|---|
| Целесообразность применения на транспорте | Зарядные станции, вокзалы, остановки, освещение | Удаленные перегоны, гибридные комплексы |

Как видно из таблицы, оба типа ВИЭ имеют свои области применения [8]. Солнечная генерация предпочтительнее для объектов, расположенных вблизи населенных пунктов и требующих интеграции в существующую застройку [2]. Ветроустановки более эффективны для удаленных объектов, где отсутствуют ограничения по шуму и имеются благоприятные ветровые условия [6].

**Перспективы внедрения ВИЭ на транспорте в России**

Анализ, проведенный Мартко Е.О. [3], показывает, что, несмотря на определенное отставание России от мировых лидеров в области альтернативной энергетики, в стране имеются благоприятные предпосылки для развития ВИЭ. К таким предпосылкам относятся [1, 5]:

– огромная территория с неравномерной плотностью населения и распределением энергосетей;

– наличие регионов с высоким уровнем инсоляции (южные области, Забайкалье);

– регионы с устойчивыми ветровыми режимами (побережья морей, степные зоны);

– государственная поддержка развития ВИЭ (программы субсидирования, льготные тарифы);

– развитие электротранспорта и необходимость создания зарядной инфраструктуры.

Особый интерес представляет использование ВИЭ для электроснабжения объектов Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, многие участки которых проходят по малонаселенной местности со сложными условиями доставки топлива [6]. Применение гибридных энергокомплексов на базе солнечных панелей, ветрогенераторов и накопителей энергии позволит повысить надежность электроснабжения и снизить эксплуатационные затраты [1].

**Примеры реализации проектов ВИЭ на транспорте**

В мировой практике накоплен значительный опыт успешной реализации проектов по интеграции ВИЭ в транспортную инфраструктуру [7]. В Германии более 200 железнодорожных станций частично или полностью питаются от солнечных электростанций, установленных на крышах вокзалов и депо [8]. В Китае вдоль

скоростных автомагистралей создаются «солнечные коридоры» с зарядными станциями для электромобилей, работающими от фотоэлектрических панелей [6].

В России также имеются первые примеры таких решений [2]. На Сахалине реализуется проект по оснащению автодорожной инфраструктуры гибридными энергоустановками на базе ветрогенераторов и солнечных панелей. В Крыму ряд зарядных станций для электротранспорта функционирует с использованием солнечной генерации [1].

**Барьеры и пути их преодоления**

Несмотря на очевидные преимущества, широкому внедрению ВИЭ на транспорте препятствует ряд факторов [5, 8]:

– высокая стоимость первоначальных инвестиций;
– недостаточно развитая нормативная база;
– отсутствие типовых проектных решений;
– сложность интеграции с существующими системами электроснабжения;
– климатические ограничения в отдельных регионах.

Для преодоления этих барьеров необходимы [2, 7]:

– развитие механизмов государственно-частного партнерства;
– субсидирование процентных ставок по кредитам на «зеленые» проекты;
– разработка типовых проектов энергоснабжения объектов транспорта на базе ВИЭ;
– создание дорожных карт по интеграции ВИЭ в транспортную инфраструктуру;
– подготовка специалистов соответствующего профиля.

**Заключение**

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

– использование возобновляемых источников энергии для электроснабжения объектов транспортной инфраструктуры является перспективным направлением, соответствующим мировым тенденциям развития энергетики и транспорта [7, 8];
– работы Мартко Е.О. [3, 5] подтверждают актуальность развития ВИЭ в России и показывают, что транспортный сектор может стать одной из драйверных отраслей для внедрения альтернативной энергетики;

– солнечные электростанции наиболее эффективны для питания зарядных станций электромобилей, объектов дорожного сервиса, вокзалов и систем освещения, особенно в регионах с высоким уровнем солнечной радиации [1, 2];

– ветроэнергетические установки целесообразно применять для удаленных объектов железнодорожной инфраструктуры, а также в составе гибридных энергокомплексов, обеспечивающих круглосуточное электроснабжение [6];

– наибольший эффект может быть достигнут при комплексном использовании различных типов ВИЭ в сочетании с накопителями энергии, что позволяет обеспечить надежное и качественное электроснабжение объектов транспорта при снижении зависимости от централизованных сетей [1];

– в мировой практике накоплен успешный опыт интеграции ВИЭ в транспортную инфраструктуру, который может быть адаптирован к российским условиям [7, 8];

– для широкого внедрения ВИЭ на транспорте требуется преодоление ряда барьеров, включая совершенствование нормативной базы и развитие механизмов финансирования [5];

– дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку типовых решений по оснащению объектов транспортной инфраструктуры возобновляемыми источниками энергии с учетом климатических особенностей различных регионов России [2, 6].

**Список используемых источников**

1. Вершинин М.И., Гегечкори О.Н. Перспективы развития альтернативной энергетики в России // Вестник молодежной науки. 2017. № 1 (8). С. 1-4.

2. Кузьмин В.В., Биккулова Ю.М., Ведяшова Н.Д. Перспективы развития альтернативной энергетики в России // Контентус. 2018. № 5 (70). С. 1–8.

3. Мартко Е.О., Сурков М.В., Белицын И.В. Анализ нетрадиционной энергетики в России и мире // Актуальные вопросы науки 2022: сборник статей. 2022. С. 12–14.

4. Мартко Е.О., Сурков М.В., Белицын И.В. Анализ ущерба от недоотпуска электроэнергии в сеть // Актуальные вопросы науки 2022: сборник статей. 2022. С. 15–18.

5. Мартко Е.О., Фролов Г.Н., Белицын И.В. Перспективы использования альтернативных источников энергии в России в XXI веке // Актуальные вопросы науки 2022: сборник статей. 2022. С. 24–26.

6. Сидоров А.И., Комаров С.С. Применение возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения объектов железнодорожного транспорта // Транспорт Урала. 2022. № 3. С. 45–51.

7. Global Trends in Renewable Energy Investment 2023 / Frankfurt School-UNEP Centre. 2023. 78 p.

8. IRENA. Renewable Energy in Transport: Trends and Outlook 2024 / International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2024. 112 p.

# МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ ГАРМОНИК НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ С ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

*Жилин Е.В. – к.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

**Аннотация**

Классический метод управления активными фильтрами на основе теории мгновенной мощности (*pq*-метод) дает погрешность компенсации гармоник тока при несинусоидальном и несимметричном питающем напряжении. В реальных условиях эксплуатации, характеризующихся наличием высших гармоник и несимметрии в напряжении сети, точность выделения компенсирующих токов существенно снижается. В настоящей работе рассматривается модифицированный алгоритм управления, основанный на комбинации *pq*-метода с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Приводится анализ недостатков классического подхода, связанных с пульсациями напряжения в выражениях для опорных токов при искаженном напряжении питания. Представлено математическое описание работы ФАПЧ во вращающейся системе координат, включая преобразования Кларк и Парка, формирование сигнала ошибки, ПИ-регулятор и интегратор частоты. Показано, что использование оценки фазового угла от ФАПЧ позволяет сформировать идеальное опорное напряжение, не содержащее искажений, но синхронизированное с основной гармоникой сети. Замена реального напряжения на идеальное в расчетах обеспечивает повышение точности в выражениях для опорных токов, что устраняет влияние искажений питающего напряжения на процесс компенсации.

## Введение

Современное развитие силовой электроники и широкое внедрение преобразовательных устройств привели к значительному ухудшению качества электроэнергии в распределительных сетях. Нелинейные нагрузки, такие как

частотно-регулируемые приводы, выпрямители и источники бесперебойного питания, генерируют высшие гармоники тока, что вызывает увеличение потерь, нагрев оборудования и ложные срабатывания защит [1, 7].

Наиболее эффективным средством борьбы с гармоническими искажениями являются активные фильтры гармоник (АФГ), которые в реальном времени генерируют ток, компенсирующий гармонические составляющие нагрузки [5, 6]. Большинство промышленных АФГ используют алгоритмы управления, основанные на теории мгновенной мощности (*pq*-теории), предложенной H. Akagi в 1983 году [8].

Классический *pq*-метод обладает существенным недостатком: точность выделения гармонических составляющих тока нагрузки напрямую зависит от качества питающего напряжения. В условиях несинусоидальности или несимметрии напряжения, опорные сигналы, используемые в преобразованиях, искажаются, что приводит к снижению эффективности компенсации или даже к генерации дополнительных гармоник в сеть.

В работе предлагается модифицированный алгоритм, сочетающий классическую *pq*-теорию с системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и блоком генерации идеального опорного напряжения. Данный подход позволяет сохранить простоту и надежность *pq*-метода, одновременно обеспечивая его нечувствительность к искажениям питающей сети.

Целью работы является разработка математического описания модифицированного алгоритма управления активным фильтром гармоник, сочетающего классическую *pq*-теорию с системой фазовой автоподстройки частоты, и теоретическое обоснование его нечувствительности к искажениям питающего напряжения за счет генерации идеального опорного напряжения на основе оценки фазы основной гармоники сети.

**Объекты и методы**

Для понимания сути модификации кратко рассмотрим классический *pq*-метод. Трехфазные напряжения сети и токи нагрузки преобразуются в неподвижную систему координат *αβ* с помощью преобразования Кларк [2, 3]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Мгновенные активная $p$ и реактивная $q$ мощности определяются как:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Полученные мощности содержат постоянные $(\bar{p};\bar{q})$ и пульсирующие составляющие $(\tilde{p};\tilde{q})$. Переменные составляющие обусловлены наличием высших гармоник в токе нагрузки. Опорный ток для компенсации рассчитывается по обратному преобразованию:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\alpha & -u_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Как видно из последнего выражения, в знаменателе присутствует сумма квадратов напряжений. Если напряжение сети искажено гармониками, то величина перестает быть постоянной и начинает пульсировать с частотой гармоник. Это приводит к появлению ошибок в расчетах опорного тока и, как следствие, к снижению эффективности фильтрации.

Основная идея модификации заключается в замене реального искаженного напряжения на идеальное напряжение, сгенерированное внутри контроллера. Для этого необходимо точно знать текущую частоту и фазу основной гармоники сети, что обеспечивается с помощью ФАПЧ.

На вход системы ФАПЧ подаются искаженные фазные напряжения. Сигналы из неподвижной системы $\alpha\beta$ проецируются на систему координат $dq$, которая вращается с текущей оценкой угла $\hat{\theta}(t)$. Преобразование задается матрицей вращения [4]:

$$\begin{bmatrix} u_d(t) \\ u_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta}(t) & \sin\hat{\theta}(t) \\ -\sin\hat{\theta}(t) & \cos\hat{\theta}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В установившемся режиме, когда оценка угла $\hat{\theta}(t)$ точно равна истинной фазе $\omega t$, сигнал $u_d$ становится равным амплитуде напряжения $U_m$, а сигнал $u_q$ становится

равным нулю. Если есть ошибка по фазе $\Delta\theta=\omega t-\theta$, то $u_q \approx U_m \cdot \Delta\hat{\theta}$, отсюда следует, что сигнал $u_q$ пропорционален ошибке отслеживания фазы.

Сигнал ошибки $u_q(t)$ подается на вход ПИ-регулятора. Задача регулятора свести $u_q$ к нулю, изменяя оценку частоты $\omega(t)$.

$$\hat{\omega}(t) = K_p \cdot u_q(t) + K_i \int u_q(t)dt \,. \tag{5}$$

Пропорциональная часть обеспечивает быструю реакцию на изменения фазы, интегральная часть устраняет статическую ошибку и обеспечивает слежение за частотой при ее отклонениях. Коэффициенты $K_p$ и $K_i$ выбираются исходя из требуемого быстродействия и устойчивости, для сетей 50 Гц типичные значения $K_p \approx 180$; $K_i \approx 3200$.

Полученная оценка угловой скорости $\hat{\omega}(t)$ интегрируется, чтобы получить текущий фазовый угол $\hat{\theta}(t)$.

$$\hat{\theta}(t) = \int \hat{\omega}(t)dt \,. \tag{6}$$

В непрерывной форме это просто накопление фазы, важно отметить, что данный интегратор обеспечивает непрерывное нарастание угла, что необходимо для генерации синусоидальных сигналов. В практических реализациях угол обычно приводится к диапазону $[0,2\pi)$ путем операции взятия по модулю. Полученный угол $\hat{\theta}(t)$ замыкает обратную связь, подаваясь на вход преобразования Парка, таким образом, система является замкнутой и автоматически подстраивается под изменения входного сигнала.

**Заключение**

В настоящей работе представлено теоретическое обоснование модифицированного алгоритма управления активным фильтром гармоник, предназначенного для работы в условиях искаженного питающего напряжения. Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

Классический *pq*-метод использует в расчетах реальное напряжение сети. При наличии в напряжении высших гармоник или несимметрии расчетная величина, на которую делится сигнал при формировании опорных токов, перестает быть

постоянной и начинает пульсировать, что вносит погрешность в компенсацию гармоник тока. Это приводит к тому, что в опорные токи попадают дополнительные составляющие, снижающие качество компенсации.

Для получения информации о фазе основной гармоники напряжения может использоваться система ФАПЧ. Ее работа основана на преобразовании входных сигналов во вращающуюся систему координат $dq$, где сигнал $u_q$ оказывается пропорциональным ошибке слежения. ПИ-регулятор, сводящий $u_q$ к нулю, формирует оценку частоты, интегрирование которой дает оценку фазового угла. При правильном выборе коэффициентов ФАПЧ эффективно подавляет высшие гармоники, присутствующие во входном напряжении. В предложенном алгоритме операции с напряжением выполняются над идеальными сигналами. Качество компенсации гармоник тока при этом определяется в первую очередь точностью работы ФАПЧ и уже не зависит от текущего качества напряжения в сети.

Используя оценку фазового угла от ФАПЧ, можно сформировать три идеальных синусоидальных напряжения, сдвинутых на 120°. Эти напряжения не содержат искажений, но сохраняют синхронизацию с основной гармоникой реального напряжения сети.

Алгоритм допускает реализацию в дискретной форме, что позволяет использовать его в цифровых системах управления на базе микроконтроллеров и сигнальных процессоров. Все уравнения могут быть представлены в рекуррентном виде, не требующем значительных вычислительных ресурсов.

**Список используемых источников**

1. Авербух М.А., Жилин Е.В. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства // Энергетик. 2016. №. 6. С. 54–57.

2. Авербух М.А., Жилин Е.В. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов // Промышленная энергетика. 2017. №. 12. С. 40–45.

3. Джагаров Н.Ф., Цветанов Д.Н., Джагарова Ю.В. Улучшение качества электроэнергии в электрических сетях. Часть 2. Обзор методов управления активными фильтрами для улучшения качества электрической энергии // Промышленная энергетика. 2019. №. 5. С. 53–60.

4. Лоскутов А.Б., Алтунин Б.Ю., Карнавский И.А. Имитационная модель активного фильтра для четырехпроводной сети // Промышленная энергетика. 2013. №. 10. С. 40–44.

5. Нос О.В., Востриков А.С., Штанг А.А., & Малявко, Е.Ю. Повышение энергоэффективности производства за счет применения силовых фильтров высших гармоник // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. №. 12. С. 28–36.

6. Скурятин Ю.В., Белоусов А.В. Повышение эффективности активной фильтрации. Прямое управление потребляемой мощностью // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016. №. 1. С. 71–77.

7. Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А, Аладьин М.Е. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. №. 1. С. 159–179.

8. Akagi, H. and Nabae, A. The p-q Theory in Three-Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions // European Transactions on Electrical Power. 1983. №3 P. 27–31. https://doi.org/10.1002/etep.4450030106.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРЕПОДАВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

*Захахатнов В.Г. – к.т.н, доцент, ФГБОУ ВО «Челябинский государственный агроинженерный университет»; ОУ ВО «Южно-Уральский технологический университет»*

**Аннотация**

Моделирование технологических процессов с применение визуализаций является эффективным инструментом преподавания технических дисциплин, способствует получению профессиональных компетенций без использования реальных учебных стендов. В статье приведен конкретный пример моделирования дискретного производственного процесса в интерактивной симуляционной среде Factory IO, приводятся логика и задачи, решаемые в процессе программирования.

Цель обучения в контексте изучения технических дисциплин – это подготовка к профессиональной деятельности и формирование способности и мотивации самостоятельно осваивать новые умения и навыки.

Незаменимым инструментом изучения является моделирование, которое облегчает изучение сложных систем, позволяя выделять ключевые параметры и взаимосвязи, выявлять закономерности их функционирования на основе экспериментирования с моделями, прогнозировать поведение изучаемых систем, проводить оптимизацию и разрабатывать алгоритмы управления [1, 2].

В образовании использование моделирования особенно актуально, поскольку позволяет реализовывать на моделях различные сценарии исследования без применения дорогостоящего и быстро устаревающего стендового оборудования, обеспечить безопасность исследований, активно взаимодействовать с изучаемым объектом наблюдая результаты. Авторы публикаций, посвященных использованию моделирования в учебном процессе, отмечают развитие у студентов цифровых компетенций [6]. Повышение эффективности обучения при использовании 3D анимации показана в [1,3,7]. Однако мало публикаций с конкретными примерами использования моделирования в преподавании технических дисциплин [5].

В настоящее время существует большое количество программ, предназначенных для моделирования электронных схем, тепловых и гидравлических процессов, автоматических систем управления, 3D моделирования, систем автоматического проектирования САПР и т. д. Далее приводится пример применения игры Factory IO в курсе «Автоматические системы управления». Хотя Factory IO и относят к категории *Real games,* по приближенности сценариев к реальному производству, глубине погружения в технологию управления технологическими процессами и программирования ее следует отнести к системам моделирования.

Игра Factory IO – это интерактивная симуляционная платформа, предназначенная для обучения и практической отработки навыков в области автоматизации, промышленного проектирования и программирования систем управления. Она позволяет моделировать реальные производственные процессы и управлять ими в виртуальной среде. В игре создается визуализация производственных линий с использованием конвейеров, роботов, датчиков и исполнительных механизмов. В процессе моделирования создается производственная линия, которой можно управлять в ручном или в автоматическом режиме. Для реализации автоматического режима необходимо подключение реального либо виртуальный ПЛК и создание программы управления. Для учебного процесса удобно использование встроенного виртуального контроллера Control IO, не требующего дополнительного программного обеспечения и оборудования. Далее

приводится пример моделирования линии перевалки коробок с одного конвейера на другой с помощью 3х координатного манипулятора. На рисунке 1 показана сцена линии перевалки. Линия состоит из двух ленточных конвейеров, манипулятора, барьера остановки коробки и датчика положения коробки. Манипулятор снабжен пневматическим захватом с возможностью поворота на 90°, может совершать движения по трем осям *X, Y, Z*.

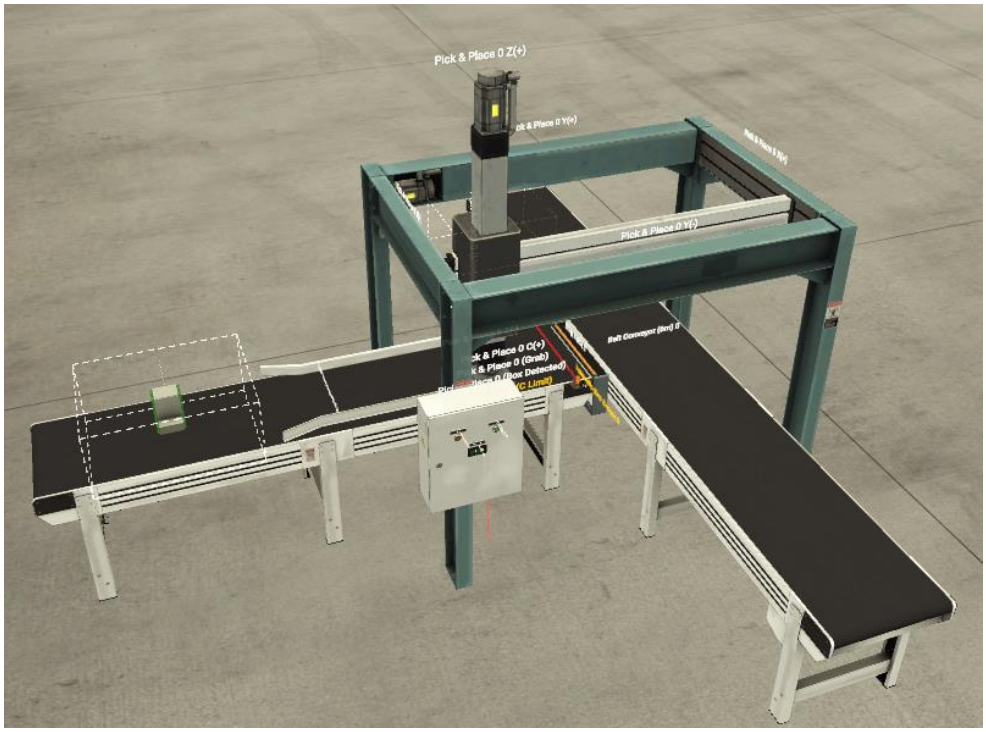



Рис 1. Сцена для изучения работы манипулятора

Источник: составлено автором

Для изучения работы отдельных механизмов, сигнальной арматуры и датчиков каждый из них имеет теги, визуально отображенные на каждом элементе. При клике на тег элементы его управления отображаются на экране сцены. С помощью этих элементов управления, подавая на них сигналы включения/выключения, можно изучать их работу.

Для автоматизации линии необходимо подключить виртуальный контроллер, при этом становится доступным программирование на языке функциональных блоковых диаграмм. Специфика программирования манипуляторов заключается в том, что код программы состоит из однотипных структур, соответствующих однотипным движениям, совершаемых манипулятором. Для понимания логики программирования студентам предлагается схема движения, показанная на рис.2.

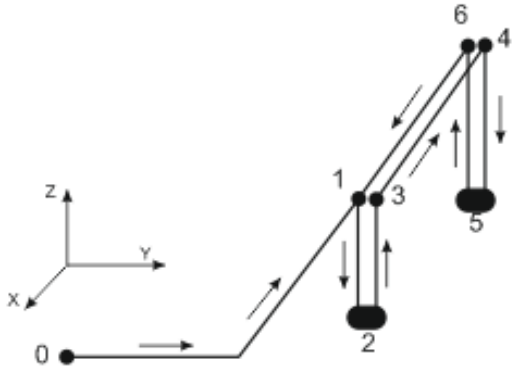



Рис. 2 Схема движения каретки манипулятора при перевалке коробок с конвейера на конвейер

0 – исходное положение, 1 – стартовое положение (над подающим конвейером), 2 – положение захвата коробки, 3- положение подъема коробки, 4(6) – положение над разгружающим конвейером, 5 – положение сброса коробки

Источник: составлено автором

Для облегчения программирования сначала разрабатывается базовая программа движения (независимо от оси). Ее вид показан на рис. 3.

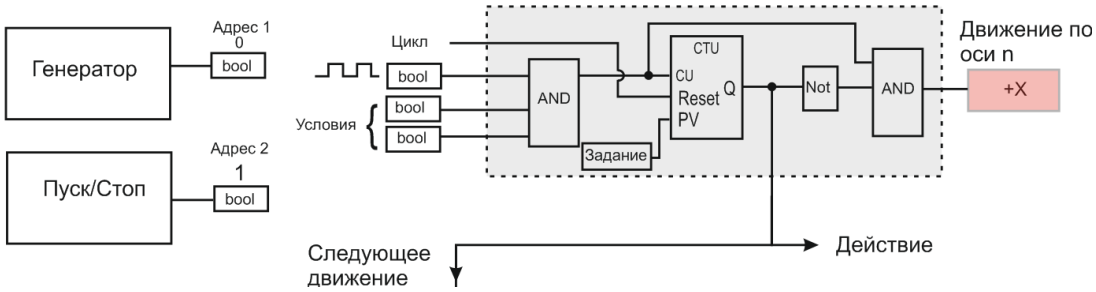



Рис.3 Базовая программа движения

Источник: составлено автором

Базовый блок движения состоит из логических элементов, счетчика CTU и блока задания количества шагов, которые совершает каретка манипулятора при дискретном управлении. На вход подаются сигналы от генератора тактовых импульсов, сигналы условий разрешения движения и сигнал «цикл», перезапускающий программу. Программный блок при наличии разрешения выдает серию тактовых импульсов, заданную блоком задания и при отработке серии

импульсов выдает сигнал разрешения следующего движения и сигнал действия – включение/выключение нужного механизма.

Студенты составляют базовую программы движения и тестируют ее на модели линии. Затем им дается задание, на основе базовой программы составить программу управления линией перевалки. В ходе работы над программой управления студенты решают следующие задачи:

– использование адресов переменных для считывания значений из разных участков программы;

– использование разных адресов переменных для управления одним механизмом;

– формирования условий разрешения движения на основе сигналов датчиков;

– частичное или полное зацикливание работы программы;

– поведение системы управления после сбоя/потери и восстановления питания.

Конечный вид программы показан на рис. 4.



Рис. 4 Вид программы управления линией перевалки коробок

Источник: составлено автором

Приведенный пример дает возможность ознакомить студентов с базовыми инструментами программирования – логическими элементами, триггерами, счетчиками и принципами программирования дискретных систем автоматического управления, получить первый положительный опыт программирования и как следствие, создать мотивацию для дальнейшего изучения предмета.

Интерфейс Factory IO дает возможность оперативно изменять программу и наблюдать изменения в схеме движения манипулятора, тем самым получать практические навыки программирования дискретных систем управления.

К недостаткам программирования в среде Control IO следует отнести отсутствие средств инкапсуляции, позволяющих сделать программу компактной и наглядной.

**Список используемых источников**

1. Баженова И.В. Визуальное моделирование в обучении программированию // Вестник ЮУрГГПУ. 2017. №6. С.15–20.

2. Берестова С.А., Мисюра Н.Е., Митюшов Е.А. Математическое моделирование в инженерии; научный редактор Т. А. Рощева; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 244 с.

3. Гейдарова Егяна Фархад Кызы, Рахманова Кямаля Халид Кызы, Ализаде Айсель Рафик Кызы, Керимли Нурана Керем Кызы. Эффективность применения 3D-анимаций в учебном процессе Азербайджанского медицинского университета // Проблемы Науки. 2021. №2 (159). С. 46–50.

4. Королев М.Е. Математическое моделирование как инструмент инженерного конструирования: Didactics of mathematics: Problems and Investigations. V.1, № 52. 2020. С. 71–77.

5. Кутрунова З.С., Максимова С.В. Об использовании геймификации в преподавании технических дисциплин // Мир науки. Педагогика и психология. 2022. №5. С. 1–13.

6. Моисеева Н.А., Полякова Т.А. Развитие цифровых компетенций будущих инженеров средствами информационно-математического моделирования // Концепт. 2021. №3. С. 71–85.

7. Пурцеладзе И.Б., Мирзахидова О.М. Современные инновационные технологии преподавания технических дисциплин // Вестник науки. 2022. №12 (57). С.154–158.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НЕФТЕГАЗОВОМ СЕКТОРЕ

*Исмайлов Э.М. – аспирант, Сургутский филиал ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»*

*Гавриленко Т.В. – научный руководитель: к.т.н. доцент, Сургутский филиал ФГУ «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»*

**Аннотация**

В докладе рассматривается возможность внедрения в существующие системы управления на базе промышленных контроллеров математической модели нейронной сети в качестве дополнительного контура защиты и управления. В докладе рассматривается обобщенное представление о возможностях искусственного интеллекта.

## Введение

Сегодня в большинстве стран мира действуют системы управления и энергоснабжения по принципу централизованной системы, в которой электропитание и информационные сигналы от систем управления передаются множеству объектов (Рисунок 1). В автономных системах электропитание передается от солнечных панелей, ветрогенератора, дизельной электростанции одному или нескольким потребителям, последняя модель генерации чаще всего применяется в труднодоступных местах, где экономически нецелесообразно применять централизованную систему электроснабжения, при этом принцип управления сохраняется такой же как у централизованной. Не секрет что в одной из ключевых отраслей народного хозяйства (нефтегазовой отрасли) не первый год говорят о перспективности внедрения децентрализованных систем управления и энергоснабжения на режимных объектах нефтегазовой отрасли путем внедрения новых технологий и интеграцию распределенной генерации (Рисунок 2) электроэнергии, что поможет обеспечить многообразие источников энергоснабжения

и повысит энергетическую безопасность объектов работающих от такой сети, при этом управление генерацией и ее объединение в единую подконтрольную сеть с множеством объектов возможно только с использованием математической модели искусственного интеллекта [7,3,4].

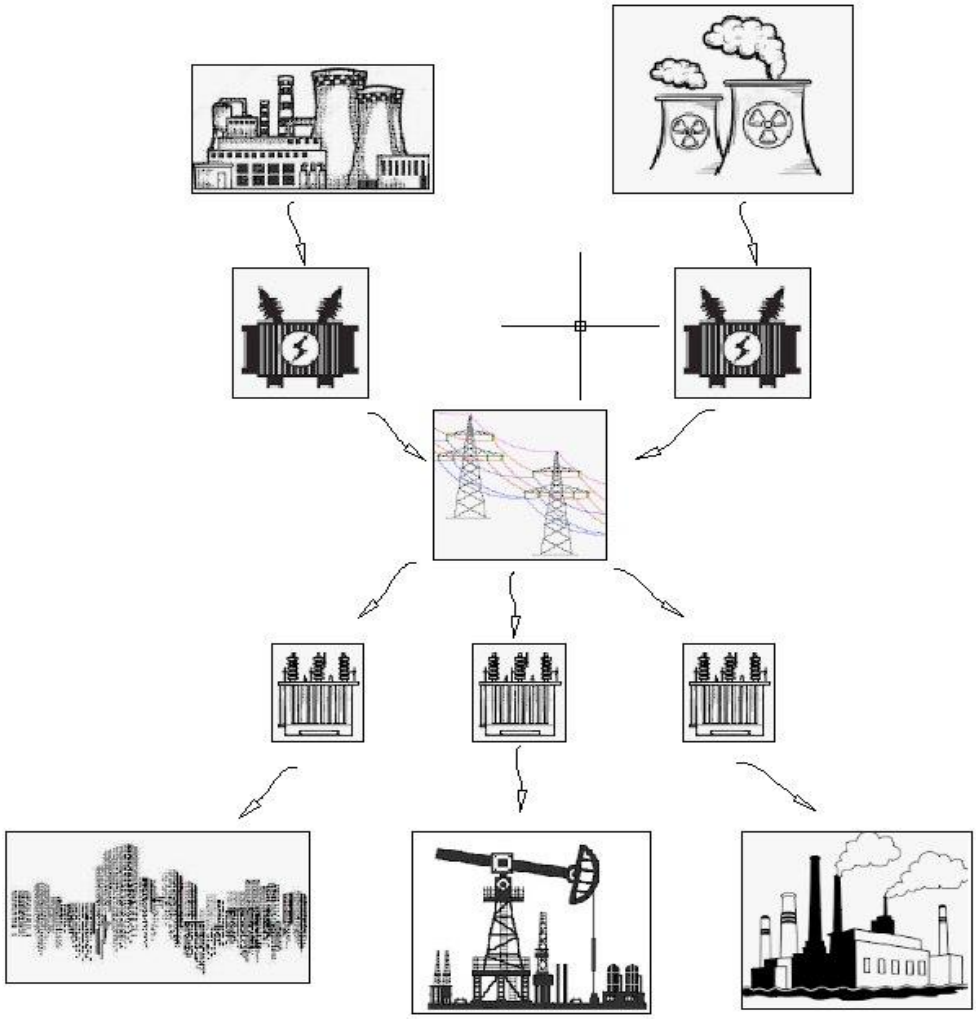


Рис. 1. Централизованная система электроснабжения

Источник: составлено автором на основе

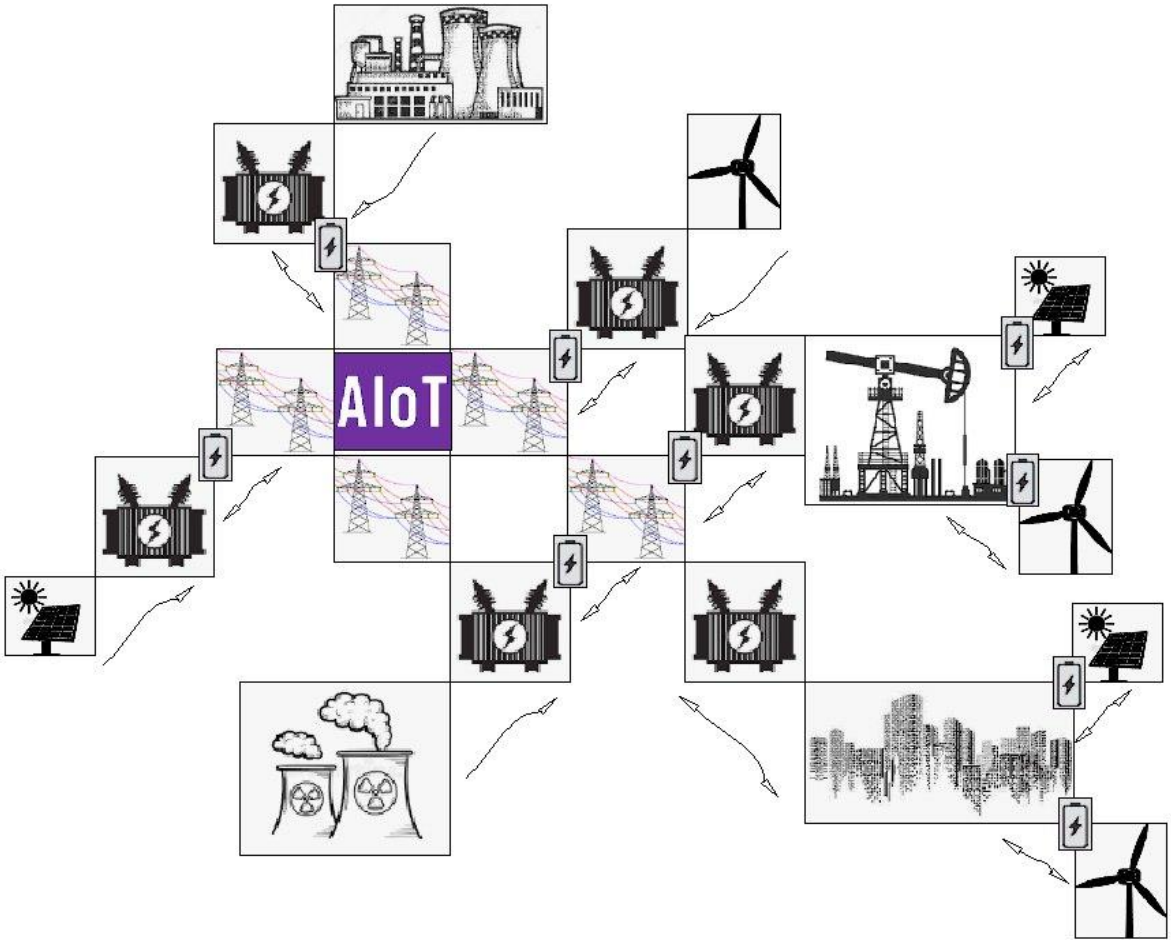



Рис. 2. Распределенная система электроснабжения

Источник: составлено автором

Важно подчеркнуть, что некоторые крупные нефтегазовые компании (Роснефть, Сургутнефтегаз, Газпром,...) осуществляют генерацию электрической энергии для собственных нужд с помощью газопоршневых электростанций (ГПС), тем самым перекрывая часть потребляемой энергии, при этом избавляясь от попутного нефтяного газа (ПНГ), сжигание которого на факельных установках строго контролируется государством, а его транспортировка для последующей реализации связано с большими сложностями в его очистке [5,8].

**Основная часть**

Сегодня человечество по ряду причин не может полностью исключить применение органического топлива для получения электрической и тепловой энергии. При этом месторождения, которые имеют доступ к существующей электрической инфраструктуре со временем иссякнут. Тем самым вынуждая

нефтяные компании уходить в местности, где нет никакой инфраструктуры, а это значит, что необходимо проводить геологоразведочные работы на неизученных территориях, где нет людей и нет никакой инфраструктуры.

На сегодняшний день в России геологоразведочные работы делятся на три этапа:

– региональный: данный этап заключает в себе геологические исследования почвы для поиска перспективных участков и прогнозирования объемов добычи (может растянуться на несколько десятков лет);

– поисковый: текущий этап специализируется на выявление конкретных месторождений (в зависимости от удалённости объектов инфраструктуры и территориальной сложности занимает до 5 лет);

– разведочный: конкретно этот этап направлен на детальное изучение выявленных месторождений и их подготовку к разработке (охватывает участок времени 5–10 лет).

Исходя из всего вышесказанного можно заключить о том, что только на геологоразведочные работы в нефтегазовом секторе уходит около 25 лет. Учитывая удалённость от централизованных источников электропитания, всё это время генерация электрической энергии происходит с помощью дизельных электростанций, что очень дорого и имеет свои сложности, связанные с доставкой данного топлива на объект [6].

Распределённая генерация исключает сложности и риски, связанные с применением одного источника питания объкта, и даёт возможность повысить энергетическую безопасность объектов, создавая резервные источники питания (энергия солнца, ветра, воды…), что непременно ведет к экономической выгоде [3].

Важно сказать, что при внедрении распределенной генерации сразу же возникает вопрос касательно системы управления, которая сможет объединять цепочку разных объектов, генерирующих электроэнергию разными методами. В этом нам помогут технологии на основе искусственного интеллекта (ИИ) [3,4,1].

Кроме всего вышеизложенного нельзя исключать факт того что в зависимости от региона добычи нефти и газа возникают сложности с получением энергии с помощью нетрадиционных источников энергии (воды, ветра, света…), так как всё зависит от конкретной местности и её особенностей. К тому же существуют и другие сопутствующие факторы, когда могут возникнуть сложности с получением альтернативной электроэнергии по причинам, не зависящим от человека и

связанными с изменением времени года или непостоянства ветра. Именно поэтому распределенная генерация должна учитывать все возможные источники энергии и не фокусироваться на одном.

На этом основании, не совсем понятна острая необходимость внедрения системы на базе ИИ для управления распределенной генерацией, так как существуют контроллеры и программы, которые могут (локально) справится с поставленными задачами. Причина – это сложившаяся обстановка в мире. Каждый день Российский сектор КИИ претерпевает огромное количество кибератак. За первую половину 2025 года число попыток внешнего вмешательства с целью нанесения ущерба народному хозяйству выросло более чем на 20 % по сравнению с прошлым годом. Производственный сектор является основной целью для нанесения удара, так как обеспечивает экономический рост государства, создает рабочие места и обеспечивает технологический прогресс.

**Вывод**

Используемые сейчас системы управления на основе ПЛК требуют постоянных обновлений своих баз данных, а учитывая тот факт, что большая часть используемых контроллеров являются интеллектуальной собственностью иностранных компаний многие из которых прекратили любое сотрудничество с РФ, база данных систем управления от недружественных производителей очень давно не обновлялась. Учитывая всё вышеизложенное можно заключить, что системы управления которые не обновлялись больше нескольких месяцев становятся уязвимыми перед вредоносными программами которые были разработаны для поражения систем управления в течение того промежутка времени пока эта система не обновлялась и чем больше времени система находится без обновлений, тем больше вероятность что такая система будет успешно поражена [2].

Система на базе ИИ способна исключить вероятность неблагоприятных внешних воздействий, благодаря алгоритмам машинного обучения, которые дают возможность корректировать работу по мере накопления новых объёмов информации, тем самым ежедневно обновляя сервер ИИ, давая возможность изучать необходимые методики для защиты от кибератак. В перспективе такие умные

системы будут способны мониторить не только виртуальное состояние объекта, но и физическое состояние технологических объектов и сетей.

Очевидно, что ИИ представляет интерес не только для распределенной генерации и нефтегазового сектора, но и для всей экономики как универсальная система управления и защиты.

**Список используемых источников**

1. AIoT Convergence Technology.png / Wikimedia Commons. [Электронный ресурс]. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AIoT_Convergence_Technology.png (дата обращения: 23.02.2026).

2. Батарейка, иконка / Shutterstock. [Электронный ресурс]. URL: https://www.shutterstock.com/ru/search/батарейка-иконка (дата обращения: 23.02.2026).

3. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Интеллектуальная настройка регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 3 (7). С. 140–159.

4. Ветряная мельница, векторные изображения / Depositphotos. [Электронный ресурс]. URL: https://depositphotos.com/ru/vectors/мельница-ветренная.html (дата обращения: 22.02.2026).

5. Высоковольтный электрический трансформатор, иконка, кнопка, среда, вектор башни / Pngtree. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.pngtree.com/freepng/high-voltage-electrical-transformer-icon-button-environment-tower-vector_12913988.html (дата обращения: 22.02.2026).

6. Завод чб векторы / Freepik [Электронный ресурс]. URL: https://ru.freepik.com/vectors/завод-чб/3 (дата обращения: 23.02.2025).

7. Значок эскиза атомной электростанции, нарисованный рукой / Dreamstime. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.dreamstime.com/значок-эскиза-атомной-электростанции-нарисованный-рукой-image111448057 (дата обращения: 22.02.2026).

8. Иллюстрация вектора атомных электростанций, эскизов с гравировкой / Dreamstime. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.dreamstime.com/иллюстрация-вектора-атомных-электростанций-эскизов-с-гравировкой-image159934473 (дата обращения: 22.02.2026).

9. Исмайлов Э.М., Гавриленко Т.В. Проблема устойчивости критической инфраструктуры в условиях высокого уровня автоматизации // Успехи кибернетики. 2025. Т. 6, № 2. С. 75–79.

10. Леонова Ю.А. Развитие возобновляемых источников энергии в России // Вестник Института экономических исследований. 2019. № 3 (15). С. 126–133.

11. Матренин П.В. Архитектура доверенной системы искусственного интеллекта в задачах прогнозирования временных рядов в электроэнергетике // International Journal of Open Information Technologies. 2025. Т. 13, № 9. С. 103–110.

12. Нефтяная платформа черно-белая / Freepik. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.freepik.com/free-vector/oil-petroleum-platform-black-white_4376680.htm (дата обращения: 23.02.2026).

13. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон № 261-ФЗ : [принят Государственной Думой 11 ноября 2009 года : одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 года] / КонсультантПлюс: [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru (дата обращения: 06.02.2026).

14. Поляков А. А. Комплексирование методов геологоразведочных работ для решения задач поиска и разведки нефти и газа // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 4. С. 240–251.

15. Простой значок солнечной панели изображает возобновляемую энергию / Dreamstime. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.dreamstime.com/простой-значок-солнечной-панели-изображает-возобновляемую-энергию-image358814151 (дата обращения: 23.02.2025).

16. Справочник инженера по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электрических станций и сетей / под ред. А. Н. Назарычева. Москва: Инфра-Инженерия, 2015. 928 с. [Электронный ресурс]. URL: www.litres.ru (дата обращения: 06.02.2026).

17. Стильная фигура, PowerPoint анимация / PNGWing. [Электронный ресурс]. URL: https://www.pngwing.com/ru/free-png-tyhpv (дата обращения: 23.02.2026).

18. Судовые газотурбинные и дизель-газотурбинные агрегаты разработки и производства ГП НПКГ «Зоря»-»Машпроект» / Турбины и Дизели. [Электронный ресурс]. URL: http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/630 (дата обращения: 06.02.2026).

19. Черно-белый город / Клев.клуб. [Электронный ресурс]. URL: https://png.klev.club/15358-cherno-belyj-gorod.html (дата обращения: 23.02.2026).

20. Электрической значок doodle плана трансформатора напряжения тока : [фотосток] / Dreamstime. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.dreamstime.com/электрической-значок-doodle-плана-трансформатора-напряжения-тока-image117140369 (дата обращения: 23.02.2025).

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ С НИЗКОЙ ИНЕРЦИЕЙ: ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

*Козлова Н.С. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Приволжский Государственный Университет Путей Сообщения»*

*Понырко Н.А. – студент, ФГБОУ ВО «Приволжский Государственный Университет Путей Сообщения»*

*Филиппов К.А. – студент, ФГБОУ ВО «Приволжский Государственный Университет Путей Сообщения»*

**Аннотация**

В настоящей статье исследуется проблема критического снижения инерционной постоянной электроэнергетических систем, обусловленная возрастающей долей генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Представлен всесторонний анализ современных типов систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), включая литий-ионные, натрий-ионные аккумуляторы, проточные редокс-батареи, а также гравитационные и водородные накопители.

## Введение

Фундаментом традиционной электроэнергетики на протяжении десятилетий являлись синхронные машины – турбогенераторы тепловых и гидравлических электростанций. Массивные роторы этих агрегатов аккумулируют значительную кинетическую энергию, которая при возникновении возмущений (набросах или сбросах нагрузки) высвобождается или поглощается, эффективно демпфируя колебания частоты. Данное свойство, известное как инерция энергосистемы, служило естественным и высоконадежным стабилизирующим фактором.

Интенсивное проникновение возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечных и ветровых электростанций, в корне трансформирует сложившийся паритет. ВИЭ подключаются к единой энергосети посредством инверторов, которые лишены физической инерции вращающихся масс. Усугубляет ситуацию высокая волатильность генерации ВИЭ, обусловленная метеорологической

зависимостью и проявляющаяся в резких флуктуациях («пилообразном» графике) выработки. Возникает парадоксальная ситуация: экологически ориентированные генерирующие мощности, призванные заместить ископаемое топливо, сами становятся источником угрозы системной устойчивости вследствие редукции суммарной инерции вращающихся масс.

Целью данной работы является анализ функционального потенциала систем накопления электроэнергии как активных элементов первичного регулирования частоты, классификация современных накопительных технологий в контексте их применимости в условиях России, а также выявление системных барьеров, сдерживающих их масштабное внедрение в отечественную электроэнергетическую отрасль.

**Эволюция функциональности СНЭЭ**

Современные накопители энергии представляют собой не просто укрупненные аккумуляторные батареи, а широкий спектр технологических решений, каждое из которых занимает специфическую нишу в обеспечении надежности энергосистемы.

**Доминирование литий-ионных и LFP-систем**

В глобальном масштабе литий-ионные технологии, особенно на основе литий-железо-фосфата (LFP), занимают доминирующее положение благодаря высокой плотности энергии и технологической зрелости производства. LFP-химия демонстрирует повышенную безопасность эксплуатации и увеличенный ресурс (до 6000–8000 циклов) по сравнению с никель-марганец-кобальтовыми аналогами, что утвердило ее в качестве стандарта для промышленных сетевых накопителей [11]. Однако критическим недостатком для российской практики является деградация емкостных характеристик при отрицательных температурах, что обусловливает необходимость применения дорогостоящих систем термостатирования и существенно лимитирует применение Li-ion батарей в регионах с холодным климатом.

**Перспективы натрий-ионных (Na-ion) аккумуляторов**

Натрий-ионная технология переживает этап ренессанса. Исследователями Калифорнийского университета в 2025 году была достигнута плотность энергии 178 Вт·ч/кг, что приближает коммерческие образцы к показателям LFP-аккумуляторов

[11]. Однако для Российской Федерации ключевым преимуществом Na-ion батарей является их способность сохранять до 80% емкости при температуре -40°C без дополнительного обогрева [10]. В марте 2025 года компания Ippon представила на российском рынке линейку источников бесперебойного питания на натрий-ионных элементах, подчеркивая их пригодность для эксплуатации в неотапливаемых помещениях и на открытом воздухе в условиях суровых зим [10]. Данное обстоятельство открывает широкие перспективы для замещения дизельной генерации в изолированных энергорайонах и на промышленных объектах Крайнего Севера.

**Проточные редокс-батареи для задач длительного аккумулирования**

Технология проточных редокс-батарей базируется на хранении энергии в жидких электролитах, что обеспечивает независимое масштабирование мощности (детерминируется размером электрохимических ячеек) и энергоемкости (определяется объемом резервуаров). Китайскими учеными из Даляньского института химической физики в 2025 году была продемонстрирована органическая проточная батарея, выдерживающая 5200 циклов при 100% глубине разряда [1]. Подобные системы оптимальны для суточного и недельного выравнивания графиков нагрузки, однако их широкому распространению препятствуют высокая удельная стоимость и значительные массогабаритные показатели.

**Механические и водородные системы: гравитация и сезонное хранение**

Гравитационные накопители (EnergyVault, Gravitricity) функционируют по принципу преобразования избыточной электроэнергии в потенциальную энергию поднятых грузов с последующей генерацией при их опускании. Данная технология позиционируется как альтернатива гидроаккумулирующим станциям, не привязанная к специфическому рельефу местности [11]. Водородное направление рассматривается преимущественно для сезонного аккумулирования энергии. Норвежский стартап Photoncycle предлагает метод хранения водорода в твердой фазе, декларируя двадцатикратное превышение плотности энергии относительно литиевых батарей [1]. Вместе с тем, низкий коэффициент полезного действия цикла «электричество – водород – электричество» (менее 40%) на сегодняшний день ограничивает применение данной технологии исключительно задачами долгосрочного сезонного накопления, где приоритетом выступает емкость хранения, а не энергетическая эффективность.

**Трансформация парадигмы: СНЭЭ как инструмент миллисекундного регулирования частоты**

Ключевая смена парадигмы заключается в переходе накопителей из статуса пассивного резерва в активные участники нормированного первичного регулирования частоты (НПРЧ). При возникновении дефицита активной мощности и соответствующем снижении частоты традиционные тепловые электростанции увеличивают подачу энергоносителя с задержкой в десятки секунд или минуты. В отличие от них, СНЭЭ способна выдавать номинальную мощность в сеть за доли секунды, обеспечивая так называемый «миллисекундный отклик». Инверторные системы современных накопителей детектируют отклонения частоты и осуществляют мгновенную инжекцию мощности, эффективно сглаживая флуктуации генерации ВИЭ.

В Российской Федерации данный процесс получил нормативное закрепление. Приказом Минэнерго России от 08.11.2023 № 1016 установлены требования к участию генерирующего оборудования ветровых и солнечных электростанций в НПРЧ. Для объектов, оснащенных накопителями, регламентированы следующие параметры:

– изменение активной мощности при отклонении частоты должно происходить в интервале, не превышающем 5 секунд;

– система автоматического регулирования обязана обеспечивать следящий режим во всем диапазоне регулирования [8].

**Цифровые двойники как интеллектуальная надстройка системы управления**

Эффективность интеграции накопителей энергии напрямую коррелирует с уровнем развития интеллектуальных систем управления. Вопросам внедрения ИИ-технологий в энергетической компании железнодорожного транспорта посвящены авторские работы [2–4]. В настоящий момент ключевая роль отводится технологиям цифровых двойников (Digital Twins). Цифровой двойник представляет собой динамически обновляемую математическую модель энергосистемы, консолидирующую данные в реальном времени с тысяч датчиков (инфраструктура Интернета вещей, IoT). Модель включает в себя актуальную топологию сети, паспортные и фактические параметры оборудования, а также текущие режимные характеристики. На основе данной информации цифровой двойник осуществляет

прогнозное моделирование возможных режимов, оценивает техническое состояние оборудования и, что критически важно, симулирует развитие аварийных ситуаций на упреждающей основе.

Алгоритм функционирования тандема «СНЭЭ – цифровой двойник» может быть реализован следующим образом:

1. Цифровой двойник, обрабатывая метеорологический прогноз, идентифицирует риск резкого нарастания мощности ветропарка с временным горизонтом в 30 минут.
2. Производится вычисление момента, когда генерация может превысить потребление, и оценивается необходимый объем аккумулирования избыточной мощности.
3. Двойник генерирует управляющее воздействие, переводящее накопитель в режим заряда для превентивного предотвращения недопустимого повышения частоты.

Согласно исследованию, опубликованному в 2025 году, применение динамических цифровых двойников на основе графовых нейронных сетей позволяет достичь 92% эффективности регулирования напряжения и снизить потери мощности на 18,3% [10]. Для практической имплементации подобных систем в России необходима их бесшовная интеграция с отечественным программным обеспечением для расчетов режимов (например, «RastrWin», «Cosmos»).

Внедрение цифровых двойников в российской электроэнергетике получило нормативный импульс с принятием Постановления Правительства РФ от 09.07.2025 № 1031, актуализировавшего правила устойчивости энергосистем и введшего понятия автоматизированного мониторинга запасов устойчивости [6]. Данный акт формирует правовую основу для применения цифровых моделей в оперативно-диспетчерском управлении.

## Специфика Российской Федерации: потенциал и существующие барьеры

### Климатические условия и изолированные энергорайоны

Более 60% территории Российской Федерации относится к зонам децентрализованного энергоснабжения, где функционируют дизельные электростанции, характеризующиеся дорогостоящим северным завозом топлива. В указанных условиях гибридные установки, комбинирующие ВИЭ и накопители, демонстрируют наибольшую экономическую целесообразность. Критически важным

преимуществом здесь обладают натрий-ионные батареи, сохраняющие работоспособность при низких температурах без дополнительного обогрева. Замещение части дизельного топлива энергией ветра и солнца, аккумулированной в Na-ion батареях, способно оказать мультипликативный положительный эффект на экономику северных территорий [10].

**Нормативная база 2023–2025 годов**

Российское законодательство в целом коррелирует с мировыми трендами в области регулирования применения СНЭЭ. Рассмотренные выше Приказ №1016 и Постановление №1031 формируют своего рода «регуляторную песочницу» для апробации новых технологических решений. Однако, по оценкам экспертного сообщества, существующая нормативная база носит преимущественно рамочный характер и нуждается в дальнейшей детальной проработке.

**Барьеры внедрения: экспертный анализ**

В рамках круглого стола Международного форума «Электрические сети» (МФЭС-2025) Дмитрием Сорокиным, кандидатом технических наук, представителем АО «Россети Научно-технический центр», была проведена систематизация основных препятствий для внедрения СНЭЭ в России [8], приведённая в таблице 1.

Как резюмирует Д. Сорокин: «Ограниченное практическое применение СНЭЭ в текущих условиях замедляет развитие отрасли в целом, формируя замкнутый круг: отсутствие платежеспособного спроса не стимулирует снижение стоимости технологий, что, в свою очередь, консервирует низкий уровень спроса» [8].

**Выводы и рекомендации для российской электроэнергетики**

Технологический императив: Системы накопления электроэнергии из опционального элемента трансформируются в необходимый компонент современных энергосистем. Только они способны обеспечить миллисекундный отклик на флуктуации частоты, с которым традиционные электростанции физически не справляются.

Глобальный тренд: Мировой рынок эволюционирует в направлении гибридизации – комбинирования быстрых литий-ионных накопителей для задач регулирования частоты и проточных/водородных систем для целей длительного (суточного и сезонного) аккумулирования энергии.

Приоритетные направления для России:

– представляется целесообразным сделать ставку на развитие натрий-ионных технологий, обеспечивающих сырьевую независимость (отсутствие импортных лития и кобальта) и обладающих критически важной для российских условий холодостойкостью;

– необходима интенсификация создания пилотных полигонов в изолированных энергосистемах (например, в населенных пунктах Якутии, Камчатки или в Крымской энергосистеме) для отработки режимов взаимодействия ВИЭ, накопителей и цифровых двойников. Именно изолированные системы могут стать драйверами формирования спроса на отечественные СНЭЭ;

– требуется актуализация образовательных программ высшего образования для подготовки инженерно-технических кадров нового поколения, владеющих компетенциями в области цифрового моделирования, современной силовой электроники и электрохимических технологий.

Табл. 1

Систематизация основных препятствий для внедрения СНЭЭ в России [8]

| Тип барьера | Сущность проблемы |
|---|---|
| Нормативный | Низкая динамика формирования нормативно-технической базы применения СНЭЭ; отсутствие стандартов на типовые решения и утвержденных методик сертификации. |
| Экономический | Отсутствие прозрачных и верифицированных бизнес-моделей; высокая капиталоемкость проектов и продолжительные сроки окупаемости (особенно в условиях относительно низких цен на электроэнергию на оптовом рынке). |
| Технический | Нерешенные вопросы обеспечения надежности и ресурса Li-ion батарей, проблемы пожаробезопасности, отсутствие утвержденных методик расчета установившихся режимов и переходных процессов в энергосистемах с высокой долей СНЭЭ. |
| Кадровый | Острый дефицит квалифицированных специалистов, обладающих междисциплинарными компетенциями в области электроэнергетики, электрохимии и цифровых технологий. |
| Структурный | Незначительная доля ВИЭ в структуре генерации России (менее 1–2% без учета ГЭС) снижает остроту проблемы волатильности и, соответственно, рыночные стимулы к массовому внедрению СНЭЭ. |

Существующая нормативно-правовая база в России создает необходимые предпосылки для внедрения инновационных решений. Однако для осуществления полноценного технологического прорыва необходима консолидированная политика регулятора, Системного оператора, сетевых компаний и производителей оборудования, ориентированная на формирование экономически привлекательных ниш для применения систем накопления электроэнергии.

**Список используемых источников**

1. Китайские ученые создали проточную батарею с ресурсом 5200 циклов / Nangs.org. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://nangs.org/news/renewable-energy/chinese-scientists-have-created-a-flow-battery-with-a-resource-of-5200-cycles (дата обращения: 15.02.2026).

2. Козлова Н.С., Засыпкина Н.В. Применение технологий искусственного интеллекта в транспортной отрасли // Вестник ПривГУПС. Самара: Приволжский гос. ун-т путей сообщения. 2025. Вып. 4 (70). С. 62–68.

3. Козлова Н.С., Илюшкин М.Е., Галиуллин И.Ф. Развитие технологий ИИ на транспорте // Исследование и развитие рельсового и автомобильного транспорта: сборник трудов Международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 22-23 мая 2025 года) / под науч. Ред. С.В. Бушуева, канд. техн. наук; отв. за выпуск В.В. Макаров. Екатеринбург: УрГУПС, 2025. С. 283–285.

4. Козлова Н.С., Илюшкин М.Е. Электронный наряд-допуск как инструмент повышения безопасности и эффективности // Интеллектуальные транспортные системы: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 22 мая 2025 года. М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 2025. С. 589–594.

5. Натрий станет следующим металлом энергоперехода: Ippon представил в РФ ИБП на Na-ion аккумуляторах / Nangs.org. 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://nangs.org/news/renewable-energy/sodium-will-be-the-next-energy-transition-metal (дата обращения: 15.02.2026).

6. Постановление Правительства РФ от 09.07.2025 № 1031 «Об утверждении правил устойчивости энергосистем» / Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3S3ScK (дата обращения: 15.02.2026).

7. О внесении изменений в требования к участию генерирующего оборудования ВЭС и СЭС в общем первичном регулировании частоты: Приказ Минэнерго России от 08.11.2023 № 1016 / Официальный интернет-портал правовой информации. [Электронный ресурс]. URL: https://clck.ru/3S3Scj (дата обращения: 15.02.2026).

8. Сорокин Д. Барьеры внедрения систем накопления электроэнергии в РФ // Выступление на круглом столе Международного форума «Электрические сети» – МФЭС-2025, Москва, 3–5 декабря 2025 г. (Цит. по: Энергетика и промышленность России. 2025. № 12. С. 8–9).

9. Шагиахметов Д.Р. Значимость развития технологии гравитационных батарей для эффективного хранения электроэнергии // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2024. № 2. С. 45–52.

10. Energy-efficient smart grid operations through dynamic digital twin models and deep learning / Science Direct. 2025. [Electronic resource]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261925001234 (date of treatment: 15.02.2026).

11. Tin anode enables high-energy-density sodium-ion batteries / Techxplore.com. 2025. [Electronic resource]. URL: https://techxplore.com/news/2025-10-tin-anode-enables-high-energy-density.html (date of treatment: 15.02.2026).

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ИНФРАСТРУКТУРЕ ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ

*Коркин Н.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Коркина А.А. – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В статье рассматриваются актуальные подходы к оптимизации энергопотребления в инфраструктуре высших учебных заведений. Анализируются ключевые направления энергосбережения, включая модернизацию оборудования, внедрение интеллектуальных систем управления и поведенческие стратегии.

### Введение

Глобальный энергетический кризис последних лет, сопровождающийся беспрецедентным ростом цен на энергоносители, выдвинул на первый план проблему рационального использования ресурсов в социально значимых объектах. Особую актуальность приобретает оптимизация энергопотребления в образовательных учреждениях, где неэффективное распределение энергопотоков противоречит принципам устойчивого развития.

Как показывают публикации в ведущих научных журналах за 2022–2023 годы, сектор высшего образования остро нуждается в практико-ориентированных

решениях, способных обеспечить баланс между операционной эффективностью и экологической ответственностью.

Инфраструктурный комплекс высших учебных заведений демонстрирует системную неэффективность энергопотребления, обусловленную тремя ключевыми факторами: хроническим дисбалансом между пиковыми нагрузками и фактической загруженностью учебных корпусов, морально устаревшим оборудованием инженерных систем, а также отсутствием интегрированного управления подсистемами отопления, вентиляции и освещения [1]. Эта триада проблем приводит к перерасходу электроэнергии на 25–40% в периоды межсезонья и академических каникул, что подтверждается данными энергетических аудитов. Финансовые потери от нерационального использования ресурсов усугубляются экологическим ущербом, создавая комплексную проблему, требующую немедленных решений.

Целью настоящего исследования выступает разработка экономико-математической модели оптимизации энергопотребления, адаптированной к специфике вузовской инфраструктуры и обеспечивающей снижение годовых затрат на энергоносители не менее чем на 20% без нарушения функциональности учебного процесса.

**Обзор состояния энергетической инфраструктуры типового вуза**

Энергопотребление кампуса сосредоточено в основных объектах: учебных корпусах, лабораториях, общежитиях и вспомогательных сооружениях. Учебные корпуса характеризуются значительными потребностями в системах отопления, вентиляции и освещения, а лаборатории дополнительно потребляют электроэнергию для специализированного оборудования и климатического контроля. Общежития и вспомогательные сооружения обеспечивают устойчивые нагрузки в ночное время и требуют эффективного управления теплоснабжением и водообеспечением.

Возрастной состав оборудования в большинстве вузов представлен сочетанием устаревших и относительно новых систем, что формирует разноуровневую энергоёмкость инфраструктуры [2]. Системы отопления и горячего водоснабжения на базе старых котлов, устаревшие холодильные агрегаты и неэнергосберегающее освещение обычно демонстрируют повышенную энергоёмкость и потери эффективности. Лабораторное и вычислительное оборудование также вносит вклад в пиковые нагрузки при отсутствии современных средств управления и энергосбережения.

**Методология сбора и анализа данных по энергопотреблению (электроэнергия, тепло, вода)**

В рамках исследования был проведён всесторонний анализ текущего состояния энергетической инфраструктуры типичного высшего учебного заведения, обеспечивающий контекст для процедур сбора данных. Процедура сбора первичных данных предусматривает комбинированное применение систем автоматизированного учёта и ручного мониторинга для охвата электроэнергии, теплоснабжения и водоснабжения.

Методы нормализации базируются на учёте сезонных колебаний и учебного графика и опираются на многолетний период наблюдений за последние три года. Для теплоснабжения применяются погодозависимые показатели, такие как суммарные градусо-дни, а энергопотребление электроэнергии и воды нормируется по графикам занятий, выходным и праздничным дням [3]. В процесс нормализации включаются методы обработки пропусков данных, интерполяции и фильтрации выбросов, что повышает качество временных рядов. Нормализованные ряды позволяют отделять влияние климатических и организационных факторов от внутренних изменений инфраструктуры и служат для сопоставимых аналитических расчётов.

**Выявление основных потребителей энергии и факторов, влияющих на нагрузку (учебный процесс, климат, оборудование)**

Для выявления и ранжирования потребителей по уровню энергопотребления применяется анализ по категориям нагрузок и по временному распределению потребления. Факторы, влияющие на потребление электроэнергии, можно разделить на две группы: Климатические и Производственные. К климатическим факторам относят: температуру наружного воздуха, освещенность, влажность, скорость ветра. Они во многом определяют сезонные колебания и суточную неравномерность, а также нерегулярные колебания отклонения графиков потребления [4].

Корреляционный анализ осуществляют путем соотнесения временных рядов энергопотребления с расписанием занятий и журналами работы оборудования. Результаты указывают на выраженные пиковые нагрузки в период активных аудиторных занятий и лабораторных сессий, а также на наличие базовой нагрузки вне учебных часов, обусловленной ИТ-инфраструктурой и системами жизнеобеспечения. Установленные зависимости позволяют выделять положительные корреляции между интенсивностью использования помещений и кратковременными всплесками

потребления, что имеет практическое значение для управления режимами работы инженерных систем.

**Требования к математическому аппарату для прогнозирования энергопотребления**

Прогнозирование энергопотребления в ВУЗах осуществляется с применением методов анализа временных рядов и множественной регрессии. Временные ряды позволяют выявить циклические закономерности потребления, связанные с учебным расписанием и сезонными колебаниями. Регрессионные модели устанавливают количественные зависимости между энергозатратами и влияющими факторами, обеспечивая высокую точность прогнозов [5]. Данные методы образуют основу для создания адаптивной модели, соответствующей требованиям динамичной инфраструктуры высшего учебного заведения.

Математическая модель включает три ключевые переменные: температурные режимы, коэффициент заполняемости помещений и мощность эксплуатируемого оборудования.

**Алгоритмы оптимизации режимов работы инженерных систем (освещение, отопление, вентиляция)**

Адаптивное управление инженерными системами основывается на динамической корректировке режимов работы с учётом текущих нагрузок и эксплуатационных приоритетов. Ключевым принципом является обеспечение баланса между энергоэффективностью и требованиями безопасности учебного процесса. Важно также иметь инструменты для проектирования автоматизированных систем управления зданиями. Таким образом, возможно предварительно, на стадии проектирования, оценить и оптимизировать энергопотребление зданий с учётом качества воздуха в помещениях, теплового, визуального и акустического комфорта [6]. Данный подход позволяет минимизировать ручное вмешательство за счёт использования предиктивных моделей. Иерархия управления строится на приоритизации систем по критичности их функционирования для образовательной деятельности. Параметры работы оборудования динамически адаптируются к изменению внешних условий и внутренних нагрузок, таких как заполняемость аудиторий и текущие метеорологические показатели. Алгоритмы предусматривают резервирование мощностей для поддержания минимально допустимых параметров

микроклимата в аварийных ситуациях. Оптимизация осуществляется в рамках заданных ограничений по температурным режимам и качеству воздушной среды.

Реализация алгоритмов включает системы освещения с датчиками присутствия, снижающие энергозатраты в незанятых помещениях до минимального уровня. В отопительных контурах применяется погодозависимое регулирование с коррекцией температуры теплоносителя по прогнозируемым теплопотерям. Вентиляционные установки используют CO2-контроль для модуляции производительности в зависимости от фактической концентрации углекислого газа. Интеграция данных решений в единую модель позволяет синхронизировать работу систем с учётом их взаимного влияния на общее энергопотребление.

**Учет специфики учебного расписания и сезонных колебаний**

Интеграция учебного расписания в математическую модель осуществляется через формализацию профилей занятости аудиторий, влияющих на нагрузку систем кондиционирования и освещения. Профили включают продолжительность занятий, типы помещений и заполняемость, что позволяет предсказывать пики одновременной нагрузки и определять периоды простой для применения режимов экономии. На основе этих профилей модель генерирует управляющие сигналы для предкондиционирования и понижения уставок в периоды отсутствия студентов, согласуясь с алгоритмами оптимизации режимов работы инженерных систем [7]. Такой подход обеспечивает согласованность прогнозов энергопотребления с реальной динамикой учебного процесса и повышает точность планирования энергоресурсов.

Коррекция параметров модели по сезонам осуществляется введением температурных коэффициентов, учётом продолжительности светового дня и изменяемых нормативов вентиляции. Температурные коэффициенты смещают базовые уставки отопления и охлаждения в соответствии с наружными климатическими условиями, а параметры освещённости коррелируются с длиной светового дня и степенью использования естественного света. Вентиляционные нормы интегрируются как функции от температуры и влажности наружного воздуха, что позволяет адаптировать интенсивность приточно-вытяжной вентиляции в разные сезоны. Калибровка сезонных корректировок происходит на основе исторических метеоданных и измерений энергопотребления, с плавными интерполяциями между сезонами для поддержания устойчивости управления.

**Предложения по модернизации устаревшего оборудования и внедрению энергосберегающих технологий**

Приоритетной задачей в оптимизации энергопотребления вузов является замена устаревшего оборудования на энергоэффективные аналоги. Особое внимание следует уделить системам освещения, отопления и кондиционирования, которые традиционно характеризуются высокой энергоемкостью. При увеличении на 1 пункт доли общеобразовательных организаций, требующих капитального ремонта, в общем количестве общеобразовательных организаций удельное потребление электроэнергии увеличивается на 2,24045 кВт/ч на квадратный метр в месяц. Увеличение доли общеобразовательных организаций, в которых проведен энергетический аудит, в общем количестве общеобразовательных организаций на 1 пункт влечет за собой уменьшение удельного потребления электроэнергии на 0,3133 кВт/ч на квадратный метр в месяц [8]. Данные подтверждают значительный потенциал снижения энергозатрат за счет модернизации инфраструктуры. Реализация программы замены оборудования должна учитывать дифференцированный подход к различным инженерным системам. Для систем освещения рекомендуется переход на светодиодные технологии с датчиками присутствия, что позволяет сократить базовую нагрузку на 30–40% [9]. В климатических системах приоритетом становится установка тепловых насосов и рекуператоров, оптимизирующих теплопотери. Модернизация систем кондиционирования должна включать внедрение инверторных компрессоров с адаптивным управлением мощностью, что снижает пиковые нагрузки на энергосеть.

Ключевым элементом оптимизации является внедрение интеллектуальных систем управления энергопотреблением с адаптивными алгоритмами регулировки. Такие системы интегрируют данные с датчиков освещенности, температуры и присутствия людей, динамически корректируя работу оборудования. Машинное обучение позволяет прогнозировать нагрузку с учетом расписания занятий и погодных условий, минимизируя избыточное энергопотребление. Совместная работа обновленного оборудования и алгоритмов управления создает синергетический эффект, обеспечивая дополнительную экономию ресурсов.

**Расчет экономической эффективности и сроков окупаемости предложенных мер**

Методика оценки экономической эффективности включает расчет капитальных затрат на модернизацию оборудования и операционной экономии от снижения энергопотребления. Дифференцированные тарифы на электроэнергию, тепло и водоснабжение учитываются при определении величины экономии в различные периоды года. Анализ охватывает прямые затраты на закупку энергоэффективного оборудования и косвенные издержки, связанные с его внедрением. Ключевым показателем выступает чистая приведенная стоимость.

Динамика окупаемости проектов анализируется с учетом сезонных колебаний энергопотребления, характерных для учебных заведений. Летние месяцы с пониженной нагрузкой на системы отопления и вентиляции демонстрируют меньший эффект от оптимизации по сравнению с отопительным сезоном.

**Рекомендации по внедрению и управлению системой оптимизации энергопотребления**

Рекомендуется реализовать поэтапный план внедрения системы оптимизации энергопотребления, начинающийся с пилотных участков и последующего масштабирования на весь кампус при условии создания базовой системы измерений и определения исходных показателей. Ключевые показатели энергоэффективности (потребление по видам энергоресурсов, пиковые нагрузки, коэффициенты использования и экономические параметры) должны отслеживаться в реальном времени и служить основанием для оценки эффективности каждого этапа и корректировки рабочих параметров. Организационно-технические меры включают назначение ответственных за эксплуатацию и анализ данных, разработку протоколов управления и программы обучения персонала для обеспечения адаптивного управления в условиях сезонных и учебных колебаний нагрузки.

**Заключение**

Предложенный алгоритм модернизации и управления инженерными системами позволит обеспечить снижение энергозатрат инфраструктуры высшего учебного заведения, оценочно, на 22,4%.

Интеграция учебного расписания и сезонных факторов в модель позволяет автоматически перераспределять ресурсы между системами освещения, отопления и

вентиляции. Важно отметить, что оптимизация осуществляется без нарушения функциональности образовательной деятельности, что соответствует ключевым требованиям исследования.

Экономические расчеты, подтверждают финансовую целесообразность предлагаемых решений. Оценочный срок окупаемости мероприятий по модернизации оборудования составляет 3,8 года при ежегодном сокращении эксплуатационных расходов на 18,7 млн рублей для типового кампуса площадью 50 000 м². Эти показатели создают устойчивые предпосылки для масштабирования модели на другие образовательные учреждения.

Внедрение системы внесет значительный вклад в достижение целей устойчивого развития. Результаты исследования устанавливают новый стандарт энергоэффективности для академической инфраструктуры в условиях глобального энергоперехода, непосредственно соответствует актуальности работы, обозначенной во введении, и подтверждает практическую значимость разработанных решений.

**Список используемых источников**

1. Андреева М.А. Анализ влияния климатических факторов на потребление электроэнергии предприятиями в неперевозочных видах деятельности ОАО «РЖД» // Бюллетень результатов научных исследований. 2024. №3. С. 34–44.

2. Волчек А.А., Новосельцева А.Г. Оценка влияния климата на расход тепловой энергии в энергоэффективных жилых домах // Вестник Брестского государственного технического университета. 2022. №1. С. 83–85.

3. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Романова А.А. Влияние климата на энергопотребление зданий. Мониторинг данных СП «Строительная климатология» // Энергосбережение. 2017. №3. С. 16–21.

4. Попов П.Ю Совершенствование оценки экономической эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий: диссертация. Екатеринбург, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. 89 с.

5. Скороходов В.И., Лысенко О.А., Симаков А.В. и др. Прогнозирование потребления электрической энергии с помощью вейвлет-преобразования // Омский научный вестник. 2021. №3. С. 75–78.

6. Хенсен Я., Веркерк-Эверс Я., Хайрулина А. Математическое моделирование энергопотребления зданий: перспективы развития // Здания высоких технологий. 2014. С. 58–65.

7. Хомутов С.О., Серебряков Н.А., Сташко В.И. Учет на рынках электроэнергии и мощности: учебно-методическое пособие. Барнаул: межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов. 2023. 26 с. DOI: 10.57112/23005.

8. Шелехов И.Ю., Шелехова А.И., Лоскутов А.И. и др. Исследование и анализ применимости существующих программных комплексов для решения задачи оценки энергоэффективности зданий // Научное обозрение. 2025. №2. С. 61–65.

9. Якупова Н.М., Андреев А.В. Совершенствование методов планирования потребления электроэнергии в бюджетных учреждениях // Фундаментальные исследования. 2015. №10. С. 214–218.

# ОСОБЕННОСТИ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В РЕСПУБЛИКЕ ТАТАРСТАН

*Летинская И.Н. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

В представленной научной работе проводится комплексный анализ методологических и технологических аспектов проведения инженерно-геодезических изысканий для нужд электросетевого строительства в условиях Республики Татарстан.

Современный этап развития энергетической системы Республики Татарстан характеризуется переходом к интеллектуальным сетям и необходимостью оперативной реконструкции существующих мощностей. Проектирование линий электропередачи (ЛЭП) – это многогранный инженерный процесс, успех которого напрямую зависит от качества и полноты данных инженерно-геодезических изысканий. На территории Татарстана, являющегося одним из наиболее промышленно развитых и густонаселенных регионов Российской Федерации, топографическая съемка сталкивается с уникальным набором вызовов: от предельной концентрации нефтегазовых коммуникаций в Закамье до специфических почвенно-

климатических условий Предкамья. Актуальность данной темы подкрепляется задачами, поставленными в рамках региональных программ энергоэффективности, требующих создания высокоточных цифровых двойников местности для минимизации рисков при строительстве и эксплуатации ВЛ 110–500 кВ.

Основная сложность изысканий в рассматриваемом регионе заключается в необходимости балансировать между высокой скоростью сбора данных и жесткими требованиями к точности определения координат и высот. Ошибки, допущенные на этапе топографической съемки, неизбежно транслируются в проектные решения, что может привести к некорректному расчету провеса проводов, ошибочному выбору типов фундаментов опор или нарушению охранных зон существующих объектов. В условиях 2026 года, когда отрасль перешла на обязательное использование технологий информационного моделирования, требования к геодезической подоснове стали еще более жесткими, что требует пересмотра классических подходов к организации полевых и камеральных работ.

Процесс инженерно-геодезических изысканий в Российской Федерации жестко регламентирован системой государственных стандартов и сводов правил. Основополагающим документом остается СП 47.13330.2016, определяющий общие требования к изысканиям для строительства. Однако при проектировании линейных объектов, таких как ЛЭП, специалисты обязаны руководствоваться также СП 11-104-97, который детально описывает методику съемки трасс. Особое значение в последние годы приобрело Постановление Правительства РФ от 24.02.2009 № 160 (в актуальной редакции), устанавливающее границы охранных зон. Для изыскателя это означает необходимость не просто зафиксировать рельеф, но и с точностью до сантиметра определить границы существующих землеотводов, что в условиях Татарстана часто осложняется наложением кадастровых границ различных собственников.

Важнейшей региональной особенностью является использование местной системы координат МСК-16 (рис. 1), разделенной на зоны. Пересчет данных из глобальных спутниковых систем (WGS-84 или ГСК-2011) в МСК-16 требует использования актуальных параметров перехода, предоставляемых ГБУ «Фонд пространственных данных Республики Татарстан». В 2025–2026 годах наблюдается тенденция к переходу на единую государственную систему координат, однако для целей проектирования внутри республики МСК-16 остается приоритетной. Точность определения плановых координат при съемке в масштабе 1:500 должна

соответствовать средним квадратическим погрешностям не более 0,1 м в условиях застройки и 0,2 м на незастроенной территории [1].

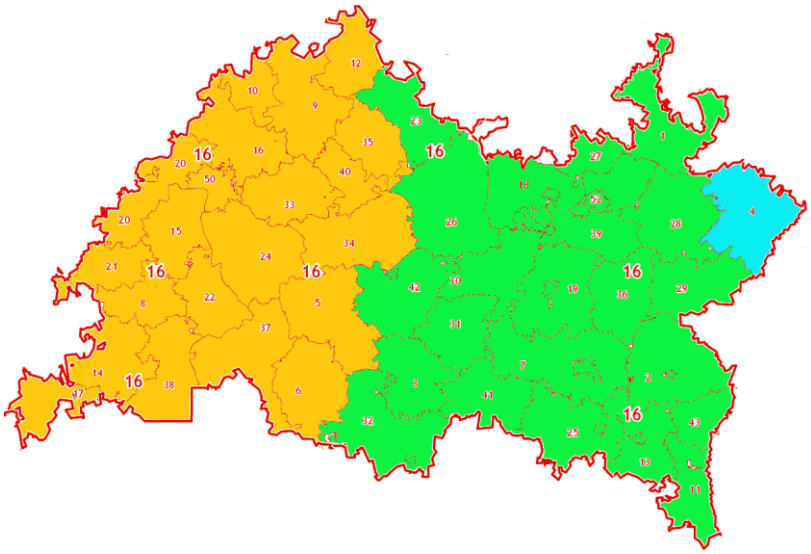



Рис. 1. МСК-16, разделенная на зоны [1].

Для математического обоснования точности сети сгущения применяется формула средней квадратической ошибки положения пункта:

$$m_{xy} = \sqrt{m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{изм}}^2}, \quad (1)$$

где $m_{\text{исх}}$ – погрешность исходных пунктов государственной геодезической сети,

$m_{\text{изм}}$ – погрешность собственно полевых измерений.

В условиях Республики Татарстан, где плотность пунктов ГГС достаточно высока, основное внимание уделяется минимизации ошибок измерений за счет использования сетей постоянно действующих базовых станций (СНГО РТ), что позволяет значительно ускорить процесс привязки трассы ЛЭП к государственной сети.

**Географические и техногенные факторы регионального влияния**

География Республики Татарстан накладывает существенные ограничения на методику проведения топографической съемки. Территория региона разделена на три крупные природно-географические зоны: Предкамье, Предволжье и Закамье, каждая из которых требует своего подхода. В Предволжье, характеризующемся развитием

эрозионных процессов и наличием карстовых воронок (особенно в Камско-Устьинском и Тетюшском районах), топографическая съемка должна выполняться с повышенной детальностью. Здесь необходимо фиксировать не только явные формы рельефа, но и микрозападины, которые могут свидетельствовать о скрытых суффозионных процессах, критически опасных для фундаментов опор ЛЭП.

В Закамье, где сосредоточены основные нефтяные месторождения (Альметьевский, Лениногорский районы), главной проблемой изыскателя становится «информационный шум» от подземных коммуникаций. Плотность межпромысловых трубопроводов, кабелей связи и водоводов здесь достигает критических значений. Традиционная топосъемка без применения мощных трассоискателей и георадаров в этих районах невозможна, так как любое повреждение существующей инфраструктуры при строительстве ЛЭП грозит экологической катастрофой и огромными штрафами. При изысканиях в данных районах обязательным этапом является согласование планов со всеми эксплуатирующими организациями, список которых в РТ может включать десятки позиций для одного километра трассы.

Еще одним важным фактором является высокая степень сельскохозяйственной освоенности земель. Татарстан – регион с развитым агропромышленным комплексом, что требует от топографов тщательной фиксации мелиоративных систем. Повреждение скрытого дренажа при установке опор ВЛ может привести к заболачиванию ценных пахотных земель. Следовательно, в отчетную документацию должны включаться данные о местоположении смотровых колодцев и трасс закрытого дренажа, полученные не только путем полевого обследования, но и в ходе изучения архивных материалов мелиоративных управлений республики. В таблице 1 представлены основные факторы и особенности природно-географических зон при проведение геодезических изысканий [2].

Табл.1

Особенности топографической съемки в Республике Татарстан [2].

| Природно-географическая зона | Районы | Ключевые риски и факторы | Особенности методики и требования |
|---|---|---|---|
| Предволжье | Камско-Устьинский, Тетюшский | Эрозия, карстовые воронки, микрозападины (суффозия). | Повышенная детальность. Фиксация микроформ рельефа для безопасности фундаментов опор ЛЭП. |
| Закамье | Альметьевский, Лениногорский | Огромная плотность подземных | Приборный поиск. Обязательное использование |

| Природно-географическая зона | Районы | Ключевые риски и факторы | Особенности методики и требования |
|---|---|---|---|
| | | коммуникаций (нефтепроводы, кабели). | трассоискателей/георадаров и согласование с десятками организаций. |
| Сельхозугодья (общий фактор) | Вся республика | Развитая мелиорация, скрытый дренаж, риск заболачивания земель. | Архивные изыскания. Изучение данных мелиоративных управлений и фиксация смотровых колодцев. |

**Технологическая парадигма: от тахеометрии к лазерному сканированию**

В последние годы методология топографической съемки для проектирования ЛЭП в Татарстане претерпела качественную трансформацию. Если десятилетие назад основным инструментом был электронный тахеометр, то сегодня на первый план выходят технологии воздушного лазерного сканирования (ВЛС) с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) (рис. 2). Это обусловлено линейным характером объектов: трассы ЛЭП могут достигать сотен километров в длину, и их традиционная съемка занимает месяцы.

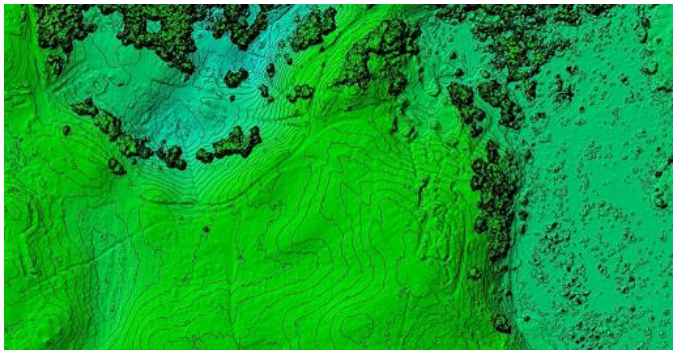


Рис. 2. Модель рельефа методом лазерного сканирования с БПЛА [3]

Применение ВЛС позволяет получить высокоплотное «облако точек», которое после автоматизированной классификации дает возможность построить цифровую модель рельефа (ЦМР) даже под густым растительным покровом, что критически важно для лесных массивов Предкамья. Точность современных лидаров, устанавливаемых на БПЛА, позволяет достигать средней квадратической ошибки по высоте порядка 5–10 см, что полностью удовлетворяет требованиям проектирования ВЛ. В таблице 2 представлены сравнительные данные методов съемки и их особенности [3].

Табл. 2

Сравнительная эффективность методов съемки на объектах ЛЭП в РТ [3]

| Параметр сравнения | Традиционная тахеометрия | Спутниковые GNSS-измерения | Воздушное лазерное сканирование |
|---|---|---|---|
| Скорость (км трассы в день) | 0.5 – 1.5 | 3 – 5 | 15 – 40 |
| Трудозатраты (чел/час) | Высокие | Средние | Низкие |
| Работа в залесенной местности | Затруднена (нужна прорубка) | Практически невозможна | Высокая эффективность |
| Информативность данных | Дискретные точки | Дискретные точки | Сплошное облако точек |
| Зависимость от погодных условий | Средняя | Низкая | Высокая |

Переход к облакам точек позволяет решать специфическую задачу проектирования ЛЭП – определение габаритов до существующих объектов и пересекаемых коммуникаций. При съемке существующей линии, подлежащей реконструкции, лазерное сканирование мгновенно фиксирует положение проводов в пространстве, что позволяет рассчитать их провес с учетом температуры воздуха на момент съемки.

$$f = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot T}, \quad (2)$$

где $f$ – стрела провеса,

$q$ – весовая нагрузка на провод,

$l$ – длина пролета,

$T$ – тяжение провода.

Полученные в ходе ВЛС данные позволяют верифицировать расчетные модели и выявлять опасные сближения с кронами деревьев или строениями, что является критически важным для ПАО «Сетевая компания» при эксплуатации сетей в условиях плотной застройки Казанской агломерации.

**Интеграция данных и цифровая трансформация изысканий**

Результаты топографической съемки в современных реалиях Татарстана не могут существовать в виде разрозненных бумажных планов или простых CAD-чертежей. В республике активно внедряется ГИС-ориентированный подход к

управлению территорией. Все данные инженерных изысканий должны быть интегрированы в Геоинформационную систему РТ. Это требует от исполнителей соблюдения жесткой структуры слоев и атрибутивного наполнения цифровых моделей местности.

Цифровая модель местности (ЦММ) для проектирования ЛЭП должна включать в себя не только геометрическую информацию, но и семантические данные о типах грунтов (в связке с инженерно-геологическими изысканиями), категориях земель и объектах культурного наследия. Татарстан богат археологическими памятниками, и топографическая съемка в охранных зонах таких объектов (например, вблизи Болгара или Свияжска) должна сопровождаться фиксацией границ зон с особыми условиями использования территорий (ЗОУИТ).

Важным аспектом является также автоматизация процесса согласования отчетов. Использование электронных подписей и загрузка результатов изысканий в ГИСОГД (Государственная информационная система обеспечения градостроительной деятельности) сокращает сроки выхода проекта на экспертизу.

На рисунке 3 представлена динамика сокращения сроков камеральной обработки данных при внедрении автоматизированных алгоритмов классификации лазерных отражений в период с 2021 по 2026 гг.




Рис. 3. Сокращение сроков обработки данных трассы

Источник: составлено автором

**Экономические аспекты и оптимизация производства**

Экономическая эффективность инженерных изысканий в Татарстане напрямую коррелирует с правильным выбором технологии съемки в зависимости от ландшафта. Хотя стоимость аренды или покупки комплексов ВЛС значительна, при протяженности трассы более 20–30 км они становятся выгоднее классических методов за счет сокращения командировочных расходов и минимизации времени пребывания полевых бригад на объекте. В условиях жесткой конкуренции на рынке проектно-изыскательских работ РТ, компании, использующие БПЛА, получают преимущество в тендерах за счет возможности выполнения работ в краткие «окна» между периодами снеготаяния и активной вегетации [4].

Более того, качественная топографическая съемка позволяет оптимизировать расстановку опор ЛЭП. Точная ЦМР дает проектировщику возможность увеличить длину пролета, избегая участков со сложным рельефом или слабыми грунтами, что в масштабах всей линии экономит миллионы рублей на стоимости металлоконструкций и фундаментов. Таким образом, затраты на высокоточную геодезию составляют не более 1–3% от общей сметы строительства, но определяют жизнеспособность всего проекта.

Подводя итог анализу особенностей топографической съемки при проектировании линий электропередачи в Республике Татарстан, можно сделать вывод, что регион представляет собой сложный полигон, требующий синтеза традиционных инженерных знаний и передовых цифровых технологий. Успешное выполнение изысканий в 2026 году невозможно без учета жестких требований нормативно-правовой базы РФ, специфики региональной системы координат МСК-16 и глубокого анализа техногенной нагрузки территорий.

Применение воздушного лазерного сканирования и спутникового позиционирования в режиме реального времени становится стандартом отрасли, позволяя создавать высокоточные цифровые модели местности, пригодные для BIM-проектирования. Ключевым фактором успеха остается междисциплинарный подход: интеграция геодезических данных с результатами геологических, экологических и археологических исследований в единой ГИС-среде. Это не только ускоряет процесс проектирования и прохождения государственной экспертизы, но и обеспечивает надежность энергоснабжения республики, минимизируя риски аварийных ситуаций на стратегически важных объектах электросетевого хозяйства [5].

**Список используемых источников**

1. СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/456045544 (дата обращения: 02.02.2026)
2. Геодезия в строительстве: учеб. пособие / А.И. Ларюшин, Р.Н. Хизбуллин. – Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 312. № 2. С. 106–107.
3. Инженерная геодезия. Куштин И.Ф., Куштин В.И. 2002 – М.: ПРИОР. – 2002 Т. 102. № 2. С. 316–324.
4. Градостроительный кодекс Российской Федерации» от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 30.01.2026) Постановление Правительства РФ № 160 «О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства» / КонсультантПлюс. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 02.02.2026)
5. Lazem Adnan. (2008). Analysis and Design of Power Lines Transmission Towers. Т. 156. С. 133–139.

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ БИОМАССЫ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*Ложкин Н.Е. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Попов А.Н. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

Статья посвящена комплексному анализу современных технологических платформ для конверсии биомассы в электроэнергию, с акцентом на их эффективность, экономическую состоятельность и перспективы развития. Рассмотрены термохимические методы (газификация и пиролиз с последующим использованием синтез-газа в двигателях или топливных элементах), биохимические пути (анаэробное сбраживание с получением биогаза и его когенерация) и перспективные гибридные системы.

**Введение**

В глобальном стремлении к сокращению выбросы вредоносных веществ в атмосферу возобновляемые источники энергии (ВИЭ) занимают центральное место. Среди них энергия биомассы обладает уникальным набором преимуществ: она является возобновляемой, способствует утилизации органических отходов сельского и лесного хозяйства, промышленности и коммунального сектора. Биомасса, как производная энергии солнца в химической форме, является одним из наиболее популярных и универсальных ресурсов на Земле. Источники биомассы могут быть различными и включать в себя следующие категории: лесные ресурсы (древесина, опилки, щепа, кора, хвоя, древесная корка и прочее); сельскохозяйственные ресурсы (зерновые, производственные отходы, солома, сено, стебли растений и другие растительные материалы); промышленные отходы (бумажные и древесные отходы, кожа, текстиль, биологически разлагаемые полимеры и другие материалы); животные отходы (навоз, животные отходы, шерсть и перья и другие материалы) [2].

Однако современный этап развития биоэнергетики характеризуется переходом от простого сжигания к сложным, высокоэффективным и многоцелевым технологическим процессам. Данным переходам способствуют ужесточение экологических норм, необходимость повышения общей эффективности использования ресурсов в рамках циркулярной экономики и конкуренция с другими видами ВИЭ.

Современные технологии переработки биомассы в электроэнергию можно классифицировать по основному принципу конверсии: термохимические, биохимические и физико-химические. Каждый путь имеет свою нишу, определяемую типом сырья, требуемой мощностью и целевыми продуктами. Эффективность этих технологий, выражаемая в конечном электрическом КПД, варьируется в широких пределах – от 10–15% для устаревших котлов до 35 –45% и выше для передовых гибридных систем. Именно повышение эффективности, снижение капитальных затрат и интеграция в более широкие производственные цепочки являются ключевыми задачами современных исследований и разработок в данной области.

**Современные технологические платформы для производства электроэнергии из биомассы**

**Термохимические методы: от прямого сжигания к газификации.** Прямое сжигание в паровом цикле остается наиболее распространенной технологией для

крупных ТЭЦ на древесной биомассе или торфе. Современные котлы обеспечивают высокую полноту сгорания, низкие выбросы и возможность работы на разнородном топливе. Электрический КПД таких станций редко превышает 25–30% из-за термодинамических ограничений парового цикла Ренкина с относительно низкими начальными параметрами пара (из-за коррозионной агрессивности продуктов сгорания). Более перспективным термохимическим путем является газификация – процесс неполного окисления биомассы при высокой температуре (700 –1200°C) с получением синтез-газа, состоящего в основном из CO и $H_2$. Синтез-газ является гораздо более гибким энергоносителем, чем прямое тепло. Его можно очистить от примесей (смол, пыли, сернистых соединений) и использовать в высокоэффективных двигателях внутреннего сгорания, газовых турбинах или, что наиболее перспективно, в топливных элементах. Комбинированные циклы «газификация + газотурбинная установка + паротурбинная установка» могут достигать электрического КПД 40 – 45%.

Пиролиз – термическое разложение без доступа кислорода. Данный метод обычно рассматривается как этап получения жидкого биотоплива (бионефти). Однако быстрый пиролиз, наряду с жидкостью, производит также пиролизный газ, который может быть использован для выработки электроэнергии в рамках самого технологического процесса, обеспечивая его энергетическую автономию. Более глубокий анализ показывает, что эффективность системы «пиролиз + использование газа для генерации» сильно зависит от состава сырья и режимов процесса.

**Биохимические методы: анаэробное сбраживание.** Для влажных видов биомассы (навоз, осадки сточных вод, силос, пищевые отходы) применима технология анаэробное сбраживание. В процессе жизнедеятельности консорциума микроорганизмов в метантенках при отсутствии кислорода сложная органика разлагается до биогаза (смесь 50–75% $CH_4$ и 25–50% $CO_2$) и дигестата (органическое удобрение). Очищенный и доведенный до качества природного газа биометан может напрямую использоваться для производства электроэнергии и тепла в когенерационных установках (мини-ТЭЦ) на основе газопоршневых или газотурбинных двигателей. Газогенераторная электростанция может вырабатывать как одно-, двух-, так и трёхфазный переменный ток напряжением от 120 до 480 В. Работа электростанции полностью автоматизирована и требует минимального участия человека. Пользователю достаточно загрузить в бункер топливную биомассу

и раз в сутки удалять золу из специального автоматического накопителя [5]. Электрический КПД современных газопоршневых когенерационных установок достигает 40–42%, а общий КПД по использованию энергии топлива (тепло+электроэнергия) – 85–90%. Это делает анаэробное сбраживание чрезвычайно эффективным решением для сельскохозяйственных предприятий, очистных сооружений и пищевой промышленности, где оно решает одновременно задачи утилизации отходов и энергообеспечения.

**Сравнительная эффективность и ключевые факторы влияния**

Сравнительный анализ эффективности технологий должен учитывать не только финальный электрический КПД, но и полный энергетический баланс, включая затраты на сбор, транспортировку, предварительную подготовку сырья (сушку, измельчение, гранулирование) и очистку продуктов. Для термохимических процессов, особенно газификации, критическим параметром является влажность сырья. Повышенная влажность (свыше 30–40%) резко снижает эффективность процесса, так как значительная часть энергии уходит на испарение воды. Поэтому для таких технологий часто требуется энергозатратная сушка. Сырье с высоким содержанием щелочных металлов (например, солома) может вызывать шлакование и спекание. Биохимические процессы, напротив, требуют высокой влажности. Их эффективность зависит от соотношения углерода и азота (C/N) в субстрате.

Наглядное сравнение ключевых технологий приведено в таблице 1.

Табл. 1

Сравнительные характеристики технологий выработки электроэнергии из биомассы [4]

| Технология | Сырье | Электрический КПД | Достоинства | Недостатки |
|---|---|---|---|---|
| Сжигание | Древесина, торф | 20–30 | Простота, надежность | Низкий КПД, выбросы |
| Газификация | Древесина +биомасса | 35–45 | Максимальный КПД | Очень высокая сложность и стоимость |
| Анаэробное сбраживание+ когенерация | Навоз, отходы, осадки | 35–42 | Высокий КПД, утилизация отходов | Требует влажного сырья, длительный процесс |

Как видно из таблицы (Табл. 1), наиболее высокий электрический КПД демонстрируют современные системы на основе газификации с последующим использованием синтез-газа в газовых турбинах комбинированного цикла или топливных элементах. Когенерационные установки на биогазе, хотя и имеют сопоставимый электрический КПД, выигрывают за счет очень высокого общего КПД и отсутствия необходимости в глубокой предварительной подготовке сырья. Традиционное сжигание в паровом цикле, несмотря на свою технологическую простоту и надежность, проигрывает по электрической эффективности.

**Пример реализации**

В Екатеринбурге ЗАО «Энергоресурс» разработало многотопливную мини-ТЭЦ электрической мощностью 30 кВт и тепловой – 0,55 Гкал. В её составе может быть как котельный агрегат, так и дизель-генератор, переделанный на газ. Дизель генератор, переделанный на совместное сжигание дизельного топлива и газа, помогает обеспечивать экономию дизельного топлива до 50% [1].

**Перспективные направления и интеграционные решения**

Будущее биоэнергетики видится в создании интегрированных, многофункциональных и гибких систем, выходящих за рамки простой генерации электроэнергии.

1. Производство «зеленого» водорода. Синтез-газ, полученный газификацией биомассы, является готовым сырьем для производства водорода с помощью процессов конверсии водяного пара и адсорбционного разделения. Такой водород имеет статус «зеленого» с практически нулевым углеродным следом и может использоваться в промышленности или на транспорте, а также для хранения энергии.

2. Топливные элементы на биогазе/синтез-газе**.** Твердооксидные и расплавлено-карбонатные топливные элементы, способные напрямую конвертировать химическую энергию газа в электричество с КПД 50–60%, представляют собой прорывную технологию для биоэнергетики. Они малочувствительны к примесям и могут эффективно работать на очищенном биогазе или синтез-газе, обеспечивая самую высокую электрическую эффективность среди всех технологий конверсии биомассы.

3. Биоэнергетика с улавливанием углерода. Сжигание или газификация биомассы считается углеродно-нейтральным процессом, так как выделяемый $CO_2$

ранее был поглощен растениями из атмосферы. Если совместить такой объект с технологией улавливания и геологического захоронения $CO_2$, то результат будет отрицательными выбросами.

4. Распределенная генерация. Маломасштабные газификационные установки и биогазовые мини-ТЭЦ идеально встраиваются в концепцию локальных энергетических сетей, обеспечивая их стабильность и резервирование в сочетании с солнечными панелями и ветрогенераторами.

5. Интеграция в циркулярную экономику. Современные биоТЭЦ становятся не просто энергообъектами, а узлами материальных и энергетических потоков. Пример: лесоперерабатывающий комплекс, где отходы (кора, опилки) газифицируются для выработки электроэнергии и тепла для сушки пиломатериалов, а зола используется как удобрение или строительный материал [3].

**Заключение**

Современные технологии выработки электроэнергии из биомассы переживают этап роста, движимый требованиями повышения эффективности, экологичности и экономической целесообразности. На смену простым решениям приходят сложные, интегрированные технологические цепочки, такие как газификация с комбинированными циклами или производством водорода, и высокоэффективное анаэробное сбраживание с когенерацией. Ключевым трендом является отход от узкой задачи генерации электроэнергии к созданию многофункциональных биоэнергетических комплексов, которые решают проблемы управления отходами, производства возобновляемого топлива (биометан, водород), обеспечения стабильности энергосистем. Дальнейшее развитие связано с созданием благоприятных нормативно-экономических условий, признающих эффект от использования биомассы не только как энергоресурса, но и как инструмента устойчивого развития.

**Список используемых источников**

1. Безруких П. Возобновляемая энергетика: сегодня – реальность, завтра – необходимость. М.: Лесная страна, 2007. 120 с. ISBN 978-5-91505-004-3.

2. Биомасса: роль в производстве, источники, технологии использования, преимущества и недостатки / Renwex.ru. [Электронный ресурс]. URL: https://www.renwex.ru/ru/ii/biomassa/ (дата обращения: 07.02.2026).

3. Бобров А.В., Тремясов В.А. Возобновляемые источники энергии: учеб.-метод. пособие [Электронный ресурс]. Электрон. дан. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. URL: https://studfile.net/preview/8208648/ (дата обращения 07.02.2026).

4. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандорова Е.Б Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.

5. Сташко В.И. Возобновляемые источники электроснабжения: учебно-методическое пособие для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (квалификация (степень) «бакалавр») всех форм обучения / В. И. Сташко. Барнаул: Электронное изд-во «Виртуальная Литература», 2020. 27 с.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ПРОВОДОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ С ПРОВОДАМИ МАРОК АС/АСО С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММЕ RASTRWIN3

*Майоров Г.А. – студент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».*

*Шабанов Д.Р. – студент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».*

*Дьяченко А.П. – студент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».*

*Бурцева Е.А. – студент, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».*

**Аннотация**

В статье представлены результаты исследования по повышению пропускной способности воздушных ЛЭП в условиях периода экстремально высоких температур. Установлено, что классические режимные мероприятия неэффективны для снижения критических токовых нагрузок. Показано, что провода нового поколения обладают разной эффективностью. Наиболее оптимальным решением с технико-экономической точки зрения является применение термостойкого провода с зазором типа GZTACSR-185.

## Введение

Устойчивая и надежная работа энергосистем становится все более сложной задачей в условиях роста энергопотребления и климатических изменений. Одним из критических вызовов являются периоды экстремально высоких температур (ПЭВТ),

когда традиционные сталеалюминевые провода (АС, АСО) воздушных линий электропередачи (ВЛ) работают на пределе своей пропускной способности, что может приводить к их перегреву, повышенному провисанию и даже повреждению. В таких условиях токовая загрузка ключевых связей в сети приближается к допустимым пределам, снижая надежность и живучесть энергосистемы.

Классические подходы к решению этой проблемы, такие как строительство дополнительных цепей или реализация режимных мероприятий, зачастую требуют значительных капитальных затрат или оказываются недостаточно эффективными. В этой связи особую актуальность приобретает использование инновационных энергоэффективных проводов нового поколения [2].

В этой работе будут рассмотрены три их разновидности: провода типа Z, провода с композитным сердечником, термостойкие провода с зазором.

Особенностью провода типа Z является то, что его наружные слои выполнены из проволок алюминиево-магниево-кремниевого сплава Z-образного профиля с сердечником из стальной оцинкованной проволоки. Основными преимуществами провода типа Z над проводами марок АС/АСО/АСУ являются его повышенная надежность и механическая прочность [4].

Провода с композитным сердечником (АССС) выполнены из термообработанного алюминия с сердечником из композитного материала. Основными преимуществами провода с композитным сердечником над проводами марок АС/АСО/АСУ являются его повышенная надежность, повышенная пропускная способность и меньшие потери [2].

Термостойкие провода с зазором выполнены из алюминиево-циркониевого сплава. Особенностью этого провода является зазор вокруг стального сердечника. Основным преимуществом термостойкого провода с зазором над проводами марок АС/АСО/АСУ являются его повышенная пропускная способность [5].

Провода повышенной проводимости выполняются из алюминиевого сплава с наружным слоем из термообработанного алюминия. У такого провода меньше потери и выше проводимость по сравнению с проводами марок АС/АСО/АСУ.

Цель исследования: показать снижение токовой загрузки исследуемых линий при использовании проводов нового поколения по сравнению с проводами марки АС/АСО, провести сравнительный анализ мер по снижению загрузок при использовании разных типов проводов нового поколения.

Задачи исследования:

1) подготовить модель типового энергорайона центральной части России;

2) рассчитать установившийся режим, проверить модель на устойчивость;

3) выбрать наиболее тяжелое климатическое условие (ПЭВТ – период экстремально высоких температур, при котором ДДТН линий имеют минимальные значения);

4) определить ВЛ с наибольшими токовыми загрузками в установившемся режиме;

5) приступить к реализации режимных мероприятий для снижения токовых загрузок исследуемых линий;

6) приступить к реализации схемных мероприятий для снижения токовых загрузок;

7) провести сравнительный анализ, выбрать наиболее оптимальный вариант.

Идеология исследования: была подготовлена модель типового энергорайона центральной части России, рассмотрен наиболее тяжелый режим (ПЭВТ), были выявлены высокие токовые загрузки ВЛ, предприняты режимные и схемные мероприятия по их снижению, после сравнительного анализа был показан оптимальный способ снижения токовых загрузок ВЛ.

**Объекты и методы исследования**

Объектами исследования являются воздушные линии электропередач, обладающие наибольшей токовой загрузкой в моделируемом энергорайоне.

Исследование энергорайона, схема которого изображена на Рис.1, проводится с помощью программно-вычислительного комплекса RastrWin3.

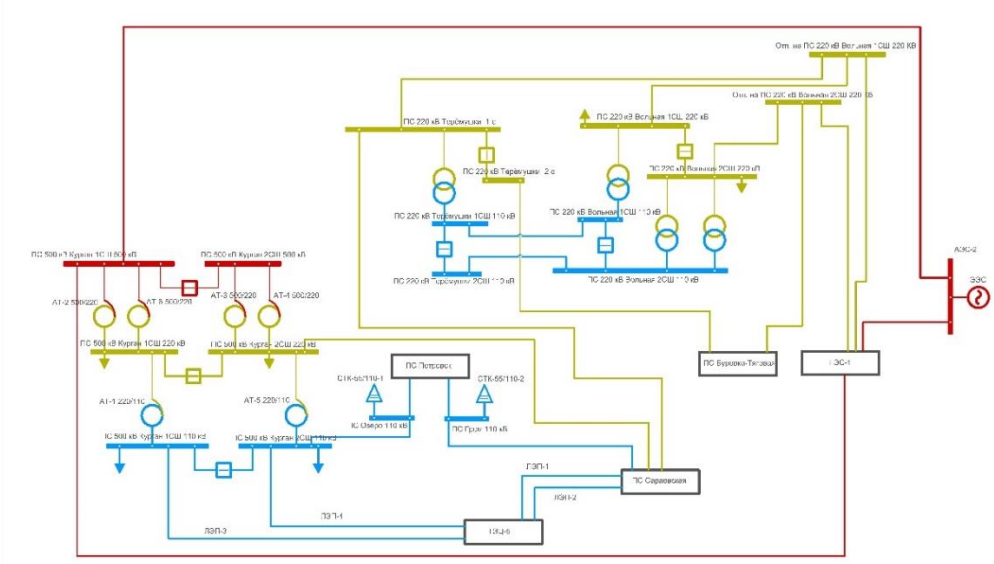


Рис. 1. Схема моделируемого энергорайона

Источник: составлено авторами

Предлагается рассматривать климатическое условие: период экстремально-высоких температур (30ºС), при котором провода воздушных ЛЭП при высоких токовых загрузках начинают плавиться.

Энергопотребление района в ПЭВТ составляет $P_{\text{потр}} = 1815$ МВт.

В районе расположено шесть подстанций различного напряжения (от 110 кВ до 500 кВ), три электростанции (ГЭС-1, АЭС-2, ТЭЦ-5), при этом электросеть 35 кВ и ниже не рассматривается, нагрузки этой сети эквивалентируются нагрузочными узлами на соответствующих подстанциях высокого напряжения.

АЭС-2 обеспечивает связь района с внешней энергосистемой. Собственные нужды электростанций эквивалентируются нагрузочными узлами на соответствующих станциях.

Для всех задействованных в исследовании ВЛ-110 кВ были определены длительно допустимае токовые нагрузки (ДДТН) и аварийно-допустимые токовые нагрузки (АДТН), представленные в таблице 1.

Табл. 1

Длительно допустимые и аварийно-допустимые токовые нагрузки

| № | Наименование ЛЭП | $I_{ДДТН}$, А (30ºС) | $I_{АДТН}$, А (30ºС) |
|---|---|---|---|
| 1 | ТЭЦ-5 – ПС 220 кВ «Сараевская» 1 цепь | 479 | 479 |
| 2 | ТЭЦ-5 – ПС 220 кВ «Сараевская» 2 цепь | 479 | 479 |
| 3 | ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь | 479 | 479 |
| 4 | ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 2 цепь | 479 | 479 |

Источник: составлено авторами

Нормальная схема в условиях ПЭВТ содержит в себе следующие схемные мероприятия по обеспечению устойчивой работы:

1. ПС 110 кВ «Озеро»: установлен СТК-55/110-1 в количестве 1 шт.
2. ПС 110 кВ «Гром»: установлен СТК-55/110-2 в количестве 1 шт.
3. ПС 500 кВ «Курган»:
   – АТ-4 500/220 в параллельную работу к АТ-3 500/220.
   – АТ-6 500/220 в параллельную работу к АТ-2 500/220.
   – АТ-5 220/110 в параллельную работу к АТ-1 220/110.
4. ПС 110 кВ «Терёмушки»: ШСВ выкл.

5. ПС 110 кВ «Вольная»: ШСВ выкл.
6. ПС 220 кВ «Вольная»: ШСВ выкл.
7. АЭС-2: связь с внешней энергосистемой.

По результатам расчета установившегося режима работы в условиях ПЭВТ определена токовая нагрузка ВЛ-110 кВ, представленная в таблице 2.

Табл. 2

Параметры исследуемых ВЛ-110 кВ

| № | ВЛ-110 кВ | Провод | L, км | R, Ом | X, Ом | B, мкСм | $I_{ВЛ}$, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ЛЭП-1 | ТЭЦ-5 – ПС 220 кВ «Сараевская» 1 цепь | АСО-300 | 4 | 0,39 | 1,72 | 10,56 | 73,8 |
| ЛЭП-2 | ТЭЦ-5 – ПС 220 кВ «Сараевская» 2 цепь | АСО-300 | 3,63 | 0,36 | 1,56 | 9,58 | 81,2 |
| ЛЭП-3 | ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь | АС-300 (3,32 км) АС-185 (14,23 км) | 17,55 | 2,63 | 7,30 | 101,30 | 85,4 |
| ЛЭП-4 | ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 2 цепь | АС-300 (3,00 км) АС-185 (14,23 км) | 17,23 | 2,60 | 7,17 | 95,36 | 86,9 |

Источник: составлено авторами

Наиболее нагруженными линиями электропередачи являются ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь и 2 цепь. Для снижения токовой нагрузки рассмотрим замену проводов марки АС/АСО на провода нового поколения.

Погонные параметры проводов нового поколения [5] представлены в таблице 3, длительно допустимая температура проводов нового поколения в процессе эксплуатации превышает допустимую температуру сталеалюминевых проводов.

Табл. 3

Погонные параметры проводов нового поколения (на 1 км длины) при температуре окружающего воздуха +25 ºС

| № | Провод | Сечение Al, мм$^2$ | $R_{0_25}$, Ом/км | $X_0$, Ом/км | $X_{емк}$, Мом/км | $I_{ДДТН}$, А | $t_{провода}$, ºС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ACCC Helsinki 160 | 158,8 | 0,198 | 0,242 | 0,170 | 813 | 175 |
| 2 | ACCC Copenhagen 230 | 230,4 | 0,128 | 0,234 | 0,161 | 1024 | 175 |
| 3 | ACCC-Z148-1Z | 149,1 | 0,230 | 0,234 | 0,213 | 504 | 90 |
| 4 | GZTACSR-185 | 184,1 | 0,164 | 0,235 | 0,213 | 983 | 210 |

Источник: составлено авторами

**Экспериментальная часть**

**Режимные мероприятия**

Рассматриваемые ВЛ-110 кВ входят в схему выдачи мощности ТЭЦ-5, поэтому изменение загрузки энергоблоков ТЭЦ-5 приведет к изменению нагрузки на ВЛ-110 кВ, что показано в таблице 4. Режимно-балансовые условия рассматриваемого энергорайона позволяют изменить выдаваемую мощность станции.

Результаты расчетов установившегося режима:

1. Снижение генерируемой мощности каждого энергоблока со 110 МВт до 100 МВт привело к увеличению токовых нагрузок ВЛ-110 кВ.

2. Увеличение генерируемой мощности каждого энергоблока с 110 МВт до 120 МВт привело к незначительному уменьшению токовых нагрузок ВЛ-110 кВ.

Табл. 4

Изменение токовых загрузок ЛЭП 1-4 в зависимости от мощности генерации энергоблоков ТЭЦ-5

| № | ВЛ-110 кВ | Токовая загрузка ВЛ, % | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Рген = 100 МВт | Рген = 110 МВт | Рген = 120 МВт |
| ЛЭП-1 | ТЭЦ-5 – ПС 220 кВ «Сараевская» 1 цепь | 86,3 | 73,8 | 59,4 |
| ЛЭП-2 | ТЭЦ-5 – ПС 220 кВ «Сараевская» 2 цепь | 87,8 | 81,2 | 65,3 |
| ЛЭП-3 | ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь | 88,4 | 85,4 | 84,9 |
| ЛЭП-4 | ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 2 цепь | 97,2 | 86,9 | 86,4 |

Источник: составлено авторами

График зависимости изменения токовых загрузок ЛЭП от мощности генерации ТЭЦ-5 показан на рисунке 2.

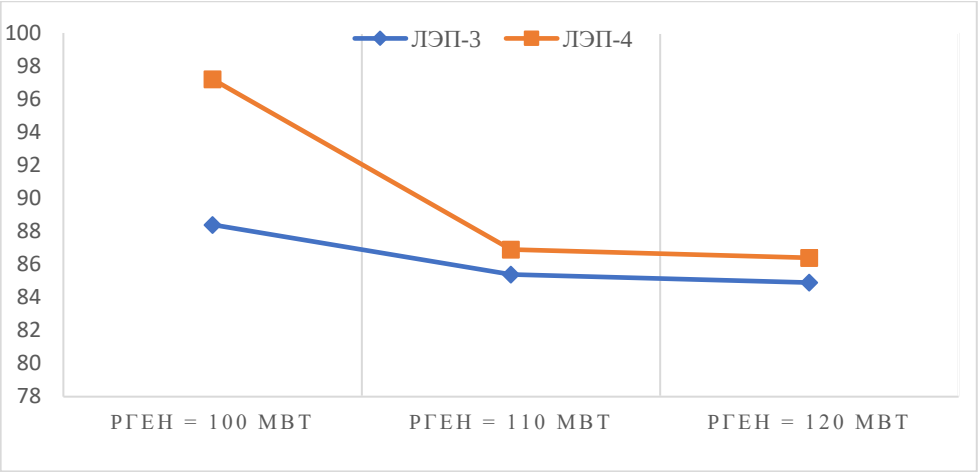



Рис. 2 График зависимости токовых загрузок исследуемых ВЛ-110 кВ от мощности генерации энергоблоков ТЭЦ-5

Источник: составлено авторами

Таким образом, режимные мероприятия не способны достаточно снизить токовые нагрузки ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4).

Перейдём к ряду экспериментов по замене проводов АС и АСО на провода нового поколения различных типов.

**Схемные мероприятия**

Для корректного использования проводов, необходимо учесть зависимость активного сопротивления от температуры. Будут рассмотрены алюминиевые провода, для чего возьмём коэффициент температурной зависимости $\alpha = 0{,}00403$ для алюминия.

Дальнейший расчет будет осуществляться по следующим формулам [1]:

$$R_{25} = R_{0_25} \cdot L, \quad (1)$$

где $R_{25}$ – активное сопротивление [Ом];

ЛЭП $R_{0_25}$ – погонное активное сопротивление [Ом/км] ЛЭП при температуре окружающей среды 25 градусов Цельсия;

L – длина [км] ЛЭП.

$$R_{0_30} = R_{0_25} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (t_{30} - t_{25})\right), \quad (2)$$

где $R_{0_30}$ – погонное активное сопротивление [Ом] ЛЭП при температуре окружающей среды 30 градусов Цельсия;

$R_{0_25}$ – погонное активное сопротивление [Ом] ЛЭП при 25 градусах Цельсия;

$\alpha = 0{,}00403$ – температурный коэффициент для алюминия;

$t_{30},\ t_{25}$ – температуры 30 и 25 градусов Цельсия.

$$R_{30} = R_{0_30} \cdot L \tag{3}$$

где $R_{30}$ – активное сопротивление [Ом]ЛЭП;

$R_{0_30}$ – погонное активное сопротивление [Ом/км] ЛЭП при температуре окружающей среды 30 градусов Цельсия;

L – длина [км] ЛЭП.

$$X = X_0 \cdot L \tag{4}$$

где $X$ – реактивное сопротивление [Ом] ЛЭП;

$X_0$ – погонное реактивное сопротивление [Ом] ЛЭП;

L – длина [км] ЛЭП.

$$B_0 = \frac{1}{X_{\text{емк}}} \tag{5}$$

где $B_0$ – погонная реактивная проводимость [мкСм/км],

$X_{\text{емк}}$ – погонное емкостное сопротивление [МОм·км].

$$B = B_0 \cdot L \tag{6}$$

где $B$ – реактивная проводимость [мкСм] ЛЭП,

L – длина линии [км].

$$I_{\text{ДДТН}}^{(30°)} = \text{К} \cdot I_{\text{ДДТН}}^{(25°)}, \tag{7}$$

где $I_{\text{ДДТН}}^{(30°)}$ – ДДТН провода ЛЭП при температуре окружающей среды 30 градусов Цельсия;

К=0,9375 – коэффициент перехода от $t = 25°$ к $t = 30°$;

$I_{\text{ДДТН}}^{(25°)}$ – ДДТН провода ЛЭП при температуре окружающей среды 25 градусов Цельсия.

В таблице 5 представлены параметры ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) при замене провода на провод марки АССС Helsinki 160.

Табл. 5

Параметры провода марки АССС Helsinki 160

| $R_{25}$, Ом | $R_{30}$, Ом | X, Ом | B, мкСм | L, км | $I^{30^{\circ}}_{\text{ДДТН мах.раб.т}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 3,483 | 3,550 | 4,254 | 103,177 | 17,55 | 762,185 А |

Источник: составлено авторами

При замене проводов ЛЭП-3 и ЛЭП-4 с АС-300 + АС-185 на АССС Helsinki 160 было зарегистрирована токовая загрузка 61,1 %.

В таблице 6 представлены параметры ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) при замене провода на провод марки АССС Copenhagen 230.

Табл. 6

Параметры провода марки АССС Copenhagen 230

| $R_{25}$, Ом | $R_{30}$, Ом | X, Ом | B, мкСм | L,км | $I^{30^{\circ}}_{\text{ДДТН мах.раб.т}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2,252 | 2,297 | 4,25412 | 108,81 | 17,55 | 960 А |

Источник: составлено авторами

При использовании данного провода было зафиксировано снижение токовых загрузок ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) до 49,2%. Однако, так как провод имеет сечение 230 мм$^2$, то при внедрении его вместо проводов АС-300 + АС-185 необходимо заменить все опоры на протяжении участка АС-185 (14 км).

Проведём экономический расчет замены проводов ЛЭП-3 и ЛЭП-4 с АС-300 + АС-185 на провода марки АССС Copenhagen 230.

1. Общие характеристики строительства ВЛ – 110 кВ:

Место положение: Центральная Россия,

Длина ВЛ: 14 км,

Рельеф местности: равнинный.

2. Технические показатели ВЛ:

Количество цепей: одна,

Характеристика опор: свободностоящие,

Материал опор: металл,

Марка провода: ACCC Copenhagen 230.

Нормативный скоростной напор ветра: 400 Па.

$$К = L \cdot 10^3 \cdot N + K_В + Д, \quad (8)$$

где $L$ – длина линии,

$K_В$ – установка выключателей по концам электропередачи,

$K_{тр} = 1$ для Центральной России,

$N$ – стоимость одной опоры,

Д – затраты на демонтаж старых опор.

$$К = 14 \cdot 10^3 \cdot 1795 + 7300000 \cdot 2 + 6{,}36 \cdot 14 = 39{,}731 \text{ млн руб.}$$

Необходимо учесть прочие затраты (12,5%) и стоимость постоянного отвода земельного участка:

$$К = 39{,}731 \cdot 1{,}125 + 14 \cdot 12 \cdot 20 \cdot 70 = 44{,}93 \text{ млн руб.}$$

В ценах на 01.01.2025 стоимость строительства ВЛ 110кВ составляет:

$$44{,}93 \cdot 6{,}91 = 310{,}47 \text{ млн руб,}$$

где, 6,91– индекс цен по капитальным вложениям по объектам электроэнергии на июнь 2025 г. По отношению к уровню 2000 г., без учета НДС.

В таблице 7 представлены параметры ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) при замене провода на провод марки ACCC-Z148-1Z.

Табл. 7

Параметры провода марки ACCC-Z148-1Z

| $R_{25}$, Ом | $R_{30}$, Ом | X, Ом | B, мкСм | L, км | $I^{30°}_{ДДТН\ мах.раб.т}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4,036 | 4,118 | 4,110 | 82,174 | 17,55 | 472,5 А |

Источник: составлено авторами

При использовании данного провода было обнаружено повышение токовых нагрузок ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) до 98,2%.

В таблице 8 представлены параметры ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) при замене провода на высокотемпературный провод марки GZTACSR-185.

Табл. 8

Параметры провода марки GZTACSR-185

| $R_{25}$, Ом | $R_{30}$, Ом | X, Ом | B, мкСм | L, км | $I^{30^{\circ}}_{\text{ДДТН мах.раб.т}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2,87469 | 2,9326 | 4,1225 | 107,86 | 17,55 | 921,6 А |

Источник: составлено авторами

При использовании данного провода было обнаружено снижение токовых нагрузок ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) до 51,2%. Замена опор на участке АС-185 не понадобится, так как данный провод обладает тем же сечением (184,1 мм2).

Проведём экономический расчет замены проводов ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) с АС-300 + АС-185 на провода марки GZTACSR-185.

1. Общие характеристики строительства ВЛ – 110 кВ:

Место положение: Центральная Россия,

Длина ВЛ: 17,55 км,

Рельеф местности: равнинный.

2. Технические показатели ВЛ:

Количество цепей: одна,

Характеристика опор: замена опор не требуется,

Марка провода: GZTACSR-185,

Нормативный скоростной напор ветра: 400 Па.

$$К = L \cdot 10^3 + K_{В}, \quad (9)$$

где $L$ – длина линии,

$K_{В}$ – установка выключателей по концам электропередачи,

$K_{тр} = 1$ для Центральной России.

$$К = 17{,}55 \cdot 10^3 + 7300000 \cdot 2 = 14{,}618 \text{ млн руб.}$$

Необходимо учесть прочие затраты (12,5%) и стоимость постоянного отвода земельного участка:

$$К = 14{,}618 \cdot 1{,}125 + 17{,}55 \cdot 12 \cdot 70 \cdot 20 = 16{,}75 \text{ млн руб.}$$

В ценах на 01.01.2025 стоимость строительства ВЛ 110кВ составляет:

$$16{,}75 \cdot 6{,}91 = 115{,}67 \text{ млн руб,}$$

где 6,91– индекс цен по капитальным вложениям по объектам электроэнергии на июнь 2025 г. По отношению к уровню 2000 г., без учета НДС.

**Сравнительный анализ**

Проведем сравнение четырех изложенных вариантов замены проводов. Для этого рассмотрим токовые нагрузки до и после замены проводов.

Как видно из рисунка 3 при использовании проводов ACCC Helsinki 160 и ACCC-Z148-1Z наблюдается повышение токовых нагрузок ЛЭП, что противоречит цели исследования.

Провода ACCC Copenhagen 230 и GZTACSR-185 позволяют заметно уменьшить токовые нагрузки. Кроме того, как можно увидеть на рисунке 4, ДДТН этих проводов примерно равны между собой.

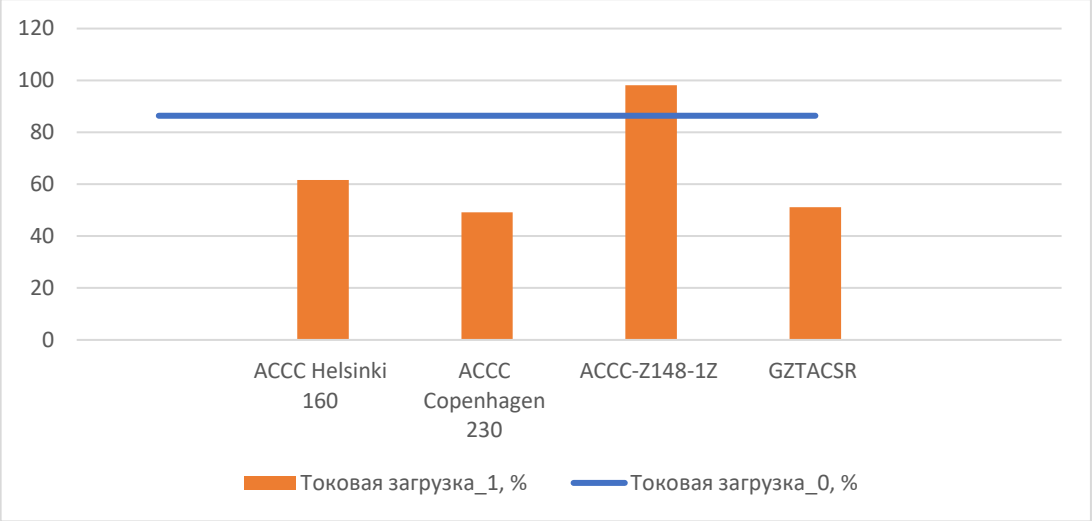



Рис. 3 Сравнение токовых загрузок для ЛЭП-4 до (_0) и после (_1) замены проводов АС/АСО на провода нового поколения

Источник: составлено авторами

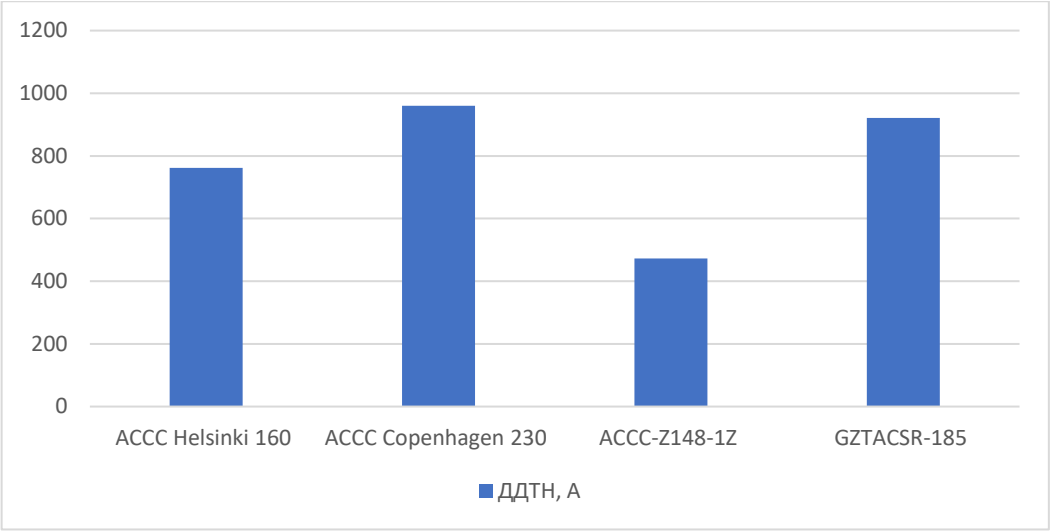



Рис. 4 Сравнение ДДТН [А] проводов нового поколения.

Источник: составлено авторами

Проведём сравнение проводов ACCC Copenhagen 230 и GZTACSR-185 с экономической точки зрения. По результатам расчетов, изложенных выше, составим таблицу:

Табл. 9

Сравнение капитальных затрат

| Марка провода | Капитальные затраты |
|---|---|
| ACCC Copenhagen 230 | 310,47 млн руб |
| GZTACSR-185 | 115,67 млн руб |

Источник: составлено авторами

Таким образом, использование для ЛЭП-4 провода ACCC Copenhagen 230 обходится примерно в 2,7 раза дороже, чем использование провода GZTACSR-185, не предполагающего замену опор ВЛ.

Наиболее оптимальный вариант уменьшения токовых нагрузок ЛЭП – использование **термостойкого провода с зазором типа GZTACSR-185**.

**Заключение**

В данной статье выполнено комплексное исследование возможности повышения пропускной способности и надёжности воздушных линий электропередачи (ЛЭП) в экстремальных температурных условиях (ПЭВТ). Исследование проводилось путём математического моделирования в программном комплексе RastrWin3 на примере типового энергорайона центральной части России.

Было установлено, что в период экстремально высоких температур ВЛ-110 кВ ТЭЦ-5 – ПС 500 кВ «Курган» 1 цепь (ЛЭП-3) и 2 цепь (ЛЭП-4) работают с токовой нагрузкой, приближающейся к предельно допустимым значениям (~86–87%), что создаёт риск перегрева и снижает устойчивость энергосистемы. Классические режимные мероприятия по регулированию генерации ТЭЦ не позволили решить данную проблему.

В качестве альтернативы была проанализирована эффективность замены традиционных сталеалюминевых проводов (АС/АСО) на четыре варианта проводов нового поколения: ACCC Helsinki 160, ACCC Copenhagen 230, ACCC-Z 148-1Z и термостойкий провод с зазором GZTACSR-185.

Результаты моделирования показали, что не все инновационные провода приводят к желаемому результату в конкретных сетевых условиях. Провод **ACCC-Z148-1Z** не только не снизил, но и увеличил токовую нагрузку на ЛЭП, что сделало его применение нецелесообразным для решения поставленной задачи.

Напротив, провода **ACCC Copenhagen 230** и **GZTACSR-185** продемонстрировали высокую техническую эффективность, снизив нагрузку на исследуемых линиях примерно до 49–52% и обеспечив значительный запас по пропускной способности.

Сравнительный технико-экономический анализ выявил безусловное преимущество провода **GZTACSR-185**. Несмотря на сопоставимый с ACCC Copenhagen 230 эффект по снижению нагрузки, его применение не требует замены опор на всей протяжённости линии, так как его сечение (184,1 мм²) близко к сечению заменяемого провода АС-185. Это обусловило кратное (в 2,7 раза) снижение капитальных затрат на реализацию проекта модернизации.

Таким образом, можно сделать вывод, что отдельная замена проводов на наиболее нагруженных участках сети на термостойкие провода с зазором типа GZTACSR-185 является оптимальным решением для повышения пропускной способности и надёжности ЛЭП в условиях ПЭВТ.

**Список используемых источников**

1. Брилинский А.С., Першиков Г.А., Смоловик С.В., Чудный В.С. Электрические системы и сети: учебное пособие. СПб.: Политех-пресс, 2020. 174 с.

2. Дорофеев А.О., Вагапов Т.Р., Повышение пропускной способности воздушных линий электропередач // Современные научные исследования и инновации. 2018. № 1. [Электронный ресурс]. URL: https://web.snauka.ru/issues/2018/01/85351 (дата обращения: 08.02.2026).

3. Иванов С.А., Кузнецов А.А., Рындина И.Е., Чудный В.С. Электроэнергетические системы и сети в примерах и иллюстрациях: учебно-методическое пособие. СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, 2024. 169 с.

4. Каченков А.К., Z-провода для высоковольтных линий электропередач / А. К. Каченков; науч. рук. Т. Л. Долгопол // ЭнергоСтарт: материалы VI Междунар. молодеж. науч.-практ. конф. (17-23 ноября 2023 г.). – 2023. – С. 208-1 – 208-5.

5. Официальный сайт ООО «Ламифил». Каталог продукции: Провода для ВЛ. [Электронный ресурс]. URL: https://ламитех.рф/produkciya/nomenklatura/provoda-dlja-vl/ (дата обращения: 07.02.2026).

6. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ // Проблемы региональной энергетики. 2010. № 2. С. 1–18.

7. Постолатий В.М., Суслов В.М. Теоретические аспекты выбора оптимальных параметров конструкций линий электропередачи переменного тока нового поколения // Проблемы региональной энергетики. 2010. № 1. С. 1–9.

8. Шакиров Р.Г., Гундеров Д.В. Сравнительный анализ сталеалюминевых проводов и проводов нового поколения. Расчеты // Электротехнические комплексы и системы: материалы межвуз. науч. конф. (Уфа, 22–23 окт. 2014 г.). Уфа: Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2014. С. 84–92.

## ИСПЫТАНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

*Марьин Г.Е. – доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Тимершин Б.Ф. – аспирант, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»*

**Аннотация**

Настоящая работа посвящена лабораторным методам определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов как ключевого показателя их энергоэффективности. Рассмотрена актуальность задачи в контексте современных требований строительства и энергосбережения. Подробно освещена теоретическая основа метода стационарного теплового потока, лежащая в основе большинства стандартных испытаний (ГОСТ 7076-99). Проведен обзор основных методов исследований, включая стационарный и нестационарный режимы, а также современное аппаратурное обеспечение. Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на точность измерений и величину коэффициента теплопроводности, таких как влажность, температура, плотность и анизотропия структуры материала. Описана роль нормативной базы в обеспечении достоверности результатов и процедура оформления протоколов испытаний. В заключении отмечены современные тенденции автоматизации лабораторных исследований и подчеркнута значимость точного определения теплопроводности для проектирования надежных и экономически эффективных ограждающих конструкций.

В условиях современного строительства и энергосбережения, вопросы повышения энергоэффективности зданий стоят особенно остро. Ключевую роль в решении этой задачи играют теплоизоляционные материалы, основным критерием качества которых является низкая теплопроводность [1]. Лабораторные испытания с целью определения коэффициента теплопроводности (λ, Вт/(м·К)) являются обязательным этапом как при разработке новых материалов, так и при входном контроле сырья или сертификации готовой продукции. Целью данных испытаний является не просто получение цифрового значения, а верификация заявленных производителем характеристик, оценка соответствия материала требованиям нормативной документации (ГОСТ, СНиП, СП) и прогнозирование его поведения в реальных условиях эксплуатации. Точность определения коэффициента теплопроводности напрямую влияет на достоверность теплотехнических расчетов ограждающих конструкций и, как следствие, на экономическую эффективность систем утепления.

В основе лабораторного определения теплопроводности лежит фундаментальный закон Фурье о стационарной теплопередаче [2]. Подавляющее большинство аттестованных методов базируются на создании в образце материала одномерного стационарного теплового потока. Согласно ГОСТ 7076-99 и аналогичным международным стандартам (ISO 8301, ASTM C518), суть метода заключается в следующем: образец материала с известной толщиной (δ) помещается между двумя изотермическими пластинами, нагретой и охлаждаемой, с поддержанием постоянной разности температур (ΔT). После достижения теплового равновесия измеряется плотность теплового потока (q), проходящего через образец.

Коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле:

$$\lambda = (q \cdot \delta) / \Delta T.$$

Принципиальным требованием для получения достоверных результатов является обеспечение идеального теплового контакта между поверхностью образца и пластинами прибора, а также минимизация краевых потерь тепла, что достигается конструкцией измерительной установки.

Современная лабораторная практика предлагает два основных подхода к определению теплопроводности, различающихся по принципу создания теплового потока и используемому оборудованию:

**1)Метод стационарного теплового потока (приборы типа ИТП-МГ4, Fox-600 и др.).** Является наиболее распространенным и регламентированным стандартом. Образец помещается между двумя термостатированными плитами. Позволяет проводить испытания при различных средних температурах образца, моделируя как летние, так и зимние условия эксплуатации.

**2)Метод нестационарного теплового режима.** Используется для экспресс-анализа или измерения теплопроводности в полевых условиях (например, метод игольчатого зонда для мягких материалов или метод цилиндрического зонда). Классическим примером является метод регулярного режима (метод Кондратьева). Хотя эти методы быстрее, они часто уступают стационарным в точности для материалов с высокой неоднородностью.

**3)Метод защищенной горячей зоны.** Является эталонным, при котором нагреватель окружается охранным нагревателем для исключения краевых утечек тепла.

**Влияние структурных и эксплуатационных факторов**

Коэффициент теплопроводности не является константой материала в физическом смысле; он существенно зависит от ряда факторов, которые обязательно должны учитываться или фиксироваться в протоколе испытаний:

**1)Влажность материала.** Вода обладает теплопроводностью примерно в 20–25 раз выше, чем воздух. Увлажнение образца (сорбционное или капиллярное) приводит к резкому росту $\lambda$. Поэтому стандартные испытания проводятся при нормированной влажности (обычно высушенных до постоянной массы образцах), либо отдельно исследуется зависимость $\lambda(w)$ для различных условий эксплуатации.

**2)Температура.** Для большинства теплоизоляционных материалов зависимость λ(t) носит линейный или слабопараболический характер. В лабораториях определение часто проводят при двух-трех значениях средней температуры (например, -20°С, +10°С, +25°С) для построения градуировочной кривой.

**3)Плотность (объемный вес).** Для волокнистых и пористых материалов существует оптимальная плотность, при которой теплопроводность минимальна. Лабораторные испытания позволяют выявить этот оптимум при разработке рецептуры материала.

**4)Анизотропия.** Для материалов с направленной структурой (например, экструдированный пенополистирол с ориентацией полимерных цепочек, древесина или прессованная минеральная вата) теплопроводность может различаться вдоль и поперек направления теплового потока [3]. Лабораторные испытания должны учитывать это, проводя измерения в требуемом направлении (как правило, поперек листа).

Достоверность лабораторных испытаний обеспечивается строгим соблюдением стандартизированных методик. В Российской Федерации основополагающим документом является **ГОСТ 7076-99** «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Для конкретных видов материалов действуют дополнительные стандарты (например, ГОСТ 17177 для теплоизоляции из минерального волокна).

Процесс обработки результатов включает статистическую оценку погрешности измерений, учет толщины образца под нагрузкой (для сжимаемых материалов) и пересчет результатов на сухое состояние или состояние, соответствующее условиям эксплуатации А или Б. Итогом испытаний является протокол, содержащий не только значение λ с округлением до сотых долей, но и подробное описание условий испытаний: температура, влажность образца, плотность, ориентация теплового потока (снизу вверх или сверху вниз), что критично для конвективных материалов.

**Заключение**

Развитие лабораторной базы сегодня идет по пути автоматизации измерений и повышения точности. Современные приборы оснащены программируемыми контроллерами, позволяющими проводить испытания в автоматическом режиме по заданному циклу, и высокоточными датчиками теплового потока. Наблюдается тенденция к разработке комплексных методов, позволяющих одновременно

определять теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость. Таким образом, лабораторные испытания теплоизоляционных материалов являются сложным, но необходимым инструментом, обеспечивающим связь между физикой процесса теплопереноса, требованиями строительной индустрии и качеством выпускаемой продукции. Только точное знание коэффициента теплопроводности позволяет инженеру гарантировать, что стена дома будет действительно теплой, а затраты на отопление – минимальными.

**Список используемых источников**

1. Гочакова А., Сапаргулыева Г., Атджанов Х. Теплоизоляционные материалы и изделия и их технические особенности // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 5 (74). С. 589–592.

2. Загороднюк Л.Х., Корякина А.А., Севостьянова К.И., Хахелева А.А. Теплоизоляционные композиционные смеси с техногенными материалами // Энергетические системы. 2017. № 1. С. 490–495. eISSN 2782-3989.

3. Медведева Г.А., Секарина О.С. Современные стеновые теплоизоляционные материалы совместно с материалами из отходов теплоэнергетики // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9, № 5. С. 11.

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

*Марьин Г.Е. – доцент кафедры Энергетическое машиностроение ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Новоселова М.Н. – ассистент кафедры Энергетическое машиностроение ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

В условиях глобального энергетического перехода и ужесточения климатической политики водородные тепловые электрические станции (ТЭС) рассматриваются как один из ключевых элементов низкоуглеродной энергетики будущего. Актуальность работы обусловлена необходимостью интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергосистемы и поиска эффективных решений для долгосрочного хранения энергии.

В статье проведен комплексный анализ перспектив развития водородных ТЭС, начиная от классификации методов производства водорода (серый, голубой, зеленый) и заканчивая проблемами его практического использования в газотурбинных установках. Подробно рассмотрены физико-химические особенности водорода, такие как высокая скорость горения и низкая объемная

плотность энергии, которые создают серьезные инженерные вызовы: риск обратной вспышки, термоакустическая неустойчивость, повышенное образование оксидов азота (NOx) и водородное охрупчивание материалов.

Глобальный энергетический переход: Современная энергетика подвергается фундаментальной трансформации под влиянием климатических (необходимость удержания роста температуры в рамках 1,5–2°C), экономических (волатильность цен на ископаемое топливо) и геополитических (стремление к энергонезависимости) факторов. Массовое внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) выявило их главный недостаток – стохастический характер генерации. Существующие технологии (аккумуляторы) эффективны лишь для краткосрочного хранения. В этом контексте водород приобретает стратегическое значение как вектор энергии, способный обеспечить долгосрочное (в т.ч. сезонное) аккумулирование избытков энергии от ВИЭ и ее последующее использование для балансировки энергосистем.

Развитие водородных ТЭС позволяет сохранить ключевые преимущества тепловой генерации – надежность, управляемость и предсказуемость – при переходе к безуглеродной энергетике, выступая в роли диспетчерского ресурса [1,2]. Использование водорода в энергетике не является абсолютно новым. В XIX веке широко применялся светильный газ (до 50% $H_2$). Современный переход от природного газа к водороду – это логическое продолжение тенденции к более чистым энергоносителям, но на качественно новом технологическом уровне [3,4].

Водород обладает уникально высокой удельной энергией (120 МДж/кг), что более чем в два раза превосходит природный газ (50 МДж/кг). Ключевой проблемой является крайне низкая плотность энергии в объеме. Даже в сжатом (700 бар) или сжиженном (-253°C) состоянии водород требует в 3–4 раза больше объема для хранения того же количества энергии, что и бензин, что создает серьезные инженерные сложности.

Выбор технологии (электролиз щелочной, PEM, твердооксидный; пиролиз; биологическая ферментация) определяет не только себестоимость, но и требования к сырью, энергоэффективность и стадию технологической готовности, что критически важно для формирования стратегий инвестирования.

Технологические проблемы сжигания водорода в ГТУ. Перевод газотурбинных установок (ГТУ) на водород сопряжен с комплексом серьезных научно-технических проблем, требующих радикального пересмотра конструкции камер сгорания:

– высокая скорость горения и обратная вспышка: Скорость пламени водорода (2,7 м/с) в 7–8 раз выше, чем у метана. Это вызывает риск проскока пламени в зону смесеобразования, приводя к перегреву и разрушению горелок;

– неустойчивость горения и колебания давления: Широкие пределы воспламеняемости водорода (4-75%) делают пламя чрезвычайно чувствительным к возмущениям. Совпадение частот тепловыделения и акустических колебаний камеры вызывает мощные пульсации, ведущие к усталостным разрушениям [5];

– рост эмиссии оксидов азота ($NO_x$): Высокая температура горения водорода (>2200°C) приводит к экспоненциальному росту термических $NO_x$ (реакция Зельдовича). Возникает парадокс «чистого» топлива: отсутствие $CO_2$, но высокие выбросы $NO_x$, требующие либо специальных методов подавления, либо дорогостоящих систем очистки [6];

– водородное охрупчивание материалов: Атомарный водород диффундирует в кристаллическую решетку металлов, накапливается в дефектах и вызывает внутреннее давление, приводящее к микротрещинам и резкому снижению прочности и пластичности, стали. Это угрожает целостности трубопроводов, камер сгорания и лопаток турбин.

Методы решения проблем сжигания и охрупчивания Преодоление указанных вызовов требует комплексного подхода, включающего:

– применение аустенитных нержавеющих сталей (AISI 304L, 316L), никелевых суперсплавов (Inconel 718), разработка наноструктурированных и дисперсно-упрочненных материалов, а также строгий термический контроль для снятия внутренних напряжений;

– микросмешение: Разделение потока топлива на множество мелких струй для сверхбыстрого и равномерного смешения с воздухом, что снижает локальные температуры и риск обратной вспышки;

– многостадийное сжигание: Организация подачи топлива в несколько зон для оптимизации температурного профиля и подавления NOx;

– разбавление: Впрыск пара или азота для снижения пиковой температуры пламени (хотя это снижает КПД) или использование «сухих» низкоэмиссионных горелок (DLN) с увеличенным избытком воздуха;

– барьерные покрытия: Нанесение керамических (на основе $ZrO_2$) или наноструктурированных покрытий для термоизоляции и предотвращения диффузии водорода;

– интеллектуальные системы управления: Внедрение систем активного контроля с распределенными датчиками давления и температуры, использующих предиктивные алгоритмы и машинное обучение для подавления термоакустической неустойчивости в реальном времени.

Для реализации этой модели необходимы высокоуровневые АСУ ТП с ИИ, значительные капиталовложения (CAPEX) и разработка строгих стандартов безопасности для крупномасштабных водородных объектов.

**Выводы**

Развитие водородных ТЭС является стратегически важным направлением глобальной декарбонизации, позволяющим сохранить управляемость энергосистем при интеграции ВИЭ.

Современный уровень технологий (микросмешение, новые материалы, активный контроль горения) позволяет эффективно решать ключевые проблемы сжигания водорода, такие как обратная вспышка, неустойчивость и эмиссия NOx.

Ключевым барьером для широкого внедрения остается высокая себестоимость производства «зеленого» водорода. Ожидается, что эффект масштабирования и технологические инновации приведут к ее значительному снижению в ближайшие десятилетия.

Наиболее перспективной моделью является интеграция водородных ТЭС в гибридные энергокомплексы с ВИЭ, что обеспечивает синергетический эффект, сезонное хранение энергии и формирует основу для устойчивой, безопасной и технологически продвинутой энергетической системы будущего.

**Список используемых источников**

1. Куликов А.Л., Илюшин П.В. Статистические методы оценки параметров аварийного режима энергорайонов с объектами распределенной генерации // Электричество. 2019. № 5. С. 4–11.

2.Марьин Г.Е., Осипов Б.М. Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24, № 2(151). С. 356–365.

3. Марьин Г.Е., Сопина Ю.В. Перспективы применения водорода в энергетике // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля 2021 года. – Белгород:

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 4160–4163.

4. Сопина Ю.В., Марьин Г.Е. Влияние технологий аккумулирования электрической энергии на развитие возобновляемых источников энергии // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. С. 4430–4433.

5. Marin G.E., Mendeleev D.I., Osipov B.M. A study on the operation of a gas turbine unit using hydrogen as fuel // Journal of Physics: Conference Series: International Conference on Aviation Motors, ICAM 2020, Moscow, 18–21 мая 2021 года. Vol. 1891. IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. P. 012055. DOI 10.1088/1742-6596/1891/1/012055.

6. MartinGräbner, BerndMeyer. Performance and exergy analysis of the current developments in coal gasification technology // Fuel, Volume 116,2014, P. 910–920.

# ТЕХНОЛОГИИ КОГЕНЕРАЦИИ И ТРИГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ МИКРОГАЗОВЫХ ТУРБИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЖКХ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Махров С.Е. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Попов А.Н. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

Анализируется применение микрогазовых турбин (МГТ) в когенерационных и тригенерационных установках. Тригенерация на базе МГТ повышает энергоэффективность (КИТ до 85%) и сокращает срок окупаемости для объектов с холодильной нагрузкой. Основные барьеры – высокие капитальные затраты и неадаптированное законодательство.

## Введение

Современные вызовы в энергетическом секторе, включая рост тарифов на энергоносители, ужесточение экологических требований и необходимость модернизации изношенной инфраструктуры, актуализируют поиск эффективных решений для локального энергоснабжения. Особенно остро эта проблема стоит для

объектов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и малых/средних промышленных предприятий, которые часто характеризуются нестабильным качеством энергии, высокими потерями в сетях и значительными затратами на теплоснабжение и электроснабжение. Традиционная централизованная система в данном контексте демонстрирует свои системные недостатки: потери при транспортировке электроэнергии могут достигать 10–15%, тепловой энергии 25–30%, что в совокупности снижает общий коэффициент полезного использования первичного топлива до 35–45% [4].

Альтернативой выступает концепция распределенной (децентрализованной) энергетики, ключевым элементом которой являются когенерационные установки – технологии комбинированного производства тепловой и электрической энергии (ТЭ и ЭЭ) из одного источника топлива. Это позволяет повысить общий коэффициент использования топлива (КИТ) до 70–90% за счет утилизации сбросного тепла, которое в классической конденсационной энергетике безвозвратно теряется. Дальнейшим развитием этой идеи является тригенерация – процесс, в котором к выработке электроэнергии и тепла добавляется производство холода за счет тепловой энергии (например, с помощью абсорбционных холодильных машин – АБХМ). Это обеспечивает круглогодичную загрузку оборудования, так как в летний период тепловая энергия направляется не на отопление, а на кондиционирование.

Среди различных первичных двигателей для малой распределенной энергетики (газопоршневые установки – ГПУ, двигатели Стирлинга, топливные элементы) особый интерес представляют микрогазовые турбины (МГТ) единичной мощностью от 30 до 500 кВт. Их преимущества включают: компактность, низкий уровень вибраций и шума, малые выбросы NOx и CO благодаря высокотемпературному и устойчивому процессу горения, возможность работы на различных видах газообразного топлива (природный газ, биогаз, попутный нефтяной газ), а также длительный межсервисный интервал. Однако высокие капитальные затраты и относительная новизна технологии на рынке требуют детального обоснования эффективности их применения в конкретных условиях [1].

Целью данного исследования является проведение комплексного технико-экономического анализа и оценка потенциала применения когенерационных и тригенерационных установок на базе микрогазовых турбин для повышения энергоэффективности типовых объектов ЖКХ и малой промышленности.

**Методология исследования**

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– анализ энергетических балансов и нагрузок типовых объектов;

– моделирование схем утилизации тепла выхлопных газов МГТ;

– разработка математической модели для расчета технико-экономических показателей;

– сравнительная оценка эффективности базовой когенерации и тригенерации.

**Характеристика объектов-реципиентов**

В качестве модельных объектов выбраны:

Объект №1 (ЖКХ): Многоквартирный жилой комплекс (200 квартир) с инфраструктурой (фитнес-центр, прачечная, административные помещения). Общая площадь – 25 000 м². Характерна сезонная тепловая нагрузка (отопление, ГВС) и круглогодичная электрическая нагрузка. Летом возникает потребность в кондиционировании общественных зон.

Объект №2 (Промышленность): Небольшое пищевое производство (цех переработки молока). Характерны одновременные и стабильные нагрузки: электрическая (холодильные компрессоры, освещение, линии розлива), тепловая (пастеризация, мойка) и холодильная (хранение сырья и готовой продукции).

**Технологические схемы**

Рассмотрены три варианта:

1. Вариант А (Раздельное снабжение): Электроснабжение – от сетей; теплоснабжение – от центральной котельной или газового котла; холодоснабжение – от парокомпрессионных чиллеров. Базовый сценарий для сравнения.

2. Вариант Б (Когенерация): Установка на базе МГТ (выбрана модель Capstone C200, 200 кВт эл.) с утилизационным котлом-рекуператором. Электрическая энергия покрывает базовую нагрузку, избыток может продаваться в сеть. Тепловая энергия утилизируется для отопления и ГВС в зимний период, летом – только для ГВС (тепловая нагрузка снижается, КИТ падает).

3. Вариант В (Тригенерация): Установка на базе той же МГТ, но с подключением к контуру утилизируемого тепла одноступенчатой абсорбционной холодильной машины (АБХМ) типа «вода-бромистый литий». В зимний режим работа аналогична Варианту Б. В летний режим часть или вся тепловая энергия

направляется в АБХМ для выработки холода на кондиционирование или технологические нужды.

**Математический аппарат**

Расчеты выполнялись на основе моделирования годового графика нагрузок (8760 часов). Ключевые расчетные формулы:

Общий коэффициент использования топлива (КИТ):

$$\text{КИТ}_{\text{коген}} = \frac{N_{\text{эл}} + Q_{\text{тепл}}}{Q_{\text{топл}}} \cdot 100\%, \text{КИТ}_{\text{триген}} = \frac{N_{\text{эл}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{холод}} \cdot COP_{\text{абхм}}}{Q_{\text{топл}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где $N_{\text{эл}}$ – полезная электрическая мощность, кВт;

$Q_{\text{тепл}}$, $Q_{\text{холод}}$ – полезная тепловая и холодильная мощность, кВт; $Q_{\text{топл}}$ – тепловая мощность, выделившаяся при сжигании топлива, кВт;

$COP_{\text{абхм}}$ – коэффициент трансформации АБХМ (~0,7) [5].

Годовая экономия (ГЭ), руб.:

$$\text{ГЭ} = \sum(\text{Э}_{\text{сет}} \cdot \text{Т}_{\text{эл}} + Q_{\text{кот}} \cdot \text{Т}_{\text{тепл}} + \text{Х}_{\text{эл}} \cdot \text{Т}_{\text{эл}}) - (\text{З}_{\text{топл}} + \text{З}_{\text{обсл}} + \text{А}) \quad (2)$$

где $\text{Э}_{\text{сет}}$, $Q_{\text{кот}}$, $\text{Х}_{\text{эл}}$ – сэкономленные объемы сетевой электроэнергии, тепла от котельной и электрохолода;

$\text{Т}_{\text{эл}}$, $\text{Т}_{\text{тепл}}$ – соответствующие тарифы;

$\text{З}_{\text{топл}}$, $\text{З}_{\text{обсл}}$, А – затраты на топливо для МГТ, обслуживание и амортизацию) [3].

Срок окупаемости (СО), лет:

$$\text{СО} = \frac{\text{К} - \text{Л}}{\text{ГЭ}} \quad (3)$$

где К – капитальные затраты на оборудование и монтаж, руб.;

Л – ликвидационная стоимость, руб. (принята 0 для упрощения) [3].

**Результаты и обсуждение**

**1. Технический анализ**

Для Объекта №1 (ЖКХ) годовой график показал, что при работе в когенерационном режиме (Вариант Б) зимний КИТ достигает 78%, однако летом, при отсутствии отопительной нагрузки, он падает до 55–60% (только ГВС и частичная утилизация). Это приводит к среднегодовому КИТ примерно 68%. В тригенерационном режиме (Вариант В) летняя тепловая энергия эффективно используется АБХМ для кондиционирования фитнес-центра и административных помещений, что позволяет поддерживать КИТ на уровне 75–80% круглогодично и увеличить среднегодовой КИТ до 76%. Для Объекта №2 (пищевое производство) с его постоянными тепловыми и холодильными нуждами переход на тригенерацию обеспечивает почти полную утилизацию тепла выхлопных газов и среднегодовой КИТ на уровне 82–85% [5].

**2. Технико-экономический анализ**

Исходные данные для расчета: тариф на электроэнергию – 6 руб./кВт·ч, на тепло – 1 800 руб./Гкал, на природный газ – 5 руб./м³. Капитальные затраты: МГТ 200 кВт – 10 млн руб., утилизационный котел – 1.5 млн руб., АБХМ мощностью 170 кВт (по холоду) – 2.5 млн руб., монтаж и наладка – 15% от стоимости оборудования.

Результаты расчетов сведены в Таблицы (табл. 1), (табл. 2).

Табл. 1

Сводные технико-экономические показатели для модели варианта Б (Когенерация)

| Показатель | Объект №1 (ЖКХ) | Объект №2 (Промышленность) |
|---|---|---|
| Среднегодовой КИТ, % | 68 | 72 |
| Годовая экономия, тыс. руб. | 2 850 | 3 450 |
| Кап. затраты (КАПЭ), млн руб. | 13,2 | 13,2 |
| Срок окупаемости (СО), лет | 4,6 | 3,8 |

Источник: составлено автором

Табл. 2

Сводные технико-экономические показатели для модели варианта В (Тригенерация)

| Показатель | Объект №1 (ЖКХ) | Объект №2 (Промышленность) |
|---|---|---|
| Среднегодовой КИТ, % | 76 | 84 |
| Годовая экономия, тыс. руб. | 3 320 | 4 100 |
| Кап. затраты (КАПЭ), млн руб. | 15,9 | 15,9 |
| Срок окупаемости (СО), лет | 4,8 | 3,9 |

Источник: составлено автором

**3. Обсуждение результатов**

1. Эффективность тригенерации: Как видно из таблиц (табл. 1), (табл. 2), для Объекта №2 с круглогодичной стабильной нагрузкой внедрение тригенерации практически не увеличило срок окупаемости (3,9 лет против 3,8), обеспечив при этом значительный рост КИТ и энергонезависимости. Для Объекта №1 (ЖКХ) тригенерация увеличила СО на 0,2 года, но дала ключевое преимущество – круглогодичную эффективную работу и возможность покрытия пиковой кондиционерной нагрузки без загрузки электросети.

2. Чувствительность к тарифам: Моделирование показало, что повышение тарифа на электроэнергию до 7 руб./кВт·ч сокращает СО на 0,5–0,7 лет для всех вариантов. Введение «зеленого» тарифа на ввод избыточной энергии в сеть могло бы улучшить экономику на 10–15%.

3. Экологический эффект: Замена старых котельных и снижение потребления сетевой электроэнергии (часто вырабатываемой на угольных ТЭЦ) приводит к снижению выбросов CO2 на 25–40% в расчете на единицу полезной энергии.

4. Системные преимущества: Установка МГТ повышает надежность энергоснабжения объекта, выступая в роли резервного источника питания. Кроме того, она снижает пиковую нагрузку на распределительные сети, откладывая необходимость их дорогостоящей модернизации.

**Заключение**

Проведенное исследование подтверждает высокий потенциал технологий когенерации и тригенерации на базе микрогазовых турбин для повышения энергоэффективности объектов ЖКХ и малой промышленности.

Основные выводы:

1. Микрогазовая турбина как первичный двигатель обладает набором конкурентных преимуществ для распределенной энергетики: экологичность, топливная гибкость, низкие эксплуатационные расходы.

2. Когенерационный режим обеспечивает существенный скачок в эффективности использования топлива (КИТ до 70–75%) по сравнению с раздельной генерацией и является экономически целесообразным уже при современном уровне тарифов (СО 3,5–5 лет) [4].

3. Тригенерационная схема с интеграцией абсорбционной холодильной машины является логическим развитием когенерации, позволяя преодолеть ее

главный недостаток – сезонность тепловой нагрузки. Она обеспечивает круглогодичную высокую загрузку установки и повышает среднегодовой КИТ до 75–85%. Для объектов с одновременной потребностью в тепло- и холодоснабжении (пищевая, фармацевтическая промышленность, объекты с ЦОДами) тригенерация демонстрирует сопоставимую или лучшую экономику, чем когенерация [2].

4. Ключевыми факторами, сдерживающими массовое внедрение, остаются высокие первоначальные капиталовложения и несовершенство нормативной базы, регулирующей подключение к сетям и продажу избыточной энергии. Развитие механизмов энергосервисных контрактов (ЭСКО) и лизинговых схем может стать катализатором рынка.

Перспективы дальнейших исследований связаны с оптимизацией гибридных систем, где МГТ комбинируется с фотоэлектрическими панелями и аккумуляторами энергии, а также с моделированием работы виртуальных электростанций на базе агрегированных МГТ-установок.

**Список используемых источников**

1. ГОСТ Р 56187-2014. Установки газотурбинные малые. Общие технические условия / Электронный фонд правовых и нормативно- технических документов. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200116225 (дата обращения: 15.02.2026)

2. Дзино А.А., Малинина О.С. Абсорбционные холодильные машины: учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 68 с.

3. Дмитриев А.М., Ковалев И.Н., Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. 120 с.

4. Мартко Е.О. Автономные источники энергии: учебное пособие к лекционному курсу по дисциплине «Автономные источники электроснабжения» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Е. О. Мартко; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2019. 91 с.

5. Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения. М.: НИИСФ, 2008. 406 с.

# ЭВОЛЮЦИЯ И СРАВНЕНИЕ ТОПОЛОГИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СВЯЗИ: ИНВЕРТОРЫ С PWM ПРОТИВ ТРЕБОВАТЕЛЬНЫХ ЧАСТОТ

*Машрапов А.А. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Попов А.Н. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

Данная работа систематически анализирует развитие топологий преобразователей для высоковольтной связи. Рассматриваются принципы формирования выходного сигнала, энергетическая эффективность, тепловые и шумовые характеристики, а также влияние напряжения, частоты и нелинейных нагрузок на динамическое поведение систем. Исследование охватывает современные аппаратные реализации, методики моделирования и верификации, а также стратегическое направление дальнейшего развития высоковольтной связи.

## Введение

Современная высоковольтная связь требует приводов и преобразователей, способных обеспечить эффективную передачу энергии или данных при строгих требованиях по гармоникам, КПД, размеру и надежности. В этом контексте выбор топологии преобразователя и метода формирования выходного сигнала играет критическую роль. Две широко обсуждаемые концепции: инверторы с широтно-импульсной модуляцией (PWM) и альтернативные решения, ориентированные на работу при «требовательных частотах» (high-frequency demanding topologies), где внимание уделяется частотоустойчивости, уменьшению паразитных эффектов и улучшению линейности [3].

Эффективность управляемого преобразования электроэнергии связана как с развитием силовых полупроводниковых приборов и различных структурных схем силовых преобразователей, так и способами формирования коммутационной функции для управления силовыми ключами преобразователя. Отечественная школа имеет обширный опыт создания преобразовательной техники на основе тиристоров, выпускаемых в нашей стране начиная с 1961 г. и обладающих низкими потерями в проводящем состоянии, устойчивостью к кратковременным перегрузкам и относительно простой аналоговой реализацией системы управления. В 1990-е годы на рынке получил распространение новый силовой полупроводниковый прибор IGBT, объединивший в себе положительные качества биполярного и полевого

транзистора: полную управляемость, высокое быстродействие и малую мощность цепей управления. Развитие IGBT оказало существенное влияние на преобразовательную технику, предназначенную для управления электрическими машинами переменного. Параллельно развивались силовые схемы преобразователей частоты, в особенности для силовых преобразователей на средние и высокие напряжения. Оптимально выбранная силовая схема уменьшает стоимость изготовления и эксплуатации преобразователя и может придать преобразователю новые свойства, например, рекуперацию электроэнергии. Применение многоуровневых схем увеличивает количество силовых приборов, уменьшая их номинальное напряжение, что позволяет использовать более надёжные, экономичные и работающие на меньшей частоте коммутаций, а, следовательно, и с меньшими динамическими потерями, силовые ключи. Увеличение количества уровней напряжения в многоуровневых схемах преобразователей частоты, улучшает гармонический состав выходного напряжения и может увеличить пульсность схемы выпрямления, что значительно снижает негативное воздействие преобразователя на сеть. Многоуровневые преобразователи с активной схемой выпрямления, способны к рекуперации энергии в сеть, что приводит к повышению эффективности энергопотребления. На базе таких преобразователей создаются такие устройства как активные фильтры гармоник тока, компенсаторы реактивной мощности и объединённые контроллеры передаваемой мощности, которые предназначены для улучшения работы оборудования в «слабых» сетях и снижения воздействие нелинейных потребителей электроэнергии [1].

Целью данного исследования является проведения сравнения между инвентором PWM и частотным преобразователем.

**Инвентор PWM**

Инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ, англ. pulse-width modulation (PWM)) – это устройство, которое преобразует постоянное напряжение в переменное, используя метод управления мощностью за счёт изменения длительности импульсов [2].

Принцип работы ШИМ основан на генерации импульсного сигнала постоянной частоты и переменной скважности – отношения периода следования импульса к его длительности. Импульсы генерируются путем сравнения треугольного несущего сигнала с опорным модулирующим сигналом [4].

Некоторые особенности принципа:

– амплитуда сигнала остаётся постоянной, а длительность импульсов изменяется;

– длительность импульса определяет, какую часть периода сигнала ШИМ составляет включённое состояние и, следовательно, уровень сигнала на выходе;

– увеличение скважности повышает среднее выходное напряжение, а уменьшение снижает его.

Некоторые схемы инвенторов с ШИМ:

– дифференциальная схема – применяется в однофазных ИБП малой и средней мощности;

– мостовая схема – используется в системах питания от солнечных панелей или от топливных элементов. Для мостовых схем – как один источник напряжения питания, так и два источника напряжения постоянного тока со средней точкой (нейтралью);

– схема инвентора на основе SPWM – сигнала – в схеме используются два MOSFET-транзистора N-типа и полумост для управления трансформатором. Для уменьшения нежелательных шумов и защиты транзисторов используются два диода, включённённых параллельно.

**Инвентор требовательных частот**

Инвертор с регулируемой частотой (преобразователь частоты) – это устройство, которое преобразует стандартное переменное напряжение сети в постоянное, а затем снова преобразует его в переменное с регулируемой частотой и напряжением. Это позволяет точно контролировать скорость вращения асинхронных двигателей, что важно для энергосбережения и точного регулирования процессов в промышленных системах [5].

Структурно преобразователь частоты состоит из следующих основных блоков:

– **выпрямитель (конвертер)** – преобразует переменное напряжение сети в постоянное;

– **звено постоянного тока (DC-шина)** – сглаживает пульсации выпрямленного напряжения;

– **инвертор** – преобразует постоянное напряжение в переменное с регулируемой частотой и амплитудой;

– **система управления** – контролирует работу всех блоков преобразователя, обеспечивая требуемые параметры выходного напряжения.

Процесс преобразования включает несколько этапов:

– **выпрямление** – входное переменное напряжение преобразуется в постоянное с помощью выпрямителя (диодного моста) [1];

– **фильтрация** – постоянное напряжение сглаживается с помощью конденсаторов [1];

– **инвертирование** – с помощью IGBT-транзисторов постоянное напряжение преобразуется обратно в переменное, но уже с регулируемой частотой и амплитудой;

– **управление** – микропроцессорная система управляет работой инвертора, формируя необходимые сигналы управления.

Частотные преобразователи используются в различных сферах, например:

– **промышленное производство** – для управления скоростью вращения электродвигателей в различных промышленных процессах, таких как производство пищевых продуктов, текстиля, химической и нефтегазовой промышленности [3];

– **транспорт** – устройства применяются в железнодорожном и авиационном транспорте, а также в автомобильной промышленности для управления электродвигателями;

– **энергетика** – приборы используются для управления работой насосов, вентиляторов и компрессоров в энергетических установках, таких как атомные станции, гидроэлектростанции и ветряные фермы [3].

**Сравнение характеристик**

Изучив характеристики различных моделей преобразователей, составим сравнительную таблицу:

Табл. 1

Сравнительная таблица: PWM – инвентор и инвентор требовательных частот

| Параметр | Инвертор PWM | Инвертор с регулируемой частотой |
|---|---|---|
| Принцип работы | Широтно-импульсная модуляция | Регулировка частоты выходного сигнала |
| Контроль выходного тока | Ограниченный контроль | Более точный контроль |
| КПД | Высокий (80-95%) | Зависит от типа конструкции, может быть ниже |
| Частота переключения | Обычно 1-20 кГц | Широкий диапазон частот |

Продолжение табл. 1

| Применение | Приводы, источники питания | Промышленные моторы, вентиляторы |
|---|---|---|
| Сложность схемы | Средняя | Высокая |
| Стоимость | Обычно ниже | Может быть выше |
| Уровень шума | Может создавать шум | Обычно тише |
| Регулировка мощности | Ограниченная | Отличная |

Источник: составлено автором

После детального сравнения становится очевидно, что противопоставлять эти два термина некорректно с инженерной точки зрения, но крайне важно понимать иерархию их отношений для правильного выбора оборудования.

**Заключение**

Проведенный анализ эволюции преобразовательной техники для высоковольтной связи (HVDC) и энергетики демонстрирует фундаментальный сдвиг от «железных» решений к «интеллектуальной» силовой электронике. Сравнение классических и современных топологий, в частности, эволюция от инверторов, требовательных к чистоте частоты (линейно-коммутируемые), к инверторам с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), позволяет сделать следующие ключевые выводы.

1. Технологическая парадигма: от сетевой синхронизации к активному синтезу

Ранние топологии (например, инверторы, ведомые сетью, или преобразователи на основе тиристоров с фазовым управлением – LCC) были «требовательны к частоте» и жестко привязаны к наличию мощной принимающей сети. Они выполняли функцию простого переключателя, но не могли работать на «слабую» сеть или поддерживать ее.

Современные же топологии (многоуровневые IGBT-инверторы с ШИМ, особенно модульные многоуровневые преобразователи – MMC) эволюционировали в сторону активного синтеза напряжения. Они не подстраиваются под сеть, а сами создают сеть, формируя синусоиду любой требуемой частоты (50, 60 Гц или постоянный ток) с высокой точностью [4].

2. Энергоэффективность и качество энергии

Эволюция от требовательных к частоте решений к PWM-топологиям ознаменовала скачок в качестве передаваемой энергии. Если тиристорные преобразователи создавали высокий уровень гармоник и потребляли огромную

реактивную мощность, то современные ШИМ-инверторы с многокаскадной структурой обеспечивают:

– практически синусоидальную форму тока и напряжения;
– коэффициент гармоник менее 1% (без традиционных АС-фильтров);
– возможность независимо управлять активной и реактивной мощностью (STATCOM-функция) [4].

Сравнение показывает, что переход от «требовательных к частоте» инверторов к инверторам с ШИМ в контексте высоковольтной связи – это эволюция от пассивного преобразования к активному управлению энергосистемой. Если первые поколения преобразователей были тяжелой артиллерией, способной только передавать огромные объемы энергии из точки А в точку Б при идеальных условиях, то современные PWM-системы стали универсальными «энергетическими маршрутизаторами».

Сегодня именно многоуровневые PWM-топологии являются золотым стандартом для HVDC и промышленности, обеспечивая высочайшее качество энергии, гибкость управления и возможность построения интеллектуальных сетей (Smart Grid) будущего [4].

**Список используемых источников**

1. ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200084639 (дата обращения: 28.01.2026)

2.ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200104301 (дата обращения: 28.01.2026)

3. Мартко Е.О. Автономные источники энергии: учебное пособие к лекционному курсу по дисциплине «Автономные источники электроснабжения» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2019. 91 с.

4. Маклаков А.С., Антоненко А.А. Двухуровневые выходные напряжения АИН на основе ШИМ с селективным устранением гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 2(59). С. 65–72. DOI: 10.18503/2311-8318-2023-2(59)-65–72.

5. Тонкаль В.Е., Мельничук Л.П., Новосельцев А.В., Дыхненко Ю.И. Преобразователи напряжения модуляционного типа с промежуточным звеном повышенной частоты. Киев: Наукова думка, 1981. 252 с.

# СТАТИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАТОРЫ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (STATCOM) КАК СРЕДСТВО СНИЖЕНИЯ УЩЕРБА ОТ НИЗКОГО КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ

*Мельников Р.А. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия*

*Павличенко И.А. – аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия*

**Аннотация**

В статье рассматривается проблема экономического ущерба от низкого качества электроэнергии в распределительных сетях среднего напряжения. На основе анализа работ Мартко Е.О., показавшей масштабы потерь от недоотпуска электроэнергии, обосновывается необходимость внедрения специальных регулирующих устройств. В качестве перспективного решения предложены статические компенсаторы реактивной мощности (STATCOM). Рассмотрен принцип работы STATCOM, его влияние на стабилизацию напряжения и надежность электроснабжения. Выполнен сравнительный анализ STATCOM с традиционными средствами компенсации.

## Введение

Обеспечение надежного и качественного электроснабжения потребителей является одной из ключевых задач электроэнергетики. Особую остроту эта проблема приобретает для распределительных сетей среднего напряжения 6–10 кВ, которые характеризуются значительной протяженностью, разветвленностью и неравномерностью нагрузок. Как показывают исследования, отклонения напряжения за пределы нормативных значений, а также перерывы в электроснабжении приводят к существенным экономическим последствиям.

В работе Мартко Е.О. [1] проведен детальный анализ ущерба от недоотпуска электроэнергии в сеть на примере филиалов ПАО «Россети Центр». Автором

показано, что только за 4 квартал 2020 года суммарная продолжительность аварийных отключений составила более 4 тысяч часов, а недоотпуск электроэнергии достиг 2046 тыс. кВт·час. Даже при упрощенном расчете по минимальному тарифу для населения ущерб энергосистемы оценивается в миллионы рублей. При этом одной из распространенных причин отклонений качества электроэнергии, особенно в протяженных линиях, является недостаточная оснащенность сетей современными регулирующими устройствами, способными оперативно компенсировать изменения режимов работы.

Целью настоящей статьи является анализ возможностей статических компенсаторов реактивной мощности STATCOM как эффективного средства стабилизации напряжения и снижения экономического ущерба от низкого качества электроэнергии в распределительных сетях 6–10 кВ.

**Причины ухудшения качества электроэнергии в распределительных сетях**

Основной причиной отклонений напряжения в распределительных сетях 6–10 кВ являются потери напряжения в линиях электропередачи, величина которых зависит от передаваемой мощности, длины линии и ее параметров. В сетях промышленных предприятий ситуация усугубляется наличием резкопеременных нагрузок (электроприводы, сварочные установки, дуговые печи), которые вызывают колебания напряжения.

Традиционные средства регулирования напряжения, такие как трансформаторы с регулированием под нагрузкой (РПН) и конденсаторные батареи, обладают существенными недостатками. РПН имеют ограниченное быстродействие и ресурс переключений, а обычные конденсаторные батареи обеспечивают лишь ступенчатое регулирование и не способны быстро реагировать на динамические изменения режима.

В результате потребители, подключенные к концам протяженных линий, получают напряжение ниже нормативного, что приводит к нарушению технологических процессов, снижению производительности оборудования и, как следствие, к экономическому ущербу, аналогичному описанному в работе [1]. Для предприятий непрерывного цикла даже кратковременные отклонения напряжения могут означать брак продукции или аварийные остановы.

**Принцип работы и особенности STATCOM**

Статический синхронный компенсатор (STATCOM) относится к классу устройств гибкой передачи переменного тока (FACTS). В отличие от традиционных конденсаторных батарей, STATCOM построен на базе силового преобразователя напряжения на полностью управляемых полупроводниковых приборах (IGBT-транзисторах).

Принцип работы STATCOM заключается в генерации или потреблении реактивной мощности путем формирования напряжения, синхронизированного с сетью. Когда выходное напряжение компенсатора выше сетевого, устройство генерирует реактивную мощность в сеть (емкостной режим). Если напряжение STATCOM ниже сетевого, устройство потребляет реактивную мощность (индуктивный режим). При равенстве напряжений обмен реактивной мощностью отсутствует.

Ключевыми особенностями STATCOM, отличающими его от традиционных средств компенсации, являются:

– высокое быстродействие – время реакции составляет десятки миллисекунд;

– плавность регулирования – устройство способно изменять выдаваемую мощность непрерывно;

– работа в обоих направлениях – STATCOM может как выдавать, так и потреблять реактивную мощность;

– малые габариты – отсутствие громоздких батарей конденсаторов и реакторов;

– способность работать в сетях с искаженной формой напряжения.

**Влияние STATCOM на качество электроэнергии и надежность**

Применение STATCOM в узлах нагрузки распределительных сетей позволяет решать комплекс задач по повышению качества электроэнергии и надежности электроснабжения.

Стабилизация напряжения. STATCOM поддерживает напряжение в точке подключения на заданном уровне независимо от колебаний нагрузки. При росте потребления реактивной мощности компенсатор автоматически увеличивает ее выдачу, предотвращая провалы напряжения. При снижении нагрузки устройство переходит в режим потребления, исключая перенапряжения.

Компенсация реактивной мощности. Передача реактивной мощности по сетям вызывает дополнительные потери активной мощности и загрузку линий. Установка

STATCOM вблизи потребителей позволяет разгрузить питающие линии, снизить потери и высвободить пропускную способность сети.

Демпфирование колебаний. Благодаря высокому быстродействию STATCOM эффективно подавляет колебания напряжения, вызванные работой резкопеременных нагрузок.

Повышение надежности. Поддержание нормального уровня напряжения снижает вероятность аварийных отключений, вызванных срабатыванием защит при глубоких провалах напряжения. Кроме того, STATCOM способен участвовать в послеаварийном восстановлении режима, ускоряя включение ответственных потребителей.

**Сравнительный анализ STATCOM и традиционных средств**

Для обоснования выбора STATCOM как средства снижения ущерба от низкого качества электроэнергии целесообразно провести сравнение с традиционными устройствами компенсации реактивной мощности. В мировой практике накоплен значительный опыт применения различных типов компенсирующих устройств, обобщенный в фундаментальных трудах по гибким системам передачи переменного тока (FACTS) и качеству электроэнергии [5, 6]. На основе анализа данных источников, а также современных исследований в области промышленной энергетики [4] составлена сравнительная характеристика, представленная в таблице 1. Приведенные показатели отражают усредненные значения для устройств класса среднего напряжения, наиболее релевантных для оснащения распределительных сетей промышленных предприятий.

Табл. 1

Сравнительная характеристика средств компенсации реактивной мощности [4,6]

| Параметр | Конденсаторная батарея | Синхронный компенсатор | STATCOM |
|---|---|---|---|
| Быстродействие | Низкое (секунды) | Среднее (0,3–0,5 с) | Высокое (0,02–0,04с) |
| Диапазон регулирования | Только выдача | Выдача/потребление | Выдача/потребление |
| Плавность | Ступенчатая | Плавная | Плавная |
| Способность работать при низком напряжении | Резко падает | Снижается | Сохраняется |
| Генерация высших гармоник | Отсутствует | Отсутствует | Минимальна (при ШИМ) |
| Необходимость обслуживания | Периодическая | Высокая | Низкая |

| Параметр | Конденсаторная батарея | Синхронный компенсатор | STATCOM |
|---|---|---|---|
| Потери энергии | 0,1–0,5% | 1,5–3% | 0,5–1,5% |
| Срок службы | 8–12 лет | 15–20 лет | 15–20 лет |

Как видно из таблицы, STATCOM сочетает преимущества обоих традиционных устройств – высокое быстродействие и двухстороннее регулирование синхронного компенсатора с низкими потерями и минимальным обслуживанием, характерными для статических устройств. При этом важно отметить, что выбор конкретного типа компенсирующего устройства должен определяться условиями работы сети, характером нагрузки и технико-экономическими показателями. Для сетей с быстроизменяющейся нагрузкой, характерной для современных промышленных предприятий, быстродействие STATCOM становится определяющим фактором, позволяющим эффективно подавлять колебания напряжения в реальном времени.

**Экономический эффект от применения STATCOM**

Возвращаясь к проблеме, поставленной Мартко Е.О. [1], можно оценить, каким образом применение STATCOM влияет на снижение ущерба от недоотпуска электроэнергии.

Экономический эффект складывается из нескольких составляющих:

1. Снижение потерь электроэнергии. Компенсация реактивной мощности уменьшает токи в линиях и трансформаторах, что ведет к снижению потерь активной мощности. По различным оценкам, применение STATCOM в распределительных сетях позволяет снизить потери на 10–15% в точке установки.

2. Предотвращение ущерба от провалов напряжения. Быстродействие STATCOM позволяет удерживать напряжение при кратковременных возмущениях, исключая отключения чувствительного оборудования. Стоимость одного аварийного останова на современном промышленном предприятии может достигать миллионов рублей.

3. Увеличение пропускной способности сети. Компенсация реактивной мощности высвобождает до 20–30% пропускной способности линий и трансформаторов, что отодвигает необходимость реконструкции сетей с заменой проводов на большее сечение.

4. Снижение эксплуатационных затрат. В отличие от синхронных компенсаторов, STATCOM не имеет вращающихся частей, что снижает затраты на обслуживание и ремонт.

Таким образом, единовременные затраты на установку STATCOM окупаются в течение 3–5 лет за счет снижения потерь, предотвращения ущерба от нарушений электроснабжения и отсрочки затрат на реконструкцию сетей.

**Заключение**

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Проблема низкого качества электроэнергии в распределительных сетях 6–10 кВ приводит к значительному экономическому ущербу, что подтверждено исследованиями Мартко Е.О. [1].

2. Традиционные средства регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности обладают ограничениями по быстродействию, диапазону и плавности регулирования, что не позволяет в полной мере решить проблему.

3. Статические компенсаторы реактивной мощности STATCOM представляют собой современное высокоэффективное решение, обеспечивающее быстрое и плавное регулирование напряжения, компенсацию реактивной мощности и повышение надежности электроснабжения.

4. Применение STATCOM в распределительных сетях позволяет существенно снизить экономический ущерб от недоотпуска электроэнергии за счет уменьшения потерь, предотвращения аварийных отключений и оптимизации режимов работы сети.

5. Дальнейшие исследования целесообразно направить на разработку методик выбора параметров STATCOM для конкретных узлов нагрузки промышленных предприятий и оценку технико-экономической эффективности их внедрения в сетях Алтайского края.

**Список используемых источников**

1. Мартко Е.О., Сурков М.В., Белицын И.В. Анализ ущерба от недоотпуска электроэнергии в сеть // Актуальные вопросы науки 2022: сборник статей. 2022. С. 15–18.

2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. – 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2020. 280 с.

3. Карапетян А.Г., Ушаков В.Я. Интеллектуальные электрические сети (Smart Grid): концепции и технологии: учебное пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2021. 312 с.

4. Шабанов Г.П., Терентьев Д.Ю. Повышение энергоэффективности систем электроснабжения промышленных предприятий на основе адаптивного управления // Промышленная энергетика. 2023. № 5. С. 18–24.

5. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. New York: IEEE Press, 2020. 452 p.

6. Bollen M.H.J., Gu I.Y.-H. Signal Processing of Power Quality Disturbances. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2021. 789 p.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОВОДОВ С КОМПОЗИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

*Минусов А.А. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Мартко Е.О. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В представленной статье рассматривается возможность увеличения пропускной способности имеющихся воздушных линий электропередач, как одного из способов решения проблемы энергоснабжения, связанной с постоянным ростом передачи электроэнергии новым потребителям. Проведён сравнительный анализ ныне используемых неизолированных сталеалюминиевых проводов с проводом из профилированных алюминиевых проволок с композитным углеродосодержащим сердечником марки «АССС».

В условиях стремительного развития электротехнической отрасли, масштабного строительства промышленных объектов и наращивания производственных мощностей наблюдается экспоненциальный рост потребления электроэнергии, являющейся фундаментальной основой функционирования всех уровней технических систем. Данная тенденция приводит к необходимости передачи значительных объемов электрической энергии, что, в свою очередь, ограничивается пропускной способностью существующих линий электропередач. В свете этих обстоятельств представляется актуальным провести сравнительный анализ традиционных сталеалюминиевых проводов (марки АС) и современных высокотемпературных алюминиевых проводов с композитным сердечником (АССС),

обладающих повышенной проводимостью. Для анализа был выбран высокотемпературный алюминиевый провод с композитным сердечником – АССС [1].

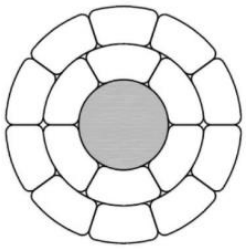


Рис. 1. Сечение провода АССС

Источник: составлено автором

Провода, используемые в настоящее время имеют марку АС.

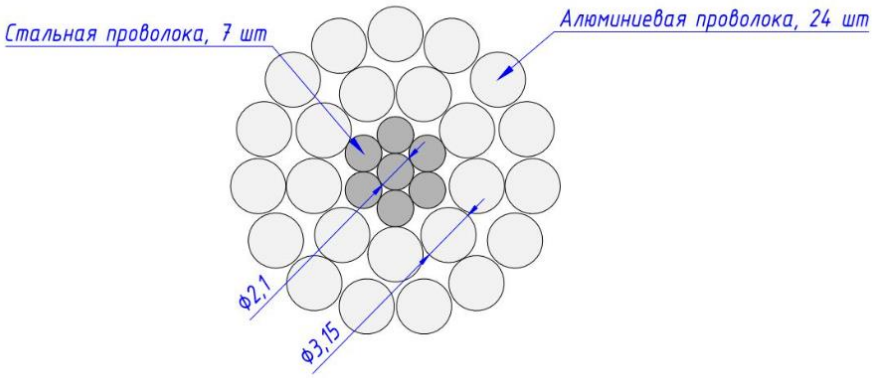



Рис. 2. Сечение провода АС 185/24

Источник: составлено автором

Для проведения сравнительного анализа были выбраны провода с площадью сечения алюминиевой части 185 мм². Рассмотрим ключевые характеристики провода АССС:

**Токовая нагрузка**. Провода марки АССС обладают расширенным диапазоном токовых нагрузок, что обусловлено конструкцией несущей жилы, выполненной из карбоновых нитей. Это позволяет токоведущей части проводника выдерживать высокие температуры без существенного провисания, что является критическим фактором, ограничивающим максимальную величину тока, передаваемого по линии электропередачи. При максимально допустимой рабочей температуре провода АС (90°С) токовая нагрузка провода АССС составляет 600 А, в то время как для стандартного сталеалюминиевого провода этот показатель равен 530 А. При

повышении температуры до максимально допустимого значения для провода ACCC (160°C) токовая нагрузка возрастает до 880 А, что свидетельствует о его высокой проводимости.

**Коэффициент заполнения**. Повышенная проводимость провода ACCC обусловлена использованием жил трапециевидной формы из алюминия, прошедшего специальную термическую обработку, что обеспечивает больший коэффициент заполнения по сравнению с традиционными проводами AC.

**Потери на коронный разряд**. Композитные провода демонстрируют меньшие потери на коронный разряд, что обусловлено их гладкой поверхностью, минимизирующей локальные увеличения напряженности электрического поля. Это приводит к снижению общей напряженности на поверхности проводника. Кроме того, применение иной технологии установки проводов на опоры исключает волочение по земле, что минимизирует механические повреждения внешнего слоя проводящей части.

**Механическая прочность**. Использование сердечника из карбоновых нитей значительно повышает механическую прочность провода. Средние технические характеристики показывают, что максимальная нагрузка на разрыв для провода AC составляет порядка 58 кН, в то время как для провода ACCC этот показатель превышает 70 кН. При этом масса провода ACCC на 140 кг/м меньше, что позволяет производить расчеты длины пролета с учетом данного параметра.

**Длина пролета.** Для наглядности были проведены расчеты длины пролета для напряжения 500 кВ. Стандартные провода позволяют осуществлять пролеты длиной порядка 400 метров, в то время как провода с композитным сердечником обеспечивают расстояние между опорами до полутора раз большее, чем со сталеалюминиевыми проводниками. Замена проводов AC на ACCC позволяет увеличить длину пролета до 600 метров, что приводит к возможности использования меньшего числа опор при строительстве новых воздушных линий электропередач [2].

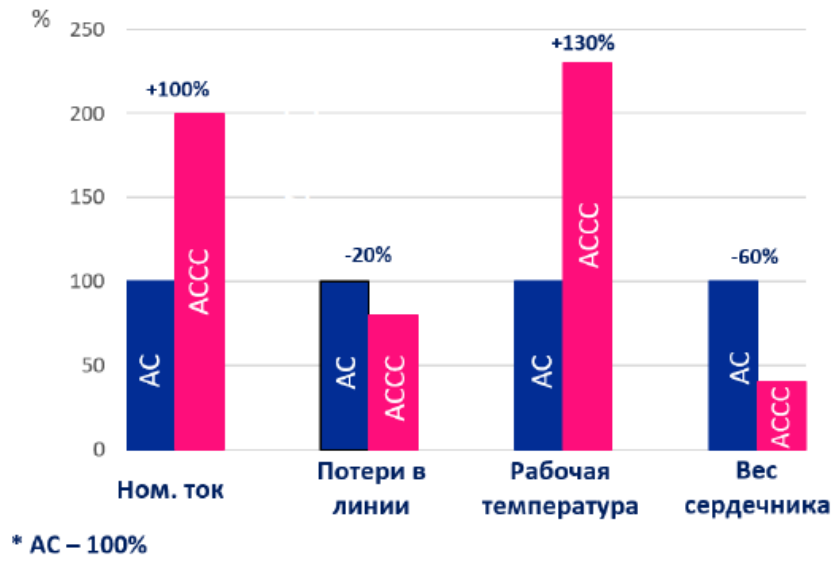



Рис. 3. Сравнение характеристик проводов АС и АССС

Источник: составлено автором

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что применение проводников повышенной пропускной способности с улучшенными механическими характеристиками позволяет значительно увеличить эксплуатационные возможности существующих линий электропередач, а также оптимизировать затраты на строительство новых воздушных линий за счет сокращения числа устанавливаемых опор.

**Список используемых источников**

1. Зарудский Г.К. Минимизация технических потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения с учетом коронирования провода // Электричество. 2022. № 3. С. 5–21.

2. Провод АССС, провод алюминиевый с композитным сердечником / ЛЭП-инжиниринг. [Электронный ресурс]. URL: https://energoteh-ek.ru/catalog/kabeli-i-provoda (дата обращения: 10.02.2026).

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РЕГИОНАХ

*Минусов А.А. – студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

*Мартко Е.О. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»*

**Аннотация**

В представленной статье обозревается проблематика влияния надежности электроснабжения на технологические процессы агропромышленного комплекса в условиях активного развития сельскохозяйственного сектора Алтайского края. Разобран один из способов повышения требуемых свойств, путём замены устаревшего электрооборудования на современное.

Электроснабжение потребителей, особенно в значимых сельскохозяйственных и промышленных регионах, таких как Алтайский край, является критически важным фактором социально-экономической стабильности и развития. Подстанция «Поспелихинская», выступающая ключевым узлом в сетях 110 кВ, обеспечивает электроснабжение важного аграрного района с развитой перерабатывающей инфраструктурой. Надежность ее работы напрямую влияет на бесперебойность технологических процессов в агропромышленном комплексе, работу объектов социальной сферы и качество жизни населения.

В современных условиях наблюдается устойчивая тенденция к росту и изменению характера нагрузок, обусловленная как естественным развитием территории, так и внедрением новых потребителей (например, объектов хранения и переработки сельхозпродукции). Одновременно с этим энергосистема Алтайского края подвергается плановой модернизации: производится замена и вывод из работы части трансформаторного оборудования, осуществляется реконструкция воздушных линий электропередачи (ВЛ) с заменой проводов, происходят изменения в топологической структуре сети 110/220 кВ. Эти преобразования, безусловно, направлены на повышение общей эффективности и пропускной способности сети. Однако они приводят к значительным изменениям режимных параметров, в первую очередь – уровней токов короткого замыкания (ТКЗ) на шинах подстанции и в прилегающей сети.

Изменение ТКЗ является системной проблемой, затрагивающей селективность и быстродействие релейной защиты и автоматики (РЗА). Устаревшие или неправильно настроенные устройства РЗА при новых, повышенных или пониженных значениях ТКЗ могут либо не сработать в аварийной ситуации (потеря чувствительности), либо ложно отключить исправное оборудование (потеря селективности). И то, и другое ведет к расширению аварии, длительным перерывам в электроснабжении и значительным экономическим ущербам. Таким образом,

возникает противоречие между объективной необходимостью модернизации сетевой инфраструктуры и потенциальным снижением надежности работы существующих систем защиты на конкретном объекте.

Следовательно, экономическая значимость электроснабжения потребителей, питающихся от подстанции «Поспелихинская», изменение параметров электроэнергетической системы и критическая зависимость надежности электроснабжения от корректной работы устройств РЗА обуславливают актуальность данной работы.

Повышение надежности электроснабжения, как свойства объектов (линий электропередач, коммутационных аппаратов, силового оборудования) сохранять во времени в заданных пределах значения своих параметров, которые характеризуют способность выполнять требуемые функции в установленных режимах, планируется произвести путем замены ныне имеющегося оборудования; Предложенным решением минимизируется вероятность отказов ключевых электроустановок, связанных с большим сроком эксплуатации [2].

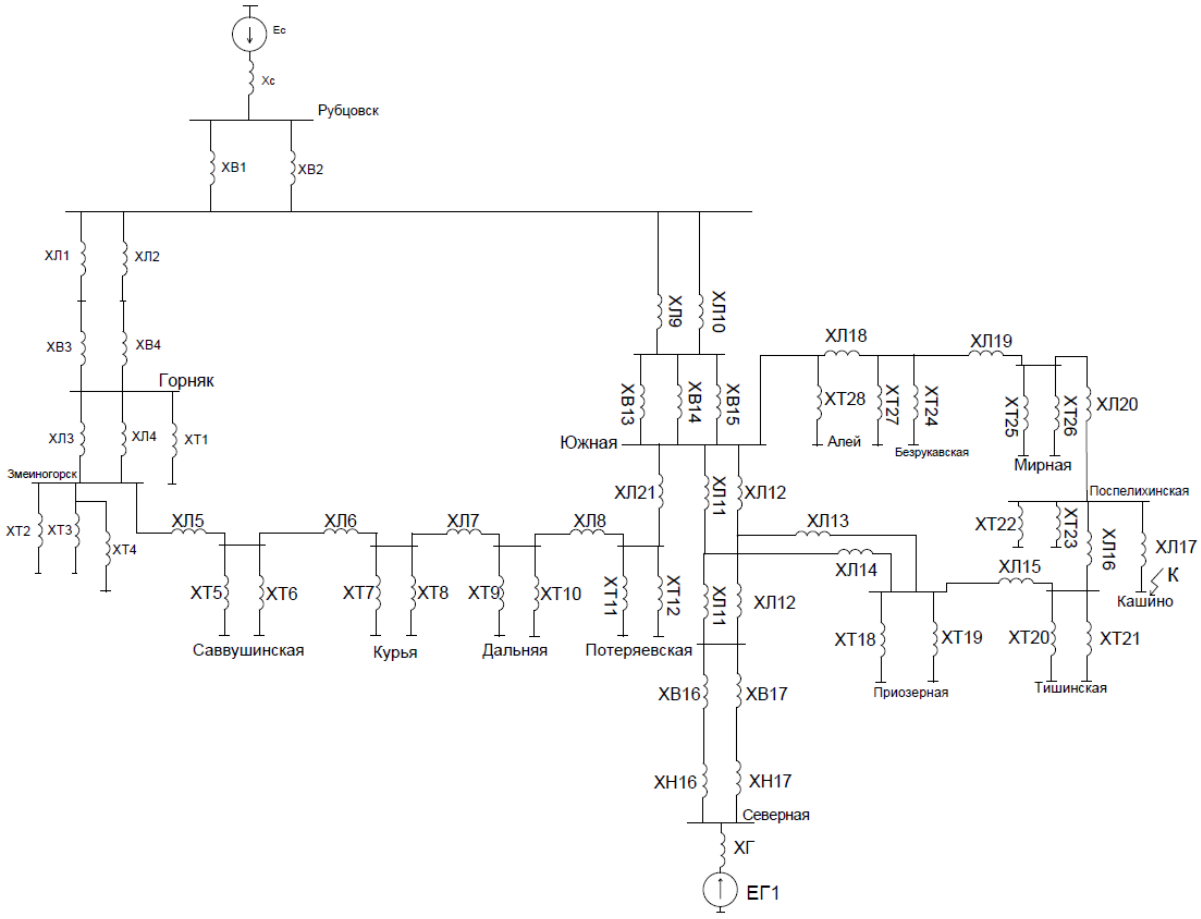



Рис. 1. Схема замещения рассматриваемой системы

Источник: составлено авторами

Основным параметром, определяющим характеристики электрооборудования электроэнергетической системы, является уровень токов короткого замыкания. Так, для данного энергорайона результатом расчетов являются следующие величины: $i_{уд} = 2411{,}43\,(А)$ – для трёхфазного короткого замыкания; $i_{уд} = 2018\,(А)$ – для однофазного короткого замыкания [1].

На основе расчётов также получаем следующую зависимость:

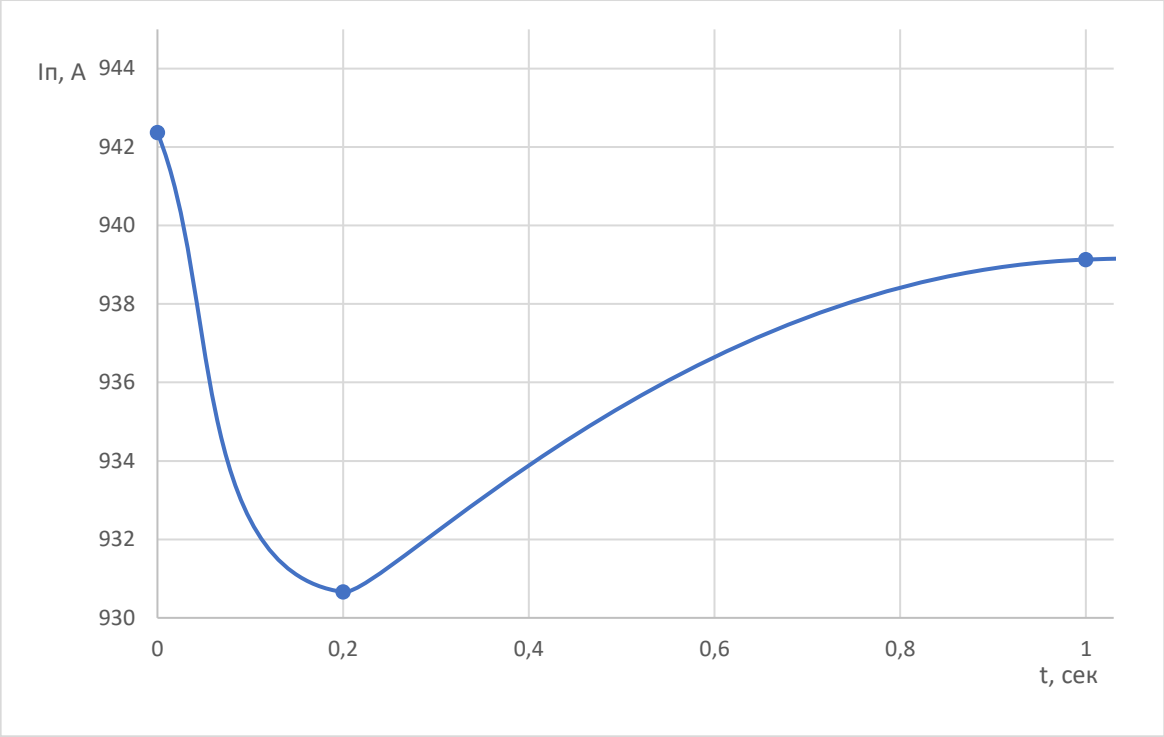



Рис. 2. Характерная зависимость периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания при автоматическом регулировании возбуждения синхронных генераторов

Источник: составлено авторами

По полученным вычислениям был произведен выбор автоматических выключателей на подстанции «Поспелихинская» - заводские параметры выключателя ВГТ-110 У1 полностью удовлетворяют критериям выбора, соответственно, ВГТ принимается к исполнению.

С целью защиты подстанции от перенапряжений были выбраны нелинейные ограничители перенапряжения ОПН-110 УХЛ1.

Согласно критериям, трансформаторы тока выбраны марки ТОГФ-110 УХЛ1, трансформаторы напряжения – ЗНОГ-110 УХЛ1.

Дополнительно произведен расчёт уставки и зоны действия токовой отсечки для ВЛ 110 кВ «Поспелихинская – Кашино» длинной 74,68 км.

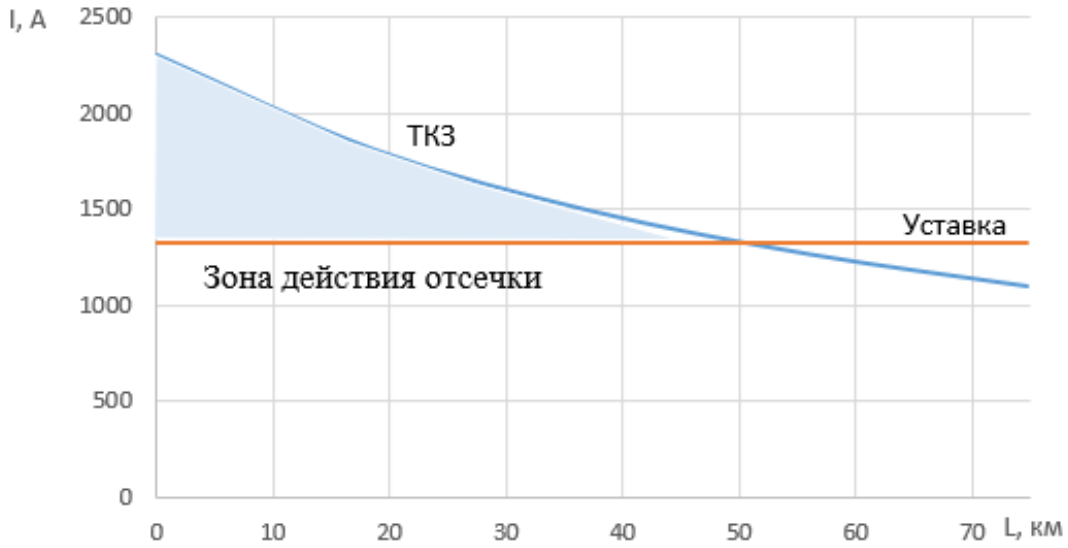



Рис. 3. Зона действия токовой отсечки

Источник: составлено авторами

Произведен выбор силовых трансформаторов по предложенному, упрощенному, ступенчатому графику суточных нагрузок для зимнего и летнего периода с учетом перегрузочной способности и количества потенциально отключаемых потребителей третьей категории. С учетом вышеперечисленного был выбран ТДН-25000/110.

В результате разработан комплекс технических решений, направленных на повышение надёжности электроснабжения потребителей подстанции «Поспелихинская» в условиях изменения электрической сети Алтайского края. Актуальность работы подтверждена выявленной взаимосвязью между плановой модернизацией сетевой инфраструктуры (изменение нагрузки, замена проводов, переконфигурация схем 110/220 кВ) и критическими параметрами работы систем защиты.

**Список используемых источников**

1. Савина Н.В. Надежность систем электроэнергетики. Благовещенск: Амурский государственный университет, 2011. 269 с.

2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. М.: Энергия, 1970. 517 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

*Новоселова М.С. – аспирант, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Марьин Г.Е. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

В настоящий момент растет спрос на альтернативные виды топлива. Такие топлива обладают относительно низкими энергетическими характеристиками, в своем составе могут содержать балласты, азот и серу, вследствие чего необходимо менять подход к их сжиганию.

Наиболее распространенным видом топлива для газотурбинных установок в настоящее время является природный газ. Однако все большую популярность набирают исследования в области альтернативных топливных газов: синтез-газы, получаемые из различного сырья, технологические газы, водород и содержащие его топливные смеси. Такие топлива отличаются по своим теплофизическим свойствам от природного газа, вследствие чего возникает необходимость корректировок в процессе топливоподготовки и горения.

Водород является экологически чистым видом топлива с разнообразием способов его производства. Энергетические характеристики значительно выше, чем у природного топлива. Однако область применения водорода в настоящее время ограничена, что связано с большими различиями в физических свойствах по сравнению с природным газом. Сжигание водорода с низким уровнем выбросов является сложной задачей, требующей специальных технологий, таких как диффузионные горелки, разбавление азотом или паром [1].

Основные методы производства водорода можно разделить по используемому сырью и способу получения. Промышленные способы включают паровой риформинг метана (около 85% мирового производства), пиролиз и дегидрирование

углеводородов. Электролиз воды, хотя и дает высокую чистоту водорода (до 99,9 %), пока занимает лишь около 5% производства из-за высоких энергозатрат.

Водород применяется в качестве подмешиваемого газа для повышения энергетических характеристик как альтернативных видов, так и природного газа, а также для снижения выбросов вредных веществ [2,3].

Основные виды синтез-газов, рассматриваемых в исследованиях на данный момент – синтез-газы, получаемые путем газификации угля, и биогаз.

Производство синтез-газа из угля основано на процессе газификации – высокотемпературной (750–1800 °C) конверсии твердого топлива с использованием окислителей (кислород, воздух, водяной пар). В зависимости от состава дутья различают воздушную, паровую, парокислородную и углекислотную газификацию. При воздушном дутье получают газ с высоким содержанием азота (до 50–56%) и низкой теплотой сгорания, пригодный только для энергетических целей. Парокислородная газификация под давлением позволяет получить синтез-газ среднего качества с содержанием водорода до 40% и оксида углерода 10–13%.

В составе синтез-газа, полученного при газификации угля, содержится CO, $CO_2$ и $H_2$. Помимо содержания углекислого газа в составе топлива и образования его при окислении угарного газа, такой синтез-газ обладает низкой теплотой сгорания, требующей увеличения расхода воздуха в камеру сгорания совместно с увеличением расхода самого топлива [4]. Синтез-газ обладает высокой скоростью горения, что связано с содержанием водорода в составе в больших концентрациях. Такая особенность накладывает ограничения на применение топлива в газотурбинных установках, работающих на переменных режимах.

Основным и наиболее распространенным методом производства биогаза является анаэробное сбраживание – биологический процесс разложения органического сырья в герметичных емкостях при отсутствии кислорода. Этот процесс протекает при участии трех групп бактерий (гидролизных, кислотообразующих и метанообразующих) в определенном температурном режиме (мезофильном 30-40°C или термофильном 50-60°C) и включает четыре последовательные стадии: гидролиз, ацидогенез, ацетогенез и метаногенез. Сырьем для производства биогаза могут послужит органические отходы: сельскохозяйственные, твердые бытовые отходы, отходы производств (деревообрабатывающие, пищевые и прочие производства). Основными компонентами биогаза являются $CH_4$, $H_2$ и $CO_2$[5, 6].

Сложность в использовании этого топлива для газотурбинных установок состоит в необходимости обеспечения процесса стабильного производства и качественной очистки от примесей топливного газа. Из-за сезонности работы производств, поставляющих сырье для биогаза, сложно обеспечить достаточные запасы для ГТУ большой и средней мощности. В связи с этим на данный момент биогаз сжигают в микротурбинах и газотурбинных установках малой мощности.

Отдельную категорию альтернативных топлив представляют низкокалорийные газы, такие как шахтный метан и газы термической переработки отходов. Шахтный метан, выделяющийся из угольных пластов, содержит в своем составе до 80% воздуха и имеет теплоту сгорания менее 10 МДж/м³, что делает невозможным его прямое сжигание в стандартных ГТУ без применения специальных методов стабилизации пламени, например, использования каталитических камер сгорания или добавок высококалорийного топлива. Аналогичные проблемы характерны для газов, получаемых при пиролизе и газификации твердых коммунальных отходов: их состав может включать значительные количества смол и щелочных металлов, требующих многоступенчатой очистки перед подачей в турбину.

Для технологических газов характерен нестабильный компонентный состав, содержит нежелательные вещества в составе, удорожающие стоимость подготовки топлива. Помимо этого, такие газы имеют низкую теплотворную способность.

Например, попутный нефтяной газ (ПНГ), выделяющийся при добыче нефти, ранее сжигалось в больших количествах, однако в последние годы были введены ограничения по количеству сжигаемого ПНГ. Таким образом, для утилизации излишков попутного нефтяного газа устанавливают газотурбинные установки со сложной системой подготовки топливного газа.

Адаптация вспомогательного оборудования для сжигания сложное и дорогостоящее решение, т.к. усложнено пониженной детонационной стойкостью топлива, наличием сероводорода, механических примесей, капельной жидкости и балласта

Для адаптации газотурбинной установки к сжиганию альтернативных топливных газов необходимы либо конструктивные изменения в самой установке, изменение подхода к подготовке топлива, настройка САР и более сложная подача в камеру сгорания ГТУ.

**Список используемых источников**

1. Алфаяад А. Г. Х. Возможность применения водорода как топлива для будущей работы газовой турбины // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 4 С. 18–24. DOI 10.17513/mjpfi.13373.

2. Марьин Г.Е., Мингалеева Г.Р., Новоселова М.С., Ахметшин А.Р. Добавление водородного топлива к синтез-газу для возможности сжигания в газовой турбине // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2024. № 9(426). С. 172–185. DOI 10.15518/isjaee.2024.09.172-185.

3. Новоселова М.С. Оценка эксплуатационных характеристик ГТУ типа НК-16-18 СТ Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. С. 730–733.

4. Новоселова М.С. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26, № 1. С. 131–143. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143.

5. Олейникова Е.Е. Биогазовая технология как новый тренд развития энергетики // Технологический суверенитет и цифровая трансформация: Материалы международной научно-технической конференции, Казань, 03 апреля 2025 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. С. 325–328.

6. Тимофеева С.С. Биотермохимическая технология утилизации отходов птицеводства // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29, № 9. С. 12–17. DOI 10.18412/1816-0395-2025-9-12-17.

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВАДРАТУРНОГО МЕТОДА ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Пряшникова П.Ф. – к.т.н., Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Севастополе*

**Аннотация**

Проведен сравнительный анализ эффективности методов вычисления вероятностных характеристик электрических систем Предложен способ повышения эффективности квадратурного метода.

**Введение**

В процессе эксплуатации параметры и внешние воздействия электрических систем изменяются случайным образом [2]. Для построения математических моделей электрических систем со случайными воздействиями и параметрами (стохастических электрических систем) обозначим $X = \{x = (x_i)_{i=1}^{n_x}\}$ – множество всех внешних воздействий, $Y = \{y = (y_i)_{i=1}^{n_y}\}$ – множество всех переменных выхода, используемых в каждой конкретной задачи. Обычно, математическая модель стохастической системы задается в виде решающей функции $\mu(E/x)$ или в виде триарного отношения.

Для задания решающей функции рассматриваются стохастические электрические системы, которые ставят в соответствие произвольному входному сигналу $x \in X$ определенное распределение вероятностей в пространстве выходных сигналов $Y$. Решающая функция $\mu(E/x)$ описывает принадлежность сигнала выхода $y \in Y$ множеству $E \subset Y$ при заданном входном сигнале $x \in X$.

В работе рассматриваются стохастические электрические системы, недетерминированность поведения которых обусловлена только наличием в системе случайных параметров. К этому классу систем могут быть приведены с помощью канонических или неканонических разложений случайных процессов системы со случайными внешними воздействиями. Для анализа и синтеза рассматриваемого класса систем более удобным является задание математической модели в виде триарного отношения $Z = X \times \Lambda \times Y$, где $X$ – нормированное пространство всевозможных значений входного сигнала, $\Lambda = \{\lambda = (\lambda_i)_{i=1}^{n_\lambda}\} \neq \emptyset$ – нормированное пространство всевозможных значений вектора случайных параметров системы, $Y$ – нормированное пространство всевозможных значений выходного сигнала системы, задаваемое с помощью требуемого для целей исследования электрической системы числом моментных характеристик или многомерных законов распределения вероятностей.

Вычисление вероятностных характеристик стохастических электрических сетей заключается в определении математического ожидания:

$$R = MBy, \tag{1}$$

где $B$ – оператор, ставящий в соответствие каждому входному сигналу $y \in Y$ функцию потерь $L = \{l_i\}_{i=1}^{n_l}$, являющуюся элементом нормированного пространства,

$M$ – оператор математического ожидания, определяемый равенством:

$$\mu l = \int_L l \, \mu_l(dl), \tag{2}$$

где $\mu_l(dl)$ – вероятностная мера случайной величины $l \in L$.

Математическое ожидание (2) в зависимости от конструкции оператора $B$ может выражать различные вероятностные характеристики электрической системы: математическое ожидание, корреляционную и ковариационную матрицы, многомерные законы распределения вероятностей, вероятность принадлежности токов и напряжений некоторому подмножеству $Y^* \subset Y$ и др.

Чаще всего при вычислении вероятностных характеристик электрических систем ограничиваются математическим ожиданием и корреляционной матрицей.

**Анализ эффективности методов вычисления вероятностных характеристик стохастических электрических систем**

Даже для простейших конструкций оператора $B$ отсутствуют аналитические методы вычисления интеграла (2). Каждый из существующих численных методов вычисления вероятностных характеристик стохастических электрических систем имеет свои достоинства и свои недостатки. Основными критериями эффективности практического применения существующих методов являются точность и объем вычислений, возможность учета влияния отдельных случайных параметров на величину вероятностных характеристик, универсальность метода, сложность приведения математической модели к виду, удобному для цифровизации. Наиболее важная оценка эффективности заключается в сравнении затрат времени вычислений, необходимого для достижения требуемой точности. При этом естественным является выделение двух групп методов: методов, точность которых может быть повышена путем увеличения затрат времени вычислений, и методов, принципиально не дающих такой возможности. Первая группа методов имеет существенное преимущество по сравнению со второй группой, которое будет возрастать с увеличением производительности вычислительной техники.

Для методов первой группы важной характеристикой является наличие и простота оценки точности вычислений в зависимости от затрат времени вычислительной техники. Для методов второй группы аналогичной характеристикой является наличие и простота оценки точности вычислений в зависимости от

характера принятых упрощений математической модели исследуемой стохастической электрической системы.

В настоящее время наиболее широкое распространение получил метод статистических испытаний, имеющий наглядную вероятностную интерпретацию, алгоритмическую простоту и универсальность. Формальная схема метода статистических испытаний вычисления вероятностных характеристик стохастических электрических сетей сводится к многократному розыгрышу выходного сигнала $y \in Y$ на декартовом произведении $X \times \Lambda$ в соответствии с вероятностными характеристиками пространств $X$ и $\Lambda$ и последующей обработки полученной информации по формулам математической статистики. Недостатки метода заключаются в его слабой сходимости и неточности формирования случайных параметров с помощью датчиков случайных чисел.

Для вычисления вероятностных характеристик многих стохастических электрических систем может с успехом применяться метод статистической линеаризации. Ограничения в применении метода статистической линеаризации связаны с необходимостью априорного задания законов распределения вероятностей входных сигналов нелинейных звеньев. Обычно эти законы считают нормальными, что в ряде случаев приводит к существенной погрешности в расчета или качественно неверным результатам.

Методы функциональных рядов основаны на представлении выходного сигнала стохастической электрической системы в виде ряда $y = \sum_{i=1}^{\infty} A_i x$, где $\{A_i\}_{i=1}^{\infty}$ – множество некоторых операторов, структуру которого выбирают, исходя в первую очередь из удобства исследования ряда. Для целей исследования стохастических систем наибольшее распространение получили ряды Вольтера. В общем случае получение операторов $\{A_i\}_{i=1}^{\infty}$ для рядов Вольтера представляет собой сложную задачу, для которой не найдены общие методы решения.

К аналитическим методам в первую очередь относится метод, основанный на решении уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова. Уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова является дифференциальным уравнением в частных производных параболического типа, для решения которого применяют метод степенных рядов и численные методы. Недостатком метода степенных рядов является слабая универсальность и необходимость сложных аналитических преобразований. Численные методы основаны на замене дифференциальных уравнений в частных производных системами обыкновенных дифференциальных уравнений относительно

значений плотности вероятности в фиксированных точках состояний стохастической электрической системы. При практических расчетах порядок систем обыкновенных дифференциальных уравнений может быть оценен значением $N = 11^n$, где $n$ – размерность пространства состояний электрической системы. Значение $N$ велико и на современная вычислительная техника позволяет за приемлемое время интегрировать эти уравнения при $n \leq 7$.

Квадратурные методы [3] основаны на приближенном вычислении интеграла (2) с помощью квадратурных формул вида:

$$\int_{\Lambda} p(\lambda) y(\lambda) d\,\Lambda \approx \sum_{i=1}^{n} a_i y(\lambda_i), \tag{3}$$

где $p(\lambda)$ – многомерный закон распределения плотности вероятности некоррелированных случайных параметров $\Lambda$, $a_i$ $(i = 1, \ldots, n)$ – коэффициенты квадратурной формулы, $\lambda_i$ $(i = 1, \ldots, n)$ – узлы квадратурной формулы, $y_i = y(\lambda_i)$ $(i = 1, \ldots, n)$ – реализации выходного сигнала стохастической электрической системы при некоторых фиксированных значениях (узлах) вектора $\lambda$.

Выбор узлов $\lambda_i$ $(i = 1, \ldots, n)$, коэффициентов $a_i$ $(i = 1, \ldots, n)$ и величины $n$ осуществляется исходя из принятого критерия близости правой и левой частей квадратурной формулы (3) и требуемой точности выполнения этого критерия. Высокая эффективность и перспективность применения квадратурных методов обусловлена тем, что основой этих методов является хорошо развитая математическая теория численного интегрирования [1]. Однако в разработанных квадратурных методах используются далеко не все возможности теории численного интегрирования. В частности, традиционно узлы и коэффициенты квадратурной формулы (3) выбирают так, чтобы обеспечить наивысшую алгебраическую степень точности (узлы Гаусса). Повышение эффективности может быть достигнуто за счет других способов выбора узлов.

**Повышение эффективности квадратурного метода**

Эффективность квадратурного метода будем характеризовать числом узлов $n^*$, необходимых для достижения заданной точности формулы (3). Значение $n^*$ есть сумма всех $n$, формул типа (3), используемых как непосредственно для вычисления вероятностных характеристик, так и для выбора числа узлов, необходимых для достижения заданной точности. Узлы квадратурных формул наивысшей

алгебраической степени точности являются корнями ортогональных полиномов. Корни соседних ортогональных полиномов не совпадают между собой, что приводит к неоправданным вычислительным затратам, необходимым для выбора числа узлов $n$. Предлагается с целью снижения этих затрат узлы квадратурной формулы выбирать так, чтобы: 1) выбираемые узлы в смысле некоторого критерия были близки к узлам Гаусса, 2) в квадратурных формулах для $n$ и $n+1$ максимальное число узлов совпадало. Обозначим $\lambda_i$ $(i = 1, \ldots, n)$ – узлы Гаусса, $\mu_i$ $(i = 1, \ldots, n)$ – узлы, выбираемые последовательно. Тогда в качестве критерия близости предлагается использовать норму $\rho(\{\lambda_i\}_{i=1}^n, \{\mu_i\}_{i=1}^n)$. Определяемую одной из формул: 1) $\rho(\{\lambda_i\}_{i=1}^n, \{\mu_i\}_{i=1}^n) = \min\limits_{1 \le i \le n} \left( \min\limits_{1 \le j \le n} |\lambda_i - \mu_j| \right)$; 2) $\rho(\{\lambda_i\}_{i=1}^n, \{\mu_i\}_{i=1}^n) = \min\limits_{\Lambda}(|\psi(\{\lambda_i\}_{i=1}^n) - \psi(\{\mu_i\}_{i=1}^n)|)$, где $\psi$ есть предельная функция распределения узлов, определяемая равенством $\psi(x) = \lim\limits_{n \to \infty} \psi_n(x)$, $\psi_n(x) = \sum_{j=0}^n \varphi_j(x)$, $\varphi_j(x) = j/n$, если $x_{n,j} \le x \le x_{n,j+1}$ $(j = 0, \ldots, n)$, $\psi_n(x) = 0$ в противном случае.

**Список используемых источников**

1. Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967. 500 с.

2. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В.А. Веникова. М.: Высшая школа, 1981. 288 с.

3. Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. М.: Машиностроение, 1968. 248 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

*Редель А.Е. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Газизуллин К.Ф. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Заровняев М.И. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

*Научный руководитель: Марьин Г.Е. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»*

**Аннотация**

Традиционные теплозащитные покрытия (ТЗП) для лопаток газотурбинных двигателей на основе системы NiCrAlY/YSZ часто ограничены по сроку службы из-за недостаточной адгезии между слоями, возникновения термических напряжений и диффузионных процессов при высоких температурах (до 1300°C). Это приводит к отслоению керамического слоя и преждевременному выходу лопаток из строя. Для улучшения адгезии введены промежуточный оксидный слой (MgO), модификация поверхности связующего слоя плазменной обработкой и добавление связующей стеклофазы в керамику. Разработан проект модернизированного покрытия, позволяющий снизить термические напряжения за счет буферного слоя MgO, повысить механическую прочность связующего слоя армированием графеном и CNT, а также увеличить адгезию керамики благодаря созданию микрорельефа и использованию стеклофазы. Предложенный комплекс мероприятий позволяет повысить адгезионную прочность между слоями не менее чем на 25–30% и значительно увеличить ресурс работы лопаток в условиях термоциклирования, что обеспечивает экономический эффект за счет увеличения межремонтных интервалов и снижения затрат на замену дорогостоящих компонентов ГТД.

## Введение

Лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) работают в экстремальных условиях высоких температур (до 1300°C), окислительной среды и эрозионного воздействия. Для их защиты применяются теплозащитные покрытия (ТЗП), которые должны обладать низкой теплопроводностью, стойкостью к окислению и механической прочностью [1]. Традиционная система покрытий состоит из металлического связующего слоя (MCrAlY, где M = Ni, Co) и керамического верхнего слоя из диоксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ). Однако по мере повышения рабочих температур требования к покрытиям ужесточаются, и классические составы перестают обеспечивать необходимый ресурс.

Основными проблемами существующих ТЗП являются:

– недостаточная адгезия между слоями, приводящая к отслоению керамики [2];

– термические напряжения, возникающие из-за различия коэффициентов термического расширения (КТР) материалов;

– диффузия элементов из основного сплава в покрытие и обратно, ускоряющая деградацию;

– окисление связующего слоя с образованием хрупких оксидов [3].

Целью настоящей работы является разработка модернизированного многослойного покрытия, включающего современные наноматериалы (графен, углеродные нанотрубки) и редкоземельные элементы (церий), а также специальные

промежуточные слои и методы обработки поверхности для повышения адгезионной прочности и общего ресурса покрытия.

**Материалы и методы модернизации**

Барьерный слой выполняет функцию защиты от высокотемпературной коррозии и окисления, а также служит основой для последующих слоёв. Сплав NiCoCrAlY выбран благодаря хорошей совместимости с никелевой основой и способности формировать плотную оксидную плёнку $\alpha$-$Al_2O_3$. Добавка церия (Ce) в количестве 0,5–1,0 мас. % способствует:

– улучшению адгезии оксидной плёнки;
– замедлению диффузии алюминия и других элементов;
– повышению термостабильности [4].

Толщина барьерного слоя составляет ~80–120 мкм.

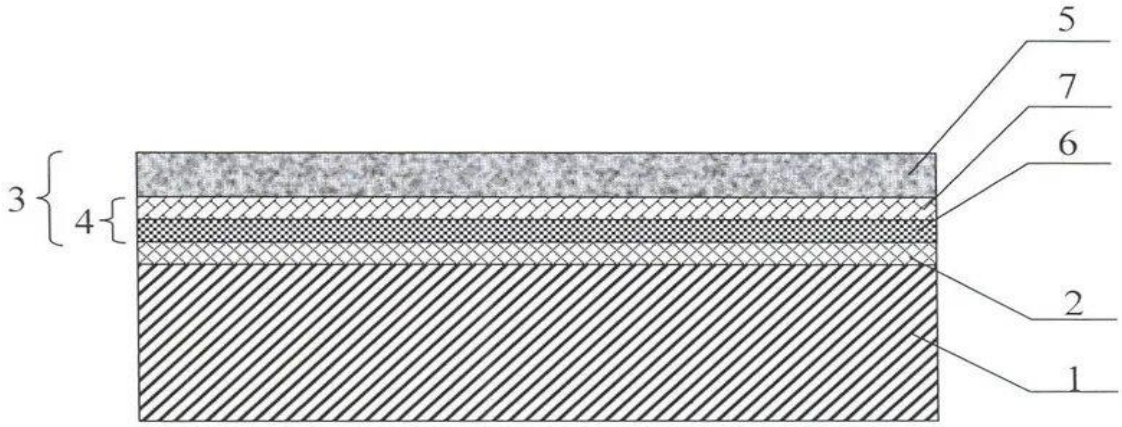



Схема расположения слоев и подслоев защитного покрытия

Фиг. 1

Рис.1. Схема модернизированного многослойного теплозащитного покрытия [4]

Связующий слой предназначен для механического и химического соединения барьерного слоя с керамикой. Введение в матрицу NiCrAlY углеродных наноматериалов (графен и многостенные углеродные нанотрубки) позволяет достичь следующих эффектов:

– увеличение прочности и жёсткости слоя за счёт армирования наноразмерными включениями;
– повышение теплопроводности, что способствует выравниванию температурного поля и снижению локальных перегревов;

– улучшение адгезии к керамике благодаря образованию химических связей между углеродом и компонентами верхнего слоя.

Концентрация нанодобавок составляет 1–3 мас.%. Толщина слоя – 50–80 мкм.

Верхний керамический слой обеспечивает основную теплоизоляцию. В его состав входит диоксид циркония, стабилизированный иттрием (YSZ), что обеспечивает низкую теплопроводность и высокий КТР, близкий к металлическим слоям. Добавка оксида алюминия ($Al_2O_3$, 5–10 мас. %) повышает твёрдость и стойкость к эрозии, а карбид кремния (SiC, 5–10 мас.%) дополнительно увеличивает термостойкость и механическую прочность [5].

Толщина керамического слоя – 200–300 мкм.

**Повышение адгезионной прочности**

Между барьерным слоем NiCoCrAlY+Ce и связующим слоем вводится тонкий (2–5 мкм) слой оксида магния (MgO), наносимый методом электронно-лучевого испарения. MgO обладает промежуточным КТР между металлом и керамикой, что снижает термические напряжения. Кроме того, он препятствует взаимной диффузии элементов и «залечивает» микротрещины.

Термические напряжения на границе раздела можно оценить по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{F} = -\alpha * \Delta * T * E \tag{1}$$

где E – модуль упругости,

α – КТР,

ΔT – перепад температур,

ν – коэффициент Пуассона.

Введение буферного слоя позволяет уменьшить эффективный градиент α.

Перед нанесением керамики поверхность связующего слоя (NiCrAlY+графен+CNT) подвергается плазменной обработке, создающей равномерный микрорельеф с шероховатостью Ra = 4–8 мкм. Это увеличивает площадь контакта и формирует механические замки, повышающие адгезию. Дополнительно возможно применение лазерного текстурирования.

В состав керамического слоя добавляется небольшое количество (3–5 мас. %) стеклообразной фазы (например, алюмосиликатное стекло или продукт пиролиза

полиакрилонитрила). При высокотемпературном спекании стеклофаза размягчается, заполняет микронеровности на поверхности связующего слоя и, затвердевая, создаёт химическую связь. Это значительно повышает прочность сцепления.

Адгезионная прочность может быть оценена методом нормального отрыва. Ожидаемое увеличение по сравнению с традиционной системой составляет не менее 25–30%.

**Формирование защитных покрытий**

Финишным этапом ремонта является нанесение теплозащитного слоя. Типовое покрытие состоит из двух слоёв:

– металлический подслой (MCrAlY), выполняющий функцию барьера против высокотемпературной коррозии. Его наносят методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF) или плазменного напыления в вакууме;

– керамический слой (диоксид циркония, стабилизированный иттрием), который снижает температуру металла на 100–150 °C. Наиболее качественные покрытия получают методом электронно-лучевого испарения (EB-PVD) [5].

Наличие таких покрытий позволяет продлить межремонтный ресурс лопатки в 1,5–2 раза. Сложность их применения в ремонте связана с высокой стоимостью оборудования и необходимостью строгого соблюдения технологии.

Табл.1

Сравнительный анализ конструкций покрытия

| Компонент | Базовая конструкция | Модернизированная конструкция | Решаемая проблема | Вклад в эффективность |
|---|---|---|---|---|
| Барьерный слой | NiCrAlY | NiCoCrAlY + Ce | Окисление, диффузия | Повышение стойкости в 1,5 р. |
| Связующее покрытие | NiCrAlY | NiCrAlY + графен + CNT | Механическая прочность, адгезия | Увеличение прочности на 20% |
| Керамический слой | YSZ | YSZ + $Al_2O_3$ + SiC + стеклофаза | Эрозия, теплопроводность, адгезия | Снижение теплопроводности на 15% |
| Промежуточный слой | Отсутствует | MgO (2–5 мкм) | Термические напряжения | Снижение напряжений на 30% |
| Обработка поверхности | Механическая зачистка | Плазменное текстурирование | Адгезия | Увеличение адгезии на 25% |

Источник: составлено авторами

**Заключение**

Реализация предложенного комплекса мероприятий позволяет достичь следующих результатов:

– повышение адгезионной прочности между слоями не менее чем на 25%, основной вклад в которое вносят промежуточный слой MgO, модификация поверхности и связующая фаза в керамике;

– увеличение срока службы лопаток в условиях термоциклирования за счёт снижения термических напряжений и повышения стойкости к окислению;

– экономический эффект от модернизации складывается из сокращения частоты замен лопаток и увеличения межремонтных интервалов ГТД.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

1. Оптимизация концентрации нанодобавок для различных условий эксплуатации.

2. Исследование применения альтернативных оксидных буферных слоёв (например, $Y_2O_3$, $ZrO_2$).

3. Разработка методов неразрушающего контроля адгезии многослойных покрытий.

**Список используемых источников**

1. Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбин. М.: ВИАМ, 2021. 98 с.

2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. С. 245–258.

3. Елисеев Ю.С., Крымов В.В. Ремонт лопаток газотурбинных двигателей. М.: Изд-во МАИ, 2020. 312 с.

4. Ломовской О.В., Хандожко А.В. Лазерная наплавка жаропрочных сплавов на детали ГТД // Сварочное производство. 2023. № 5. С. 28–34.

5. Толораия В.Н., Оспенникова О.Г. Термическая обработка монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2022. № 3. С. 15–22.

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

*Рузанов Р.В. – аспирант, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»*

*Вахнина В.В. – д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»*

**Аннотация**

В статье рассматривается проблема выявления в многоквартирных жилых домах ненормированной электрической нагрузки. Выполнен обзор и анализ российских и зарубежных научных публикаций о классификации домохозяйств по характеру и объему электропотребления, дается краткая характеристика ключевых факторов, влияющих на электропотребление домохозяйств и обосновывается выбор ключевых параметров для классификации бытовых потребителей электрической энергии.

## Введение

В настоящий момент актуальной проблемой для энергосбытовых компаний и сетевых организаций является все большее число потребителей, чьи параметры потребления электрической энергии не соответствуют параметрам, заявленным в договоре энергоснабжения. Так в многоквартирных жилых домах все большее распространение получает майнинг криптовалют. Данный вид деятельности запрещен на некоторых территориях Российской Федерации на период с 1 января 2025 года по 15 марта 2031 года на основании постановления Правительства РФ от 23.12.2024 №1869 [2].

Также, в соответствии с Федеральным законом от 27.12.2018 № 522-ФЗ, с 1 июля 2020 года обязанность по организации учета электроэнергии потребителям полностью переходит к электросетевым и энергосбытовым организациям [4].

С 1 января 2022 года в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 19 июня 2020 г. № 890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)», разрешается установка только интеллектуальных приборов учета потребителям, а с 1 января 2023 года установлена ответственность электросетевых и энергосбытовых организаций за непредоставление или ненадлежащее предоставление минимального

набора функций интеллектуальных систем учета (далее ИСУ) потребителям электроэнергии [1].

Все вышеперечисленное создает правовую основу для построения систем учета, позволяющих выявлять нарушения в процессе потребления электрической энергии со стороны потребителей многоквартирных жилых домов. Создание интеллектуальных систем учета электрической энергии становится не правом, а обязанностью сетевых и энергосбытовых организаций.

Таким образом у сетевых и энергосбытовых организаций появляется инструмент, позволяющий контролировать параметры потребления электрической энергии в реальном времени, что могло бы способствовать выявлению потребителей, осуществляющих коммерческую деятельность в многоквартирных домах, а также на объектах, отнесенных к потребителям, приравненным к населению.

Кроме того, для соответствия современному уровню показателей качества электроэнергии в бытовых сетях требуется контролировать уровень гармонической эмиссии бытовых нелинейных электроприемников, которые получили широкое распространение в многоквартирных жилых домах и, кроме всего прочего, характеризуются неопределенностью параметров и случайным режимом функционирования, а также взаимным влиянием на параметры гармонической эмиссии друг друга [5].

**Объект и методы исследования**

Объектом данного исследования являются параметры типичных электропотребителей, установленных в квартирах многоквартирных жилых домов. Исследование этих параметров, которые могли бы передаваться в интеллектуальную систему учета с интеллектуальных приборов учета в режиме реального времени для обработки с помощью алгоритмов искусственного интеллекта для оперативного выявления нехарактерного потребления в жилом доме, является целью данной научной работы. Задачей для алгоритмов искусственного интеллекта является выявление отклонений ключевых параметров электропотребления от их нормальных значений, а также предположительном определении типа и характера нестандартной нагрузки и выдаче своевременного предупреждения для администратора ИСУ о нехарактерном потреблении с указанием конкретного адреса потребителя.

Современные интеллектуальные приборы учета позволяют контролировать качество электроэнергии по следующим основным параметрам:

– положительное и отрицательное отклонение напряжения;
– отклонение частоты;
– длительность провала напряжения;
– глубина провала напряжения;
– длительность перенапряжения;
– длительность прерывания электроснабжения;
– длительность (положительных и отрицательных отклонений напряжения) и количество (перенапряжений) нарушений в текущем расчетном периоде (месяце).

В интеллектуальных приборах учета также реализована настройка параметров для контроля качества электрической энергии:

– опорное напряжение – согласованное напряжение в системе электроснабжения;
– граница контроля прерывания напряжения;
– граница контроля провала напряжения;
– граница контроля перенапряжения.

Все эти данные могут быть переданы по интерфейсу связи в сервер ИСУ для обработки и подачи уведомлений администратору ИСУ [3].

Эти данные предполагается использовать для классификации каждой квартиры МКД по типу, характеру и объему потребления. Для каждого типа квартир предполагается определить типовой график нагрузки и объем потребления в сутки и в месяц. Каждой квартире предполагается присвоить стартовый рейтинг в зависимости от типа жилого дома, класса жилья, количества комнат и площади квартиры. Этот рейтинг будет изменяться в зависимости от характера и объема потребления электроэнергии. При превышении пороговых значений потребления электроэнергии для данного типа квартир, ей будут присваиваться дополнительные баллы рейтинга, которые достигнув определенной суммы, будут сигнализировать энергосбытовой и электросетевой компании о необходимости проведения проверки потребителя для выявления нарушений со стороны потребителя электроэнергии.

Подобная практика уже существует в европейских странах и успешно применяется для классификации потребителей электроэнергии, моделирования энергопотребления зданий, расчета летней тепловой нагрузки и зимней потребности в отоплении [6].

Также при классификации потребителей необходимо учитывать и демографические факторы. В статье [8] исследователи из Южной Кореи в качестве

ключевых демографических факторов для классификации потребителей используют площадь жилья, количество членов семьи и уровень заработной платы.

В статье [7] Андерсен и др. обнаруживают, что как уровень, так и сроки потребления главным образом зависят от таких характеристик домохозяйства, как тип жилища, технология его отопления, использование электромобилей, а также количество и возраст проживающих в доме.

Однако необходимо отметить, что для целей данного исследования целесообразно использование дополнительного фактора, такого как общая энергоэффективность здания для учета степени влияния климатических особенностей региона на характер электропотребления домохозяйства, т.к. в менее энергоэффективных зданиях будет наблюдаться существенное увеличение объема потребления электроэнергии, приходящегося на климатические установки, системы отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC).

Возможность снятия почасового профиля электропотребления также позволит составить типовые графики электропотребления для каждого типа домохозяйств, что в свою очередь позволило бы рассчитать среднесуточное, среднемесячное и среднегодовое потребление для каждого типа квартир, что дало бы дополнительную возможность контроля потребителей электросетевыми и энергосбытовыми компаниями.

**Результаты**

В результате проведенного анализа мировой практики по классификации потребителей электроэнергии, был сделан вывод о необходимости разделения ключевых факторов, характеризующих электропотребление домохозяйств на две основные группы: это факторы непосредственно отражающие численные показатели электропотребления и демографические факторы.

В каждой группе были выбраны следующие ключевые факторы для классификации домохозяйств по отношению к электропотреблению.

К ключевым показателям электропотребления можно отнести:

– почасовые значения электропотребления за сутки;
– общий объем потребления за сутки, месяц, год;
– мгновенные значения потребляемой мощности в часы пиковых нагрузок.

К ключевым демографическим показателям можно отнести:

– площадь жилья;

– тип жилища;
– технология отопления жилья;
– -количество и возраст проживающих в доме.

**Заключение**

Представлено обоснование необходимости классификации домохозяйств многоквартирных жилых домов по отношению к электропотреблению. Проведение классификации позволит повысить качество мониторинга электропотребления электросетевыми и энергосбытовыми компаниями, а также снизить объем проводимых выездных проверок потребителей с одновременным повышением их эффективности.

Классификация потребителей и формирование типовых графиков электропотребления для каждого типа квартир позволило бы оценить экономический эффект от применения различного тарифного расписания для каждого типа квартир.

Также, в связи с повсеместным внедрением интеллектуальных приборов учета, появляется возможность оценки готовности перехода к почасовым тарифам для расчета стоимости электроэнергии для населения по аналогии с коммерческими потребителями 3-6 ценовых категорий. Это в свою очередь позволило бы оценить экономические последствия отказа от перекрестного субсидирования в электроэнергетике России в целом.

**Список используемых источников**

1. Постановление Правительства РФ «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учёта электрической энергии (мощности)» от 19.06.2020 № 890 // Официальный интернет-портал правовой информации. 2020. № 0001202006230034. Ст. 2 (с изм. и доп. в ред. от 29.03.2024).

2. Постановление Правительства РФ «Об установлении запрета на осуществление майнинга цифровой валюты (в том числе участие в майнинг-пуле) в отдельных субъектах Российской Федерации и на отдельных территориях субъектов Российской Федерации» от 23.12.2024 № 1869 // Официальный интернет-портал правовой информации. 2024. № 0001202412240018. Ст. 2 (с изм. и доп. в ред. от 23.12.2024).

3. Счётчик электрической энергии однофазный многофункциональный CE207 R7. Версия ВПО 12.X. Руководство пользователя / Энергомера. [Электронный

ресурс]. URL: https://www.energomera.ru/documentations/product/ce207_r7_spds_v_12_rp.pdf (дата обращения: 16.02.2026).

4. Федеральный закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учёта электрической энергии (мощности) в Российской Федерации» от 27.12.2018 № 522 // Официальный интернет-портал правовой информации. 2018. № 0001201812280018. Ст. 1 (с изм. и доп. в ред. от 28.12.2018).

5. Янченко С.А. Теоретические и практические основы анализа несинусоидальных режимов многокомпонентных электротехнических комплексов ЖКХ: дис. … д-ра техн. наук: 2.4.2. М., 2022. 181 с.

6. Czétány L., Vámos V., Horváth M., Szalay Z., Mota-Babiloni A., Deme-Bélafi Z., Csoknyai T. Development of electricity consumption profiles of residential buildings based on smart meter data clustering // Energy & Buildings. 2021. № 252. P. 1–19.

7. Andersen F.M., Gunkel P.A., Jacobsen H.K., Kitzing L. Residential electricity consumption and household characteristics: An econometric analysis of Danish smart-meter data // Energy Economics. 2021. № 100. P. 1–28.

8. Jeong H.C., Jang M., Kim T., Joo S.-K. Clustering of Load Profiles of Residential Customers Using Extreme Points and Demographic Characteristics // Electronics. 2021. № 10. P. 1–10.

# ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ (DIGITAL TWINS) ДЛЯ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ОПЫТ ИХ ВНЕДРЕНИЯ

*Смолина Л.М. – студент, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»*

*Плотников М.П. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет»*

**Аннотация**

В статье представлен аналитический обзор технологий цифровых двойников, применяемых в электроэнергетике, а также рассмотрен опыт их внедрения в энергетической и нефтегазовой отраслях. Проанализированы архитектурные принципы построения цифровых двойников, их типология, функциональные возможности и технологические основы, включая методы математического моделирования, промышленного интернета вещей, систем предиктивной аналитики и искусственного интеллекта.

**Введение**

Современная электроэнергетика характеризуется возрастающей сложностью технологических процессов, высокой степенью износа оборудования и необходимостью повышения надежности энергоснабжения. Переход к цифровой энергетике обусловлен развитием интеллектуальных сетей, распределенной генерации и систем автоматизированного управления технологическими процессами. В этих условиях традиционные методы мониторинга и диагностики оборудования становятся недостаточно эффективными, что требует внедрения новых цифровых инструментов анализа и прогнозирования.

Одним из наиболее перспективных направлений цифровой трансформации энергетической отрасли является технология цифровых двойников (Digital Twin). Цифровой двойник представляет собой динамическую цифровую модель объекта, синхронизированную с физическим прототипом посредством потоков данных в реальном времени. Использование таких моделей позволяет прогнозировать техническое состояние оборудования, оптимизировать режимы эксплуатации и снижать эксплуатационные риски.

Внедрение цифровых двойников особенно актуально для электроэнергетики, где высокая стоимость оборудования, требования к надежности и непрерывности энергоснабжения делают критически важными задачи предиктивной диагностики и интеллектуального управления. В последние годы реализован ряд проектов в энергетике, нефтегазовой промышленности и атомной отрасли, демонстрирующих значительный экономический и эксплуатационный эффект.

Цель настоящей работы – анализ технологий цифровых двойников в электроэнергетике, исследование их архитектуры, возможностей практического применения и оценка перспектив дальнейшего развития.

Актуальность темы подтверждается масштабами рынка: по оценкам экспертов, объем ИТ-решений для российской энергетики составляет 2,3–2,5 трлн рублей, из которых около 12% приходится на цифровые двойники. При этом эффективность отрасли в результате цифровизации может повыситься на 3–5%. В России реализуется ряд крупных проектов в этой сфере, включая разработки компаний ООО «Энергодвойник», АНК «Башнефть» (входит в структуру «Роснефти»), АО «РОТЕК» АО «ВНИИАЭС», а также пилотные внедрения на объектах «Россети Московский регион» и в нефтегазовом секторе [3].

**Архитектура цифровых двойников**

В научной литературе выделяют три типа цифровых двойников: двойник-прототип (виртуальный аналог на всех стадиях жизненного цикла от проектирования до утилизации), двойник-экземпляр (содержит данные мониторинга конкретного оборудования, материалы и комплектующие) и агрегированный двойник (объединяет прототип и экземпляр, собирая всю доступную информацию об объекте) [4].

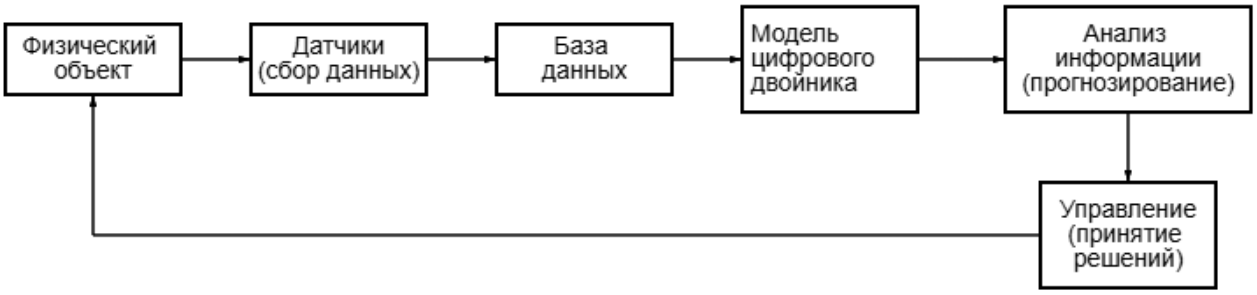



Рис. 1. Алгоритм работы предиктивной диагностики

Источник: составлено автором

Приведенная структура (рис.1) обеспечивает непрерывную синхронизацию между реальным и виртуальным объектами, что критически важно для достоверности прогнозов и своевременного выявления отклонений.

**Разработка цифрового двойника на базе MATLAB Simulink**

Для исследования режимов работы распределенной генерации в составе энергосистемы нами была разработана компьютерная модель в среде MATLAB Simulink (рис.2), включающая синхронные генераторы, линии электропередачи, трансформаторы и нагрузки. Данная модель позволит воспроизводить различные режимы функционирования, в том числе переходные процессы при изменениях нагрузки или аварийных возмущениях. На основе такой модели может быть построен цифровой двойник энергообъекта, который в реальном времени получает данные с физической установки, уточняет параметры и прогнозирует поведение системы. Использование MATLAB Simulink для создания цифрового двойника даст возможность гибко настраивать алгоритмы управления (включая регуляторы возбуждения и скорости), а также проводить виртуальные испытания без риска для

реального оборудования. Это позволит оптимизировать режимы работы, повысить надежность и эффективность эксплуатации установок распределенной генерации.

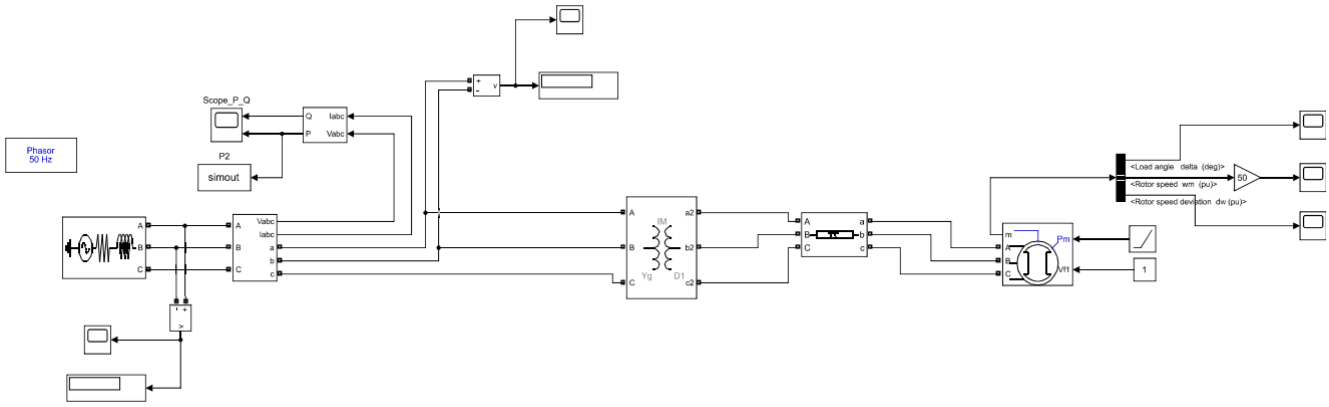



Рис. 2. Модель для анализа мини ГЭС

Источник: составлено автором

**Практический опыт внедрения**

Анализ российских разработок показывает, что российские компании способны создавать конкурентоспособные цифровые продукты для энергетики. В «Башнефти» (дочерняя структура «Роснефти») завершили испытания системы мониторинга электрогенераторов. Технически решение строится на паре «датчики – цифровой двойник»: сенсоры собирают данные о работе агрегата (вибрация, напряжение, электромагнитное поле), а виртуальная модель сравнивает их с нормативами и сигнализирует о необходимости ремонта. Это исключает внеплановые остановки и сокращает затраты. По итогам опытной эксплуатации на ГПЭС «Метели» подсчитано, что за пять лет использование системы принесет 12 млн. рублей экономии.

В России активно развиваются компании, специализирующиеся на создании программного обеспечения для цифровых двойников в энергетике. Одним из примеров является ООО «Цифровой двойник», который при поддержке Фонда содействия инновациям разрабатывает платформу для моделирования и оптимизации энергетических систем. Созданное компанией ПО включено в реестр отечественного программного обеспечения и позволяет решать широкий круг задач: от прогнозирования состояния тепловых сетей до оптимизации режимов работы генерирующего оборудования. В основе решений лежат методы искусственного интеллекта и математического моделирования, которые, по данным разработчика,

обеспечивают повышение эффективности в среднем на 18% и снижение рисков на 27%.

В создании цифровых двойников участвуют также крупные отраслевые предприятия. Так, например, компания АО «Ротек» создала диагностическую систему «Прана», которая успешно применяется для контроля состояния паровых турбин, генераторов и трансформаторного парка. Специалисты АО «ВНИИАЭС» разработали уникальный программно-аппаратный комплекс для атомной энергетики, позволяющий моделировать поведение оборудования на этапе проектирования и прорабатывать сценарии развития аварийных ситуаций. Показателен пример Уральского турбинного завода: внедрение цифрового двойника позволило сократить производственный цикл изготовления турбины Кп-77-6,8 в несколько раз – с 2,5 лет до 8 месяцев.

Значительные результаты получены и в нефтегазовом секторе. Создание цифровых моделей месторождений в ХМАО и Башкирии обеспечило экономический эффект более 1 млрд рублей. Дополнительными преимуществами стали повышение энергоэффективности на 5% и оптимизация расходов [5].

В рамках пилотного проекта, реализуемого компанией «Россети Московский регион» на подстанциях 110–220 кВ, ведется разработка системы поддержки принятия решений, основанной на технологии цифровых двойников. Ее ключевая задача – автоматизация процедур, связанных с выводом оборудования в ремонт. Весь процесс разбит на 12 последовательных шагов, начиная с оформления заявки дежурным персоналом и заканчивая закрытием наряда. При этом автоматически контролируется соблюдение критически важных ограничений: не допускается обесточивание потребителей, выполняются требования инструкций по переключениям и правила охраны труда.

Функциональные возможности разрабатываемой системы охватывают широкий круг задач. Предполагается оценивать текущее техническое состояние оборудования и его остаточный ресурс, проводить анализ уязвимостей, осуществлять предиктивный анализ поведения, контролировать режимные параметры (напряжение, работу устройств РПН и компенсации реактивной мощности). Также в функционал включено выявление нарушений техники безопасности с применением систем машинного зрения, интеграция с АСУТП и ведение электронного документооборота.

Ожидается, что внедрение такой системы позволит сократить время выполнения задач дежурным персоналом, минимизировать количество ошибок и

повысить достоверность информации о состоянии оборудования. Дополнительно проектом предусмотрено моделирование потоков событий на заданные временные интервалы и расчет индексов текущего состояния для определения приоритетности ремонтных работ.

Основные преимущества цифровых двойников: оптимизация прогнозирования и возможность принятия стратегических решений на основе данных; непрерывный мониторинг и диагностика в реальном времени; автоматизация процессов и сокращение количества итераций при принятии решений; повышение точности моделей и согласованности данных между подразделениями; сокращение сроков технологического присоединения. Несмотря на высокую перспективность цифровых двойников, их внедрение связано с рядом проблем: необходимость высокоточных данных; высокая стоимость внедрения; требования к вычислительным ресурсам; вопросы информационной безопасности.

Таким образом, технология цифровых двойников позволяет эффективно решать задачи мониторинга, диагностики и автоматизации в электроэнергетике. Рассмотренные примеры подтверждают готовность решений к практическому внедрению. Перспективы развития связаны с интеграцией в контуры автоматического управления, повышением качества данных, применением методов машинного обучения и переход к интеллектуальным энергосистемам.

**Список используемых источников**

1. Гвоздев Д.Б., Болонов В.О., Окнин Е.П., Здирук К.Б., Кузьминов И.М. О возможности применения цифровых двойников в управлении объектами электроэнергетики // Энергия единой сети. 2019. № 6(57). С. 30–37.

2. Гвоздев Д.Б., Болонов В.О., Окнин Е.П., Здирук К.Б., Кузьминов И.М. Организация цифрового дистанционного управления оборудованием и устройствами РЗА в «Россети Московский регион» (ПАО «МОЭСК») // EEPIR: электронный журнал. 2019. 31 окт. [Электронный ресурс]. URL: https://eepir.ru/article/organizaciya-cifrovogo-distancionnogo-upravleniya-oborudovaniem-i-ustroystvami-rzav-rosseti-moskovskiy-region-pao-moesk/ (дата обращения: 16.02.2026).

3. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 12 с.

4. Гурьев Д.Д., Моисеенко Д.Е., Гаврикова Н.В. Внедрение технологии цифровых двойников на Харасавэйском месторождении для повышения

энергетической эффективности. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. С. 199–201.– DOI: 10.24412/cl-37425-2025-1-199-202.

5. Двойники в сетях: как цифровизация меняет энергетику России / СберПро Медиа. – 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://sber.pro/publication/dvojniki-v-setyah-kak-cifrovizaciya-menyaet-energetiku-rossii/(дата обращения: 09.02.2026).

6. Моравель В.И., Борисов В.А. Возможности использования цифровых двойников в задачах электроэнергетики // Современные научные исследования и инновации. – 2022. № 6. [Электронный ресурс]. URL: https://web.snauka.ru/issues/2022/06/98404 (дата обращения: 09.02.2026).

7. Кокорев Д.С., Посмаков Н.П. Применение цифровых двойников в производственных процессах // Colloquium-journal. 2019. № 26(50). С. 38–45. – DOI: 10.24411/2520-6990-2019-10930.

8. Ульянов А.Д., Короткова К.Е. Применение цифровых двойников для решения задач электроэнергетики, оптимизации и автоматического управления. Братск: Братский государственный университет, 2024. С.22-26.

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ УПРОЧНЕННЫХ БОРОСИЛИЦИРОВАНИЕМ

*Смышляев М.О. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»*

*Абрамов В.А. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»*

*Заровняев М.И. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»*

**Аннотация**

В статье исследуется возможность упрочнения изделий боросилицированием. Такое упрочнение приводит к увеличению поверхностной микротвердости до 11000-12000 МПа при уровне остаточных напряжений сжатия в упрочненном слое 320-380 МПа и уменьшению изнашивания по сравнению с цементированными в 2,5-2,8 раза. Технологические процессы упрочнения деталей борированием и боросилицированием по сравнению с другими способами диффузионного насыщения проводятся при относительно меньшем времени насыщения.

Известно, что при термической обработке деталей машин методом диффузионного насыщения, а именно боросилицированием, достигаются уникальные эксплуатационные характеристики. При поверхностной микротвердости деталей в пределах 11000-12000 МПа и формировании в обработанном слое остаточных напряжений сжатия величиной 320-380 МПа, скорость их износа снижается в несколько раз по сравнению с традиционной углеродной обработкой. Согласно литературным данным [4], это снижение составляет от 2,5 до 2,80 раза. Такой значительный прирост износостойкости объясняется комплексным воздействием двух факторов: во-первых, образованием на поверхности детали высокотвердых фаз, таких как бориды железа FeB и $Fe_2B$, а также сложных бороцементитных соединений; во-вторых, формированием благоприятного поля остаточных сжимающих напряжений, которые препятствуют зарождению и распространению трещин при трении и циклических нагрузках. В связи с этим нами предполагается использование данной методики химико-термической обработки (ХТО) для упрочнения ответственных деталей газотурбинных установок (ГТУ), работающих в условиях интенсивного изнашивания, высоких температур и знакопеременных нагрузок [1]. К числу таких деталей можно отнести рабочие и сопловые лопатки компрессора и турбины, элементы топливной аппаратуры высокого давления, крепежные детали, валы и подшипники скольжения, которые подвергаются воздействию агрессивных сред и механических нагрузок.

**Методология контроля качества упрочненного слоя**

С целью проверки величины, знака и характера распределения существующих напряжений после использования химико-термической операции деталей, а также для оценки эффективности самой обработки, можно применить комплексную методику испытаний на износостойкость и физико-механических исследований. Данная методика должна включать в себя следующие последовательные этапы:

Измерение микротвердости обработанного слоя. Этот этап предполагает проведение замеров микротвердости по глубине упрочненного слоя на поперечных шлифах с шагом 10-20 мкм. Для этого используются микротвердомеры типа ПМТ-3 или Виккерс при нагрузках 50-100 г. По результатам замеров строится профиль распределения твердости от поверхности к сердцевине, что позволяет оценить толщину упрочненного слоя и градиент свойств. Важно отметить, что максимальная

твердость, как правило, достигается в поверхностной зоне, богатой боридной фазой, а затем постепенно снижается до твердости сердцевины.

Расчет остаточных напряжений. На основе полученных данных о микротвердости, а также с использованием известных формул сопротивления материалов и механики разрушения, можно рассчитать все возможные напряжения, возникающие на поверхности и в приповерхностных слоях обработанных деталей ГТУ после проведения ХТО. Для более точного определения напряжений применяются методы рентгеноструктурного анализа (метод $\sin^2\psi$), которые позволяют напрямую измерить деформацию кристаллической решетки и вычислить остаточные напряжения первого рода. Также используются расчетные методы, основанные на замерах деформации специальных образцов-свидетелей (например, метод колец или метод полосок).

**Технологические преимущества метода**

Основным технологическим преимуществом ХТО борированием и боросилицированием является то, что нормирование процесса обработки деталей ГТУ данными методами по сравнению с известными способами насыщения, такими как цементация или азотирование, проходит при достаточно меньшем времени насыщения. Это достигается за счет более высокой диффузионной подвижности атомов бора и кремния в кристаллической решетке железа при высоких температурах (обычно 900-1050°С). В то время как цементация может длиться 10-20 часов для получения слоя толщиной 0,5-1,0 мм, боросилицирование позволяет сформировать упрочненный слой требуемой толщины за 2-4 часа. Данное преимущество, наряду с достигаемой более высокой поверхностной твердостью (до 12000 МПа против 6000-8000 МПа при цементации), обуславливает возможность использования данного метода упрочнения для широкой номенклатуры различных деталей. Особенно это актуально в условиях ремонтных мастерских энергетических предприятий, где требуется быстро и эффективно восстанавливать и упрочнять детали ГТУ, выработавшие свой ресурс, без использования сложного и громоздкого оборудования [2].

**Проблема точности и качества поверхности**

Другой важной оценкой при применении ХТО деталей ГТУ остается точность их линейных размеров при используемой обработке. Диффузионное насыщение

всегда сопровождается некоторым изменением геометрии детали за счет образования нового поверхностного слоя с иной кристаллической структурой и фазовыми превращениями. В связи с этим возникает острая необходимость провести детальные исследования влияния режимов комплексного борирования на чистоту поверхности обрабатываемых деталей и стабильность их размеров. Особенно это критично для прецизионных пар трения, таких как плунжерные пары топливных насосов или подшипники, где допуски на зазоры составляют единицы микрометров. Даже незначительное изменение геометрии может привести к заклиниванию или потере герметичности.

Существенным недостатком данного метода является то, что состояние поверхностей после диффузионного насыщения как при борировании, так и при боросилицировании ухудшается на всех образцах. Величина шероховатости Ra увеличивается примерно одинаково при прочих равных значениях исходной шероховатости [3]. Это связано с ростом боридных игл на поверхности, которые имеют столбчатую структуру и могут выступать над поверхностью, а также с неравномерностью диффузионных процессов на границах зерен. Поэтому мы рекомендуем тщательно определять оптимальное время выдержки, температуру насыщения и состав насыщающей среды при проведении ХТО. Важно подбирать такие режимы, при которых формируется достаточно толстый упрочненный слой, но при этом рост боридных игл не приводит к чрезмерному огрублению поверхности. В процессе борирования возможно изменение параметра Ra на 10-20 процентов по сравнению с исходным состоянием, тогда как при боросилицировании этот показатель может несколько отличаться за счет образования более пластичных и гладких силицидных фаз, которые частично сглаживают рельеф.

**Физические основы формирования остаточных напряжений**

При проведении процесса ХТО при высоких температурах (обычно в интервале 900–1050°C) наступает активная диффузия бора и кремния в поверхностные слои материала на небольшую глубину, формируя характерную игольчатую или столбчатую структуру боридов. При этом температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) в центре детали, выполненном из основного металла, и в упрочненном поверхностном слое, состоящем из боридов и силицидов, существенно различаются. Бориды, как правило, имеют более низкий коэффициент расширения по сравнению с металлической основой. Вследствие этого при остывании после

завершения процесса борирования, начиная с некоторой критической температуры Тост (температура начала пластических деформаций или температура, при которой напряжения превышают предел текучести), в деталях начинают возникать термические остаточные напряжения. Поскольку упрочненный слой сжимается меньше, чем сердцевина, в нем формируются напряжения сжатия, а в сердцевине - растяжения.

Как установлено в работе [5], при изменении удельных объемов фаз во время фазовых переходов (образование боридов FeB и $Fe_2B$, которые имеют разную плотность и кристаллическую решетку) и при несовпадении коэффициентов линейного расширения упрочненного слоя и сердцевины металла появляются дополнительные напряжения сжатия. Эти напряжения характеризуются большей глубиной проникновения по сравнению с чисто термическими напряжениями, и их максимальное значение, а также характер распределения по глубине напрямую связаны со способом упрочнения, режимами обработки и типом формирующихся фаз. Особенность распределения этих дополнительных напряжений в глубине поверхностного слоя в принципе одинакова для многих других процессов упрочнения, таких как азотирование, цементация или поверхностная закалка: на поверхности формируются максимальные сжимающие напряжения, которые затем постепенно убывают, стремясь к нулю или переходя в незначительные растягивающие напряжения в сердцевине.

**Практические требования и направления дальнейших исследований**

Для обеспечения надежной и долговечной работы упрочненных деталей ГТУ необходимо, чтобы переход от упрочненного слоя к основе металла осуществлялся плавно, без каких-либо скачков уровня остаточных напряжений сжатия. Резкие градиенты напряжений на границе раздела фаз или слоев могут стать причиной отслаивания покрытия, шелушения или зарождения усталостных трещин при циклических нагрузках. Наличие пиков растягивающих напряжений под поверхностью также крайне нежелательно.

В связи с вышеизложенным предполагается провести комплексные экспериментальные исследования влияния основных технологических параметров, а именно времени выдержки и температуры насыщения при проведении борирования и боросилицирования, на уровень и характер распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного слоя. Оптимизация этих параметров позволит

получить упрочненный слой с максимальными эксплуатационными характеристиками, высокой износостойкостью и минимальными искажениями геометрии деталей ГТУ. В результате планируется разработать практические рекомендации по выбору режимов ХТО для конкретных типов деталей с учетом их геометрии и условий работы.

**Список используемых источников**

1. Кузьмин С.В. Материалы, используемые в лопатках газовых турбин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. Сборник докладов Национальной конференции с международным участием. Белгород, 2022. С. 304–306.

2. Липовская М.Р., Хафизова М.М., Маслов И.Н. Исследование влияния механических свойств материалов на прочность конструкций: современные методы и технологии // Инновационные научные исследования: теория, методология, тенденции развития. Сборник научных статей по материалам XIV Международной научно-практической конференции. Уфа, 2024. С. 77–80.

3. Маслов И.Н., Мингазов Р.Р. Высокоскоростная механическая обработка // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 99-7. С. 176–177.

4. Сагаутдинов Р.Р. Метод агрегатного ремонта тракторов и автомобилей // Студенческий. 2023. № 23-4 (235). С. 23–24.

5. Шайхутдинов К.А. Роль жидкостной карбонитрации в комбинированной химико-термической обработке сталей ВКС-7 и ВКС-10 // Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация». Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Казань, 2023. С. 819–821.

## ЧАСТО ВСТРЕЧАЮЩИЕСЯ ДЕФЕКТЫ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Смышляев М.О. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»*

*Абрамов В.А. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»*

*Заровняев М.И. – студент, ФГБОУ ВО «Казанский Государственный Энергетический Университет»*

**Аннотация**

Газотурбинный двигатель сложный, технологичный агрегат, включающий в себя множество деталей и узлов, изготовленных с высокой точностью, работающий при высоких нагрузках и различных климатических условиях. При этом, как и любая другая техника подвержен отказам. В статье представлены наиболее распространённые причины отказов ГТД.

Опыт эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) в авиации, энергетике и газоперекачивающей промышленности показывает, что наиболее характерные отказы двигателей происходят по дефектам, носящим конструктивно-производственные причины. Данная категория отказов закладывается еще на этапе создания двигателя. К конструктивным причинам относятся ошибки в расчетах напряженно-деформированного состояния деталей, недостаточные запасы прочности, неудачная геометрия, создающая концентраторы напряжений. Производственные причины связаны с технологией изготовления: это могут быть микротрещины, возникшие при литье или штамповке, нарушения режимов термообработки, риски и задиры после механической обработки, которые в дальнейшем становятся очагами усталостного разрушения. Однако, как показывает статистика отказов, значительная доля инцидентов появляется и по сугубо эксплуатационным причинам. Эти причины, в отличие от заводских дефектов, возникают непосредственно в процессе использования двигателя по назначению. Классическими примерами являются механические повреждения при попадании посторонних предметов в воздухозаборник: птиц, песка, гравия, кусков бетонного покрытия, воды, льда, а также работа двигателя на некондиционном топливе с повышенным содержанием серы, ванадия или механических примесей, что приводит к нарушению процесса горения и агрессивному коррозионному воздействию на проточную часть.

## Классификация отказов ГТД

Среди всех отказов ГТД в технической диагностике принято различать два основных типа, имеющих разную физическую природу и последствия. Параметрические (постепенные) отказы обусловлены плавным выходом какого-либо контролируемого параметра за установленный конструкторской документацией допуск. Это могут быть: падение давления масла из-за износа подшипников, рост

температуры газов за турбиной вследствие эрозии лопаточного аппарата или ухудшения проточной части, увеличение уровня вибрации из-за возникающего дисбаланса ротора. Такой отказ можно спрогнозировать и предотвратить, если система диагностики вовремя фиксирует тренд изменения параметра. Внезапные же отказы возникают неожиданно и обусловлены, как правило, хрупким или усталостным разрушением отдельных деталей и узлов двигателей [1]. Они наиболее опасны, так как часто приводят к нелокализуемым разрушениям и, как следствие, к пожару или полной потере работоспособности. В рамках данной работы мы подробно рассмотрим часто встречающиеся отказы ГТД в условиях реальной эксплуатации, а именно разрушение узлов газовоздушного тракта (ГВТ), и детально разберем физические и механические причины их возникновения.

Дефекты лопаточной части осевого компрессора.



Рис. 1. Вид забоин, вмятин, врывов материала на рабочих лопатках 1-ой компрессора

Источник: фото из архива авторов

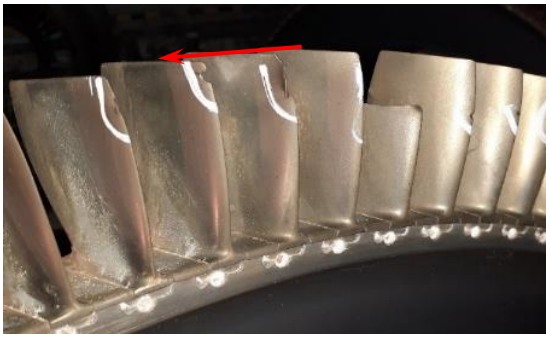


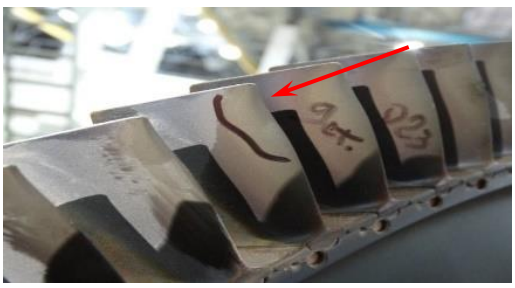
Рис. 2. Вид забоин на рабочих лопатках и обрыва части пера 8-й ступени ротора КВД

Источник: фото из архива авторов

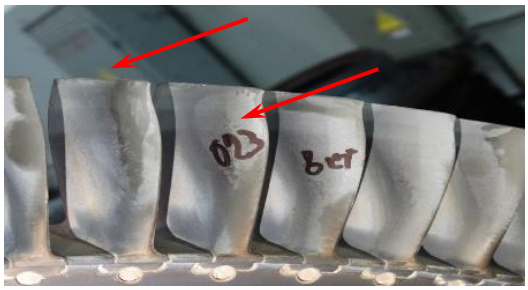
Как видно из представленных фотографий (рис. 1, 2), значительные повреждения рабочих (роторных) лопаток компрессора могут происходить в результате попадания в газовоздушный тракт двигателя со стороны входного устройства различных инородных тел. Источником этих тел часто становятся разрушенные фрагменты элементов конструкции воздухозаборника или противообледенительной системы (ВОУ), а также посторонние предметы, поднятые с поверхности аэродрома или случайно оставленные при техническом обслуживании.

**Механика процесса разрушения при ударных повреждениях**

При попадании твердого предмета на высокой скорости на поверхности лопатки образуются забоины, вмятины и вырывы материала. Однако само по себе наличие вмятины не всегда критично для немедленного разрушения – гораздо опаснее долгосрочные последствия. В зоне удара возникает локальная пластическая деформация, которая создает поле остаточных растягивающих напряжений. Сама вмятина становится геометрическим концентратором напряжений с теоретическим коэффициентом концентрации, который может достигать значений 2-3 и более в зависимости от радиуса закругления впадины. При этом обрыв части пера или всей лопатки происходит по классическому сценарию усталости. Развитие трещины начинается именно от грубой забоины на входной кромке (см. рис. 2). Под действием знакопеременных нагрузок – высокочастотных колебаний от газового потока и вибрации ротора – в зоне концентратора происходит зарождение и последующее развитие усталостной трещины. Сечение лопатки постепенно уменьшается, напряжения растут, и наступает окончательный долом. Необходимо отметить, что даже небольшая забоина глубиной в несколько десятых долей миллиметра может снизить усталостную прочность лопатки в несколько раз. Особенно опасны повреждения на периферийных сечениях лопаток, где окружные скорости максимальны, а напряжения от центробежных сил достигают пиковых значений. Если своевременно не обнаружить такую лопатку при дефектоскопии, вероятность её разрушения в процессе дальнейшей эксплуатации становится критически высокой.



а) Рабочие лопатки 8 ступени компрессора



б) Рабочие лопатки 9 ступени компрессора

Рис. 3. Вид эрозионного износа входных кромок лопаток в периферийных сечениях в рабочих колёсах 8 и 9 ступеней компрессора

Источник: фото из архива авторов

В процессе длительной эксплуатации, особенно в сложных климатических условиях, таких как запыленная атмосфера пустынь или районы с частыми пыльными бурями, двигатель неизбежно сталкивается с проблемой газоабразивной эрозии. При попадании в ГВТ недостаточно очищенного воздуха происходит интенсивный эрозионный износ профиля пера лопаток (см. рис. 3). Поступающая вместе с воздухом пыль состоит из твердых частиц оксидов кремния, алюминия, железа, которые обладают высокой твердостью. Ударяясь о поверхность лопатки на высокой скорости, эти частицы выбивают микробъемы материала. Наиболее интенсивно изнашиваются входные и выходные кромки, а также периферийные участки лопаток, где относительные скорости потока максимальны.

Поступающая пыль оказывает эрозионное воздействие не только на лопатки компрессора, но и, проходя далее по тракту, на лопатки турбины. Более того, мелкодисперсные частицы могут оплавляться в камере сгорания и осаждаться в виде твердого спекшегося осадка на деталях горячей части двигателя – сопловых и рабочих лопатках турбины, забивая отверстия системы охлаждения и ухудшая теплоотвод. Это приводит к местному перегреву и прогару. Характер влияния запыленного воздуха на работу двигателя напрямую зависит от физико-химической природы пыли: ее абразивности, твердости, химической активности при высоких температурах; от дисперсного состава – крупные частицы вызывают ударную эрозию, мелкие – царапающее воздействие; и от массовой концентрации пыли в воздухе.

Эрозионный износ изменяет профилировку лопатки. Из-за неравномерного истончения входных кромок изменяются углы атаки потока воздуха на последующие ступени. Это приводит к тому, что компрессор начинает работать на нерасчетных режимах. Падает его КПД, уменьшается запас газодинамической устойчивости. Двигатель становится более склонным к срыву потока и помпажу, особенно на переходных режимах.

**Высокотемпературная коррозия и качество топлива**

Не менее остро, чем проблема пыли, стоит вопрос качества топлива. В условиях коммерческой эксплуатации, особенно в наземном применении или на морских судах, газовые турбины нередко работают на топливе, содержащем повышенную концентрацию серы, ванадия, натрия и других агрессивных примесей. Присутствие серы в топливе приводит к образованию при сгорании оксидов серы. Они вступают в реакцию с солями натрия (которые могут попадать с забортным воздухом) и

осаждаются на поверхности лопаток турбины в виде расплавленных сульфатов натрия, вызывая сульфидную коррозию [5]. Этот процесс разрушает защитную оксидную пленку на жаропрочных никелевых сплавах, проникает вглубь материала по границам зерен, делая его хрупким и снижая механические свойства.

В составе тяжелых сортов топлив нередко присутствует ванадий. При сгорании он образует легкоплавкие оксиды, в частности пентаоксид ванадия, температура плавления которого составляет около 670–700°C. На рабочих температурах газа перед турбиной эти оксиды находятся в жидком состоянии. Жидкий оксид ванадия выступает в роли флюса: он растворяет защитные оксидные пленки на жаропрочных сплавах, открывая доступ кислорода и серы непосредственно к основному металлу [2, 4, 5]. Это вызывает интенсивное высокотемпературное окисление и коррозию.

**Синергетический эффект и ограничение ресурса**

Сочетание этих факторов является наиболее опасным. Высокотемпературное окисление жаропрочных никелевых сплавов в сочетании с сульфидной и ванадиевой коррозией приводит к образованию питтингов и раковин на поверхности лопаток. Параллельно с этим, эрозионное воздействие твердых частиц постоянно удаляет рыхлые продукты коррозии, обнажая свежий металл, что многократно ускоряет процесс разрушения. Возникает так называемый синергетический эффект, когда суммарное воздействие нескольких факторов значительно превышает сумму воздействий каждого из них по отдельности. В результате этих процессов существенно ограничивается ресурс лопаток турбины и компрессора высокого давления. Утонение кромок и образование коррозионных язв приводят к росту местных напряжений, что снижает сопротивление усталости. Лопатки, имеющие коррозионные повреждения, могут разрушиться при нагрузках, значительно меньших расчетных.

**Заключение по обзору дефектов ГВТ**

Проведенный анализ показывает, что работоспособность и ресурс узлов газовоздушного тракта определяются комплексом взаимосвязанных факторов: механическими нагрузками, качеством материалов, условиями окружающей среды и составом топлива. Для обеспечения надежности ГТД необходимо не только совершенствовать конструкции, но и строго соблюдать регламенты технического обслуживания: проводить промывку компрессора, контролировать состояние

воздушных фильтров и качество топлива. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку более совершенных методов диагностики зарождающихся дефектов на ранних стадиях, что позволит предотвращать внезапные отказы.

**Список используемых источников**

1. Абдельвахид М. Б. Методика оценки влияния климатических условий и эрозионного износа на характеристики ТРДДФ. … дис. к-та техн. наук. Москва, 2014.

2. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 84–92.

3. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р., Савина М.В. Добавление водорода к топливному газу для повышения энергетических характеристик газотурбинных установок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3(158). С. 342–355.

4. Менделеев Д.И., Марьин Г.Е., Ахметшин А.Р. Показатели режимных характеристик парогазового энергоблока ПГУ-110 МВт на частичных нагрузках // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 3(43). С. 47–56.

5. Нарушко, Е. О. Защитные покрытия от высокотемпературной газовой коррозии лопаток осевого компрессора в авиастроении // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке: материалы VII Республиканской научно-практической конференции молодых ученых / Белорусский национальный технический университет; гл. ред. С. А. Иващенко [и др.] Минск: БНТУ, 2011. Ч. 2. С. 110–115.

## АНАЛИЗ ГОРЮЧИХ СВОЙСТВ ЧЕТЫРЕХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

*Храмцов Е.В. – студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»*

*Макаров А.В. – студент, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»*

*Жуйков А.В. – к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»*

**Аннотация**

Накопление больших объемов отходов производства создает серьезную угрозу нанесения вреда окружающей среде. Одним из перспективных способов утилизации органических отходов является их совместное сжигание с углем в твердотопливных котлах. В работе представлены результаты анализа основных характеристик горения промышленных отходов и биомассы с применением метода синхронного термического анализа проведенного в окислительной среде при температуре нагрева 20 °C/мин. Цель исследования заключалась в анализе горючих свойств четырех органических отходов производства.

В таблице 1 представлены наименования и обозначения, используемые в тексте.

Табл. 1

Наименования и обозначения

| | |
|---|---|
| Топлива | |
| Коксозольный остаток – отходы предприятия по изготовлению бумажной продукции использующие в своей технологии генераторный газ получаемый при газификации бурого угля марки 3Б | КЗО |
| Бумажные отходы (картон) | КРТ |
| Сосна (опилки) – отходы лесозаготовительной промышленности | ОП |
| Иловые осадки сточных вод – отходы городских очистных сооружений | ИЛ |
| Синхронный термический анализ | |
| Термогравиметрия | ТГ |
| Дифференциальная-термогравиметрия | ДТГ |

Источник: составлено авторами

Генерация тепловой энергии на объектах угольной теплоэнергетики сопровождается масштабными выбросами диоксида углерода ($CO_2$) в атмосферный воздух. Данная проблема носит глобальный характер, учитывая, что уголь по-прежнему доминирует в мировом топливно-энергетическом комплексе. В условиях постепенного перехода к низкоуглеродной энергетике одним из перспективных решений выступает технология совместного сжигания угля и биомассы (низкосортные топлива, отходы производства и др.), позволяющая влиять на снижение углеродного следа [1].

Результаты экспериментальных и прикладных исследований демонстрируют, что такой подход не только сокращает эмиссию парниковых газов, но и уменьшает образование тонкодисперсной золы в продуктах сгорания, вследствие низкой зольности биомассы. Интеграция биомассы в состав топливной смеси способствует оптимизации ключевых параметров процесса: повышению энергоэффективности, улучшению экологических характеристик и стабилизации эксплуатационных показателей [5].

Снижение углеродного следа при совместном сжигании угля и биомассы обусловлено принципом углеродной нейтральности последней: в ходе роста растительное сырьё поглощает из атмосферы объём $CO_2$, эквивалентный тому, что высвобождается при его термическом разложении. В результате замещения части угля биомассой обеспечивается сокращение потребления твердого ископаемого топлива и сокращение суммарных выбросов парниковых газов по сравнению с использованием исключительно ископаемого топлива [2].

Среди ключевых преимуществ биомассы как энергоносителя выделяют: возможность утилизации различных производственных комплексов, например лесозаготовительного; возобновляемый характер ресурса; снижение эмиссии токсичных газообразных продуктов сгорания; потенциальную экономическую эффективность при локализации источников сырья вблизи энергообъектов.

В то же время применение биомассы сопряжено с рядом технологических сложностей: высокая гигроскопичность, способствующая накоплению влаги при хранении и транспортировке, что снижает теплоту сгорания и увеличивает эндотермический эффект при ее горении; неоднородность фракционного состава, затрудняющая дозирование, транспортировку и измельчение топлива; склонность к самонагреванию и самовозгоранию при неправильном складировании; ограниченные объёмы доступного сырья в сравнении с запасами угля; необходимость предварительной подготовки (сушки, гранулирования, измельчения) перед подачей в топку [4, 3].

Несмотря на указанные недостатки, биомасса сохраняет статус одного из наиболее перспективных возобновляемых ресурсов для поэтапного замещения угля в системах теплоэнергоснабжения.

В качестве объектов исследования были рассмотрены следующие виды отходов: коксозольный остаток; картон; сосновые опилки; иловые осадки сточных вод.

Технический и элементный анализ всех исследуемых топлив был проведен в соответствии с ГОСТ и представлен в таблице 2. Влажность представлена в аналитическом состоянии, так как хранилась в лаборатории и достигла воздушно-сухого состояния. Дополнительных мероприятий с исследуемыми топливами не проводилось.

Табл. 2

Результаты технического и элементного анализа топлив

| Топлива | $W^a$ | $A^d$ | $V^{daf}$ | $C^{daf}$ | $H^{daf}$ | $N^{daf}$ | $S^{daf}$ | $O^{daf}$ | $Q_s^{daf}$, МДж/кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КЗО | 5,7 | 14,6 | 11,8 | 92,8 | 0,7 | 1,1 | 0,5 | 4,7 | 25,30 |
| КРТ | 4,1 | 2,5 | 85,1 | 46,4 | 5,7 | – | 0,2 | 47,7 | 17,68 |
| ОП | 3,5 | – | 80,2 | 55,6 | 5,5 | 0,3 | – | 38,6 | 22,04 |
| ИЛ | 4,2 | 48,5 | 80,3 | 53,0 | 5,8 | 3,4 | 2,0 | 35,8 | 21,45 |

Источник: составлено авторами

Основные характеристики горения были получены использованием метода термического анализа, который был проведён в окислительной среде (поток воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева 20 °С/мин) на приборе SDT Q600 (TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, США), масса навески составила 6.0±0.25 мг. По профилям кривых термогравиметрии и дифференциальной-термогравиметрии были определены основные характеристики горения топлив.

Одной из характеристик горения является индекс горения, который показывает на сколько топливо эффективно сгорает, вычисляется по формуле [6]:

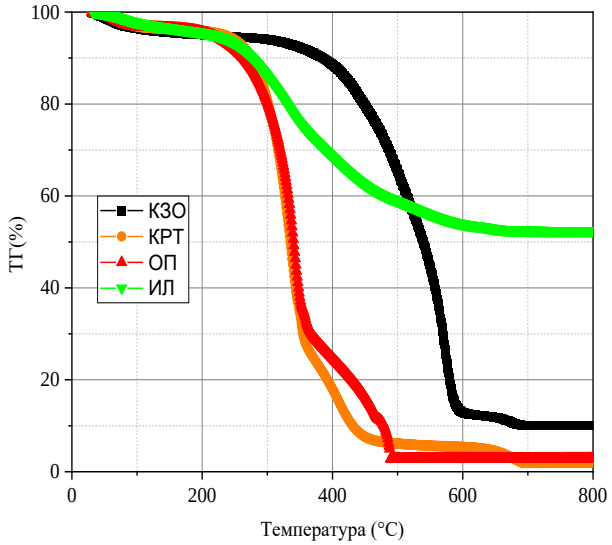
$$S = \frac{R_{max} \cdot R_{mean}}{T_i^2 \cdot T_b} \times 10^6 \ , \ [\text{мин}^{-2}\,°\text{C}^{-3}]$$

где $T_i$ и $T_b$ – температуры, при которых происходит воспламенение и выгорание коксового остатка соответсвенно, °С;

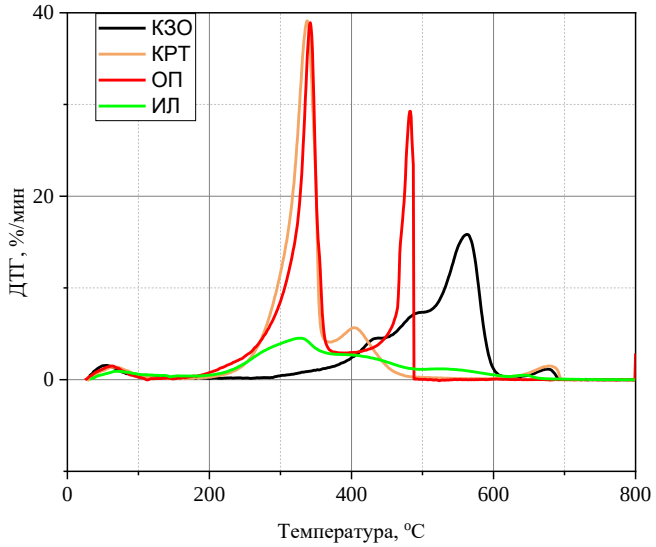
$R_{max}$ – максимальная скорость убыли массы (максимальная скорость горения), %/мин;

$R_{mean}$ – средняя скорость убыли массы от $T_i$ до $T_b$, %/мин.

Результаты термического анализа представлены на рисунке 1. При нагреве биомассы процесс горения выражен двумя пиками ДТГ, первый пик соответствует горению большого количества летучих веществ, а второй горению коксового остатка и догоранию летучих веществ (рисунок 1*б*).




(*а*)




(*б*)

Рис. 1. Профили кривых нагрева топлив: *а* – ТГ; *б* – ДТГ

Источник: составлено авторами

Основные характеристики горения представлены в таблице 3.

Табл. 3

Характеристики горения топлив

| Топлива | $T_i$, °C | $T_{max}$, °C | $T_b$, °C | $R_{max}$, %/мин | $S$, мин$^{-2}$ °C$^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| КЗО | 479 | 564 | 658 | 26 | 0,6 |
| КРТ | 300 | 339 | 649 | 39 | 4,0 |
| ОП | 308 | 343 | 490 | 39 | 4,4 |
| ИЛ | 268 | 329 | 633 | 3 | 0,4 |

Источник: составлено авторами

На рисунках 2–5 профилями кривых ТГ и ДТГ представлены процессы горения каждого топлива отдельно. Процесс горения коксозольного остатка (рис. 2), характеризуется наличием одного выраженного основного пика, соответствующего интенсивному окислению углерода. В этой стадии происходит выделение максимальной доли тепловой энергии и наблюдается наибольшая скорость потери массы образца.

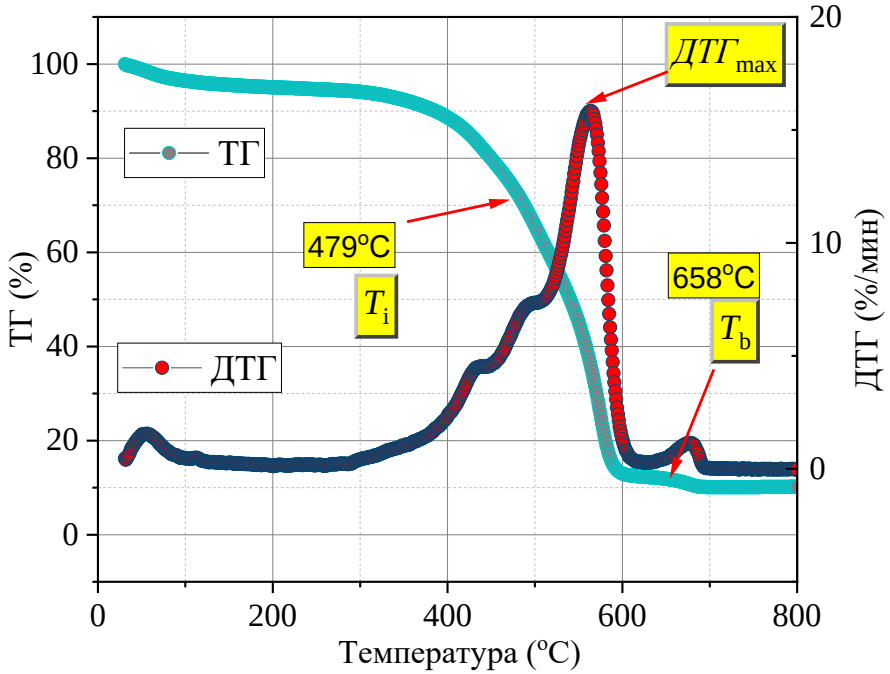



Рис. 2. Профили кривых ТГ и ДТГ при нагреве коксозольного остатка

Источник: составлено авторами

Наряду с доминирующим экзотермическим эффектом фиксируются вторичные пики, имеющие различную природу: Первый (низкотемпературный) пик обусловлен эндотермическим удалением физически связанной влаги, а также десорбцией адсорбированных газов с поверхности пористой структуры остатка. Интенсивность данного пика коррелирует с исходной влажностью топлива и степенью его предварительной подготовки. Последний (высокотемпературный) пик связан с догоранием трудноокисляемых форм углерода, термической деструкцией устойчивых летучих соединений.

Форма, ширина и температурное положение пиков зависят от ряда факторов: дисперсности частиц, скорости нагрева, состава минеральной части и степени метаморфизма исходного угля. Наличие выраженного основного пика

свидетельствует о высокой реакционной способности коксового остатка, что делает его перспективным для использования в процессах совместного сжигания с биомассой – при этом биомасса, как правило, инициирует воспламенение смеси, а коксозольный остаток обеспечивает стабильность высокотемпературной стадии процесса.

Анализ термогравиметрических кривых горения картона (рис. 3) выявляет принципиальное отличие биомассы от ископаемых твёрдых топлив и коксозольных остатков.

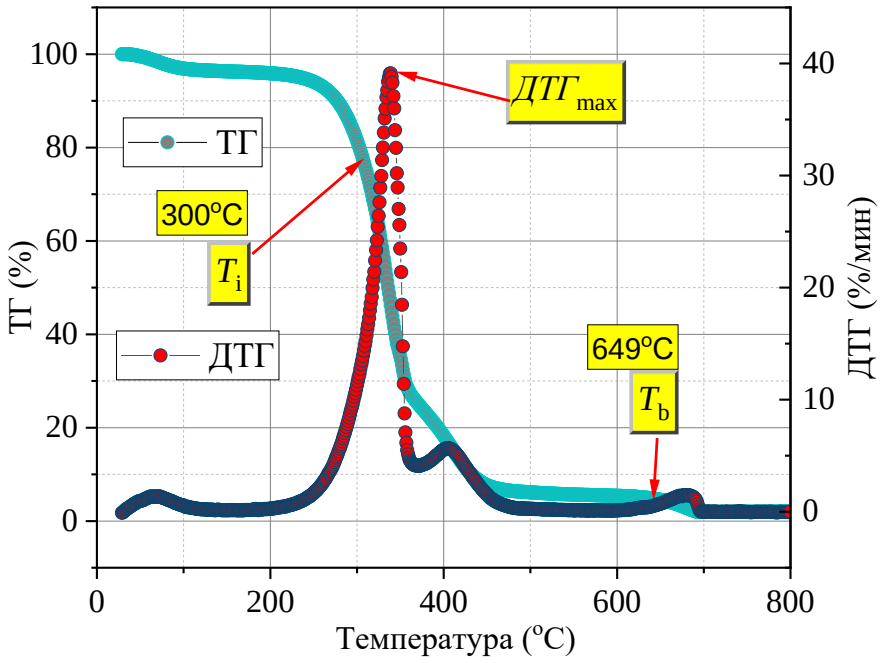



Рис. 3. Профили кривых ТГ и ДТГ при нагреве картона

Источник: составлено авторами

Наличие двух выраженных экзотермических пиков, отражающих многостадийный характер термического разложения. При этом в общей структуре процесса сохраняются элементы, характерные и для коксозольного остатка: низкотемпературный пик, связанный с удалением физически связанной влаги, и высокотемпературный пик, соответствующий догоранию остаточного углерода и термически устойчивых летучих соединений. Первый основной пик обусловлен интенсивным выделением и окислением летучих веществ. Данная стадия характеризуется высокой скоростью потери массы и значительным тепловыделением, что определяет лёгкую воспламеняемость биомассы и её способность инициировать горение в смесевых топливах. Второй основной пик связан с окислением более

термостабильных компонентов, а также с постепенным выгоранием образовавшегося на предыдущей стадии полукокса.

Анализ термогравиметрических кривых горения сосновых опилок (рис. 4) демонстрирует ряд особенностей, отличающих данный вид биомассы как от ископаемых топлив, картона. Наиболее характерной чертой является более выраженная интенсивность второго экзотермического пика, что, вероятнее всего, обусловлено качественным своеобразием состава летучих веществ.

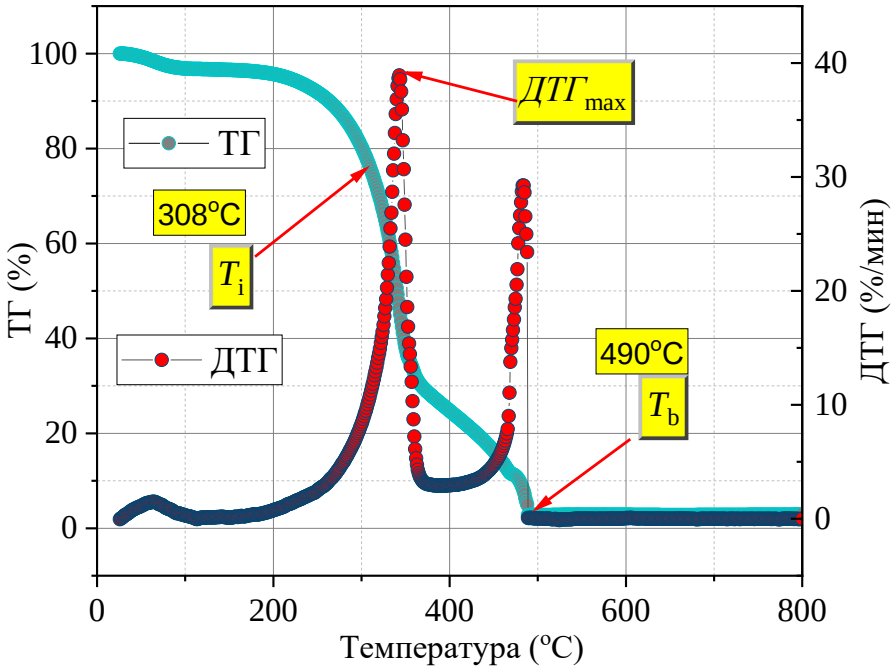



Рис. 4. Профили кривых ТГ и ДТГ при нагреве опилок сосны

Источник: составлено авторами

Примечательно, что заключительный высокотемпературный пик, характерный для коксозольных остатков и частично наблюдаемый при сжигании картона, у сосновых опилок выражен слабо или практически отсутствует. Данное явление может быть объяснено тем, что основная масса твёрдого углеродного остатка (полукокса) выгорает уже в рамках второго пика, благодаря высокой пористости древесных частиц и развитой удельной поверхности, обеспечивающим эффективный доступ окислителя к реакционным центрам.

На примере осадка городских очистных сооружений (рис. 4) демонстрируется возможность определения зольности твёрдого образца непосредственно по данным термогравиметрического анализа: остаточная масса на кривой ТГ после завершения

высокотемпературного окисления составляет порядка 50 %. Данное значение коррелирует с результатами стандартного технического и элементного анализа, согласно которым зольность исследуемого материала равна 48,5 %.

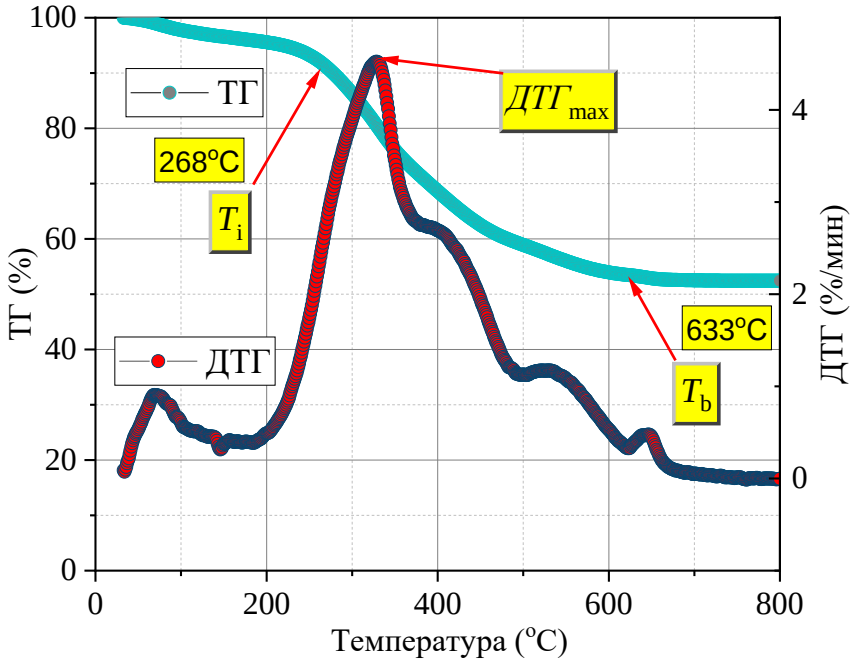



Рис. 4. Профили кривых ТГ и ДТГ при нагреве осадков сточных вод

Источник: составлено авторами

Наблюдаемая погрешность обусловлена различиями в методиках отбора проб: при термогравиметрическом анализе используется взвесь массой около 6 мг, тогда как регламент ГОСТ предусматривает навеску, превышающую данный объём в десятки раз. Столь малая масса образца в термическом анализе повышает чувствительность к локальной неоднородности материала, что и объясняет минимальные отклонения от эталонного метода.

**Заключение**

В работе с использованием синхронного термического анализа были установлены основные характеристики горения четырех отходов производства. Опилки и картон имеют самые высокие значения индекса горения, что говорит об их эффективном сгорании. Осадки сточных вод имеют самое низкое значение температуры, при которой происходит воспламенение коксового остатка, что делает их перспективным добавочным топливом для повышения реакционной способности каменных углей и других низко реакционных топлив. Коксозольный остаток имеет

низкие характеристики горения, но обладает высокой теплотой сгорания поэтому его возможно применять в качестве добавочного топлива к низкокалорийным топливам.

**Список используемых источников**

1. Алехнович А.Н. Богомолов В.В., Артемьева Н.В. Совместное факельное сжигание биомасс с углем // Теплоэнергетика. 2001. № 2. С. 26–33.

2. Алехнович А.Н. Новые технологии пылеугольного сжигания. Замена части угля // Электрические станции. 2021. № 10(1083). С. 2–7.

3. Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кулагин В.А., Степанов С.Г., Кузнецов П.Н. Способы сжигания твердотопливных смесей в энергетических установках (обзор) // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. Т. 16, № 7. С. 805–825.

4. Рябов Г.А. Развитие технологий совместного сжигания угля и биомассы // Энергетика за рубежом. Приложение к журналу «Энергетик». 2022. № 3. С. 2–40.

5. Рябов Г.А. Совместное сжигание биомассы и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 6. С. 17–32.

6. Zhuikov A. Pyanykh T., Kolosov M. [et al.] Improving Energy Efficiency of Wastewater Residue Biomass Utilisation by Co-Combustion with Coal // Energies. 2025. Vol. 18, No. 11. Article No. 2906.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА СМЕЖНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

*Худоногов И.А. – д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»*

*Антонов М.С. – аспирант, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»*

**Аннотация**

Пересечение воздушных линий электропередачи (ЛЭП) с железнодорожной энергетической инфраструктурой и коммуникациями электросвязи является одной из важных задач при проектировании систем электроснабжения. Актуальность темы заключается в вопросах обеспечения электромагнитной совместимости технических средств силового профиля,

функционирующих в неблагоприятных условиях жёсткости электромагнитной обстановки. В данной статье рассмотрен механизм влияния на трассах высоковольтных линий путём моделирования в программном комплексе «Fazonord».

**Введение**

Развитие технологий обнаружения и регистрации однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной нейтралью всё больше опирается на совершенствование методов имитационного моделирования. Одним из ключевых направлений повышения эффективности систем выявления ОЗЗ является модернизация первичных датчиков, которые устанавливаются непосредственно на проводах или опорах воздушных линий электропередачи. Эти устройства должны корректно работать в условиях постоянно меняющегося электромагнитного окружения, особенно при переходе сети в аварийные режимы – короткие замыкания, однофазные пробои на землю и пр. [3].

Для анализа переходных процессов в энергосистемах, включающих генераторы, трансформаторы, линии и нагрузку, широко применяются программные комплексы Simulink–Matlab, EMTP-RV, PSCAD. Наибольший интерес представляет пакет Fazonord, позволяющий строить детальные модели ВЛ с учётом геометрии опор, расположения проводов и других параметров. Такие модели подходят как для расчётов установившихся процессов, так и для анализа переходных режимов [2].

**Моделирование**

Применение методов конечно-элементного анализа открывает ещё более широкие возможности. Современные платформы дают возможность объединять в одной модели взаимодействующие физические процессы – в частности, электромагнитные и тепловые. Программный комплекс COMSOL Multiphysics позволяет одновременно рассчитывать поля, описываемые уравнениями Максвелла, и электрические цепи, формализуемые законами Кирхгофа.

Воздушная линия рассматривается как объект моделирования, для которого принимается допущение об одинаковых параметрах по длине и отсутствии провисания проводов. Линия считается плоскопараллельной системе. Плоскость двумерного конечно-элементного моделирования располагается перпендикулярно направлению линии, при этом магнитное поле лежит в плоскости расчёта. Продольная составляющая электрического поля исключается, что допустимо для прямолинейных участков длиной, существенно меньшей длины электромагнитной волны [1].

Рассмотрим модель участка тяговой сети на рисунке 1 длинной 50 км, в каждом направлении осуществляется пропуск 10 поездов массой 3192т.

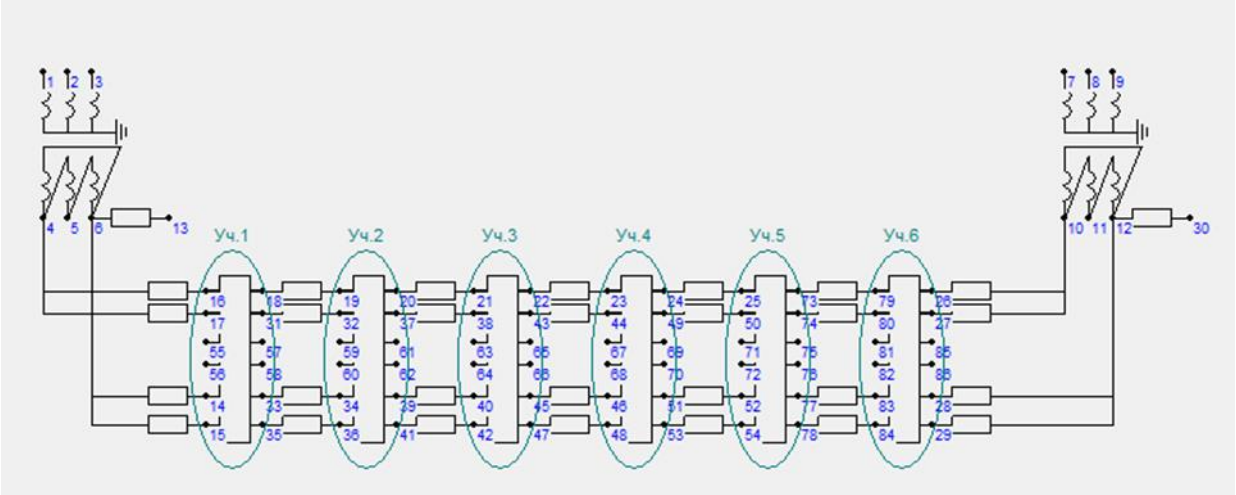



Рис. 1. Модель участков тяговой сети [2]

В модели содержится 6 элементов по 10 км. Верхние 2 узла – провода первого и второго пути контактной подвески. Нижние 2 – рельсы первого и второго пути. Два узла в середине элемента – смежные провода.

Влияние зависит от координат расположения проводов, изначально они находятся на расстоянии 3 метра от начала координат и на высоте 9 метров, начало координат находится ровно между путями. На рисунке 2 представлен график движения поездов чётного и нечётного направлений [3], в каждом из которых задействовано, соответственно, по 10 составов.

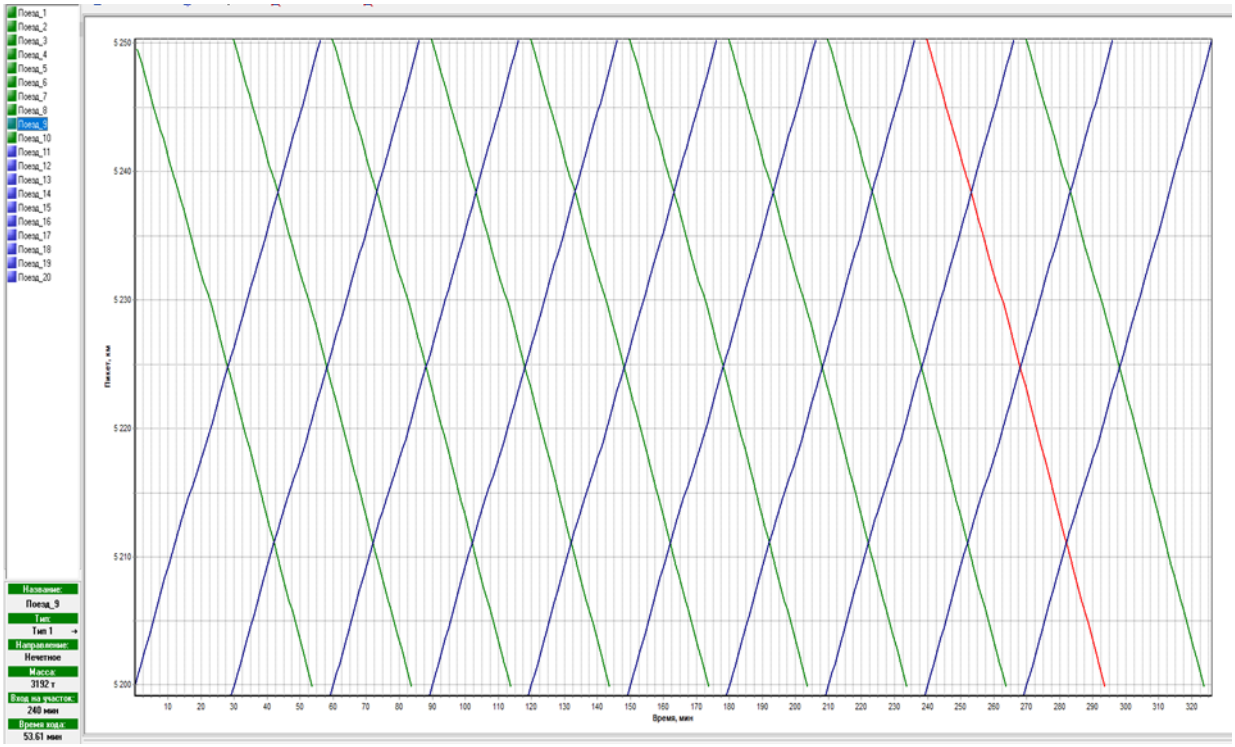


Рис. 2. График движения поездов [3]

На рисунке 3 изображена диаграмма расчёта электромагнитных полей (ЭМП) на узле элемента 30 К/с 2 – го пути.

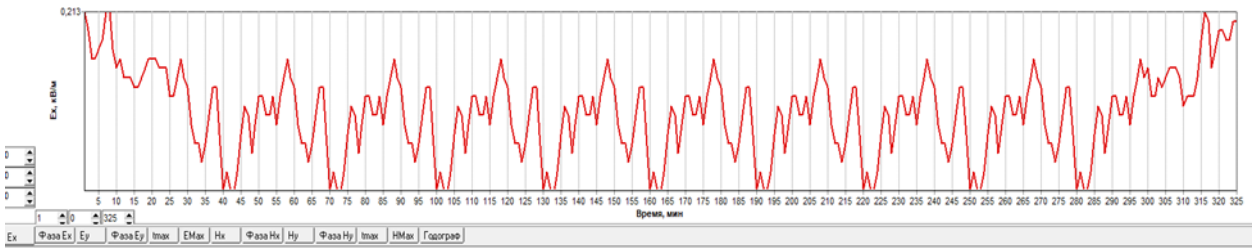


Рис. 3. Диаграмма ЭМП [4]

На рисунке 4 представлена зависимость потребления энергии от времени движения поездов.

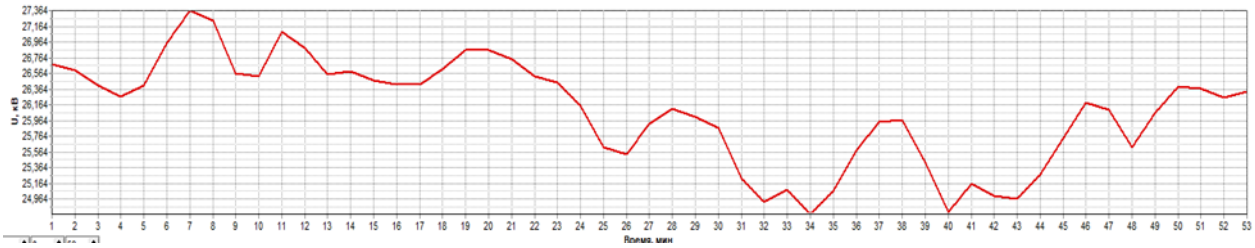


Рис. 4. Зависимость потребления напряжения от времени движения поездов [5]

Анализируя данные, можно сделать вывод что полное время хода по участку составляет 53,61 мин; минимальное потребление зафиксировано на 34 минуте

симуляции и равно 24,93 кВ. Полный расход активной энергии: -944,5 кВт·ч. Расход энергии на тягу: 902,9 кВт·ч. Энергия рекуперации: 1847,4 кВт·ч. Полный расход реактивной энергии: 3115,4 квар·ч [5].

При этом суммарные потери всей элементной базы (общей моделируемой системы), показанной на рисунке 5, составляют соответственно, потери активной энергии: 446,5 кВт·ч, реактивной энергии: 4493,5 квар·ч.

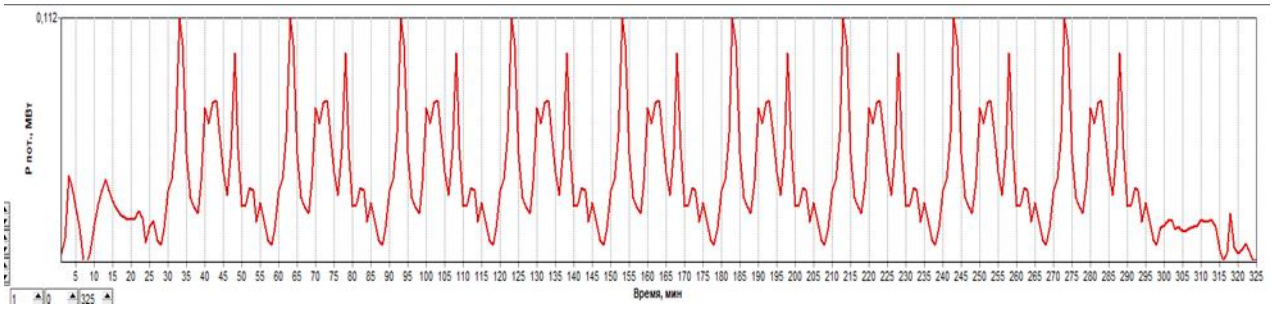



Рис. 5. Суммарные потери энергии [6]

**Заключение**

Подводя итог, можно отметить, что на всём промежутке непрерывного движения поездов смежные линии относительно высоковольтных ЛЭП испытывают значительные наведённые нагрузки от их влияния [4]. Индуцируемые магнитные поля образуют блуждающие токи и напряжения по линиям коммуникации автоматики и телемеханики, что может угрожать нормальной работоспособности не только устройств связи, но и системам автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия, выводя из строя предохранительные и релейные механизмы защиты оборудования электрической централизации [6].

**Список используемых источников**

1. Антонов М.С. Электромагнитное влияние тяговой сети на функционирование железнодорожных линий связи // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: Труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции КрИЖТ ИрГУПС, Красноярск, 03 ноября 2023 года. Красноярск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2023. С. 29–34.

2. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кобычев Д.С. Особенности режимов трехфазно-однофазных электрических сетей, питающихся от тяговых подстанций // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. № 4(14). С. 21–23.

3. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кушов А.А. Параметрическая

идентификация электротяговых сетей // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции, Иваново, 09–13 ноября 2015 года. Том 2. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. С. 410–415.

4. Королев А.А., Плетнев Д.С., Белов М.Н. Анализ программного обеспечения для моделирования электрификации железных дорог // Наукосфера. 2022. № 1-1 С. 175–181.

5. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Программный комплекс Fazonord-AC-DC для расчетов режимов систем электроснабжения переменного и постоянного токов в фазных координатах // Наука и технологии Сибири. 2025. № 2(17). С. 99–103.

6. Пузина Е.Ю., Крапивин М.И., Куцый А. П. Повышение надежности работы устройств дистанционного управления и мачтовых разъединителей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2024. № 2(82). С. 66–78.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Шилин А.А. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»*

*Елфимова О.А. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»*

*Кутейников П.Д. – аспирант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»*

**Аннотация**

В наши дни основные параметры надежности основываются главным образом на понятиях теории вероятностей. В данной статье рассмотрены основные подходы к оценке надежности таких стран, как Россия, Великобритания, Италия, Нидерланды и США (штат Калифорния и Нью-Йорк). Проведенный анализ показывает, что существующий в настоящее время подход к оценке надежности электрических сетей в России соответствует или даже превосходит зарубежные подходы. Главным приоритетом развития данного вопроса является определение норм значений параметров надежности для существующих объектов электрических сетей, а также выбор критериев их оценки.

Одними из важнейших частей современных систем электроснабжения в разных странах являются распределительные сети. Они состоят из разных элементов –

силовых трансформаторов, линий электропередачи, защитной автоматики и др. Их основное назначение – передача и распределение электрической энергии от электростанций и других центров питания к потребителям. Поскольку потребители имеют различную мощность, а также расположены на большой территории по всей стране, распределительные сети представляют из себя сложную систему с большим количеством ответвлений, в которой каждый элемент важен и предназначен для выполнения определенных задач.

В каждой стране есть свои собственные государственные органы, которые устанавливают критерии оценки надежности электрических сетей, из-за чего подход к данному вопросу отличается. В данной статье рассмотрены основные подходы к оценке надежности таких стран, как Россия, Великобритания, Италия, Нидерланды и США (штат Калифорния и Нью-Йорк).

Даже если рассмотреть работу двух абсолютно идентичных систем, работающих в абсолютно одинаковых внешних условиях, то отказы будут происходить в разных элементах этих систем и в разные моменты времени. В связи с вышеуказанным, а также с тем, что анализ надежности необходимо проводить на основании точных понятий, в наши дни основные параметры надежности основываются главным образом на понятиях теории вероятностей.

В современной теории надежности основными числовыми параметрами являются (таблица 1) [1]:

Табл. 1

Основные числовые параметры теории надежности [1]

| Наименование показателя | Формула | Пояснение |
|---|---|---|
| Средняя наработка на отказ | $T_{cp} = \frac{\sum t_{ip}}{k}$, где $t_{ip}$ - время работы оборудования данного типа между $i$-м и $p$-м отказами; $k$ - число отказов | Время, которое оборудование данного типа работает в среднем без отключений |
| Параметр потока отказов | $\omega = \frac{n}{t_{cp}}$, где $t_{\text{ср}}$ - среднее значение наработок на отказ, $n$ – количество отказов | Плотность вероятности возникновения отказа оборудования данного типа в момент времени |

| | | |
|---|---|---|
| Время работы между отказами | $t_{ip} = t_{i\phi}\left(\frac{l_\phi}{l}\right)$, где $t_{i\phi}$ - фактический интервал; $l_\phi$ - фактическая длина линии | Время работы оборудования между двумя отказами |
| Среднее время восстановления | $T_{ср.в.} = \frac{\sum t_{iв}}{k}$, где $k$ - число отказов, $t_{iв}$ - время ремонта или оперативных переключений (с учетом времени нахождения неисправности или повреждения) | Время перерыва в электроснабжении потребителя, необходимое для восстановления работоспособности поврежденного элемента (зависит от местоположения неисправности) |

В случае отказа элемента распределительной сети и, как следствие, прерывании электроснабжения, интенсивность отказов не меняется (остается постоянной) и равной $\lambda(t)=\lambda$. *Тогда вероятность безотказной работы вычисляется следующим образом:*

$$p(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

Также, кроме вышеперечисленных, самыми часто применяемыми показателями надежности являются (таблица 2):

Табл. 2

Самые часто применяемые показатели надежности

| Наименование показателя | Формула | Пояснение |
|---|---|---|
| SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) - показатель средней частоты длительных прекращений передачи электрической энергии на точку поставки | $SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_T}$ | Отношение общего числа долговременных технологических нарушений к общему числу точек поставки (потребителей) |
| SAIDI (System Average Interruption Duration Index) - показатель средней продолжительности длительных прекращений передачи электрической энергии на точку поставки | $SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_T}$ | Отношение общей продолжительности долговременных технологических нарушений к общему числу точек поставки (потребителей) |
| CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) – средняя продолжительность | $CAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI}$ | Отношение общей продолжительности долговременных технологических |

| | | |
|---|---|---|
| восстановления после технологического нарушения | | нарушений к общему числу долговременных технологических нарушений |
| MAIFI (Momentary Average Interruption Frequency Index) – средняя частоты технологических нарушений, результатом которых является кратковременное прекращение электроснабжения (на точку поставки) | $MAIFI = \frac{\sum IM_i N_{mi}}{N_T}$ | Отношение общего числа кратковременных нарушений к общему числу точек поставка (потребителей) |

В Российской Федерации для оценки надежности используются показатель средней частоты длительных прекращений передачи электрической энергии на точку поставки, а также показатель средней продолжительности длительных прекращений передачи электрической энергии на точку поставки – $П_{SAIFI}$ *и* $П_{SAIDI}$ *соответственно*.

В соответствии с [4] при расчете надежности систем электроснабжения учитываются технологические нарушения на объектах сетевых организаций, длительность которых более времени автоматического восстановления питания. Плановые отключения при расчете основных показателей надежности не учитываются. Вместо этого они характеризуются отдельными показателями $П_{SAIFI\ рем}$ *и* $П_{SAIDI\ рем}$ *[4]*.

В Великобритании для оценки надежности используются такие показатели, как $CI$ и $CML$, где $CI$ – число технологических нарушений, приводящих к отключению электроснабжения, в год на 100 потребителей, а $CML$ – средняя длительность перерывов передачи электрической энергии в год на 1 потребителя.

На расчетные значения вышеуказанных показателей надежности в Великобритании влияют не только аварийные отключения электроснабжения потребителей, но также и запланированные, но они учитываются с весовым коэффициентом 0.5.

Для оценки надежности в Италии используют коэффициенты $SAIFI$ и $SAIDI$. При расчете учитываются не все технологические нарушения, а только те, из-за которых произошло отключение передачи электрической энергии длительностью от 3 минут до 8 часов. Также во внимание не принимаются перерывы в электроснабжении,

вызванные погодой, а также не связанные с нарушениями со стороны сетевых организаций.

В дополнение к вышеуказанным, в Италии также используется показатель $MAIFI$ Он является индикативным и для его расчета учитываются технологические нарушения, приводящие к перерывам электроснабжения длительностью от 1 секунды до 3 минут.

В Нидерландах надежность систем электроснабжения характеризуется $SAIFI$ и $CAIDI$. При расчете учитываются все перерывы в электроснабжении, включая те, на которые сетевая организация повлиять не может. Исключениями могут служить форс-мажорные события, такие как террористические акты.

В США расчетные показатели надежности электроснабжения отличаются в зависимости от штата. Так, например, в Нью Йорке основными показателями являются $SAIFI$ и $CAIDI$. В то же время в Калифорнии основными являются $SAIFI$, $SAIDI$ и $MAIFI$ [2].

В Нью Йорке при расчете показателей частоты и длительности перерывов электроснабжения учитываются не все технологические нарушения, а только те, которые произошли в нормальном режиме работы. Не учитываются отключения, приводящие к нарушению электроснабжения для более 10 % потребителей в зоне обслуживания, либо при длительности отключений более 24 часов. В Калифорнии, в свою очередь, при расчете не учитываются перерывы электроснабжения, вызванные событиями, определенными в соответствии с [3].

Для удобства сравнения нормируемые показатели надежности сведены в таблицу 3.

Табл. 3

Сравнение отечественных и зарубежных показателей надежности

| | Российская Федерация | Великобритания | Италия | Нидерланды | США | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Нью -Йорк | Калифорния |
| Показатель, связанный с продолжительностью отключений | $П_{SAIFI}$ | CI | SAIFI | SAIFI | SAIFI | SAIFI |
| Показатель, связанный с продолжи-тельностью | $П_{SAIDI}$ / $П_{SAIDI\ рем}$ | CML | SAIDI | - | - | SAIDI |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| восстановления | | | | | | |
| Показатель, связанный с продолжительностью запланированных отключений | - | - | - | - | - | - |
| Показатель, связанный с продолжительностью восстановления после запланированных отключений | - | - | - | CAIDI | CAIDI | - |
| Показатель, связанный с частотой кратковременных отключений | $П_{SAIFI\ рем}$ | - | MAIFI | - | - | MAIFI |
| Показатели, особые для Российской Федерации | $T_{ср}$, ω, $t_{ip}$, $T_{ср.в}$, P(t) | - | - | - | - | - |

Проведенный анализ показывает, что существующий в настоящее время подход к оценке надежности электрических сетей в России соответствует или даже превосходит зарубежные подходы. Важным фактором является слабое развитие средств контроля за состоянием отдельных элементов распределительных сетей 1-20 кВ, в связи с чем фактическая объективная наблюдаемость отсутствует. Главным приоритетом развития данного вопроса является определение норм значений параметров надежности для существующих объектов электрических сетей, а также выбор критериев их оценки.

**Список используемых источников**

1. Богданов П.А. Развитие информационных измерительных систем и обработка измерительной информации в телекоммуникационных системах // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7, № 10. С. 34–36. EDN RZAJSZ.

2. Гвоздев Д.Б., Габдушев Д.М., Буянков Д.А. [и др.] Анализ отечественного и зарубежного опыта нормирования надежности распределительных сетей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 5(80). С. 26–33. EDN LDLHUM.

3. Гвоздев Д.Б., Габдушев Д.М., Буянков Д.А. [и др.] Анализ отечественного и зарубежного опыта нормирования надежности распределительных сетей // Электроэнергия. Передача и распределение. 2023. № 5(80). С. 26–33. EDN LDLHUM.

4. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. Энергия, 1976. 248 с.

5. Папков Б.В., Шарыгин М.В. Требования к решению проблемы надежности электроснабжения // Энергетическая политика. 2015. № 2. С. 47–54. EDN UKTDQV.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКЛОУЗЕРОВ ДЛЯ ГОРОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 10 – 35 кВ

*Юшкевич П.Д. – студент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»*

*Научный руководитель: Глазырин В.Е. – к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»*

**Аннотация**

В статье рассматривается актуальная проблема повышения надежности электроснабжения потребителей городских распределительных сетей напряжением 10–35 кВ. Традиционные сети этого класса зачастую имеют радиальную структуру и характеризуются низкой наблюдаемостью, что приводит к длительным перерывам электроснабжения при аварийных отключениях. В качестве одного из наиболее эффективных и перспективных решений предлагается внедрение автоматических пунктов секционирования на базе реклоузеров.

Надежность электроснабжения потребителей является одним из ключевых показателей эффективности функционирования любой энергосистемы. Особую остроту эта проблема приобретает в условиях городских распределительных сетей классов напряжения 10–35 кВ, которые обеспечивают электроэнергией социально значимые объекты, жилые массивы и промышленные предприятия. Исторически сложилось так, что значительная часть этих сетей имеет радиальную структуру и выполнена воздушными (ВЛ) или кабельными линиями (КЛ), эксплуатирующимися десятилетиями.

Основная проблема радиальных сетей заключается в том, что любое повреждение на линии приводит к отключению всей линии действием головного

выключателя на подстанции. До момента прибытия оперативно-выездной бригады (ОВБ) и проведения обхода для поиска места повреждения все потребители, подключенные к повреждённой линии, остаются без напряжения [6].

Решением этой проблемы может служить установка многофункциональных коммутирующих устройств, называемых реклоузерами. Целью данной статьи является анализ эффективности применения реклоузеров для секционирования городских сетей 10–35 кВ и обобщение практического опыта их внедрения.

**Принципы автоматического секционирования**

Секционирование – это разделение участка сети на несколько секций с помощью коммутационных аппаратов. Цель секционирования – локализовать поврежденный участок, отключив только его и сохранив электроснабжение на неповрежденных участках [1].

В классическом исполнении секционирование выполнялось с помощью разъединителей или выключателей нагрузки, управляемых вручную. Однако, по-настоящему эффективной автоматизация становится только с применением автоматических коммутирующих устройств, одним из которых являются реклоузеры.

Реклоузер – это интеллектуальный коммутационный аппарат, представляющий из себя комплектное устройство наружной установки, основным элементом которого является вакуумный выключатель, а для обеспечения широких возможностей автоматизации содержит измерительные преобразователи напряжения и тока, микропроцессорное устройство релейной защиты и автоматики (РЗА) и систему связи.

Ключевые функции реклоузера при секционировании:

1. Автоматическое выявление аварийного режима. Для этого реклоузер постоянно контролирует параметры электрического режима (ток, напряжение) в месте его установки.

2. Селективное отключение. При возникновении короткого замыкания (КЗ) на контролируемом участке реклоузер отключается под действием встроенных средств защиты, не дожидаясь срабатывания головного выключателя на подстанции. Это обеспечивается путём реализации встроенных ступенчатых защит (токовая отсечка, МТЗ) и согласования выдержек времени.

3. Автоматическое повторное включение (АПВ). В реклоузере реализована функция АПВ. Если выявленное защитой повреждение оказалось неустойчивым

(например, схлестывание проводов), включением выключателя от АПВ питание восстанавливается автоматически за доли секунды.

4. Сигнализация и диспетчеризация: Реклоузер передает информацию о своем состоянии, параметрах режима и факте срабатывания действии устройств РЗА в Центр управления сетями (ЦУС).

Таким образом, реклоузер выполняет роль не простого «автомата», а интеллектуального агента на контролируемой линии, способного самостоятельно осуществлять управляющие воздействия.

**Влияние секционирования на показатели надежности**

Оценка эффективности внедрения реклоузеров количественно оценивается через изменение ключевых индикаторов надежности, принятых в мировой и российской практике: SAIFI и SAIDI.

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) – характеризует среднюю частоту отключений в расчете на одного потребителя.

SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – характеризует среднюю продолжительность одного отключения.

В радиальной сети без секционирования при повреждении на одной из линий участка сети могут быть отключены все потребители. При установке реклоузеров количество потребителей, попадающих в зону аварийного отключения, резко сокращается. Потребители, находящиеся между головным выключателем и местом установки реклоузера, теряют питание только на время действия защиты и паузы АПВ. Потребители, удалённые за место повреждения, отключаются, но их количество существенно меньше общего числа присоединений, питающихся от линии.

Исследования, проведенные для сетей 10-35 кВ, показывают, что применение даже одного-двух реклоузеров на магистральной линии позволяет снизить число отключаемых потребителей на 60% при неустойчивых повреждениях [3].

В работе Корниенко К.Г. отмечается, что при моделировании радиальной сети с односторонним питанием оптимальным является применение 1-2 реклоузеров. Дальнейшее увеличение их количества приводит к снижению удельной эффективности капиталовложений (показатели RNRE и ARAE), хотя и продолжает улучшать абсолютные значения показателей надежности [2].

**Критерии выбора мест установки и типов реклоузеров**

Определение оптимального места установки реклоузеров – сложная многокритериальная задача. На практике используются следующие подходы.

1. Метод балансового разграничения: Реклоузеры часто устанавливаются на границах раздела сетей, например, между магистральной линией и ответвлениями к ответственным крупным потребителям (торговые центры, больницы, микрорайоны).

2. Метод минимизации ущерба: Место установки выбирается таким образом, чтобы минимизировать математическое ожидание ущерба от перерывов электроснабжения. Для этого необходимо знать удельную нагрузку каждого участка линии и статистику повреждаемости.

3. Секционирование протяженных участков: В городских условиях протяженные кабельные линии 10-35 кВ, соединяющие распределительные пункты (РП), также нуждаются в секционировании. Реклоузер позволяет разделить рассматриваемые распределительные сети на части таким образом, чтобы при повреждении кабеля на одном участке обесточивался только один РП, а не вся цепочка.

Выбор типа реклоузера для городских условий имеет свои особенности. Учитывая стесненные условия застройки, предпочтение отдается компактным устройствам (например, столбового исполнения для ВЛ или камерным исполнениям для установки в существующих РП). Важным требованием является наличие GSM/GPRS или оптического канала связи для интеграции в существующую систему телемеханики. Известными производителями реклоузеров в России являются компании: ООО «Таврида Электрик», АО «Чебоксарский электромеханический завод», ООО «Прософт-Системы», ГК «ЭнергоТехМонтаж».

Российские электросетевые компании (в первую очередь группа «Россети») реализуют масштабные программы по автоматизации распределительных сетей, где реклоузеры играют ключевую роль.

В 2024 году филиал «Владимирэнерго» установил 24 реклоузера на 32 ВЛ 6-10 кВ. Это позволило повысить надежность электроснабжения более 23 тысяч жителей в 160 населенных пунктах. Управление устройствами осуществляется удаленно из ЦУС [5].

«Россети Ленэнерго» завершили установку реклоузеров в Пушкинском и Гатчинском районах, что позволило кратно сократить время поиска повреждений и повысить надежность электроснабжения для жителей ряда поселков и деревень [4].

Общей чертой этих проектов является не просто замена устаревшего оборудования, а создание принципиально новой архитектуры сети – «Цифрового РЭС». Реклоузеры работают в комплексе с разъединителями, управляемыми дистанционно, и индикаторами короткого замыкания, что позволяет не только автоматически отключать поврежденный участок, но и дистанционно производить переключения на резервные линии питания по неповрежденным линиям.

Дальнейшее развитие систем секционирования на базе реклоузеров неразрывно связано с концепцией Интернета энергии (Internet of Energy). Интеллектуальные устройства становятся основой для реализации алгоритмов самодиагностики, предиктивной аналитики (прогнозирование остаточного ресурса) и активного управления спросом на уровне распределительной сети.

Интеграция реклоузеров в цифровые подстанции по протоколу МЭК 61850 открывает возможности для создания гибких, самовосстанавливающихся сетей, в которых время восстановления питания потребителей сокращается с часов до нескольких секунд и минут.

Секционирование городских распределительных сетей 10–35 кВ с применением реклоузеров является на сегодняшний день наиболее эффективным и технологически обоснованным методом повышения надежности электроснабжения потребителей.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение реклоузеров позволяет локализовать поврежденный участок, минимизируя число отключенных потребителей и сокращая время поиска аварии.

2. Эффективность внедрения количественно подтверждается улучшением международных показателей надежности SAIDI и SAIFI.

3. Дальнейшая цифровизация сетей и интеграция реклоузеров в интеллектуальные системы управления предоставляет возможность перейти к качественно новому уровню эксплуатации – созданию полностью автоматизированных самовосстанавливающихся электрических сетей.

**Список используемых источников**

1. Абдурахманов А.М., Глушкин С.В., Шунтов А.В. Анализ условий секционирования воздушных электрических сетей напряжением 6–20 кВ // Электричество. 2020. № 8. С. 17–22.

2. Корниенко К.Г. Выбор оптимального секционирования реклоузерами магистральной воздушной линии // Вестник науки. 2025. № 6 (87). С. 1953–1958.

3. Кугучева Д.К., Харитонов М.С. Оценка эффективности автоматического секционирования участка распределительной сети на примере Калининградской области // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2022. № 1 (5). С. 18–31.

4. «Россети Ленэнерго» повысили надежность электроснабжения семи тысяч жителей / Ruscable.ru. [Электронный ресурс]. URL: www.ruscable.ru/news/2025/10/01/_Rosseti_Lenenergo_povysili_nadezhnosty_elektrosna/ (дата обращения 12.02.2026).

5. «Россети Центр и Приволжье» повысили надежность электроснабжения во Владимирской области благодаря внедрению распредавтоматизации / Ruscable.ru. [Электронный ресурс]. URL: www.ruscable.ru/news/2026/02/13/Energetiki_ Rosseti_TSentr_i_ Privolzhye_povysili_na/ (дата обращения 12.02.2026).

6. Чистохин А.С. Методика повышения надежности электроснабжения нефте- и газопроводов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2024. 4(121). [Электронный ресурс]. URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17315 (дата обращения 12.02.2026).

# СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И НА ТРАНСПОРТЕ: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

СБОРНИК ТРУДОВ X ВСЕРОССИЙСКОЙ (НАЦИОНАЛЬНОЙ) НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ, АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ