

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

# **БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Сборник статей  
IV Всероссийской с международным участием  
молодёжной конференции

**10–12 декабря 2024 г.**

Томск 2024

УДК 621.31(063)

ББК 31л0

Б93

**Б93** **Бутаковские чтения** : сборник статей IV Всероссийской с международным участием молодёжной конференции / под ред. А.С. Ивашутенко ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2024. – 544 с.

Сборник посвящён теоретическим и практическим проблемам цифровой энергетики и интеллектуальным энергетическим системам, теплофизическим спектрам энергетических технологий, производству тепловой и электрической энергии, экологическим проблемам энергетики, энергетическим системам и комплексам, энергосбережению и энергоэффективности, а также новациям инженерного образования.

Представлен широкий круг исследований аспирантов, студентов и молодых учёных Томска и ряда других городов России.

**УДК 621.31(063)**

**ББК 31л0**

*Редакционная коллегия*

Ивашутенко А.С. – к.т.н., заместитель директора по развитию, ИШЭ ТПУ, председатель;

Аршинова О.Ю. – главный технический редактор;

Малькова Я.Ю. – ассистент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ;

Косторева Ж.А. – к.т.н., ассистент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ;

Цибульский С.А. – к.т.н., доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ;

Марышева Я.В. – инженер научно-исследовательского центра «Экоэнергетика 4:0» ИШЭ ТПУ;

Тютёва П.В. – к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ;

Савостьянова Л.В. – к.т.н., зав. лабораторией организационного отдела ИШЭ ТПУ;

Шолохова И.И. – ст. преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ;

Гречушников В.В. – ст. преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 1

<b>Цифровизация в электроэнергетике и интеллектуальные энергосистемы.....</b>	<b>15</b>
<b>Виртуальная инерция в современных энергосистемах</b> Гареева К.А. ....	15
<b>Изменение устойчивости энергосистем и её новая классификация</b> Мащенко Д.Е. ....	17
<b>Комплексный анализ и технические предложения по оптимизации процессов водородной энергетики</b> Марков И.С., Храмова А.И.....	19
<b>Анализ топологий ветроэнергетических установок, подключаемых к энергосистеме</b> Ефременко Ж.В. ....	22
<b>Регулирование частоты энергосистемы с помощью фотоэлектрической станции за счет резервирования части ее мощности</b> Бернякович Е.А.....	26
<b>Мониторинг линий электропередач при помощи предобученной модели нейронной сети</b> Сухобоков А.А.....	30
<b>Разработка асинхронных микросервисов для обработки блокчейн-транзакций в сети умных счётчиков</b> Дёмин, А.Ю. Дмитрийчук Д.И., Зарубин В.А. ....	32
<b>Проблемы релейной защиты сетей при добавлении источников распределенной генерации</b> Киргизалиев Т.А.....	36
<b>Оценка экономического эффекта при использовании накопителей энергии на промышленном предприятии</b> Дементьев Р.А.....	38
<b>Актуальность и цели прогнозирования часа пиковой нагрузки в субъекте Российской Федерации на предстоящие рабочие сутки</b> Ефременко Ж.В. ....	40
<b>Ранжирование кустовых насосных станций нефтяных месторождений по приоритету отключений при возникновении дефицита активной мощности в энергосистеме</b> Сушкова В.Р.....	43
<b>Расчёт токовой направленной защиты нулевой последовательности для автотрансформаторов</b> Сарнаков Д.Д. ....	46
<b>Использование нейронных сетей в алгоритме адаптивного управления инерцией системы управления силовыми преобразователями на основе виртуального синхронного генератора</b> Гусаров И.Н. ....	49
<b>Алгоритмы трехфазной фазовой автоподстройки частоты и применение к статическому синхронному компенсатору (Statcom)</b> Уманский И.В. ....	52

<b>Обеспечение устойчивости в Microgrid. Вызовы и перспективы</b> Седелева М.Д. ....	56
<b>Анализ внедрения ветроэнергетических установок 4 типа в электроэнергетические системы России и мира</b> Шарифов Х.М. ....	59
<b>Реализация протокола МЭК 61850 Sampled Values на микроконтроллере для организации сети передачи измерительных данных в составе цифровой подстанции</b> Ахтырский К.А., Кабиров В.А. ....	61
<b>Измерительные преобразователи и устройства сбора данных для систем телеметрии</b> Слива А.В. ....	65
<b>ГАЭС: принцип работы, анализ мировой практики применения</b> Абдуллаев Р.Р., Кронвальд И.Ю., ДБаранов.А. ....	67
<b>ЛЭП будущего: сверхпроводимость, беспроводная передача энергии</b> Танишев А.О., Снегирёв М.К., Федорков М.Д. ....	68
<b>Грозозащитные тросы на ЛЭП. Молниезащита зданий. Грозовые перенапряжения</b> Кондратьев А.Л., Бурнашев М.В., Гладилин К.В. ....	70
<b>Компьютеры будущего. Конец эпохи кремния</b> Гупалов В.А., Кривошапова А.Д. ....	72
<b>Пример реализации автоматизированной системы управления технологическим процессом подстанции для обучения студентов</b> Ковалев А.П. ....	74
<b>Беспилотные авиационные системы для нужд энергетики</b> Тримасов А.А., Цуканов А.В., Пожидаев И.Е. ....	77
<b>Разработка аналоговой части системы ориентации БПЛА по электромагнитному полю ВЛ</b> Николаев И.Д. ....	79
<b>Лазер: история создания, конструкция, сферы применения</b> Минголеев Е.С., Мироненко С.В. ....	81
<b>Применение автоэнкодеров для уменьшения времени сканирования томографических образцов</b> Волков М.И. ....	84
<b>Анализ применения программно-технической среды для тестирования устройств релейной защиты на базе ПАК RTDS</b> Шахнович Д.И. ....	87
<b>Прикладное применение искусственного интеллекта в прогнозировании энергопотребления</b> Поспелов Г. ....	91
<b>Прогнозирование выработки солнечных панелей с использованием методов машинного обучения</b> Бахмадов А.В. ....	93
<b>Применение систем накопления электрической энергии совместно с фотоэлектрическими установками при работе инвертора в режиме «ведущий»</b> Радько П.П., Малькова Я.Ю. ....	96
<b>Исследование работы сетевого инвертора в режиме «ведущий» в одномашинной энергосистеме</b> Малюта Б.Д. ....	100

<b>Разработка математической модели дифференциально-токовой защиты силового трансформатора в по REPEAT</b> Петрова А.Е. ....	103
<b>Обеспечение кибербезопасности цифровых подстанций</b> Ясунов В.В. ....	107
<b>Разработка и применение цифровых двойников для учёта, мониторинга и прогнозирования срока службы аккумуляторных батарей на объектах гидроэнергетики</b> Раменский К.Р., Манякина О.А. ....	110
<b>Цифровые подстанции: архитектуры, применяемые технологии и виды протоколов</b> Щепёткин И.С., Сухушин И.С., Аугервальд А.М. ....	114
<b>Экспериментальное исследование переходного процесса включения аккумуляторной батареи на заряд от источника отрицательной мощности</b> Попов М.М. ....	116
<b>Прогнозирование выработки солнечных электростанций с учетом экологических аспектов</b> Яхъяев М.А., Гериханов Д.Т., Малькова Я.Ю. ....	117
<b>Обзор систем прогнозирования выработки солнечных электростанций</b> Яхъяев М.А., Садаев Х.Ш., Малькова Я.Ю. ....	120
<b>Повышение инерционных свойств изолированных энергосистем, содержащих возобновляемые источники энергии, при помощи алгоритма виртуального синхронного генератора</b> Перцевой М.О. ....	122
<b>Разработка средств моделирования кратковременной разгрузки турбогенератора</b> Киевец А.В. ....	125
<b>Идентификация динамической модели колонны газоразделения для улучшенного управления технологическим процессом</b> Уфимцев А.В. ....	129
<b>Использование учебно-лабораторного стенда «Интеллектуальная система учета электроэнергии» в образовательном процессе</b> Садулаев А.А.-В. ....	132
<b>Цифровизация в электроэнергетике и интеллектуальные энергосистемы</b> Тетерюков А.А., Мухачев И.Б. ....	134
<b>Реализация вставки постоянного тока в программной среде моделирования REPEAT и проведение гармонического анализа токов электроэнергетической системы</b> Лифанов М.Р. ....	137
<b>Моделирование серис-преобразователя на платформе REPEAT</b> Боргояков А.А. ....	141
<b>Система токового регулятора электродвигателя на основе нейросети с использованием нечеткой логики</b> Поснов Д.Д., Токарев А.Д. ....	144
<b>Пути развития Smart Grid в России</b> Гук С.Н. ....	146
<b>Перспективы развития цифровых подстанций в России</b> Балашов Н.А. ....	147
<b>Перспективы использования цифровых технологий в атомной отрасли</b> Сильванович М.А., Пильковская М.Р., Мелькова А.С. ....	149

## Секция 2

<b>Теплофизические аспекты энергетических технологий .....</b>	<b>152</b>
<b>Исследование течения и теплообмена вблизи цилиндра со стержнями-турбулизаторами</b> Князев С.А., Сероштанов В.В., Гусаков А.А. ....	152
<b>Градиентная теплотметрия в исследовании теплообмена при кипении воды с микрочастицами <math>Al_2O_3</math> на пластине</b> Андрейко С.В., Павлов А.В., Бобылев П.Г. ....	156
<b>Анализ процессов теплообмена с фазовым переходом среды в вспомогательных трубопроводах натриевого оборудования</b> Бессонов И.А., Ревякина П.А., Ташлыков О.Л. ....	159
<b>Оценка лесной пожарной опасности, обусловленной инфраструктурой железной дороги, с использованием искусственной нейронной сети</b> Малинин А.О. ....	162
<b>Исследование влияния впрыска на параметры пароводяной смеси в закрытом сосуде</b> Елисеев В.В. ....	166
<b>Модернизация экспериментального стенда пассивного отвода остаточного тепловыделения облученных тепловыделяющих сборок</b> Глухов С.М. ....	169
<b>Математическое моделирование нагрева аккумуляторного модуля на платформе REPEAT</b> Иванов Н.С., Степин И.А. ....	172
<b>Недостатки камер сгорания стационарных ГТД</b> Казаков Р.С. ....	176
<b>Определение характеристик и условий процессов зажигания частиц влажного угля совместно с древесной биомассой</b> Омаров А.А., Косторева Ж.А., Сыродой С.В. ....	178
<b>Моделирования трехмерной задачи для определения коэффициента теплопроводности</b> Куликов К.Д., Фирсова Д.Е. ....	180
<b>Экспериментальное исследования влияния воздушного зазора между корпусом и нагревательным элементом</b> Гарбуз А.Г. ....	183
<b>Предсказание лесных пожаров методами машинного обучения</b> Гузеев Е.В. ....	186
<b>Имитационная модель лабораторного стенда по работе насосного оборудования в программном комплексе «Сапфир»</b> Шехин К.В. ....	189
<b>Расчет гидравлических параметров активной зоны реактора ИРТ-Т</b> Пасько Д.В. ....	192
<b>Осаждение взвешенных в жидкости микрочастиц в поле сил конвективного течения</b> Лисовская, Д.В. Зайцев А.С. ....	194
<b>Влияние размера вычислительной сетки на скорость и точность вычисления параметров процесса обогрева рабочей зоны газовым инфракрасным обогревателем</b> Вяткин А.В. ....	197
<b>Влияние толщины слоя древесной биомассы на механизм процессов тепло- и массопереноса, протекающих при его сушки</b> Познахарев А.С. ....	199

<b>Thermal-hydraulic optimization of multi-pass heat exchangers in solidworks</b> Ketter E.K.....	201
<b>Дробление капель водоугольного топлива в потоке воздуха</b> Р.Р. Замалтдинов .....	204
<b>Расчет стехиометрического количества воздуха для сжигания генераторного газа, полученного из углей различных месторождений</b> Безруких В.В.....	207
<b>Характеристики и условия испарения одиночной капли воды с текстурированной подложки</b> Тамашевич М.С. ....	209
<b>Исследование теплоэнергоэффективности А.А. обжига глинозольной керамики</b> Широбокова Е.Н., Сергиенкова .....	211
<b>Теплообмен при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе</b> Заворохин Т.А., Зайнуллина Э.Р.....	213
<b>Экспериментальные исследования теплообмена и гидродинамики при осциллирующем течении в пористых средах</b> Сабирова Ю.Ф. ....	216
<b>Численные исследования нестационарных течений в пористых средах</b> Сабирова Ю.Ф. ....	218
<b>Исследование влияния высокоэнергетической добавки к базовому топливу на механизмы и характеристики вторичного распада композиционных капель</b> Волокитин Д.И.....	221
<b>Секция 3</b>	
<b>Производство тепловой и электрической энергии .....</b>	<b>225</b>
<b>Оценка эффективности работы замкнутой атомной ГТУ с водородным комплексом в зависимости от потерь энергии</b> Стецов Н.В. ....	225
<b>Анализ эффективности промперегрева на парогазовых ТЭС</b> Чешуин Д.С., Ромашова О.Ю.....	228
<b>Эффективность дожигания в котлах-утилизаторах ПГУ-ТЭЦ</b> Бенедиктов А.А., Ромашова О.Ю. ....	232
<b>История и перспективы Белоярской атомной станции</b> Салюков В.С., Космынина Н.М. ....	235
<b>Validation of safety parameters of VVER-1200 using pctran simulator</b> Odi C.J.....	237
<b>Оптимизация конфигурации гибридного энергокомплекса с использованием генетического алгоритма</b> Северина Я.Д. ....	241
<b>Актуальность внедрения воздушно-конденсационных установок и их проблемные аспекты</b> Дьяченко Л.Е., Боруш О.В.....	244
<b>Модернизация системы управления автоматическим регулятором мощности реактора</b> Беляев В.В. ....	249

<b>Актуальность разработки отечественной системы диагностики шлакования поверхностей нагрева паровых котлов</b> Лойко В.П. ....	251
<b>Численное исследование влияния изменения фракционного состава пылеугольного топлива на эффективность его выгорания</b> Пузырёв С.А. ....	255
<b>Использования метода кимов для расчета тепловых схем ТЭС и АЭС</b> Агутенков И.О. ....	258
<b>Инновации в области микроэнергетики: микрогриды как решение для локального производства электрической и тепловой энергии</b> Клименко Д.С. ....	260
<b>Исследование влияния снижения гидравлических сопротивлений на тепловую экономичность ПТУ К-500-65</b> Зубов Н.В. ....	262
<b>Перспективы развития ядерной энергетики в регионах России</b> Зарубин И.В. ....	264
<b>Ограничения использования солнечной генерации в регионах России</b> Зарубин И.В. ....	266
<b>Внедрение альтернативных видов топлива в транспорт как фактор повышения экологической безопасности</b> Балыбердин А.Р. ....	267
<b>Секция 4</b>	
<b>Экологические проблемы энергетики .....</b>	<b>269</b>
<b>Влияние сопел третичного дутья на топочные процессы при сжигании пылевидного топлива в камерной топке</b> Мальцев К.И. ....	269
<b>Характеристики зажигания и горения жидких углеводородов пиролиза пластика</b> Макарейкин М.Е. ....	271
<b>Исследование высокотемпературного разложения сероводорода в дуге высоковольтного плазмотрона</b> Бабич К.И., Денисов Ю.С., Обрывалин М.В. ....	273
<b>Преимущества и недостатки струйных технологий дезактивации</b> Плаунов П.А., Зенков А.В. ....	274
<b>Влияние предварительной термической обработки древесных опилок на их измельчаемость</b> Мисюкова А.Д., Янковский С.А., Губин В.Е. ....	277
<b>Характеристики термического разложения и горения углей и композиционных топлив на их основе</b> Карташова К.А., Дорохов В.В. ....	279
<b>Влияние добавки картона на характеристики и свойства пеллетированного топлива</b> Шведов Д.К., Дорохов В.В. ....	282
<b>Способы дезактивации: преимущества и недостатки</b> Дубровский К.В., Зенков А.В. ....	286

<b>Влияние конфигурации воздушного потока на выбросы NO<sub>x</sub> в котельных установках с тангенциальным сжиганием</b> Абрамов Н.В. ....	288
<b>К вопросу о необходимости разработки системы вентиляции животноводческих ферм</b> Акмаганбетова Ж.С. ....	290
<b>Моделирование электромагнитных полей на трассах тяговых сетей постоянного тока</b> Крюков А.В., Середкин Д.А., Куок Хиеу Нгуен, Тьен Лыонг До ....	292
<b>Проблематика выбора консервирующей матрицы для захоронения радиоактивных отходов</b> Павлова И.А., убинА.В. Г. ....	296
<b>Экономические и экологические аспекты применения солнечной энергетики в городских условиях</b> Силемонов Д.С., Сафарзода Г., Худоназаров Б.В. ....	299
<b>Экспериментальные исследования изменения параметров электромагнитного поля в зависимости от расстояния до излучающего источника</b> Соловской А.С. ....	303
<b>Оценка радиационной безопасности проекта БРЕСТ-ОД-300</b> Ретунский Д.М., Сакерин А.О., Сероев И.А., Губин А.В. ....	305
<b>Влияние ТЭЦ на окружающую экосистему и способы борьбы с негативными последствиями</b> Балашов Н.А. ....	308
<b>Механизм реакции электрохимического получения водорода с использованием тиосемикарбазоновых комплексов Со (III) в качестве катализатора</b> Логвинов Д.А., Баранникова А.С. ....	309
<b>Изучение водостойкости композитных цеолитсодержащих пеноматериалов</b> Кузнецов С.С. ....	312
<b>Проблемы утилизации отходов атомной энергетики</b> Пильковская М.Р., Сильвановия М.А., Мелькова А.С. ....	314
<b>Перспективы развития систем очистки талых и дождевых вод</b> Балыбердин А.Р. ....	316
<b>Переработка нефтеотходов пиролизом для энергогенерации</b> Турчин С.В., Берикболов А.К. ....	318
<b>Секция 5</b>	
<b>Электротехнические комплексы и системы.....</b>	<b>322</b>
<b>Моделирование синхронного генератора с применением языка программирования Python</b> Доржиева Б.С., Раднаев А.Б. ....	322
<b>Бесколлекторный электропривод постоянного тока с прямым управлением момента без контроля потокосцепления</b> Ульянов Д.И. ....	324
<b>Исследование теплового состояния роторных обмоток асинхронных двигателей в нестационарных режимах работы. Методы оптимизации конструкции</b> Раднаев А.Б., Доржиева Б.С. ....	327

<b>Исследование и анализ параметров технологического функционирования гидроэлектростанций энергосистемы Таджикистана</b> Пичугова О.А. ....	330
<b>Оценка робастности регулятора напряжения автономного инвертора</b> Перовошиков Ф.В. ....	333
<b>Определение минимально необходимого числа измерений напряжений для идентификации фаз подключения счетчиков интеллектуальной системы учета к низковольтной сети методом корреляционного анализа</b> Пузанов И.А. ....	336
<b>Экспериментальное исследование гидравлических характеристик гидростатических подшипников, работающих в среде свинец-висмутового теплоносителя</b> Колосов С.В., Сапожников Н.М., Погорелов М.Д. ....	340
<b>Разработка математической модели функционирования ветро-дизельного парка</b> Мухов Н.Н. ....	342
<b>Экспериментальное определение выталкивающей силы в зазоре магнитожидкостного сепаратора</b> Шоронов В.Е. ....	344
<b>Экспериментальное исследование влияния содержания кислорода в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе на работу магнитного расходомера</b> Сапожников Н.М., Сумин Р.В., Колосов С.В. ....	347
<b>Моделирование электромагнитных полей, создаваемых вблизи путепровода при аварийном режиме работы тяговой сети</b> Воронина Е.В., Крюков А.В. ....	349
<b>Анализ магнитного поля рассеяния сверхпроводящего гибридного трансформатора</b> Галеев Р.Г. ....	353
<b>Моделирование электромагнитных влияний компактных линий электропередачи на металлические сооружения</b> Крюков А.Е. ....	355
<b>Исследование режима самозапуска асинхронного электродвигателя центробежного водяного насоса</b> Хнычев Д.А. ....	359
<b>Расчетное определение толщины оболочки судового кабеля</b> Жульмина М.Д. ....	361
<b>Оценка изменения массы графитовых элементов электродугового реактора постоянного тока</b> Корытов Д.А., Шляхов Т.С., Поваляев П.В. ....	363
<b>Разработка и внедрение новых материалов для повышения эффективности электрических приводов</b> Речкин Д.О. ....	366
<b>Оценка стойкости электрорезиновых материалов к эксплуатационным нагрузкам</b> Мурашко Ю.В. ....	370
<b>Зарядное устройство для аккумуляторной батареи</b> Головин В.Е. ....	373
<b>Применение электромагнитных виброактиваторов для разжижения придонных слоев ёмкостей хранения нефтепродуктов</b> Назаркин А.М. ....	376

<b>Моделирование работы асинхронного электродвигателя средствами языка программирования Python</b> Кишканова М.С. ....	377
<b>Разработка стенда для исследования влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей</b> Селяев А.В., Шишкина А.Н., Масленков Д.В. ....	381
<b>Электротепловые испытания силового кабеля</b> Измайлов Ф.Т., Лебедева А.А. ....	384
<b>Оценка электрофизических параметров кабельных изделий при низких температурах</b> Здорникова В.П. ....	386
<b>Перспективы использования имитационного моделирования при курсовом проектировании асинхронного двигателя</b> Бейерлейн Е.В., Проскуряков М.А. ....	389
<b>Устройство для исследования переходных процессов беспилотного летательного аппарата</b> Сыздыков К.М., Фам Чонг Хай.....	392
<b>Гашение дугового разряда в вакуумных выключателях постоянного тока магнитным полем</b> Фёдоров В.С. ....	396
<b>Оценка возможностей модернизации трансформаторов при проектировании</b> Миронов Р.А., Усачева Т.В. ....	398
<b>Тормозная электрическая машина для самолёта</b> Юнусов Х.С. ....	402
<b>Расчет энергетических показателей проектируемой электрической машины для торможение самолёта</b> Юнусов Х.С. ....	404
<b>Сравнительный анализ свойств изоляции провода при термообработке различными методами</b> Харитоновна К.А., Теляшкин Д.С. ....	406
<b>Устойчивость опор линий электропередач при ветровых и климатических воздействиях</b> Скворцов А.А. ....	408
<b>Проблемы устойчивости ветряных турбин</b> Скворцов А.А. ....	410
<b>Современные тенденции в разработке электротехнических комплексов и систем</b> Козлова Т.С. ....	412
<b>Комплекс для регистрации лесных пожаров</b> Иванова У.И., Ярославцева О.М. ....	415
<b>Исследование борьбы с явлением ложной земли в трансформаторе напряжения</b> Ермолаев А.В. ....	417
<b>Диагностика эксцентриситета ротора синхронного генератора по коэффициенту смещения поля</b> Грачев И.А. ....	420
<b>Сложности установки и эксплуатации солнечных электростанций в Алтайском крае</b> Фаст И.К. ....	424

<b>Математическая модель одноступенчатого импульсного дефектографирования для диагностики обмоток высоковольтных силовых трансформаторов</b> Кавун И.А. ....	427
<b>Анализ влияния нагрева трансформаторного масла на ёмкостный датчик в системе непрерывного мониторинга состояния маслонеполненного оборудования</b> Конев Е.М. ....	430
<b>Определение параметров релейной защиты от замыкания на землю</b> Ордабаев Б.Е. ....	433
<b>Математическая модель движения ленты транспортера</b> Сарбасова Н.Д., Майстров В.С. ....	436
<b>Исследование состава распределительных устройств энергообъектов по спутниковым снимкам</b> Копьёв А.В., Пичугова О.А. ....	439
<b>Секция 6</b>	
<b>Энергосбережение и энергоэффективность .....</b>	<b>444</b>
<b>СВЧ-переработка древесины в водородсодержащий газ: повышение эффективности за счет добавления микроволновых поглотителей на основе железа</b> Калинич И., Табакаев Р.Б. ....	444
<b>Влияние значения влажности на прочность биоугольных гранул</b> Димитрюк И.Д., Ибраева К.Т. ....	447
<b>Исследование влияния горючих добавок на характеристики выгорания топлив на основе керосина</b> Зайцева А.С. ....	451
<b>Инновационные технологии в энергетической инфраструктуре малых и средних городов</b> Иванова Е.М. ....	454
<b>Влияние майнинга на качество электрической энергии и надежность схемы электроснабжения</b> Кузьмина К.С. ....	458
<b>Автоматическая система управления вентиляцией шахты</b> Чернышев Д.И., Масалина Е.А. ....	462
<b>Исследование влагосодержания опилок для использования в качестве утеплителя ограждений зданий</b> Апарина А.В., Новикова Е.Д., Брагин Е.О. ....	466
<b>Исследование влияния несбалансированности фазных нагрузок потребителей на режимы работы низковольтных распределительных электрических сетей на основе измерений интеллектуальных счетчиков и оценивании состояния</b> Юдин А.Ю. ....	468
<b>Построение математической модели оптимизации напряжения для снижения электрических потерь</b> Антонова Е.М. ....	472
<b>Сокращения энергозатрат на собственные нужды энергообъектов за счет использования возобновляемых источников энергии</b> Дайс И.М. ....	475
<b>Работа поверхностного теплоутилизатора в органическом цикле Ренкина.....</b> Болдушевский, Е.С. Галашов Н.Н. ....	477

<b>Development of a combined control system of the ultrafiltration process for the separation of americium and curium</b> Ojo O.P. ....	479
<b>Оценка эффективности солнечных панелей на крышах в условиях городской застройки</b> Давлатзода А.Н., Худоназаров Б.В., Силемонов Д.С. ....	482
<b>Оценка возможности использования системы охлаждения дизельного генератора Caterpillar 3516dita для охлаждения воды в осенне-зимний период атмосферным воздухом</b> Хажакян В.О. ....	485
<b>Снижение влияние объектов микрогенерации на базе ФЭП на некоторые показатели качества электроэнергии</b> Кугучева Д.К. ....	489
<b>Влияние городской инфраструктуры на потребление энергии: подходы к проектированию устойчивых городов</b> Павлов М.Д. ....	492
<b>Влияние умного здания на потребление энергии: исследования и практические примеры</b> Павлов М.Д. ....	493
<b>Энергоэффективность в системах освещения: современные тенденции и перспективы</b> Клименко Д.С. ....	495
<b>Проблемы контроля и анализа показателей качества электрической энергии</b> Галиев И.Р. ....	497
<b>Повышение энергоэффективности процесса сушки стеновой глинозольной керамики</b> Смирнова Ю.Д., Сергиенкова А.А. ....	498
<b>Оптимизация работы тепловых сетей с учетом тепловых потерь: термодинамический подход и сравнительный анализ</b> Колотилкина К.В. ....	500
<b>Управление мощностью в системах электроснабжения</b> Егорихин К.А. ....	503
<b>Развитие в области солнечной энергетике</b> Егорихин К.А. ....	506
<b>Анализ целесообразности выполнения планов мероприятий по энергосбережению для непроизводственных организаций</b> Мелькова А.С., Сильванович М.А., Пильковская М.Р. ....	509
<b>Протоколы диммирования регулируемых систем освещения</b> Савченко И.С., Мельникова Е.А., Радюк Д.Д. ....	512
<b>Исследование процессов сжигания древесно-угольных брикетов в слоевом котле Прометей ЭКО</b> Есин К.С. ....	514
<b>Секция 7</b>	
<b>Новаии инженерного образования .....</b>	<b>517</b>
<b>Школы моделирования: вектор развития для новых специалистов</b> Шехин К.В. ....	517
<b>Искусственный интеллект в преподавании математики в техническом университете</b> Проскуряков М.А. ....	521

<b>Студенческое соуправление как место профессиональных проб и развития универсальных компетенций обучающихся инженерных направлений подготовки</b> Эралиева А.М. ....	523
<b>Обучающий программный модуль по обработке конфиденциальной информации на физических носителях на основе виртуальной реальности</b> Хаерова Э.И., Гатауллин Б.И. ....	526
<b>Виртуальная и дополненная реальность: новые перспективы в инженерном образовании</b> Козлова Т.С. ....	529
<b>Рекомендации для разработки образовательной программы студентам инженерной специальности</b> Самба-Люндуп Б.Б. ....	532
<b>Активная тепловизионная диагностика</b> Ткаченко Д.А. ....	535
<b>Секция 8</b>	
<b>Твой первый шаг в энергетику .....</b>	<b>538</b>
<b>Замена сварочных аппаратов, путём создания сварочного аппарата на водородном топливе</b> Зволь А.А. ....	538
<b>Разработка модели преобразователя инфракрасного излучения в электрическую энергию</b> Старостенков Я.Н. ....	540

# Секция 1

## Цифровизация в электроэнергетике и интеллектуальные энергосистемы

### ВИРТУАЛЬНАЯ ИНЕРЦИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

К.А. Гареева

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А13*

В условиях постоянного развития технологий и повышения требований к эффективности и устойчивости энергосистем, понятие виртуальной инерции приобретает всё большее значение. Виртуальная инерция представляет собой способность энергосистемы сохранять стабильность и обеспечивать надёжное электроснабжение при различных возмущениях и изменениях в режиме работы. В данном докладе мы рассмотрим основные аспекты виртуальной инерции в современных энергосистемах, её роль в обеспечении устойчивости и перспективы применения.

Виртуальная инерция – это способность энергосистемы поддерживать стабильность и обеспечивать надёжное электроснабжение за счёт использования различных механизмов и технологий. Она основана на принципах управления режимом работы энергосистемы, включая регулирование частоты и мощности, использование накопителей энергии и других средств.

Виртуальная инерция играет важную роль в обеспечении устойчивости энергосистемы. Она позволяет поддерживать стабильность частоты и напряжения, предотвращать развитие аварийных режимов и обеспечивать надёжное электроснабжение. В условиях возрастающих требований к устойчивости и надёжности энергосистем, виртуальная инерция становится ключевым фактором обеспечения их эффективной работы. Основная концепция виртуальных синхронных генераторов заключается в их способности адаптироваться к изменениям частоты. В отличие от традиционных регуляторов, которые обеспечивают лишь статическое управление частотой, подход ВСГ позволяет реализовать динамическое управление. Это управление основывается на производной от измеренной частоты. Несмотря на сложность данной топологии, связанной с использованием производной по частоте, она успешно применяется европейской исследовательской группой VSYNC, которая продемонстрировала эффективность эмуляции инерции с помощью VSG в ходе моделирования в реальном времени и ряда экспериментов [2].

Основными механизмами виртуальной инерции являются:

- Регулирование частоты и мощности. Это включает в себя использование регуляторов частоты и мощности, а также других средств управления режимом работы энергосистемы.
- Использование накопителей энергии. Накопители энергии, такие как батареи, суперконденсаторы и другие, могут использоваться для поддержания стабильности энергосистемы [1].
- Управление режимом работы генераторов. Это включает в себя изменение мощности генераторов и их скорости вращения для поддержания стабильности энергосистемы.

Виртуальная инерция находит применение в различных областях энергосистем, включая:

- Обеспечение устойчивости. Виртуальная инерция позволяет поддерживать стабильность энергосистемы при различных возмущениях и изменениях в режиме работы.
- Повышение эффективности. Использование виртуальной инерции позволяет повысить эффективность работы энергосистемы за счёт более точного управления режимом работы генераторов и других элементов.
- Снижение затрат. Применение виртуальной инерции может снизить затраты на строительство и эксплуатацию энергосистемы за счёт более эффективного использования существующих ресурсов.

Перспективы развития виртуальной инерции связаны с дальнейшим повышением требований к устойчивости и надёжности энергосистем. В условиях возрастающих нагрузок и изменений в режиме работы, виртуальная инерция станет ещё более важным фактором обеспечения эффективной работы энергосистем.

### **Проблемы и вызовы внедрения**

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение виртуальной инерции сталкивается с рядом проблем:

#### **1. Технические ограничения**

Не все инверторы способны обеспечить необходимую скорость реакции и точность управления. Требуются дополнительные исследования и разработки для создания эффективных алгоритмов управления.

#### **2. Нормативные и стандартные барьеры**

Отсутствие единых стандартов для оценки и сертификации систем виртуальной инерции может затруднить их широкое внедрение. Разработка международных стандартов станет важным шагом для упрощения интеграции этих технологий.

#### **3. Экономические аспекты**

Разработка и внедрение технологий виртуальной инерции требуют значительных инвестиций. Необходима поддержка со стороны правительств и частного сектора для финансирования таких проектов.

### **Примеры применения виртуальной инерции**

#### **1. Германия**

Германия активно использует технологии виртуальной инерции в своих энергосистемах, что позволяет интегрировать значительные объёмы ветровой и солнечной энергии. Инверторы с функцией виртуальной инерции помогают поддерживать стабильность сети даже при высоких долях ВИЭ.

#### **2. Австралия**

В Австралии виртуальная инерция применяется в проектах по установке больших солнечных ферм и ветряных электростанций. Эти системы обеспечивают необходимую поддержку частоты и напряжения, способствуя надёжному электроснабжению.

Виртуальная инерция представляет собой важный аспект современных энергосистем. Она позволяет поддерживать стабильность и обеспечивать надёжное электроснабжение за счёт использования различных механизмов и технологий. Применение виртуальной инерции в энергосистемах позволяет повысить их устойчивость, эффективность и снизить затраты. В условиях возрастающих требований к устойчивости и надёжности энергосистем, виртуальная инерция становится ключевым фактором обеспечения их эффективной работы.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Tamrakar U. Et al. Current Trends and Future Directions // Applied sciences. – 2017. – № 4. – P. 1–29.
2. Саттаров Р.Р., Гарафутдинов Р.Р. Технология виртуального синхронного генератора для повышения устойчивости энергосистем. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 373–378.

## ИЗМЕНЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ЕЁ НОВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Д.Е. Мащенко

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А13

В данном докладе разберем изменение устойчивости энергосистем и её новую классификацию, которая не только поддерживает логику, но и обеспечивает широкий охват и будущую адаптивность возникающих проблем стабильности. Основой информацией являются зарубежные источники [1, 2].

Устойчивость энергосистем за прошедшие годы изменилась в сторону большей гибкости, децентрализации и интеллектуализации. Это связано с развитием распределённой генерации, цифровизации и «Интернета энергии». Обсудим основные изменения в классификации, предложенной на сегодняшний день по сравнению с предыдущими вариантами.

Впервые оригинальная статья по определениям устойчивости энергосистем и их классификации, созданная рабочей группой IEEE была опубликована в 2004 г. Устойчивость энергосистемы была классифицирована следующим образом. Главными являются три ветви: стабильность угла ротора, стабильность напряжения, стабильность частоты. Также имеются две подветви для каждой основной ветви: в соответствии с размером возмущений (небольшое/долговременное) и временным интервалом (короткий/долговременный), которые необходимо учитывать при оценке стабильности (рис. 1).

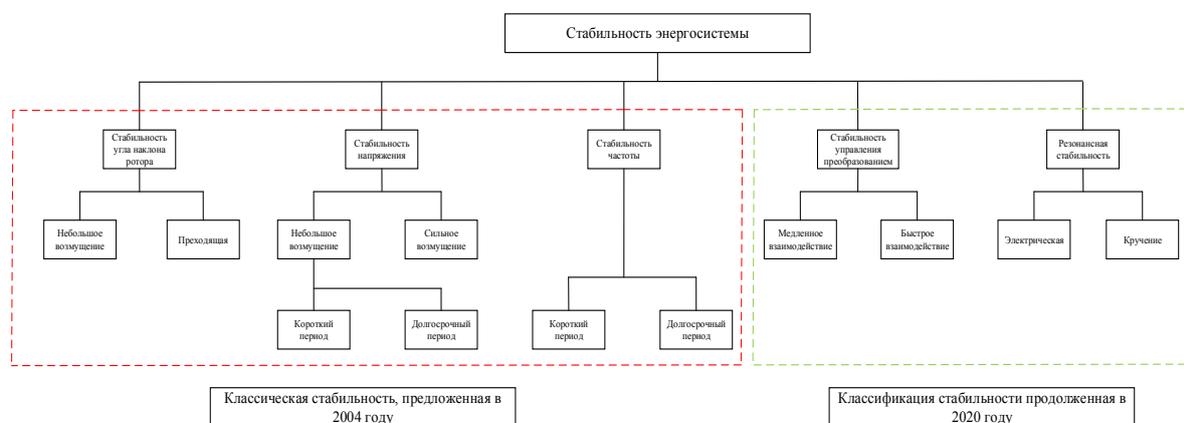


Рис. 1. Классификация устойчивости энергосистем 2004 и 2020 г. [1]

Однако динамическое поведение энергосистем постепенно менялось из-за растущего проникновения технологий генерации, нагрузок и передающих устройств с преобразователем. Начиная с XXI в., стремительное развитие технологий электроники и микросетей привело к возникновению новых проблем стабильности. IEEE создал рабочую группу, которая в 2020 г. опубликовала итоговый отчет по определениям и классификации устойчивости энергосистемы. Новая классификация устойчивости по большей части сохранила существующие определения устойчивости 2004 г., но главное отличие в том, что были добавлены две новые ветви – резонансная устойчивость и устойчивость, управляемая преобразователем.

Классификация 2020 г. не является всеобъемлющей, именно поэтому на сегодняшний день существуют предложения по новой классификации устойчивости и структуре, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с существующими классификациями устойчивости энергосистем 2004 и 2020 г. Предлагаемая классификация представлена на рис. 2.

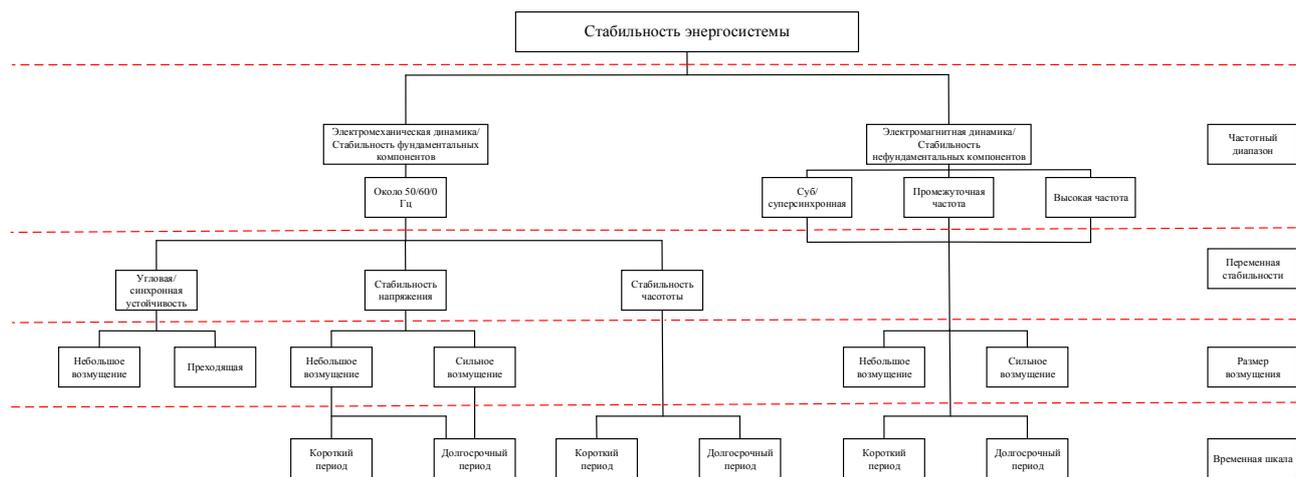


Рис. 2. Предлагаемая классификация устойчивости энергосистем [1]

Данная структура призвана помочь исследователям и инженерам лучше понять, определить и классифицировать возникающие проблемы стабильности энергосистемы в контексте сценария двойного высокого проникновения. По сравнению с классической и расширенной классификациями IEEE 2004 и 2020 г., авторы предлагают три основных изменения в классификации.

Добавлен новый слой, который классифицирует устойчивость энергосистемы на основе соответствующей частоты компонента, то есть фундаментальной составляющей, и нефундаментальной стабильности компонента. Стабильность фундаментальных компонентов включает три главные ветви классификации 2004 г., однако видно, что существующая угловая стабильность ротора модифицируется на угловую/синхронную устойчивость, которая теперь учитывает классическую стабильность угла наклона ротора синхронных генераторов, а также угол эквивалентного внутреннего потенциального напряжения турбогенераторов или угол напряжения точки общей связи.

Устойчивость нефундаментальных компонентов содержит три подкатегории в зависимости от частотного диапазона колебаний: субсинхронные и суперсинхронные колебания, промежуточная частота, высокая частота. Эти ветви в свою очередь включают в себя деления на возможные возмущения (небольшое/сильное) и период действия (короткий/долгосрочный).

Также предложено разделение классификации на отдельные блоки: частотный диапазон, переменная стабильности, размер возмущения и временная шкала.

Российская классификация устойчивости, предложенная в монографии В.А. Венникова [3], на сегодняшний день близка к зарубежной классификации 2004 г. и делится на статическую и динамическую устойчивость. При сопоставлении этих классификаций можно отметить, что зарубежное понятие «стабильность напряжения» аналогично термину «лавина напряжения», а «стабильность частоты» соотносится с понятием «лавина частоты». Таким образом, в России в настоящее время применяется классификация, которая в значительной степени перекликается с зарубежной классификацией 2004 г., что свидетельствует о единстве подходов к пониманию устойчивости в электрических системах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewable and Sustainable Energy Reviews. – URL: Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics (1).pdf (дата обращения 10.11.2024).
2. Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended. – URL: Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended.pdf (дата обращения 10.11.2024).
3. Венников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – Москва: Высшая школа, 1985. – 536 с.

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

И.С. Марков, А.И. Храмова

Томский государственный университет, ГГФ, группа 022316, 022313

Научный руководитель: А.В. Игнатьева, ст. преподаватель ГГФ ТГУ

**Аннотация.** В статье приведен анализ относительно приемлемости применения технологий добычи и производства водорода на территории России, исходя из технологических цепочек, наличия сырья, мощностей и прочих условий. Далее проведен анализ энергетического КПД, т. е. энергетической рентабельности добычи и использования водорода в рамках энергетики. Далее разработана концепция объединения технологий производства бирюзового и черного водородов, направленной на снижение экологических последствий производства водорода, а также на оптимизацию общих ресурсов производства и используемой энергии.

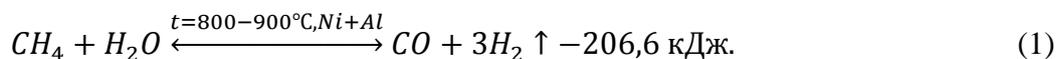
Для проведения анализа, сравним количество энергии, получаемое при сжигании единицы топлива, по сравнению с водородом:

- сжигание 1 кг водорода (500 моль) – 120 МДж энергии (+9 кг водяного пара);
- сжигание 1 кг природного газа (62,5 моля при формуле природного газа  $\text{CH}_4$ ) – 50 МДж энергии (+5 кг суммарно углекислого газа и водяного пара);
- сжигание 1 кг бурого угля – 13 МДж энергии;
- сжигание 1 кг каменного угля – 27 МДж энергии;
- сжигание 1 кг антрацита (уголь наивысшей степени фоссилизации) – 28 МДж энергии;
- сжигание 1 кг мазута – 40,5 МДж энергии;
- сжигание 1 кг бензина – 44 МДж энергии;
- сжигание 1 кг нефти – 40 МДж энергии [1, 2].



Рис. 1. Сравнительная диаграмма количества энергии, получаемого при сжигании единицы массы различных типов горючего

Далее определим, сколько энергии необходимо для образования 1 кг или 500 молей водорода из названных выше способов. Возьмем, к примеру, создание серого водорода путем паровой конверсии как одной и наиболее распространенных технологий по производству данного вида топлива:



Согласно уравнению реакции (1), для производства 3 молей водорода требуется 206,6 кДж энергии, без учета тепловых потерь и затрат тепловой энергии и на сторонние процессы. Тогда вычислим, сколько энергии  $Q_{500}$  потребуется для создания 500 молей водорода:

$$Q_{500} = Q_{\text{затрач}} \cdot \frac{\nu_{H_2\text{треб}}}{\nu_{H_2\text{уравн}}} = 206,6 \text{ кДж} \cdot \frac{500 \text{ моль}}{3 \text{ моль}} = 34,43 \text{ МДж.} \quad (2)$$

Даже с учетом возможных потерь энергии, которые можно оценить, например, в 30 % (взято произвольно, с учетом несовершенства конструкции установки сжигания топлива, а также потери энергии в окружающую среду при транспортировке тепла, а также за счет различий между теоретическим и практическим получением водорода), можно отметить, что энергия, образовавшаяся при сгорании 1 кг водорода, примерно в 2,7 раза превышает количество энергии, затрачиваемое на производство водорода путем паровой конверсией. Для более точной аналитики необходим расчет энергии, необходимой для технологического процесса конверсии. Тогда рассчитаем, сколько энергии потребуется для нагрева водяного пара до минимальной в рамках протекания реакции температуры в 800 °С, при температуре жидкости, приравненной к стандартным условиям, равной 20 °С. Так, для производства 1 кг водорода, согласно (2), потребуется примерно 167 молей воды, что составляет по массе  $m$ :

$$m = \nu_{H_2O} \cdot M_{H_2O} = 167 \text{ моль} \cdot (16 + 2) \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 3006 \text{ г} \approx 3 \text{ кг.} \quad (3)$$

Для большей достоверности исследования возьмем массу воды, равную 3,5 кг с учетом возможных потерь, например, в виде пара при проведении конверсии по причине недостаточной герметичности оборудования. Тогда количество энергии, необходимое для нагрева 3,5 кг воды до обозначенной температуры  $Q_{H_2O}$ :

$$Q_{H_2O} = m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta t = 3,5 \text{ кг} \cdot 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{С}} \cdot (800 - 20) = 11,46 \text{ МДж.} \quad (4)$$

При аналогичном учете возможных дополнительных потерь в 20 %, рассчитаем отношение потраченной энергии к полученной при сжигании водорода  $k^I$ \* (с использованием данных формул (2)–(4):

$$k = \frac{Q_{\text{уд}}}{(Q_{500} + Q_{H_2O}) \cdot (1 + 0,2) \cdot (1 + 0,3)} = \frac{120}{(11,46 + 34,43) \cdot 1,2 \cdot 1,3} = 1,68. \quad (5)$$

Получаем 168%-й выигрыш в производстве энергии из водорода, относительно его производства, что является крупным преимуществом. Вместе с тем необходим учет не только тепловых потерь, но и экономических затрат на производство, а также на реализацию самого процесса, на что требуется специальное оборудование и условия его эксплуатации.

Экологические факторы водородной энергетики:

#### 1. Углеродный след

*Причина:* попадание водяного пара и соединений углерода в атмосферу вследствие производства водорода, а также его эксплуатации (сжигании).

<sup>1</sup> В данном случае не учитывается энергия, затрачиваемая на производство никелево-алюминиевых катализаторов (в т. ч. на добычу, обогащение, выплавку и пр., поскольку они играют лишь роль ускорителей реакции и возможности снижения температуры пара для протекания реакции.

*Последствия:*

- прямые:
  - выброс в атмосферу (эмиссия) парниковых газов, что означает усиление парникового эффекта на локальном уровне [3];
  - усиление теплового эффекта вследствие выбросов большого количества водяного пара;
- косвенные:
  - миграция видов по причине изменения теплового баланса по антропогенным причинам и изменение сетей питания и устройства биогеоценоза на территории вблизи распространения выбросов электростанции при сжигании водорода;
  - увеличение доли отходов, содержащий никель, который используется в качестве катализатора для добычи водорода паровой конверсией;
  - рост числа электростанций, работающие на ВИЭ, что означает повышение числа техногенных ландшафтов, например, обширных территорий, занятых солнечными батареями или застроенных ВЭС.

2. Увеличение рисков техногенных ЧС (например, утечка водорода при его разрушении трубопровода вследствие окисления или его воспламенение и взрыв) [4].

*Последствия:*

- прямые:
  - разрушение инфраструктуры транспорта;
  - утечка водорода в атмосферу;
  - гибель людей и представителей биоты вследствие воспламенения высвободившегося водорода;
- косвенные:
  - нарушение строения биогеоценозов при подобных ЧС в местах возникновения;
  - возможная утечка нефтепродуктов как остаточного элемента труб в месте детонации (в случае, если транспортировку водорода осуществляют по нефтепроводам).

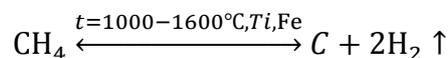
Ввиду приведенных выше экономических и экологических факторов, присущих для различных путей производства водорода, необходима разработка решения, способно оптимизировать применяющиеся способы производства газа, а также снизить экологические издержки.

Разработанное предложение заключается в совместном проведении двух способов производства водорода: «бирюзового» и «черного» видов водорода.

Обоснование предложения:

Приведем уравнения реакции изготовления данных видов водорода:

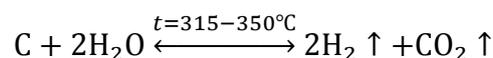
- Бирюзовый водород:



*Способ производства:* пиролиз метана для его разложения на твердый углерод и водород [5].

*Условия реакции:* температура свыше 1000 °С (800–1600 °С). Для уменьшения температуры пиролиза возможно использовать в виде катализаторов соединения переходных металлов (например, железа или титана) [4].

- Черный водород:



*Способ производства:* газификация раскаленного бурого угля водяным паром под высокой температурой с образованием синтез газа.

*Проблема:* поскольку при газификации используется бурый уголь, который, вопреки используемой формуле обозначенный там как С, т. е. чистый углерод, является совокупностью циклических соединений, в состав которых входят серо- и азотсодержащие химические

группы. Это означает, что, несмотря на неполное окисление бурого угля, в качестве примесей при создании черного водорода могут выходить оксиды азота и серы, а также аммиак и сероводород, которые без улавливания способны нанести значительный вред окружающей среде и, в первую очередь, атмосферному воздуху.

Решение проблемы: согласно теории, при производстве бирюзового водорода при высокой температуре в ходе пиролиза образуется чистый углерод, который способен использоваться в дальнейшем в металлургии или иных сферах промышленности. В то же время его использование при создании черного водорода позволит избежать возникновения примесей с содержанием азота и серы, которые в рамках атмосферного воздуха являются куда более вредными, чем монооксид углерода, диоксид углерода и водяной пар, входящие в состав образующегося синтез-газа и наносящие куда меньший урон окружающей среде, поскольку в рамках реакции будет выступать уже не бурый уголь, а чистый углерод, без примесей. С точки зрения же соотношения по количеству необходимого углерода при производстве черного водорода и углерода, образующегося при создании бирюзового водорода, можно утверждать, что это также не противоречит экономической части. Так, при образовании 2 молей водорода бирюзового образуется 1 моль углерода из 1 моля метана. Для образования же 2 молей водорода при использовании 2 молей воды необходим 1 моль углерода. Это является приемлемым для экономической сферы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савитенко М.А., Рыбаков Б.А. Применение водорода в энергетике: вопросы экологии // Турбины и дизели: аналитика. – 2021. – № 1. – С. 10–16.
2. Теплотворность различных видов топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// sovetingenera.com/otoplenie/o-drugoe/teplotvornost-razlichnyh-vidov-topliva.html](https://sovetingenera.com/otoplenie/o-drugoe/teplotvornost-razlichnyh-vidov-topliva.html) (Дата обращения 18.02.2024).
3. Попадько Н.В., Панков С.В., Попадько А.М. Водородная энергетика: этапы развития, проблемы и перспективы // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 1. – С. 293–296.
4. Арютонов С.В. Проблемы и вызовы водородной энергетики // Горение и плазмохимия. – 2021. – № 1. – С. 245–255.
5. Классификация водорода по цвету [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu/?ysclid=lsrkmb60887143506](https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/672526-klassifikatsiya-vodoroda-po-tsvetu/?ysclid=lsrkmb60887143506) (Дата обращения 18.02.2024).

## АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ПОДКЛЮЧАЕМЫХ К ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

**Ж.В. Ефременко**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41*

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Ограниченные ресурсы углеводородов и экологические проблемы от их использования выступают двигателем развития возобновляемой энергетики. Особое внимание государства, инвесторов и научных работников уделяется стремительно развивающейся ветроэнергетике. Однако наряду с этим существуют трудности, преодоление которых является актуальной задачей.

### 1. Топологии ВЭУ

В докладе рассматривается классификация горизонтально-осевых ВЭУ по типу применяемых в них генераторов. Разбиение генераторов на типы осуществлено по критерию управления скоростью. Сделан акцент на способ соединения ветроколеса и генератора (редукторное или прямое), вид регулирования скорости вращения ветроколеса (с регулируемой или фиксированной скоростью) и на величину этой скорости (тихоходные или быстроходные ВЭУ).

### 1.1. Редукторные ВЭУ

ВЭУ подразделяются по способу соединения ротора электрогенератора и ветроколеса на ВЭУ с прямым приводом (безредукторные) и редукторные ВЭУ.

#### 1.1.1. ВЭУ 1-го типа – ВЭУ с постоянной скоростью вращения вала ротора

В ВЭУ 1-го типа используется асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором. Частота вращения его ротора неизменна при работе ВЭУ в рабочем диапазоне скоростей ветра (на практике частота вращения варьируется в небольшом диапазоне), она зависит от количества пар полюсов генератора, величины скольжения, передаточного числа редуктора (выбирается с целью обеспечения выдачи электроэнергии с частотой, равной частоте сети) [1].

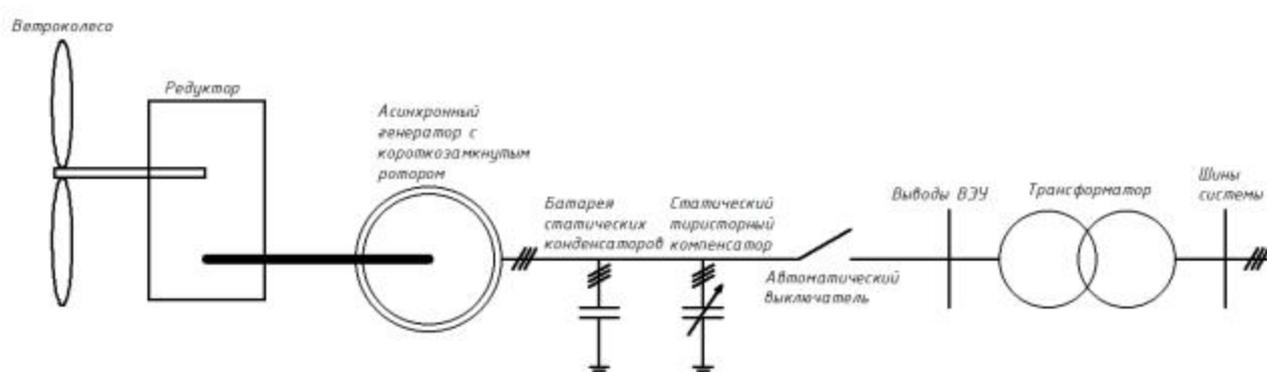


Рис. 1. Основные компоненты ВЭУ 1-го типа [2]

Подключение статорной обмотки электрогенератора к электросети 50 Гц выполняется напрямую через повышающий трансформатор. Для уменьшения реактивной мощности, потребляемой роторной обмоткой асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, параллельно ему подключается батарея конденсаторов.

Такой тип ВЭУ отличается высокой надежностью из-за отсутствия силового преобразователя и щеточного узла на роторе в сравнении с ВЭУ других типов, а также простотой и низкой стоимостью. Однако имеется ряд недостатков, основными из которых являются: невыработка электроэнергии в промежутки времени между троганием ветроколеса и набором номинальной частоты вращения (в переходных режимах), низкое качество выдаваемой электроэнергии. Данные недостатки послужили толчком к появлению иных типов ВЭУ.

#### 1.1.2. ВЭУ с частично регулируемой скоростью вращения вала ротора

##### 1.1.2.1. ВЭУ 2-го типа – асинхронный генератор с фазным ротором

Данный тип ВЭУ представляет собой редукторную установку, состоящую из ветроколеса и асинхронного генератора с фазным ротором, в роторную обмотку которого включаются резисторы. Регулирование скорости вращения ротора осуществляется путем изменения сопротивления обмотки ротора, поэтому данный тип ВЭУ имеет следующие интерпретации названия: ВЭУ с переменной скоростью вращения, ВЭУ с частично-регулируемой скоростью вращения, ВЭУ с динамическим сопротивлением ротора [3].

Такая топология ВЭУ позволяет увеличить выработку электроэнергии по сравнению с ВЭУ 1 типа, однако имеет ряд недостатков. Изменение скольжения (и, соответственно, скорости вращения) возможно осуществлять в достаточно малых пределах – от 2 до 5 % [4], электрические потери на нагрев в обмотке ротора достигают высоких значений, потребляется большое количество реактивной мощности из сети, сохраняется проблема низкого качества выдаваемой в сеть электрической энергии.

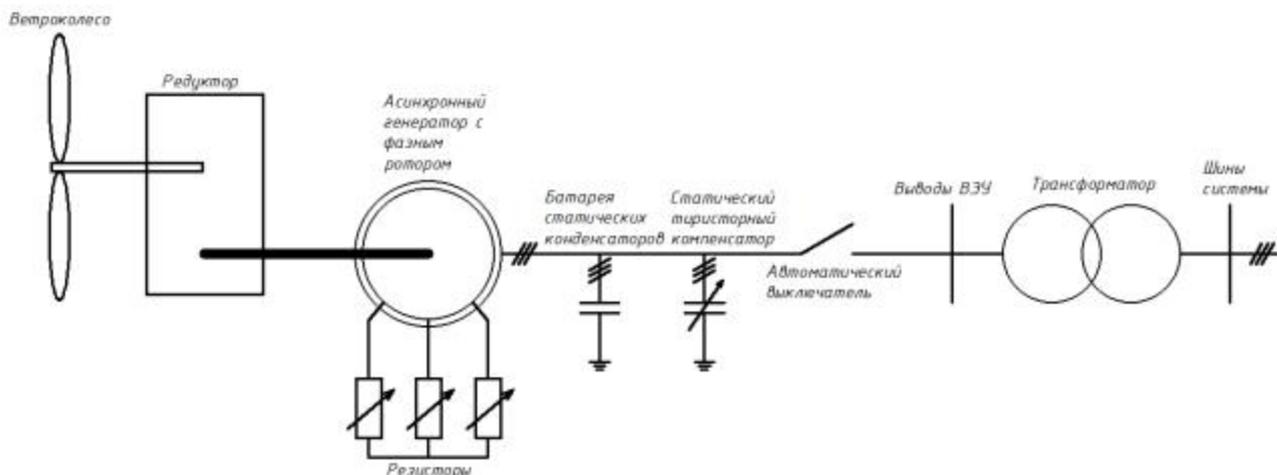


Рис. 2. Основные компоненты ВЭУ 2-го типа [2]

### 1.1.2.2. ВЭУ 3-го типа – асинхронный генератор с двойным питанием

Топология ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания представляет собой ветроколесо, связанное с асинхронным генератором с фазным ротором через редуктор. Подключение генератора к электросети осуществляется через трехобмоточный трансформатор, обмотки которого подключены следующим образом: первая – к выводам статора генератора, вторая – к щеткам, обеспечивающим контакт с контактными кольцами ротора, третья – к основной сети переменного тока. Между выводами ротора и обмоткой трансформатора устанавливается преобразователь AC/DC/AC для регулирования частоты и амплитуды напряжения в роторной обмотке. Через преобразователь проходит до 30 % установленной мощности генератора, остальные 2/3 мощности выдаются через статорную обмотку. Регулирование скорости вращения ротора генератора может осуществляться в пределах  $\pm 30\%$  от синхронной частоты [5]. К достоинствам данного типа относят плавный пуск и компенсацию реактивной мощности, низкие потери в статоре, недорогой преобразователь, рассчитанный на треть мощности генератора. Однако имеются и недостатки: регулярное техническое обслуживание, ограниченное изменение частоты вращения, более высокие затраты на техническое обслуживание из-за наличия контактных колец и щёток (средний срок службы щёток составляет 6–12 месяцев), высокая общая стоимость ветрогенератора из-за использования редуктора (включая затраты на производство и регулярное техническое обслуживание).

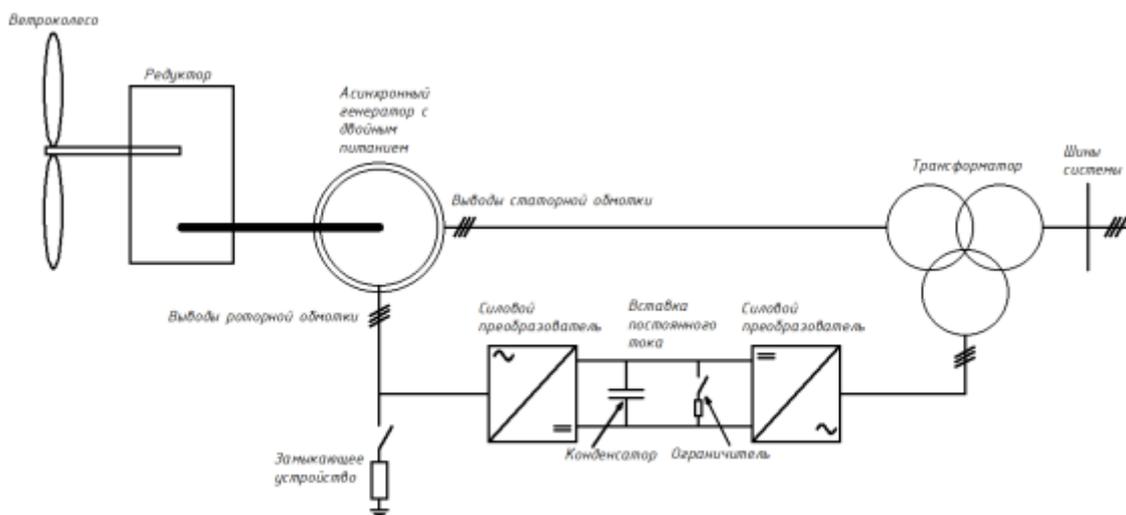


Рис. 3. Основные компоненты ВЭУ 3-го типа [2]

## 1.2. Безредукторные ВЭУ

Так как редуктор является самым слабым местом ВЭУ и зачастую выходит из строя раньше нормативного срока службы, то оправдано исключение данного узла из установки. Безредукторная ВЭУ 4-го типа состоит из синхронного генератора с электромагнитным возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов.

Высокую надежность обеспечивает применение синхронного генератора с магнитным возбуждением. Ротор такого генератора представляет собой бочку, на внутренней части которой закреплены постоянные магниты, статор находится внутри ротора. Данная конструкция позволяет размещать большее число полюсов на роторе, а также не допускать вылета постоянных магнитов из пазов в роторе вследствие работы центробежной силы при вращении.

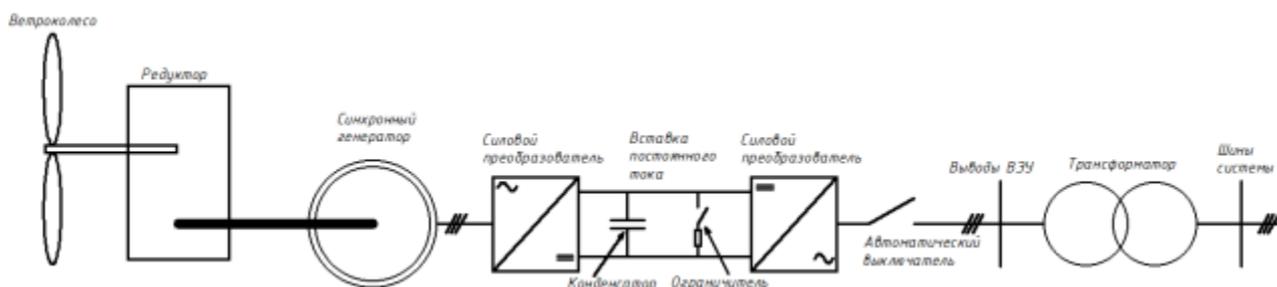


Рис. 4. Основные компоненты ВЭУ 4-го типа [2]

Преимуществами ВЭУ 4-го типа по сравнению с ВЭУ других типов являются:

- снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт из-за отсутствия редуктора;
- отсутствие коллектора, щеток и системы возбуждения (в случае магнитного возбуждения), что повышает надежность;
- уменьшение времени ремонтного простоя установки и низкий уровень шума за счет отсутствия редуктора;
- наиболее высокий КПД.

К недостаткам стоит отнести более высокую массу из-за габаритного генератора и высокий размер капитальных вложений в строительство из-за силового преобразователя, рассчитанного на полную мощность ВЭУ [1].

## 2. Актуальность применения ветроэнергетических установок в ЕЭС России

Ветроэнергетический потенциал Российской Федерации оценивается в значение 16500 ТВт·ч/год [6].

По состоянию на 1 января 2024 года введены в эксплуатацию и начали поставку мощности по договорам о предоставлении мощности 78 объектов (2420,04 МВт) ветрогенерации. Крупнейшей ВЭС на оптовом рынке электроэнергии и мощности является Кочубеевская ВЭС мощностью 210 МВт в Ставропольском крае. В 2023 г. 17 заявок по ветроэлектростанциям (ВЭС) на 738,5 МВт прошли конкурентный отбор мощности (плановая дата начала поставки мощности с 2025 по 2029 год) [7].

Наиболее подходящими регионами для развития ветрогенерации являются северные и юго-западные районы России вследствие высокой среднегодовой ветровой активности. Особый интерес представляют изолированные энергосистемы Дальнего Востока и Крайнего Севера, где эффективно строительство ветроэлектростанций для их совместной работы с малыми ГЭС, дизельными, биоэнергетическими или геотермальными установками [8].

Для работы на электроэнергетическую систему рекомендуется применять мощные ВЭУ 4-го типа, подключенные через вставку постоянного тока и трансформатор присоединения к узлу сети [9]. Это позволяет решить основную проблему ветроэнергетики – проблему обес-

печения требуемого качества электрической энергии, а также повысить надежность работы установки при выборе безредукторных ВЭУ.

### **Заключение**

В докладе рассмотрены топологии ВЭУ, отражены преимущества и недостатки каждого типа. Рассмотрена актуальность применения ВЭУ в России, отмечен оптимальный вариант топологии ВЭУ для работы в составе энергосистемы.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Bensalah A., Barakat G., Amara Y. Electrical generators for large wind turbine: Trends and challenges // *Energies*. – 2022. – Т. 15. – № 18. – С. 6700.
2. ГОСТ Р. 54418.27. 1-2019 (МЭК 61400-27-1: 2015) Возобновляемая энергетика // *Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть*. – С. 27–31.
3. Santoso M.S.S., Singh M. Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants // NREL national laboratory of the US Department of Energy. – 2011. – С. 15–17.
4. Blaabjerg, F.; Chen, Z.; Teodorescu, R.; Iov, F. Power Electronics in Wind Turbine Systems // In *Proceedings of the 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, China, 14–16 August 2006*. – Vol. 1. – P. 1–11.
5. Hansen, A.D. *Generators and Power Electronics for Wind Turbines*. – John Wiley & Sons, Ltd.: West Sussex, UK, 2012.
6. Елистратов В.В. *Возобновляемая энергетика*. – 3-е изд., доп. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 424 с.
7. Годовой отчет за 2023 г. Некоммерческого партнерства «Совет Рынка» [Электронный ресурс] // Ассоциация «НП Совет Рынка» [Официальный сайт]. – URL: [https://www.np-sr.ru/sites/default/files/1\\_godovoy\\_otchet\\_za\\_2023\\_god.pdf](https://www.np-sr.ru/sites/default/files/1_godovoy_otchet_za_2023_god.pdf) (дата обращения: 10.11.2024).
8. Гзенгер Ш., Денисов Р. Перспективы ветроэнергетического рынка в России // Интернет-ресурс. Режим доступа: <https://www.wwindea.org/wp-content/uploads/2017/06/170612-FES-Windenergie-rus-print.pdf> (дата обращения: 10.11.2024). – 2017.
9. Разживин И.А. *Всерезимное моделирование ветроэнергетической установки в электроэнергетической системе: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.14.02 : дис.* – 2019.

## **РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ЗА СЧЕТ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЧАСТИ ЕЕ МОЩНОСТИ**

**Е.А. Бернякович**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41*

Научный руководитель: Н.Ю. Рубан, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ



## Введение

В условиях стремительного роста доли возобновляемых источников энергии, в частности фотоэлектрических станций (ФЭС), перед энергосистемами встает задача обеспечения надежного и качественного электроснабжения. ФЭС, характеризующиеся переменчивостью выработки в зависимости от солнечной доступности, требуют эффективных методов регулирования частоты для поддержания стабильности энергосистемы.

В данной статье рассматривается стратегия регулирования частоты энергосистемы с использованием ФЭС за счет резервирования части её мощности. Поставленной целью является оценка эффективности данного метода резервирования, его влиянию на общую надежность системы и экономическую целесообразность применения данного подхода.

### Подход к регулированию частоты в ЭЭС с помощью СЭС

Для поддержания стабильной частоты энергосистемы часть мощности фотоэлектрической станции резервируется. Этот резерв используется в случае необходимости увеличения выработки электроэнергии, что помогает предотвратить колебания частоты. При необходимости управления частотой с помощью ФЭС, её мощность снижается на заранее определенный процент, исходя из необходимого резерва.

Для резервирования определенного количества активной мощности фотоэлектрическая генерация электроэнергии должна работать с отклонением от максимальной мощности [1]. В статье используется метод пропорционального запаса мощности и целевой коэффициент запаса мощности определяется как  $r^*$  %, выраженный в виде уравнения (1) [2]:

$$r^* \% = \frac{P_{\text{max}} - P_{r^* \%}}{P_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{max}}$  представляет максимальную мощность фотоэлектрической решетки, а на ее величину влияют внешняя освещенность и температура;  $P_{r^* \%}$  обозначает целевую мощность в точке запаса мощности.

Для наглядного примера предлагаемой стратегии управления, рассматривается двухконтурная инерция выработки электроэнергии. Структура топологии и общая схема управления изображены на рис. 1 [3].

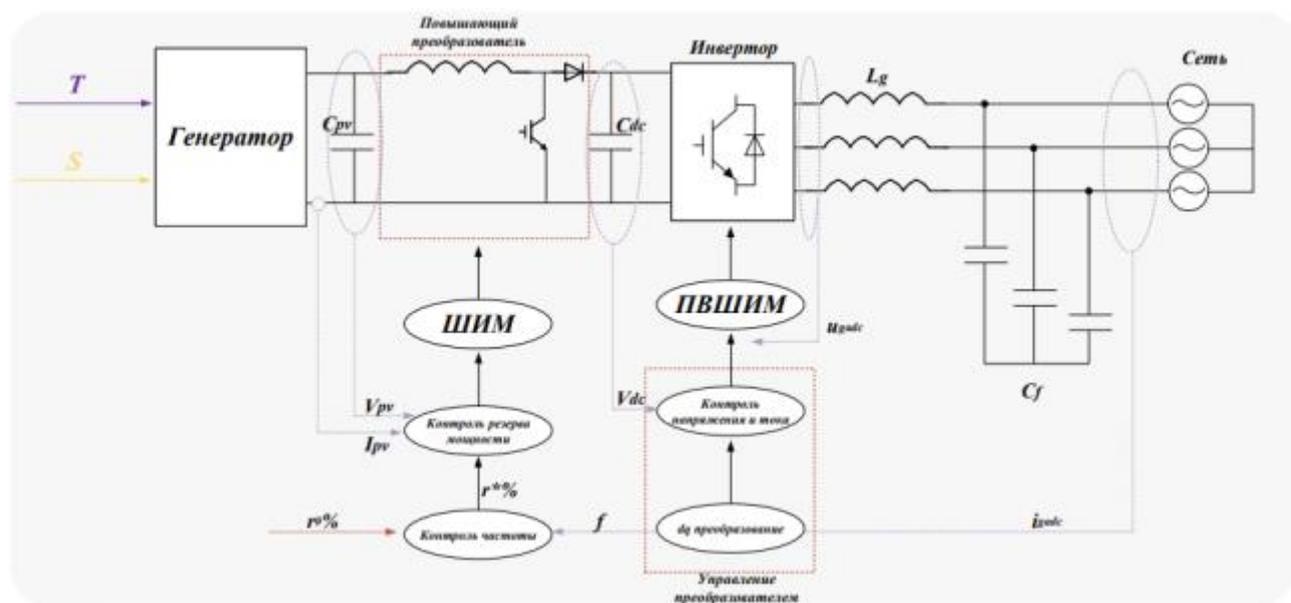


Рис. 1. Структурная блок-схема предлагаемой стратегии управления

На рис. 1,  $S$  представляет интенсивность окружающего света,  $T$  обозначает температуру окружающей среды,  $C_{pv}$  обозначает конденсатор на стороне фотоэлектрической системы,  $C_{dc}$  – конденсатор на стороне постоянного тока,  $L_g$  обозначает индуктивность фильтрации,  $C_f$  представляет фильтрующий конденсатор,  $u_{gabc}$  – напряжение, подключенное к сети,  $i_{gabc}$  – ток, подключенный к сети, и  $f$  – частота сети, измеряемая с помощью контура фазовой автоподстройки частоты (PLL<sup>2</sup>).

Роль частотного регулирования заключается в передаче целевого коэффициента запаса мощности  $r^*$  %, полученного от управления запасом мощности, на основе изменений частоты сети. Это позволяет ФЭС выработки электроэнергии демонстрировать характеристику первичной частотной модуляции, аналогичную характеристике традиционных энергоблоков. Чтобы придать фотоэлектрическим системам характеристики инерции, напоминающие синхронные машины, была принята схема регулирования частоты, изображенная на рис. 2 [3]. Блок-схема управления включает в себя как регулирование снижения частоты, так и инерционное управление, с выражением для целевого коэффициента запаса мощности  $r^*$  % следующим образом в уравнении (2):

$$r^* \% = r_0 \% + r_1 \% + r_2 \% = r_0 \% + k_d \Delta f + k_i \frac{df}{dt}. \quad (2)$$

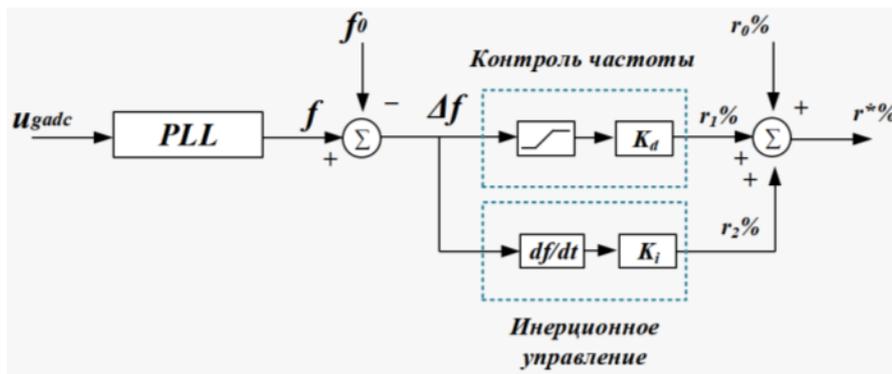


Рис. 2. Первичное регулирование частоты

На рис. 2,  $f_0$  обозначает номинальную частоту электросети;  $k_d$  представляет коэффициент провисания;  $k_i$  – коэффициент инерции;  $r_0$  % обозначает данный начальный коэффициент запаса мощности;  $r_1$  % и  $r_2$  % – значения отклонения коэффициента уменьшения нагрузки, вызванные регулировкой провисания и инерционным звеном соответственно.  $R^*$  % определяется путем добавления начального коэффициента запаса мощности  $r_0$  % к значениям отклонения  $r_1$  % и  $r_2$  % от коэффициента запаса мощности. Оно служит эталонным значением для коэффициента запаса мощности и действует как входные данные для управления запасом мощности.

Когда частота сети  $f$  отклоняется от номинальной  $f_0$ , происходит отклонение, приводящее к снижению опорного коэффициента запаса мощности  $r_1$  % и опорного коэффициента запаса мощности по инерции  $r_2$  %. Это приводит к созданию нового эталонного коэффициента запаса мощности  $r^*$  %, позволяющего фотоэлектрической системе отслеживать этот новый эталонный коэффициент запаса мощности.

Для повышения эффективности работы фотоэлектрической станции и оптимизации её мощности, предлагается динамически регулировать коэффициент запаса мощности в зависимости от уровня освещенности и нагрузки. Учитывая сильную зависимость выработки

<sup>2</sup> PLL (phase-locked loop) – электронная схема с генератором, управляемым напряжением или током, который постоянно настраивается для совпадения фазы с частотой входного сигнала.

ФЭС от интенсивности света, коэффициент запаса мощности должен увеличиваться при ярком освещении (для снижения избыточной генерации и предотвращения повышения частоты) и уменьшаться при слабом освещении (для увеличения генерации и предотвращения снижения частоты). Такой подход, основанный на изменении коэффициента запаса мощности во времени, позволяет уменьшить колебания частоты энергосистемы, обусловленные изменениями условий освещенности.

В отличие от других методов, предлагаемый в данной статье подход учитывает текущую нагрузку энергосистемы. При низкой нагрузке повышается коэффициент запаса мощности фотоэлектрической станции, увеличивая резерв мощности системы. При высокой нагрузке коэффициент запаса мощности снижается, увеличивая активную мощность ФЭС и обеспечивая баланс генерации и потребления. Таким образом, для эффективного долговременного управления необходимо учитывать динамику изменения нагрузки при определении кривой изменения коэффициента запаса мощности.

Учитывая приведенный выше анализ, предлагается функция коэффициента запаса мощности для фотоэлектрических электростанций следующим образом в уравнении (3):

$$r \% = 10 \% \cdot \frac{S}{1000} \cdot \frac{P_{av}}{P_L}, \quad (3)$$

В уравнении (3),  $S$  представляет прогнозируемую будущую интенсивность освещения на основе интенсивности освещения в определенное время,  $P_L$  – мгновенная нагрузка системы в то же будущее время на суточной кривой нагрузки, предсказанной методом прогнозирования нагрузки, а  $P_{av}$  – средняя нагрузка за этот день.

За счет настройки переменной скорости снижения нагрузки эффективность регулирования частоты фотоэлектрической установки поддерживается без компромиссов, при одновременном повышении эффективности выработки электроэнергии и экономических показателей [4].

На рис. 3 приведен наглядный пример того, как с помощью участия блока синтетической инерции можно уменьшить амплитуду и количество колебаний частоты.

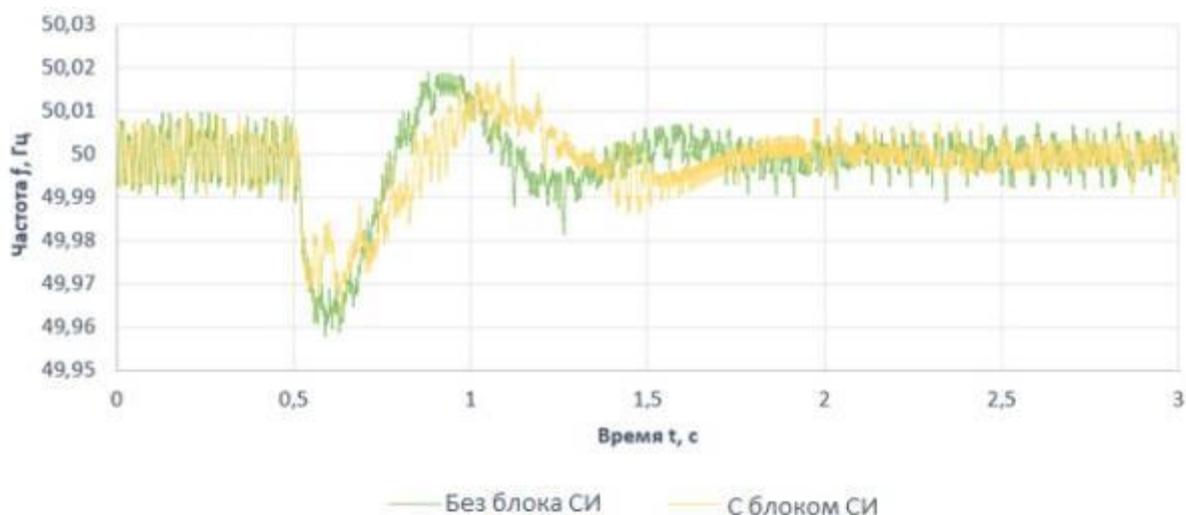


Рис. 3. График зависимости частоты от времени без использования блока СИ и с его использованием

### Заключение

В данной статье исследовалась эффективность регулирования частоты энергосистемы с помощью солнечной электростанции (СЭС) путем резервирования части ее мощности. Анализ показал, что динамическое управление коэффициентом запаса мощности СЭС, учитыва-

ющее как уровень солнечной инсоляции, так и текущую нагрузку энергосистемы, является перспективным подходом к обеспечению стабильности частоты при высокой доле возобновляемой генерации. Предложенный метод позволяет оптимизировать выработку электроэнергии СЭС, снижая избыточную генерацию при высоком уровне освещенности и компенсируя дефицит мощности при низком уровне освещенности. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку более совершенных алгоритмов управления, учитывающих прогнозирование погоды и нагрузки, а также на оценку экономической эффективности предлагаемого метода в сравнении с традиционными методами регулирования частоты.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2014 // Sciedirect 2014 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061514000969?via%3Dihub#preview-section-references> (дата обращения 18.11.2024).
2. Ли К. Исследование по производству фотоэлектрической энергии, участвующей в регулировании частоты сети. Кандидатская диссертация. – Пекин: Северо-Китайский университет электроэнергетики, 2022.
3. Чжоу С. Исследование стратегии активного регулирования мощности ветровой и солнечной генерации, участвующей в регулировании частоты электросети. Кандидатская диссертация. – Цзилинь, Китай: Северо-Восточный электроэнергетический университет, 2018.
4. Ву П., Лю Б., Ян П., Сонг С., Лю З., Цинь Л. Первичное управление частотной модуляцией и оценка фотоэлектрической энергии с учетом погоды и рабочего состояния // Журнал Уханьского университета. – 2022. – 55 (3). – 275–282.

## МОНИТОРИНГ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ ПОМОЩИ ПРЕДОБУЧЕННОЙ МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

**А.А. Сухобоков**

*Белорусский национальный технический университет, ФИТР, РТС, группа 10703222*

Научный руководитель: Н.В. Воюш, ст. преподаватель РТС БНТУ

В современных условиях энергоснабжение играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития экономики и промышленности. Линии электропередач являются важнейшей составляющей энергетической инфраструктуры, обеспечивающей передачу электроэнергии на большие расстояния. Надежность и эффективность эксплуатации ЛЭП напрямую зависят от их конструкции, а также от своевременного анализа возможных дефектов и структурных повреждений. На данный момент мониторинг линий осуществляется непосредственно специалистами, бригада которых начинает работу на участке уже при наличии проблемы. Этот процесс является неэффективным и ресурсозатратным, это может привести к длительному ограничению полноценной работы ЛЭП, тем самым к созданию угрозы работающих предприятий.

Предложенным решением является использование дронов для съемки опор линий электропередач с различных ракурсов. Изображения со съемки использовать в качестве входных данных для специально обученной модели нейронной сети, которая решая задачу обнаружения объектов, будет определять дефекты в конструкции, а также структуре ЛЭП. Использование дронов экономит ресурсы на передвижении специалистов, так как будет необходимо участие одного диспетчера-пилота, а использование нейронной сети повысит эффективность обработки входящей информации.

Функцией нейронной сети будет являться определение дефектов в структуре линии электропередач. Определение дефектов на объекте будет происходить путем распознавания изображений, передаваемых с дрона и для этих целей лучше использовать модели нейронной сети сверточной архитектуры.

В предлагаемом способе определения дефектов на начальном этапе необходимо определиться с подходом анализа набора данных, которые будут использованы при обработке и создании датасета. Съемку необходимо осуществлять с различных угловых ракурсов, таким образом, чтобы по количеству сделанных фотографий можно было составить полную картину о структуре, расположенной на опоре ЛЭП. Наилучшим вариантом будет являться многогранная съемка со сменой позиции каждые  $90^\circ$  с целью сохранения наилучшего качества изображения. По получаемым изображениям можно идентифицировать следующие возможные дефекты:

- целостность опоры;
- загрязнение и сколы изоляторов;
- неправильная вязка или её отсутствие.

Приведенные группы дефектов являются отдельными классами для обучения модели.

На следующем этапе осуществляется настройка предобученной модели сверточной нейронной сети YOLO v.8 [2]. Данная модель предлагает оптимальный баланс между точностью и скоростью обработки изображений, что особенно важно при анализе большого количества данных. YOLOv8 демонстрирует высокие показатели по обнаружению объектов с минимальными вычислительными затратами [3], что позволяет эффективно выявлять дефекты и конструктивные особенности ЛЭП. Программная настройка включает в себя модуль, определяющий необходимость использования сегментации [4] изображения, в случае различия размера изображения входного потока и требуемого размера у предобученной модели. В результате работы модуля сегментации изображение будет сегментировано на равные части, с учетом расположения границ объектов. Также программная настройка включает в себя использование необходимых команд в коде для реализации процесса обучения и тренировки модели.

В ходе работы осуществлялось обучение и тренировка нейронной сети, что позволило улучшить метрики всех циклов модели. Во время тестирования модель проверялась по нескольким ключевым метрикам: точность, полнота, среднее значение точности и F1-Score. Где точность показывает, сколько из предсказанных объектов модель определила правильно, без ложных срабатываний (рис. 1, в). Полнота оценивает, насколько эффективно модель находит все объекты на изображении (рис. 1, а), не пропуская их. mAP (mean Average Precision) – это агрегированная метрика, которая оценивает, насколько точно и полно модель предсказывает местоположение и класс объектов на различных порогах уверенности (рис. 1, б).

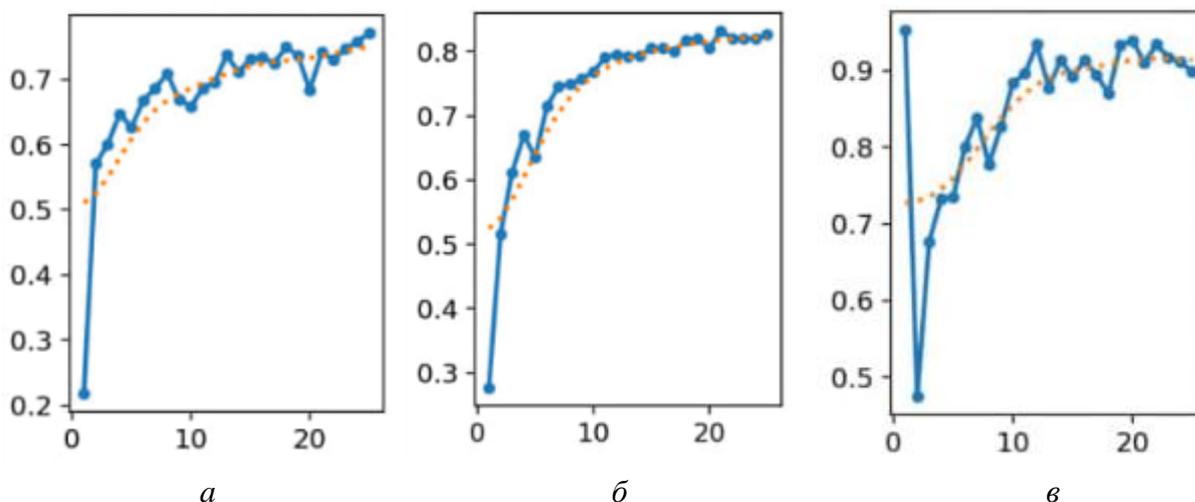


Рис. 1. Графики метрик модели после тестирования, где а) полнота, б) mAP, в) точность

Выходные данные полученной модели содержат обработанные изображения, которые являются прогнозами нейронной сети о возможных дефектах, и данная информация передается специалисту для подведения итога о правильности прогноза. В случае достижения неудовлетворительного результата, он будет отправлен в эту же модель на переобучение. Применение нейронных сетей во время мониторинга за объектами ЛЭП позволит увеличить эффективность определения возможных угроз заранее и уменьшит затратность ресурсов на технологическое обслуживание.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хэ К., Чжан С., Жэнь С., Сун Дж. Глубокое остаточное обучение для распознавания изображений // Труды Конференции IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR). – 2016. – С. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
2. Редмон Дж., Диввала С., Гиршик Р., Фархад А. Вы смотрите только один раз: Унифицированное обнаружение объектов в реальном времени // Труды Конференции IEEE по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR). – 2016. – С. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
3. Джочер Г. и др. YOLOv8: Ultralytics YOLO для обнаружения и сегментации объектов\*. Репозиторий GitHub. – URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics>. [Дата доступа – 10.11.2024]
4. Тан М., Пан, Р., Ле, К.В. EfficientDet: Масштабируемое и эффективное обнаружение объектов // Труды Конференции IEEE/CVF по компьютерному зрению и распознаванию образов (CVPR). – 2020. – С. 781–790. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01080.
5. Чжан Ч., Бенджио С., Хардт М., Рехт Б., Виньялс, О. Понимание глубокого обучения (по-прежнему) требует пересмотра обобщения // Коммуникации АСМ. – 2021. – Т. 64(3). – С. 107–115. DOI: 10.1145/3446776.
6. Эверингем М., Ван Гоол Л., Уильямс К.К., Уинн, Дж., Зисман А. Задача визуальных объектов Pascal (VOC) // Международный журнал компьютерного зрения. – 2010. – С. 303–338. DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4.
7. Лин Т.-Й., Мэр М., Белонджи С., Хэйс Дж., Перона П., Раманан Д., Доллар П., Цитник К.Л. Microsoft COCO: Общие объекты в контексте // Европейская конференция по компьютерному зрению (ECCV). – 2014. – С. 740–755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1\_48.

## РАЗРАБОТКА АСИНХРОННЫХ МИКРОСЕРВИСОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ БЛОКЧЕЙН-ТРАНЗАКЦИЙ В СЕТИ УМНЫХ СЧЁТЧИКОВ

А.Ю. Дёмин<sup>1</sup>, Д.И. Дмитрийчук<sup>2</sup>, В.А. Зарубин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Томский политехнический университет, ИШИТР, ОИТ*

*Томский государственный университет, ИПМКН, каф. ТОИ*

<sup>2</sup> *Томский политехнический университет, ИШИТР, ОИТ, группа 8К11*

<sup>3</sup> *Томский политехнический университет, ИШИТР, ОИТ, группа 8К13*

Научный руководитель: А.Ю. Дёмин, к.т.н., доцент ОИТ ИШИТР ТПУ,  
доцент ИПМКН каф. ТОИ ТГУ

### Введение

С ростом числа умных счётчиков и их значимости в энергетических сетях вопросы учёта и контроля потребления электроэнергии становятся всё более актуальными. Для эффективного решения этих задач всё чаще используют блокчейн-технологии, которые обеспечивают безопасность, прозрачность и неизменность данных [1]. В рамках таких решений традиционно используется монолитный блокчейн, где все транзакции обрабатываются синхронно и централизованно.

В этом подходе данные от всех счётчиков собираются и обрабатываются последовательно в рамках одной системы, что помогает гарантировать точность и последовательность операций. Однако синхронная обработка и централизованное хранение данных имеют свои ограничения. При увеличении числа устройств возникает проблема масштабируемости, так как нагрузка на систему растёт, что может привести к задержкам в обработке транзакций и снижению производительности.

Современные тенденции в разработке программного обеспечения подталкивают к использованию микросервисной архитектуры, которая позволяет создавать распределённые и масштабируемые системы [2]. Микросервисы становятся всё более популярными благодаря своей гибкости и возможности изолировать функциональность в отдельные компоненты.

В контексте блокчейн-технологий и умных счётчиков применение асинхронных микросервисов открывает новые возможности для повышения эффективности, скорости и масштабируемости обработки данных. Использование этой архитектуры позволяет обрабатывать большое количество транзакций параллельно, что улучшает производительность системы и ускоряет взаимодействие с устройствами в реальном времени.

В данной работе предлагается разработка асинхронной микросервисной системы для обработки блокчейн-транзакций, связанных с данными умных счётчиков, с использованием языка программирования Python и асинхронного веб-фреймворка FastAPI. Такой подход позволит эффективно обрабатывать параллельные запросы и обеспечивать бесперебойную обработку данных в реальном времени.

Цель работы – создать систему, использующую микросервисную архитектуру для обработки транзакций, связанных с учётом потребления электроэнергии, обеспечивая высокую производительность, безопасность и прозрачность с использованием блокчейн-технологий.

### **Микросервисная архитектура и её применение**

Микросервисная архитектура представляет собой подход к разработке программного обеспечения, при котором система разбивается на независимые, самодостаточные компоненты – микросервисы. Каждый микросервис выполняет одну конкретную задачу и взаимодействует с другими через чётко определённые интерфейсы, такие как API или сообщения. Это позволяет разрабатывать, тестировать и масштабировать каждый компонент системы отдельно, что значительно повышает гибкость и ускоряет процесс разработки [3].

Микросервисы могут работать автономно, но для полноценного функционирования системы важно, чтобы они могли эффективно взаимодействовать между собой. Для этого часто применяются асинхронные коммуникации, где данные передаются с использованием очередей сообщений или событий, что позволяет избежать блокировок и улучшить производительность системы. Такой подход идеально подходит для систем с высокой нагрузкой, таких как обработка блокчейн-транзакций, где требуется быстрое и параллельное выполнение множества операций.

Используя микросервисы в контексте записи транзакций с умных счётчиков, можно эффективно распределить задачи блокчейна по независимым узлам. Разделение позволит различным элементам системы работать параллельно, без каких-либо задержек. Данная архитектура позволит существенно повысить масштабируемость и отказоустойчивость системы.

### **Разработка микросервисов**

Проект состоит из трёх основных микросервисов, каждый из которых выполняет свои задачи и взаимодействует с другими сервисами через REST API, а также общую базу данных PostgreSQL. Использование Docker-контейнеров и Docker-compose помогает легко разворачивать проект, управлять микросервисами, обернутыми в контейнеры, что позволяет облегчить масштабирование системы, ее поддержку и, в перспективе – обновление.

Сервис сбора данных (Data Collector Service) получает данные с внешних устройств – счётчиков или API, затем записывает их в базу данных. Сервис для записи данных в цепочку блокчейна (Blockchain Service) необходим для хранения данных в неизменяемой структуре блоков блокчейна, сводя к минимуму возможность подделки данных и позволяя контролировать изменения в них. Сервис управления базой данных и миграциями взаимодействует с базой данных и управляет миграциями базы данных с использованием Alembic, необходим для автоматизации процесса обновления структуры БД, сборки и просмотра цепочки блокчейна.

Все микросервисы используют базу данных PostgreSQL для обмена данными. В базе данных хранятся промежуточные данные, полученные с внешних устройств. Затем блокчейн-сервис выгружает данные из БД, проверяя их целостность перед инициализацией нового блока, создает новый блок и фиксирует его в таблице blockchain базы данных.

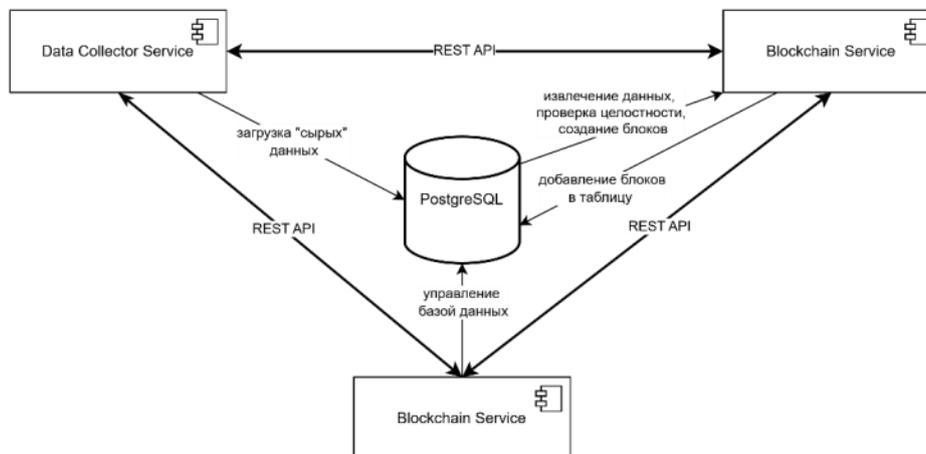


Рис. 1. Схема взаимодействия микросервисов на узле-счетчике

Для обеспечения целостности структуры базы данных используется Database Service, который применяет миграции при запуске. Также данный сервис необходим для обеспечения доступа к базе с целью получения истории потребления электроэнергии конкретным счетчиком, а также для просмотра всей цепочки блоков, записанных в таблицу blockchain.

Для организации единой точки доступа к микросервисам, облегчения маршрутизации запросов, распределения нагрузки между несколькими экземплярами микросервисов, а также централизованного управления системой используется API Gateway. Это решение помогает снизить нагрузку на микросервисы, повысить производительность и упростить мониторинг запросов.

Для развёртывания системы и оборачивания микросервисов с контейнеры используется Docker и Docker Compose. Конфигурация каждого сервиса описана в Dockerfile, а настройки запуска кластера подготовленных контейнеров – в docker-compose.yml

### Тестирование системы

Для проверки корректности работы микросервисов и устойчивости к сбоям было проведено тестирование системы с помощью фреймворка pytest. Тесты покрывают основные функции микросервисов, такие как: добавление и валидацию блоков в блокчейне, сбор данных с устройств, управление миграциями и проверку состояния базы данных, а также взаимодействие через REST API.

Тесты блокчейн-сервиса проверяют создание блоков и успешное получение цепочки блокчейна, задавая в качестве входных данных подменённые хэш-суммы предыдущих блоков. После чего система правильно помечала цепочку невалидной. Эти тесты позволяют удостовериться в неизменности данных и корректности работы алгоритма. В тестах сервиса-сборщика данных проверялся процесс сбора данных с устройств и запись информации в базу данных, пройденные тесты доказывают актуальность и точность получаемой информации. Микросервис базы данных проверял работу миграций и обновления статуса базы данных, подтвердив стабильность работы приложения.

Асинхронность тестов, написанных с помощью модулей AsyncClient и pytest.mark.asyncio, помогает моделировать приближенную к реальной нагрузку и выполнять параллельные опе-

рации, чтобы выявлять потенциальные ошибки и сбои. Таким образом были проверены компоненты микросервисов, а также взаимодействие между ними, что показало устойчивость работы системы в условиях, близких к реальным.

Результаты тестов показали высокое покрытие кода – более 90 %, что свидетельствует о комплексной проверке системы и минимизации вероятности сбоев при работе в условиях реальных данных.

### Заключение

В результате работы была разработана система, состоящая из трех приложений, организованных в рамках микросервисной архитектуры. Каждый из микросервисов выполняет свою задачу: сервис сбора данных принимает и записывает информацию с различных устройств в базу данных, сервис блокчейна обеспечивает сохранность и неизменность данных, записывая их в цепочку блоков, а сервис управления базой данных отвечает за миграции и стабильную работу с данными.

Все микросервисы взаимодействуют через общую базу данных PostgreSQL, это позволяет каждому сервису эффективно обмениваться информацией, записывая и извлекая данные из единого хранилища. Сервис сбора данных сохраняет данные в базе, к которым впоследствии обращается сервис блокчейна для обработки данных и добавления их в цепочку блоков.

Для упрощения взаимодействия между этими микросервисами и централизованного управления запросами был внедрён API Gateway. Это решение не только упростило маршрутизацию, но и улучшило мониторинг и управление запросами.

Запуская данную программу на каждом счетчике, достигается децентрализованность системы, где каждый счетчик выполняет свою роль как независимый узел, что позволяет системе продолжать функционировать даже в случае выхода из строя отдельных компонентов.

```

Curl
curl -X 'GET' \
'http://127.0.0.1:8080/blockchain/' \
-H 'accept: application/json'

Request URL
http://127.0.0.1:8080/blockchain/

Server response
Code  Details
200
Response body
{
  "length": 2,
  "chain": [
    {
      "index": 0,
      "timestamp": "2024-10-12 20:00:35.325247",
      "meter_id": "m0",
      "consumption": 0,
      "proof": {},
      "previous_hash": "0"
    },
    {
      "index": 1,
      "timestamp": "2024-10-12 20:00:38.719285",
      "meter_id": "m1",
      "consumption": 100,
      "proof": {
        "proof": "0x58b61af96838ac16886e9844e3c8c65e133e03a75eba7c785a7c786d276"
      },
      "previous_hash": "0"
    }
  ]
}

Response headers
content-length: 323
content-type: application/json
date: 04:12 Oct 2024 13:00:32 GMT
server: uvicorn

Responses
Code  Description  Links
200  Successful Response  No links

```

Рис. 2. Результат работы database\_service при получении общей цепи блокчейна

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BSEMS—A Blockchain-Based Smart Energy Measurement System / M. Sing, S. Ahmed, S. Sharma, S. Singh, B. Yoon // Sensors. – 2023. – V. 23.
2. Микросервисы (Microservices) // habr.com 2015. – URL: [https:// habr.com/ru/articles/249183/](https://habr.com/ru/articles/249183/) (дата обращения 02.11.2024).
3. Взаимодействие в архитектуре микросервисов // habr.com 2022. – URL: [https:// habr.com/ru/companies/slurm/articles/675682/](https://habr.com/ru/companies/slurm/articles/675682/) (дата обращения 02.11.2024).

## ПРОБЛЕМЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ СЕТЕЙ ПРИ ДОБАВЛЕНИИ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Т.А. Киргизалиев

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41

Одним из самых ярких примеров сети с распределенной генерацией в последнее время стали, так называемые, микросети (по англ. – Microgrid). Данные сети представляют из себя некую локализованную систему с источниками распределительной генерации (РГ) и нагрузкой, которая имеет возможность функционировать либо параллельно с внешней распределительной сетью либо автономно.

Microgrid включает в себя источники традиционной энергетики, например, дизельные или газотурбинные установки, а также объекты ВИЭ, и собственный набор потребителей. Тем самым при подключении к распределительной сети делает сеть активной, т. е. с наличием как потребления, так и генерации электрической энергии [1]. Таким образом, схема распределения электрической энергии будет выглядеть иначе (рис. 1).

Исходя из опыта [2], в настройке релейной защиты сетей Microgrid есть трудности, т. к. защита должна корректно функционировать при двух режимах работы Microgrid (в режиме работы изолированно и при подключении к внешней распределительной сети).

Сделав обзор литературы по данной тематике, можно выделить следующие проблемы в работе релейной защиты в сетях с распределенной генерацией:

1. В случае, когда защита установлена на ответвлении подстанции и на параллельной подстанции имеется источник РГ, происходит ложное срабатывание РЗ (рис. 2).

Как видно на рис. 2, при возникновении КЗ на линии, отходящей от той же шины, к которой подключена подстанция с источником РГ, происходит подпитка током к месту КЗ.

2. Некорректная работа дистанционной защиты в связи с уменьшением тока короткого замыкания [3], так называемое добавление параллельного сопротивления источника РГ (рис. 3).

3. Наличие источника РГ также пагубно влияет и на работу автоматики, например, на работу АПВ (рис. 4).

При возникновении КЗ работает релейная защита и отключит поврежденный участок, но в это время будет осуществляться подпитка места КЗ источником РГ, и возможно даже сохранения дуги замыкания. При наличии в сети АПВ, автоматика включит участок обратно на короткое замыкания (неуспешное АПВ), что может привести к выводу из строя оборудования.

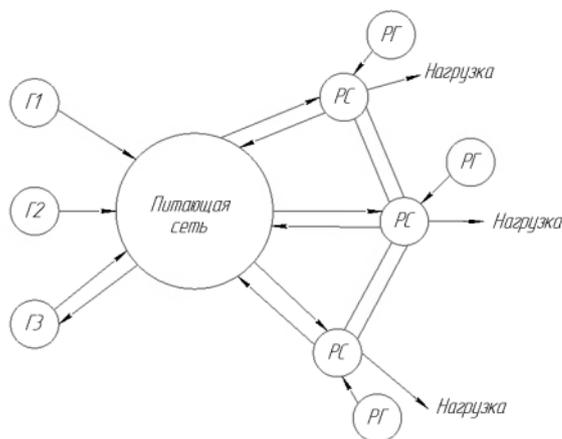


Рис. 1. Схема распределения электрической энергии сети с распределенной генерацией

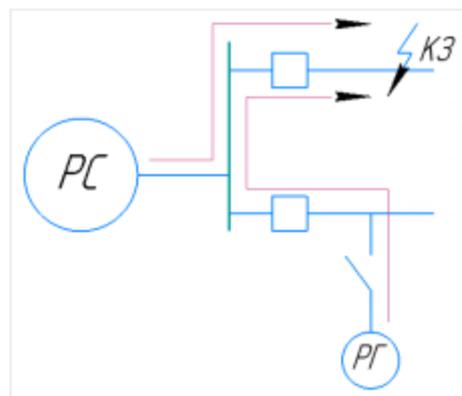


Рис. 2. Ложное срабатывание защита при наличии РГ на подстанции, отходящей от той же шины

4. Непреднамеренное переключение с режима работы параллельно с внешней сетью на изолированную работу Microgrid из-за КЗ во внешней сети. Резкое переключение может привести к образованию большого тока и отключению генераторов Microgrid.

Исходя из вышесказанного, в связи с многими трудностями в работе релейной защиты в сетях Microgrid появляется все больше статей, в которых анализируется предыдущий опыт и вносятся дополнительные корректировки, предлагая новый алгоритм в борьбе с данной проблемой. Исаков Р.Г. в своей статье [4] предлагает использовать модель адаптивной защиты, созданную в программно-аппаратном комплексе в режиме реального времени – RTDS. С помощью данного ПАК можно создать методику, которая поможет рассчитать возможные режимы Microgrid с распределенной генерацией, а также определить состав и построение РЗА, тем самым исключив вышеперечисленные проблемы РЗ в сетях с РГ.

Таким образом, можно сделать вывод, что проблема данной работы актуально и до сих пор рассматривается во многих научных статьях, где предлагаются новые решения проблемы. Как выше было сказано, наиболее перспективным направлением в развитии данной тематики является создание адаптивной защиты, которая будет включать в себя ЦПУ, пункты сбора необходимой информации и сами исполнительные механизмы.

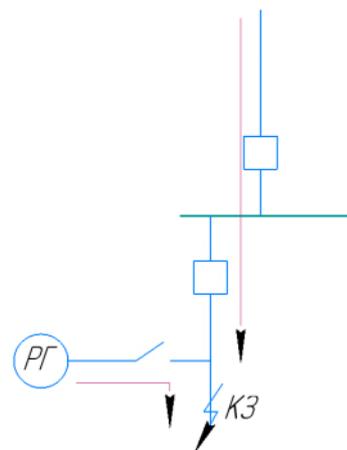


Рис. 3. Неправильная работа защиты при подключении РГ между местом КЗ и питающей ПС

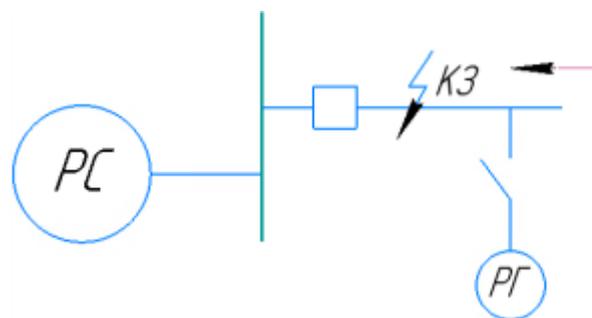


Рис. 4. Некорректная работа АПВ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаков Р.Г., Метелёв И.С., Ференец А.В. Проблемы релейной защиты сетей Microgrid и варианты решения // Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. – 2019. – Т. 1. – Ч. 2. – С. 116–123.
2. Zamani M.A.. Protection and Control of Active Distribution Networks and Microgrids: Monograph. 2012. – 197 p. – URL: <https://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=2195&context=etd> (дата обращения: 12.09.2024).
3. Advanced Architectures and Control Concepts for more MicroGrids. Work Package C. Alternative Designs for Microgrids. DC2: Novel protection systems for microgrids [Электронный ресурс] / A. Oudalov et al. 2009. – 168 p. – URL: <http://www.microgrids.eu/documents/688.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
4. Исаков Р.Г., Метелёв И.С., Ференец А.В. Кибер-физическая модель microgrid для исследования работы релейной защиты и автоматики // V Всероссийская научно-техническая конференция (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). – 2017. – С. 501–505.

## ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Р.А. Дементьев

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-42

Научный руководитель: Н.Ю. Рубан, к.т.н., доцент, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Ввиду постоянного увеличения стоимости электроэнергии и мощности использование накопителей энергии на промышленных предприятиях, как основных потребителей электрической энергии, становится всё более актуальным, поскольку при определённых условиях позволяет оптимизировать энергопотребление и повысить эффективность производства. Накопители энергии помогают сглаживать пики нагрузки на электросеть, и способствуют снижению затрат на электроэнергию. Применение подобных решений особенно важно для предприятий с высокой энергоёмкостью производственных процессов, таких как металлургические заводы, химические предприятия и нефтеперерабатывающие комплексы. «Побочными эффектами» внедрения накопителей энергии является обеспечение бесперебойного питания потребителей в случае нештатных отключений электроэнергии, выравнивание графика нагрузки энергосистемы, а также повышение уровня экологической безопасности производства путём снижения выбросов вредных веществ в атмосферу за счёт более эффективного использования энергоресурсов.

Однако, лишь небольшая часть подобных проектов доходит до стадии практической реализации, несмотря на потенциальную прибыльность от использования накопителей энергии. Чтобы внедрение технических решений с применением систем накопления энергии принесло максимальный экономический эффект, необходимо выполнить ряд условий. В данной статье рассматриваются показатели, которые помогают определить, насколько обосновано и эффективно применение накопителей энергии с целью снижения затрат на электроэнергию и мощность, приобретаемых промышленным предприятием, а также возможное влияние систем накопления энергии на выравнивание графика нагрузки энергосистемы.

Количество потребляемой электроэнергии зависит от технологических процессов того или иного предприятия и является непостоянным во времени, что ведёт к неравномерному графику нагрузки энергосистемы и наличию часов максимума и минимума, в связи с чем генерирующие компании вынуждены поддерживать определённый резерв мощностей для удовлетворения спроса. Кроме того, вероятность значительного изменения нагрузки энергосистемы за короткий промежуток времени требует от части электростанций, участвующих в формировании предложения на оптовом и розничном рынках, значительной манёвренности. Производство электрической энергии в России в основном осуществляется на теплоэлектростанциях (рис. 1).

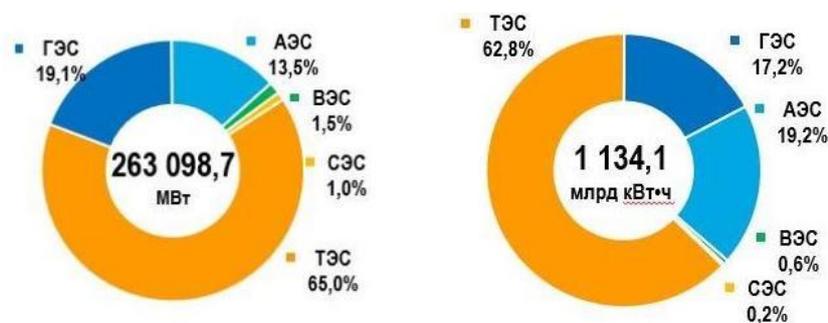


Рис. 1. Структура установленной мощности электростанций и выработки электроэнергии в энергосистеме России [1]

Описанные выше режимы нагрузки энергосистемы приводят к неравномерной загрузке оборудования электростанций, зачастую снижая коэффициент использования установленной мощности, что в силу специфики механизма ценообразования на рынках электроэнергии и мощности с преобладанием тепловых электростанций неминуемо ведёт к их удорожанию.

Сначала накопители оценивали с точки зрения того, насколько они способны увеличить эффективность генераторных электроустановок и уменьшить потери при передаче электроэнергии. Но сейчас, когда есть нехватка мощности и её стоимость растёт из-за увеличения нагрузки на энергосистему, особенно в часы максимума потребления, использование систем накопления электроэнергии имеет смысл рассматривать в качестве источников электроэнергии на энергоёмких промышленных предприятиях. Далее будет проведена оценка экономической выгоды от внедрения накопителя электроэнергии на предприятии, которое использует двухставочный тариф на покупку электроэнергии и мощности. Здесь важно учитывать, что в часы пик максимальная мощность не должна быть больше заявленного значения.

Применение накопителя, заряд которого происходит в часы минимума нагрузки энергосистемы (например, в ночное время), а отдаёт энергию в часы пиковых нагрузок, будет экономически целесообразным при соблюдении следующего условия [2]:

$$\sum (P_{\text{нагр}} - P_{\text{заявл}}) \cdot C_{\text{м}} \geq \left( \frac{K_{\text{НЭ}}}{T_{\text{Н}}} + \varepsilon \right)$$

Левая часть неравенства отражает годовой эффект от использования накопителя энергии. Его значение напрямую зависит от режима работы предприятия и условий покупки электроэнергии и мощности (ценовая категория потребителя).

Для определения ёмкости и мощности планируемого к применению накопителя, необходимо рассчитать разницу между заявленной (оплачиваемой) мощностью и фактическим потреблением и учесть время его работы. Для оценки эффективности использования накопителя, необходимо провести анализ фактического расхода электроэнергии за прошедший период. Для этого нужно выяснить, как уменьшение расходов на электроэнергию связано с различием между двумя значениями мощности: с применением накопителя и без него. Также необходимо понять, как это различие соотносится с мощностью и ёмкостью накопителя. Наглядно результаты такого анализа можно представить на графиках (рис. 2).

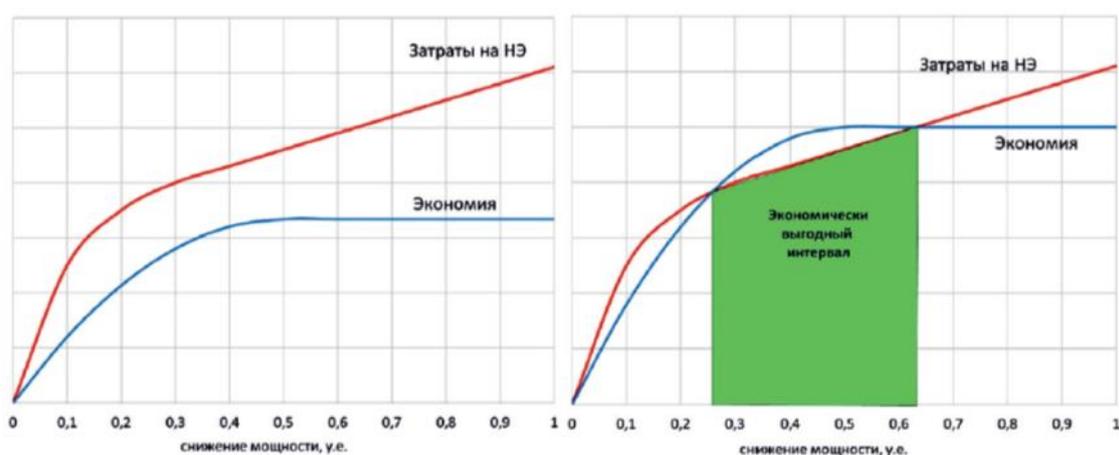


Рис. 2. Расчёт экономической эффективности применения накопителя энергии [2]

Если в рамках расчётного периода графики экономии и затрат на накопитель пересекутся в диапазоне средней мощности нагрузки или экономия превысит затраты, то использование накопителя энергии будет оптимальным и экономически целесообразным решением. В противном случае применение накопителя не принесёт выгоды потребителю.

Таким образом, применение накопителей энергии способствует повышению энергоэффективности предприятия. Они помогают оптимизировать потребление электроэнергии, позволяя снизить нагрузку на сеть в часы пик и уменьшить счета за электричество. Кроме того, системы накопления энергии могут использоваться для управления энергопотреблением в условиях нестабильного напряжения, что особенно актуально для промышленных объектов, расположенных в удалённых районах.

Ещё одним преимуществом накопителей энергии является их способность повышать надёжность электроснабжения. Они обеспечивают резервное питание в случае отключения основного источника, что позволяет избежать простоев и сохранить производственный процесс, помогают снизить риски, связанные с колебаниями напряжения и частоты, которые могут негативно сказаться на работе оборудования и качестве продукции.

Перечисленные выше факторы способствуют повышению конкурентоспособности предприятия и его устойчивости к изменениям на рынке электроэнергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроэнергетические системы России. – URL: [https:// www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2024/](https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2024/) (дата обращения 19.11.2024)
2. Добрынин Е.В., Крылов А.Н., Батишев А.М. Оценка эффективности использования накопителей энергии // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2020. – № 6(79). – С. 110–113. – DOI 10.24411/2076-6785-2020-10110. – EDN OETUGV.
3. Шевлюгин М.В., Стадников А.Н., Юдин А.С. О применении накопителей энергии в системе электроснабжения мегаполиса на примере Москвы // Электропитание. – 2020. – № 1. – С. 7–31.

## АКТУАЛЬНОСТЬ И ЦЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧАСА ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ В СУБЪЕКТЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НА ПРЕДСТОЯЩИЕ РАБОЧИЕ СУТКИ

**Ж.В. Ефременко**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41*

Научный руководитель: Е.В. Болоев, к.т.н., с.н.с. ИСЭМ СО РАН

Для снижения цен на электроэнергию и мощность в Российской Федерации (РФ) реализованы механизмы явного и неявного управления спросом [1]. В управлении спросом участвуют потребители, имеющие возможность регулирования нагрузки, называемые потребителями с управляемой нагрузкой (ПУН). В пиковые часы электроэнергетической системы (ЭЭС) для покрытия спроса на электроэнергию вынужденно задействуются неэффективные генерирующие объекты с высокой стоимостью выработки электроэнергии. Относительно небольшое снижение потребления ПУН в эти часы может существенно снизить стоимость цен на электроэнергию и мощность.

Явный механизм управления спросом на рынке электроэнергии и мощности (РЭМ) в РФ принято называть ценозависимым снижением потребления [1]. Управление изменением режима потребления электроэнергии возложено на агрегатора управления спросом (АУС) [1]. В случае явного управления спросом ПУН по команде АУС уменьшают нагрузку в часы пиковой нагрузки ЭЭС с целью получения стимулирующих выплат на основании условий заключенного между ПУН и АУС договора. При неявном управлении спросом ПУН самостоятельно уменьшает нагрузку в час или часы ожидаемой пиковой нагрузки ЭЭС с целью снижения платы за электроэнергию (мощность), так как в пиковые часы цены на электроэнергию и мощность достигают своего максимума [1].

Сущность неявного управления спросом заключается в самостоятельной разгрузке потребителей в предполагаемые «дорогие» часы. Так, население, рассчитывающееся по дифференцированным по зонам суток тарифам, а также потребители 2-й ценовой категории розничного рынка, могут переносить свою деятельность на менее загруженные часы. За счет уменьшения цены электроэнергии в непииковые зоны суток достигается снижение оплаты за потребленную электрическую энергию.

Схожий механизм неявного управления спросом на электроэнергию и мощность реализован на розничном РЭМ для потребителей, которые выбрали 3–6 ЦК [2]. Он основан на том, что положение часа пиковой нагрузки  $h_d^{\max}$  в сутках в рабочие дни заранее не известно. Часы пиковой нагрузки для каждого рабочего суток текущего месяца будут определены администратором торговой системы РЭМ и опубликованы после 10 числа следующего месяца.

Для объяснения механизма неявного управления спросом для ПУН 3–6 ЦК определим час в сутках с наибольшей суммарной ценой покупки электроэнергии и мощности.

Объем фактического пикового потребления участника  $p_{\text{факт}}$  в точке поставки [2], подлежащий обязательной покупке на рынке мощности, рассчитывается как

$$p_{\text{факт}} = \sum_{d=1}^D P(h_d^{\max})/D, \quad (1)$$

где  $h_d^{\max}$  – час максимальной фактической пиковой нагрузки для каждого рабочего суток месяца;  $P(h_d^{\max})$  – величина фактического потребления мощности в точке поставки в час  $h_d^{\max}$ ;  $D$  – количество рабочих дней в месяце.

Для потребителей 3–6 ЦК суммарная стоимость покупки электроэнергии  $C_{\Sigma}$  и мощности  $C_M$  (без учета услуг по передаче электроэнергии, сбытовой надбавки поставщика и плата за прочие услуги инфраструктуры рынка) [2] равна

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma} + C_M = \sum_{d=1}^N \sum_{k=1}^{24} W(h_{d,k}) \Pi_{\Sigma}(h_{d,k}) + p_{\text{факт}} \Pi_M, \quad (2)$$

где  $N$  – количество дней в месяце;  $W(h_{d,k})$  – величина фактического потребления электроэнергии в точке поставки за час  $h_{d,k}$  в день месяца  $d$  в час  $k$ ;  $\Pi_{\Sigma}(h_{d,k})$  – регулируемая цена на электроэнергию в час  $h_{d,k}$  на РЭМ;  $\Pi_M$  – средневзвешенная цена на мощность на РЭМ.

Подставляя фактическое пиковое потребление (1) в суммарную стоимость покупки (2) получаем

$$C_{\Sigma} = \sum_{d=1}^N \sum_{k=1}^{24} W(h_{d,k}) \Pi_{\Sigma}(h_{d,k}) + \sum_{d=1}^D W(h_d^{\max}) \frac{\Pi_M}{D}. \quad (3)$$

Согласно формуле (3) фактическая цена на покупку электроэнергии и мощности в час пиковой нагрузки, когда  $h_{d,k}$  и  $h_d^{\max}$  совпали, определяется как

$$\Pi_{\Sigma}(h_{d,k}) = \Pi_{\Sigma}(h_{d,k}) + \frac{\Pi_M}{D}, \quad (4)$$

а в другие часы, когда  $h_{d,k}$  и  $h_d^{\max}$  не совпадают, равна цене на электроэнергию

$$\Pi_{\Sigma}(h_{d,k}) = \Pi_{\Sigma}(h_{d,k}). \quad (5)$$

По данным [3] фактические цены на покупку электроэнергии и мощности в часы пиковой нагрузки (4) отличаются от цены покупки электроэнергии (5) в 15–50 раз в зависимости от региона, как например, для ООО «Иркутскэнергосбыт» 30 ноября 2023 г. (диаграммы на рис. 1) – в 30,74 раза.

ПУН могут существенно снизить плату за электроэнергию и мощность, снижая свою нагрузку в рабочие дни в течение одного часа в сутки – часа пиковой нагрузки для этого дня субъекта РФ, в котором они территориально расположены.

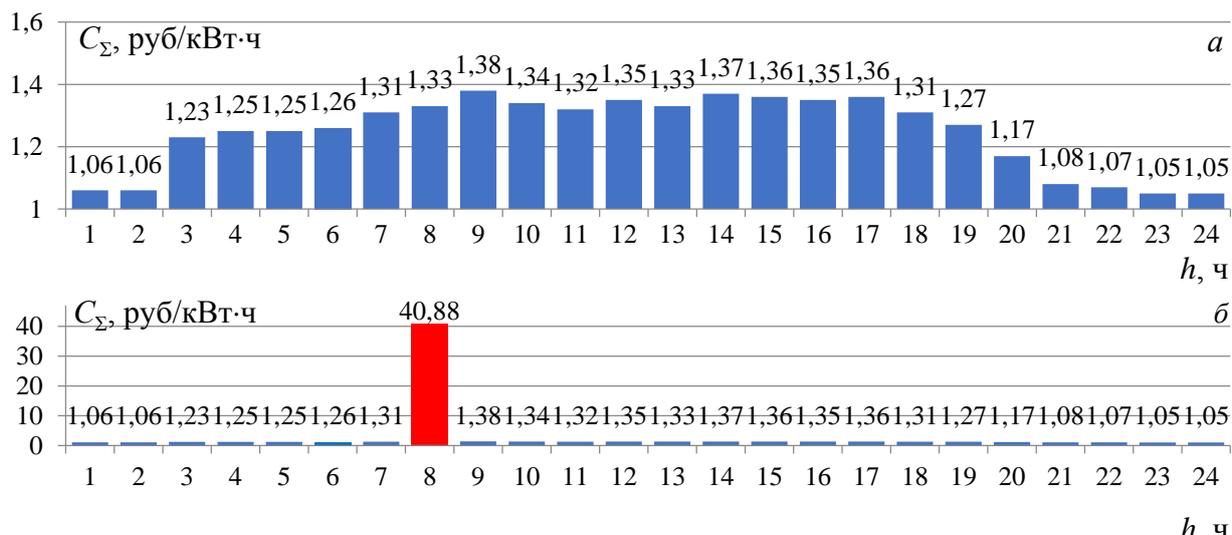


Рис. 1. Дифференцированные по часам цены покупки: а) электроэнергии и б) суммарные цены покупки электроэнергии и мощности для ООО «Иркутскэнергосбыт» 30 ноября 2023 г.

Из-за того, что часы пиковой нагрузки в рабочие дни заранее не известны, ПУН для экономии на покупке электроэнергии и мощности приходится снижать нагрузку на всем диапазоне плановых пиковых часов, установленных для региона (для Иркутской области – второй ценовой зоны в табл. 1). Тем самым, ПУН неявно участвуют в управлении спросом на электроэнергию и мощность.

Таблица 1. Плановые часы пиковой нагрузки для территорий второй ценовой зоны

Январь, ноябрь, декабрь	Февраль, октябрь	Март, апрель, май, сентябрь	Июнь	Июль	Август
с 5-го по 8-й и с 11-го по 17-й часы	с 5-го по 8-й и с 12-го по 17-й часы	с 5-го по 8-й и с 13-го по 17-й часы	с 5-го по 11-й и с 13-го по 17-й часы	с 5-го по 17-й часы	с 5-го по 10-й и с 14-го по 17-й часы

Для экономии ПУН 3-6 ЦК на покупке электроэнергии и мощности путем снижения нагрузки на один час в сутки актуально решение задачи прогнозирования часов пиковой нагрузки.

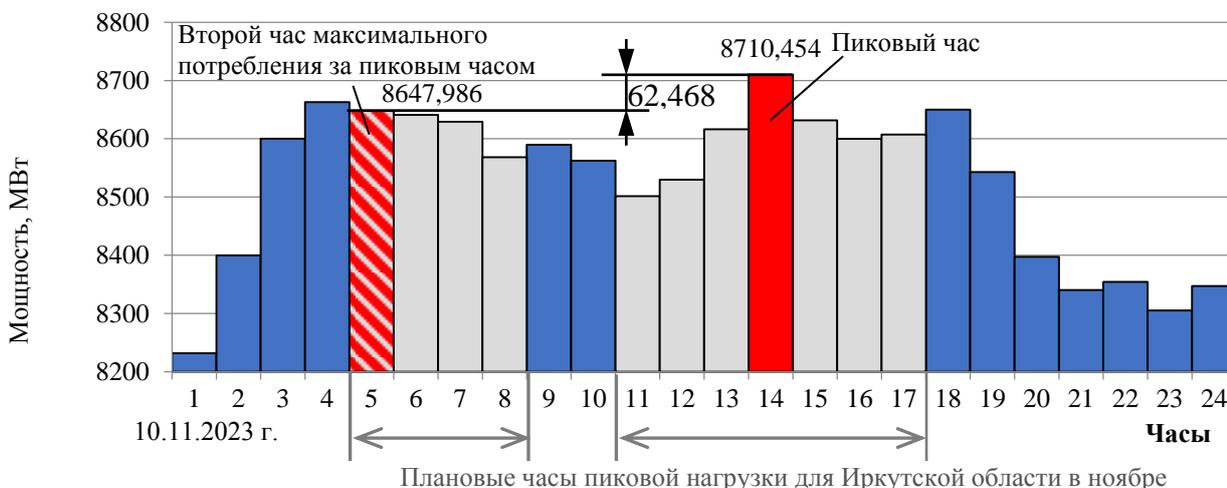


Рис. 2. Поясняющая диаграмма к расчету максимального снижения мощности (электроэнергии за час) потребителями, которое не приведет к изменению положения пикового часа в сутках 10 ноября 2023 г. в Иркутской области

Снижение нагрузки потребителями может привести к изменению положения часа пиковой нагрузки. Например, по данным [3], если 10 ноября 2023 г. (рис. 2) потребители в Иркутской области в 14 час снизили бы нагрузку более чем на 62,468 МВт, то часом пиковой нагрузки стал бы 5 час. С целью недопущения изменения положения пикового часа не менее актуальной задачей является определение максимально допустимого снижения нагрузки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция функционирования агрегаторов распределенных энергетических ресурсов в составе Единой энергетической системы России. Агрегаторы управления спросом на электроэнергию // Ассоциации НП Совет рынка. – URL: <https://www.np-sr.ru/ru/content/47048-konceptiya-funkcionirovaniya-agregatorov-raspredeleennyh-energeticheskikh-resursov-v> (дата обращения: 21.05.2024).
2. Рынок электроэнергии и мощности // Ассоциации НП Совет рынка. – URL: <https://www.np-sr.ru/ru/market/index.htm> (дата обращения: 24.04.2024).
3. Участникам оптового рынка. Участникам розничного рынка и ФСК // Администратор торговой системы. – URL: <https://www.atsenergo.ru> (дата обращения: 21.05.2024).

## РАНЖИРОВАНИЕ КУСТОВЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО ПРИОРИТЕТУ ОТКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ДЕФИЦИТА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

**В.Р. Сушкова**

*Тюменский индустриальный университет, ИПТИ, ассистент кафедры ЭЭ*

Научный руководитель: В.В. Сушков, д.т.н., профессор кафедры энергетики НВГУ

В настоящее время актуальной задачей является поддержание бесперебойного электрообеспечения месторождений нефти и попутного нефтяного газа. При внезапном нарушении нормального режима электроснабжения по причине аварийных отключений возникает дефицит активной мощности в энергосистеме и происходит снижение значения частоты, которое может привести к лавинообразному уменьшению мощности. Для предотвращения опасных снижений частоты повсеместно применяют устройства автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ), состоящие из специальной автоматики ограничения нагрузки (САОН) и автоматической частотной разгрузки (АЧР), срабатывание которых действует на отключение потребителей.

В настоящее время при составлении графиков ограничения мощности на энергообеспечивающих предприятиях согласно руководящих документов учитывают два показателя: категорию по надежности потребителей и мощность нефтепромыслового объекта. Стоит принять во внимание то обстоятельство, что отключение одного технологического звена может повлечь за собой отключение последующего звена технологической системы при этом необходимо учитывать наличие временного резервирования. К примеру, при аварийном отключении подпорных насосов системы водозабора через 15–20 с происходит отключение технологической автоматики кустовых насосных станций (КНС), что нарушает технологию системы поддержания пластового давления (ППД), а в зимний период времени может привести к размораживанию водозаборов.

На сегодняшний день в связи с возможностью разработки и применения системы Smart Grid необходимо более дифференцировано производить отключение нагрузки потребителей с учетом приоритета и величины нагрузки в рамках одной ступени разгрузки. Используя

принцип адресности, который базируется на присвоении ранга по надежности конкретному нефтепромысловому потребителю (скважины, технологические площадки, УЭЦН, КНС), возможно не учитывая категорию по надежности, формировать ступени разгрузки потребителя.

Анализ диаграммы, приведенной на рис. 1, показал, что доля системы ППД в технологическом процессе добычи нефти и попутного нефтяного газа составляет 34 %. Одним из основных наиболее энергоемких и уязвимых к внезапным нарушениям нормального режима электроснабжения нефтепромысловых объектов системы ППД является КНС.

Для эффективного решения задачи приоритета отключений выделенной нагрузки необходим учет надежности объекта [2, 4]. Перечень основных определяющих показателей, характеризующих надежность КНС, был определен исходя из анализа характерных неисправностей основных узлов КНС – электродвигателя и центробежного насосного агрегата (рис. 2).



Рис. 1. Диаграмма распределения электрических нагрузок нефтегазового месторождения по технологии

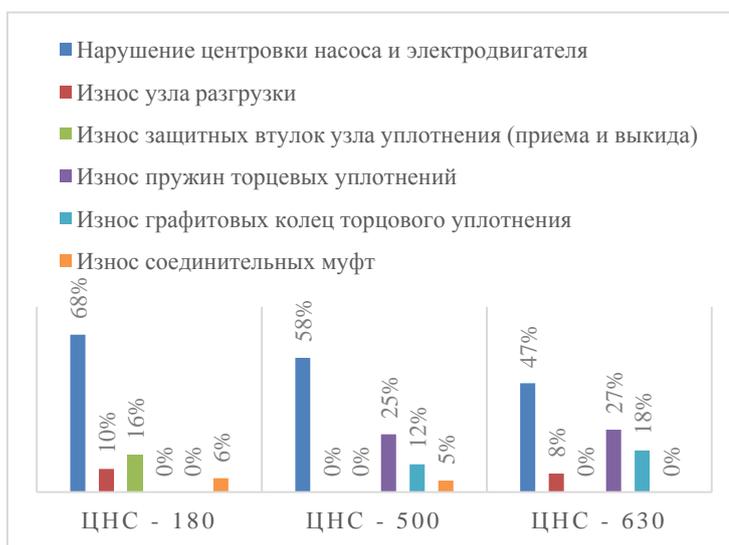


Рис. 2. Диаграмма характерных неисправностей электродвигателей типа СТД и центробежных насосов типа ЦНС

Основные этапы методики ранжирования нефтепромысловых потребителей при возникновении дефицита активной мощности в энергосистеме с учетом возможного риска отказов электросетевого оборудования представлены на рис. 3.

В разработанной методике применена количественная оценка интегральных показателей надежности КНС. Для этого задействованы следующие определяющие показатели надежно-

сти: средний срок службы, средняя наработка до отказа, среднее время восстановления, число коротких замыканий в лобовой части обмотки статора после капитального ремонта, техническое состояние (ТС), коэффициент риска наступления негативных последствий при аварийном отключении электродвигателя КНС. Техническое состояние электродвигателя КНС оценивается по уровню его вибрации. В руководящем документе (РД) № 153-39.1-046-00 принято шесть уровней качественной оценки ТС по параметрам вибрации узлов электродвигателя КНС в зависимости от величины среднего квадратического значения виброскорости [3]. Например, первый уровень соответствует оценке «отлично», а последний – «недопустимо».

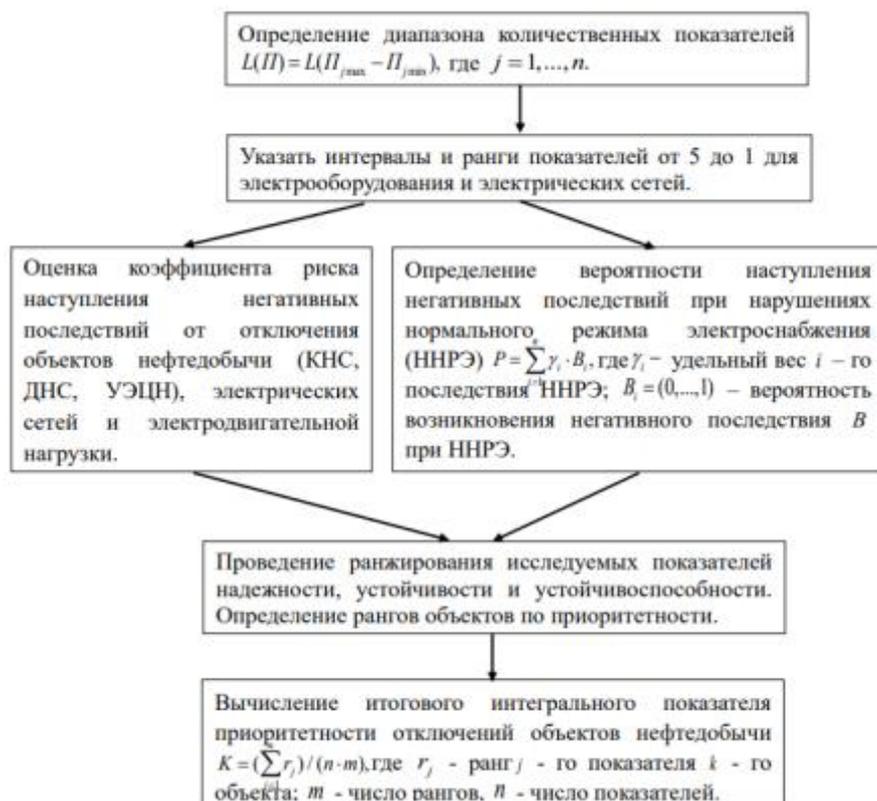


Рис. 3. Общий подход к ранжированию по надежности нефтепромысловых потребителей

Далее выполняется оценка коэффициента риска наступления негативных последствий от отключения КНС. Оценка производится методом составления матрицы попарных сравнений [5] последствий нарушений нормального режима электроснабжения КНС в балльной системе на основе экспертных оценок. Возможные негативные последствия (ущерб) определялись на основе метода аппарата цепей Маркова, которые позволяют оценить вероятность наступления следующих основных негативных последствий: аварийный останов (например, по причине внезапного перерыва в электроснабжении); срабатывание технологических защит; аварийный ремонт электродвигателя КНС и т. д.

Интегральный показатель приоритетности отключений  $K$  определяется по выражению [1, 2]:

$$K = \left( \sum_{j=1}^n r_j \right) / (n \cdot m), \quad (1)$$

где  $r_j$  – ранг  $j$ -го показателя  $k$ -го объекта;  $m$  – число рангов;  $n$  – число показателей.

В результате проведенных исследований на основе вычисления итогового интегрального показателя (1) назначены ранги КНС по приоритетности отключений в зависимости от производительности КНС.

Значения интегральных показателей  $K$  исследуемых КНС представлены в порядке возрастания в табл. 1.

Таблица 1. Ранги КНС в зависимости от производительности

Производительность, $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Итоговый интегральный показатель приоритетности отключения $K$	Назначенный ранг	Рекомендуемая схема питания КНС
$Q < 2700$	0,467	1	Магистральная двухцепная ВЛ 35 кВ с реклоузерами
$2700 < Q < 4200$	0,533	2	Кольцевая двухцепная ВЛ 35 кВ с проходной ПС 35 кВ или магистральная двухцепная ВЛ 35 кВ с реклоузерами
	0,533		
	0,533		
$Q > 4200$	0,567	2–3	
	0,600		

Таким образом, разработана методика по определению приоритета отключений при возникновении дефицита активной мощности в энергосистеме с учетом надежности, производительности и технического состояния насосного агрегата КНС. При расчете учитывались вероятностные характеристики возникновения ущерба и техническое состояние насосного агрегата КНС, произведена экспертная оценка наступления основных негативных последствий при аварийном останове технологического объекта КНС. Применение данной методики дает возможность более обоснованно подходить к составлению графиков ограничения мощности нагрузки при возникновении дефицита активной мощности в энергосистеме. Ранговый подход по приоритетности отключений позволяет применить принцип адресности, что является предпосылкой создания и практического применения адаптивной АЧР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фархадзаде Э.М., Фарзалиев Ю.З., Мурадалиев А.З., Исмаилова С.М. Методы и алгоритмы сравнения и ранжирования надежности и экономичности работы объектов электроэнергетических систем // Электричество. – 2017. – № 8. – С. 4–13.
2. Назаров А.А., Кавченков В.П. Разработка методики оценки надежности и приоритетности ремонтов в региональной энергосистеме с учетом возможного риска // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 3. – С. 50–57.
3. РД 153-39.1-046-00. Положение о системе технических обслуживаний и ремонта энергомеханического оборудования ОАО «Самотлорнефть» по фактическому состоянию. – Тюмень, 2000. – 181 с.
4. Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Васильева Н.С. Разработка методики оценки надежности и приоритетности ремонтов для электрооборудования нефтяной промышленности с учетом возможного риска // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 3 (66). – С. 106–116.
5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

## РАСЧЁТ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

**Д.Д. Сарнаков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41*

Научный руководитель: В.Е. Рудник, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В данной работе была рассмотрена релейная защита автотрансформаторов подстанции «№ 4». В ходе выполнения данной работы, была спроектирована токовая направленная защита нулевой последовательности (ТНЗНП) автотрансформатора. Данная защита предназначена для защиты трансформатора от коротких замыканий на землю. На рис. 1 представлен район автотрансформаторов с первой и второй периферией.

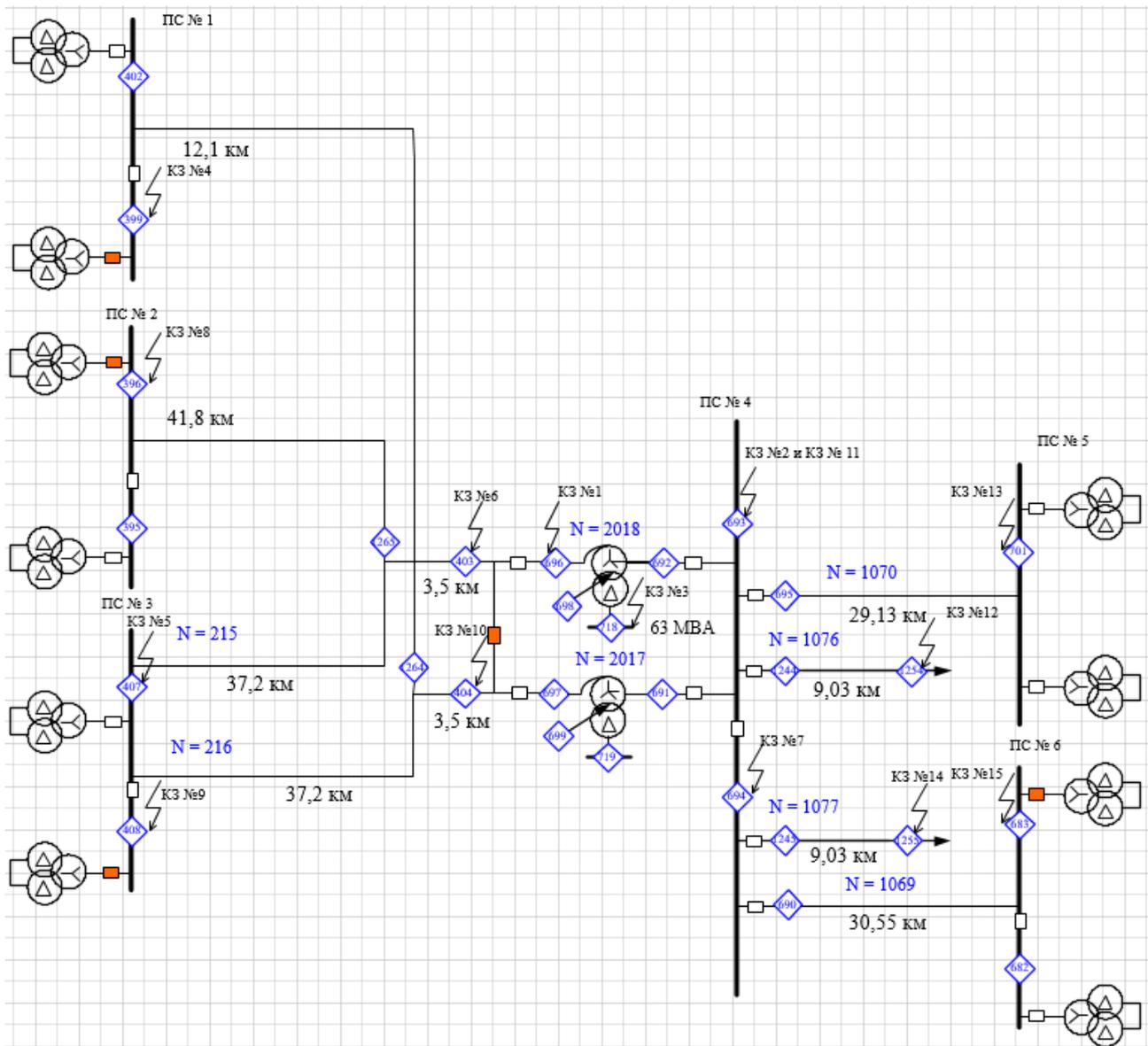


Рис. 1. Схема района подстанции «№ 4н»

Токовая направленная защита трансформатора в данной конфигурации состоит из 5 ступеней, часть из них имеют направленную защиту в сторону сети, а часть в сторону трансформатора. 1-я ступень направлена в трансформатор и отстраивается от КЗ на шинах защищаемой стороны. 2-я ступень также направлена в трансформатор, но отстраивается от КЗ на шинах смежной стороны. 3-я и 4-я ступень направлены в сеть, они же отстраиваются от первой и второй ступеней защит соответственно, стоящих на линиях, отходящих от данных шин. 5-я ступень направлена в сеть отстраивается от тока небаланса в рабочем режиме. Каждая из ступеней выполняется с выдержкой времени. В табл. 1 представлены токи короткого замыкания, необходимые для расчёта защиты ТНЗНП, рассчитанные в программе АРС С РЗА.

Для примера представим расчёт для высшей стороны напряжения (ВН) автотрансформатора. Ток срабатывания 1-й ступени отстраивается от максимального тока короткого замыкания, из токов представленных в таблице,  $K_{отс} = 1,3$ . Чувствительность же первой ступени не проверяется. 2-я ступень защищаемого АТ необходимо согласовать с уставкой 3-й ступени защит линий, отходящей от средней стороны. Для данной ступени используем  $K_{отс} = 1,1$ . В дальнейших расчётах получим  $I_{СЗАТ(110)}^{III} = 526,3$  А.

*Таблица 1. Расчет токов короткого замыкания в программе АРМС РЗА*

	Номер КЗ	Место КЗ	Вид КЗ	I1, А	I2, А	3I0, А
Токовая защита нулевой последовательности ВН АТ1	8	396	А0	152	152	457
			BC0	287	111	534
	9	408	А0	154	154	463
			BC0	290	111	546
	10	404	А0	98	98	560
			BC0	186	72	651
11	693	А0	322	322	576	
		BC0	602	194	731	
Токовая защита нулевой последовательности СН	12	1254	А0	579	579	1646
			BC0	1103	439	1887
	13	701	А0	406	406	1219
			BC0	835	447	1163
	14	1255	А0	606	606	1230
			BC0	1135	375	1543
	15	683	А0	322	322	966
			BC0	691	403	865
	11	693	А0	640	640	2129
			BC0	1199	394	2680

Отстраиваемся от данной ступени с учётом коэффициента трансформации и коэффициента отстройки, и получаем уставку второй ступени равную 290 А. Чувствительность данной ступени проверяется по минимальному току КЗ, на отходящих линиях от данной секции шин. Коэффициент чувствительности рассчитывается по выражению (1).

$$K_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{М}}}{I_{\text{С.З.АТ}}} = \frac{576}{290} = 1,98. \quad (1)$$

3-я ступень АТ необходимо согласовать с уставкой 1-х ступеней защит линий, отходящей от высшей стороны, а 4-ю ступень с уставкой 2-х ступеней защит линий, отходящих от АТ1. Данные ступени были согласованы в программе АРМС РЗА, получившиеся уставки данных ступеней можно увидеть в табл. 2. 5-я ступень автотрансформатора отстраивается от тока небаланса в автотрансформаторе в нормальном режиме. Расчёт данного тока был произведён в программе АРМС РЗА, уставка была отстроена от данного тока и принята в 100 А. Чувствительность данной уставки также выполняется. Все итоговые значения уставок и коэффициентов чувствительности, а также время срабатывания данных ступеней можно наблюдать в табл. 2.

*Таблица 2. Уставки срабатывания и коэффициенты чувствительности для каждой ступени трансформатора АТ1*

Ступень защиты трансформатора АТ1	Уставка по току, А	Коэффициент чувствительности, о.е.	Время срабатывания, с
Сторона ВН			
1 – в АТ	965,9	–	0
2 – в АТ	290	2,02	0,95
3 – в сеть	398	4,8	0,35
4 – в сеть	162,3	2,52	1
5 – в сеть	100	4,09	3,8
Сторона СН			
1 – в АТ	1690	–	0
2 – в АТ	276	4,05	0,65
3 – в сеть	526,3	4,04	0,65
4 – в сеть	209	4,2	0,95
5 – в сеть	100	8,65	3,5

В результате можно сказать, что все уставки проходят по коэффициенту чувствительности, что позволяет установить данную защиту на реальный объект, то есть, на автотрансформаторы подстанции № 4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высшая школа, 2008. – 252 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В АЛГОРИТМЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ИНЕРЦИЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**И.Н. Гусаров**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ31*

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### Введение

Источники возобновляемых источников энергии (ВИЭ) традиционно работают в режиме максимальной выдачи активной мощности в электросеть. Такая стратегия управления определяет функционирование ВИЭ в ведомом режиме относительно сети и ограничивает их возможность регулирования напряжения и частоты [1]. С уменьшением доли генерирующих установок, активно участвующих в регулировании частоты, наблюдается ухудшение общего инерционного отклика системы, а также сокращение резервов активной и реактивной мощности. Это, в свою очередь, снижает общую устойчивость сети. Кроме того, высокий процент ВИЭ в энергосистеме создает трудности для нормальной работы устройств релейной защиты и систем автоматического управления в аварийных ситуациях.

Таким образом, одной из ключевых задач в области электроэнергетики становится разработка системы автоматического управления (САУ) для инверторов, подключенных к ВИЭ. Эта система должна быть способна регулировать выдаваемую мощность, напряжение и частоту, а также перейти от ведомого режима к ведущему. Многие авторитетные научные группы [2–4] активно исследуют эту тему и рассматривают концепцию виртуального синхронного генератора (ВСГ) как одно из перспективных решений для устранения вышеупомянутых проблем.

### Концепция ВСГ для инверторов ВИЭ

Концепция ВСГ заключается в воспроизведении характеристик и свойств реальной синхронной машины с помощью применения соответствующих уравнений и аппаратных решений в САУ инвертора. Это позволяет значительно повысить эффективность работы объектов ВИЭ в электрических сетях, а также улучшить их надежность как в обычных, так и в аварийных режимах.

Поскольку параметры алгоритма ВСГ не зависят от конкретных характеристик синхронной машины, это открывает широкие возможности для оптимизации алгоритмов управления силовыми преобразователями в различных схемах и режимах. Один из подходов к совершенствованию САУ ВСГ заключается в использовании адаптивных алгоритмов виртуальной инерции. В одной из работ [5] рассматривается возможность изменения момента инерции в

реальном времени с применением двухпозиционного управления. В другом исследовании авторы [6] изучают нелинейные изменения виртуальной инерции в зависимости от колебаний частоты сети. Также стоит упомянуть работу [7], в которой предложена сигмоидальная функция изменения виртуальной инерции в зависимости от частоты сети и скорости ее изменения.

### Использование адаптивного изменения инерции при работе с алгоритмом ВСГ

Для адаптивного управления постоянной инерции необходимо выработать алгоритм изменения данного коэффициента в зависимости от частоты сети и характера ее изменения. Один из популярных алгоритмов изменения постоянной инерции представлен на рис. 1 совместно с табл. 1.

Таблица 1. Характер изменения постоянной инерции при изменении частоты

Интервал	$d\omega/dt$	$\Delta\omega$	$\Delta\omega \cdot d\omega/dt$	Характер $T_j$
1,5	$>0$	$>0$	$>0$	Увеличить
2,6	$<0$	$>0$	$<0$	Уменьшить
3,7	$<0$	$<0$	$>0$	Увеличить
4,8	$>0$	$<0$	$<0$	Уменьшить

Предложенный метод широко используется в двухпозиционном управлении и подробно описан в источнике [5]. Тем не менее, дискретное управление виртуальной постоянной инерции имеет свои ограничения, среди которых выделяется зона нечувствительности. Чтобы минимизировать частоту переключений в установившемся режиме, в данный алгоритм вводится задержка управляющих сигналов. Однако при резких изменениях частоты такая задержка может привести к недостаточной реакции алгоритма в критические моменты, что может вызвать превышение предельно допустимого значения частоты, установленного стандартами и другими нормативными документами.

Учитывая вышеупомянутые проблемы, алгоритм, рассматриваемый в данной работе, предполагает нелинейное изменение постоянной инерции виртуальной системы генерации на основе нейросетевых подходов. В то же время основные принципы управления инерцией остаются неизменными и представлены в табл. 1.

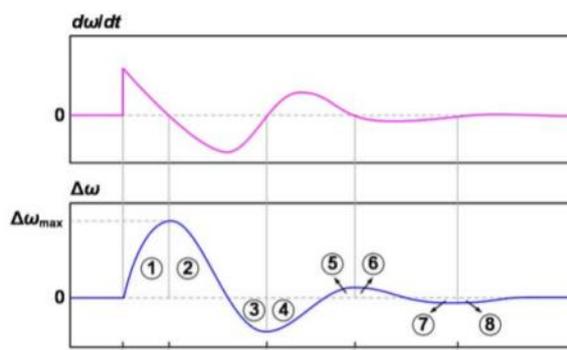


Рис. 1. Процесс изменения частоты при переходном процессе

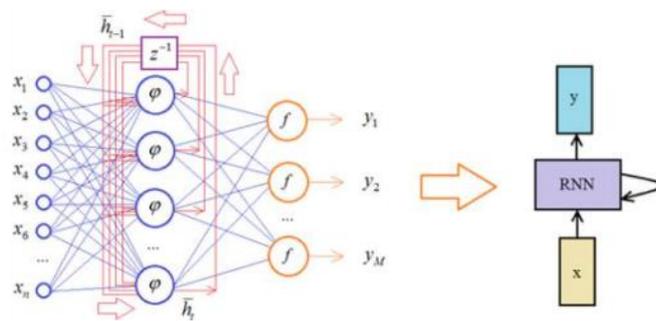


Рис. 2. Структура сети RNN

### Структура нейронной сети для управления постоянной инерции ВСГ

Для данного исследования была выбрана нейронная сеть с рекуррентной обратной связью (RNN). Структурная схема работы сети представлена на рис. 2.

Структура данной сети очень схожа со структурой перцептрона, но ключевым отличием является наличие в скрытом слое обратной связи, имеющей задержку в один такт. Рекуррентная связь промежуточного слоя в НС обеспечивает влияние предшествующего такта на выходной ответ нейронной сети. Данное улучшение позволяет учесть в выходном слое НС не только входные параметры, но и предшествующие.

Изначально, для начала работы НС, подаются значения рекуррентного слоя  $h_0$ , где данный вектор представлен нулевой матрицей (1):

$$h_0 = [0,0,0 \dots 0_N]^T. \quad (1)$$

Также на входной слой подается вектор значений  $x_1$ . В данной работе этим вектором являются значения частоты сети и значения скорости изменения частоты в начальный момент времени (2):

$$x_1 = [\Delta\omega_1, d\omega_1]. \quad (2)$$

Дальше значения проходят через матрицу весовых коэффициентов  $W_{11}$ , образуя промежуточный или скрытый слой. Затем значения поступают на два входа. Один представляет из себя рекуррентный вектор  $h_1$ , другой является связью скрытого слоя и выходного. В результате работы единичной итерации RNN на выходе имеется вектор выходного слоя  $y_1$ , представленный значением постоянной инерции, и рекуррентный вектор  $h_1$ , необходимый для дальнейшей итерационной работы сети.

### Анализ работы НС при изменениях частоты сети

В ходе исследования был проведен ряд экспериментов по оптимальному управлению постоянной инерции ВСГ при возмущениях в электрической сети с использованием программного комплекса PSCAD. Для репрезентативного отражения результатов исследования за основу была взята интегральная оценка качества переходного процесса [8], которая отражает, на сколько эффективно алгоритм управления справляется с поставленной задачей.

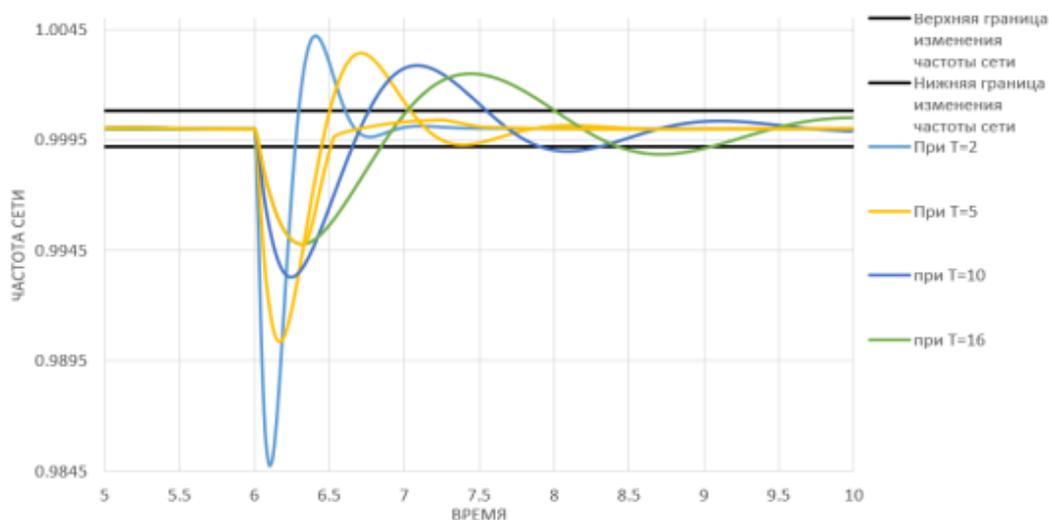


Рис. 3. Работа ВСГ с различными постоянными инерции при изменении нагрузки на 1.5 МВА

Таблица 2. Интегральная оценка качества переходных процессов

Момент инерции	$T_J=2$	$T_J=5$	$T_J=10$	$T_J=16$	Двухпозиционное управление	НС
$I = \int_{t_{нач}}^{t_{конеч}} x(t) \cdot dt$	0,337	0,399	0,489	0,543	0,214	0,175
$t_{регулирования}$	6,60	7,04	7,55	8,00	6,87	6,5

### Заключение

Эволюция технологии ВСГ создает новые возможности для более глубокого интегрирования возобновляемых источников энергии в существующие энергетические системы и способствует переходу к распределенной энергетике. В настоящее время существует множество методов реализации алгоритмов управления, основанных на ВСГ, в рамках автоматизированных систем управления инверторами объектов возобновляемой энергетики.

Однако стоит подчеркнуть, что применение нейронной сети в алгоритмах управления на базе ВСГ не всегда является оптимальным решением по нескольким причинам. Прежде всего, для получения адекватных результатов от такой нейронной сети необходимо обучить ее на разнообразных репрезентативных переходных процессах, что может оказаться весьма сложным из-за широкого спектра возможных возмущений в электрической сети. Эта проблема может быть решена с помощью алгоритмов обучения без учителя или, например, с использованием методов машинного обучения с подкреплением.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00004*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.Ю., Гусев А.С., К вопросу о современных принципах управления возобновляемыми источниками энергии на основе виртуального синхронного генератора // Вестник ПНИПУ – 2022. – № 41. – С. 5–30. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.1.01
2. Xianxu H.U.O. et al. Research on Frequency Stability Control for Micro-grid Based on Virtual Synchronous Generator // Modern Electric Power. – 2019. – Т. 36. – № 1. – С. 45–52.
3. D'Arco S., Suul J.A., Fosso O.B., A virtual synchronous machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids // Electr. Power Syst.Res. – 2015. – V. 122. – P. 180–197.
4. Zhong Q.C., Weiss G. Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. – IEEE, 2009.
5. В Hui Wang, Chengdong Yang, Xu Liao, Jiarui Wang, Weichao Zhou, Xiu Ji, Artificial neural network-based virtual synchronous generator dual droop control for microgrid systems. // Computers and Electrical Engineering. – 2023. – V. 111. – Part A.
6. Chen J., Liu M., Milano F., O'Donnell T. Adaptive Virtual Synchronous Generator Considering Converter and Storage Capacity Limits // CSEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2015. – V. 3. – No. 2. – P. 451–458.
7. Suvorov A., Askarov A., Ruban A., Rudnik V., Radko P., Achitaev., Suslov K. An Adaptive Inertia and Damping Control Strategy Based on Enhanced Virtual Synchronous Generator Model. – Mathematics. – 2023. – V. 11. – No. 18. – P. 3938. DOI:10.3390/math11183938.
8. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 196 с.

## АЛГОРИТМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ И ПРИМЕНЕНИЕ К СТАТИЧЕСКОМУ СИНХРОННОМУ КОМПЕНСАТОРУ (STATCOM)

**И.В. Уманский**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5А13*

Научный руководитель: Р.А. Уфа, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ

Синхронизация фаз с напряжением сети переменного тока и измерение параметров прямой последовательности имеют большое значение для различных устройств, связанных с электронным оборудованием, подключенным к электросети, включая источники бесперебойного питания, фильтры активной мощности, системы преобразования возобновляемой энергии и устройства гибких систем передачи переменного тока (FACTS) [1].

Одним из устройств FACTS является статический синхронный компенсатор (STATCOM), используемый для регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, а также для повышения динамической устойчивости энергосистемы.

Методы синхронизации сети в целом можно разделить на две категории: синхронизация на основе напряжения и синхронизация на основе мощности. В настоящее время синхронизация на основе напряжения стала доминирующей в устройствах STATCOM, где в общей точке связи вводится ряд трехфазных систем фазовой автоподстройки частоты на основе преобразования Парка–Горева, что позволяет оценить частоту, фазовый угол и напряжение прямой последовательности. В этом контексте до сих пор было предложено несколько стратегий фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для трехфазных систем, чтобы обеспечить точное отслеживание напряжения сети с быстрым динамическим откликом [2, 3].

Наиболее популярной структурой ФАПЧ является синхронная система обратной связи или синхронная петля (SRF-PLL), которая в какой-то мере является типичной (рис. 1). Подход основан на представлении трехфазных напряжений в синхронной системе отсчета dq [4]. Как показывает ряд исследований [4–7], SRF-PLL существенно зависит от величины и изменения частоты входного сигнала и при резких изменениях может перейти в неустойчивый режим.

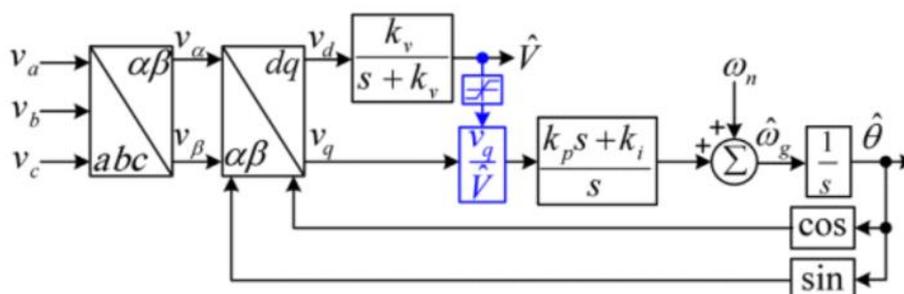


Рис. 1. Типичная трехступенчатая схема ФАПЧ

Для повышения устойчивости к вышеупомянутым возмущения в схему может быть включен линейный фильтр напряжения («фильтр скользящего среднего» – MAF, рис. 2). MAF значительно улучшает фильтрующую способность SRF-PLL, но при этом вызывает большую задержку в контуре управления, что замедляет динамическую реакцию системы [8].

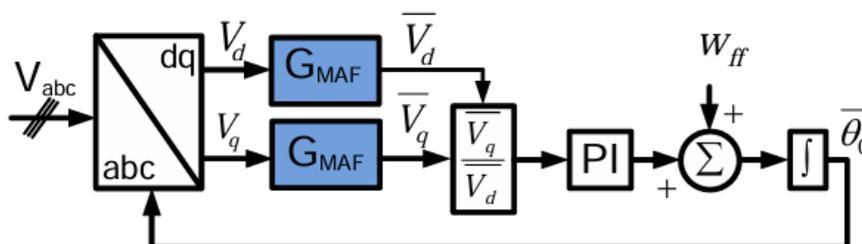


Рис. 2. Принципиальная схема MAF-PLL

Для восстановления динамического отклика установки существует ряд усовершенствованных алгоритмов MAF-PLL:

- DMAF-PLL [9] (рис. 3), представляет собой дифференциальный MAF-PLL. Две дополнительные пропорциональные составляющие (DFID и DFIQ), по сравнению с обычным MAF-PLL, включены с целью устранения низких гармонических составляющих перед подачей на вход фильтра. Это позволяет увеличить полосу пропускания фильтра и, следовательно, улучшает динамическую характеристику замкнутого контура.

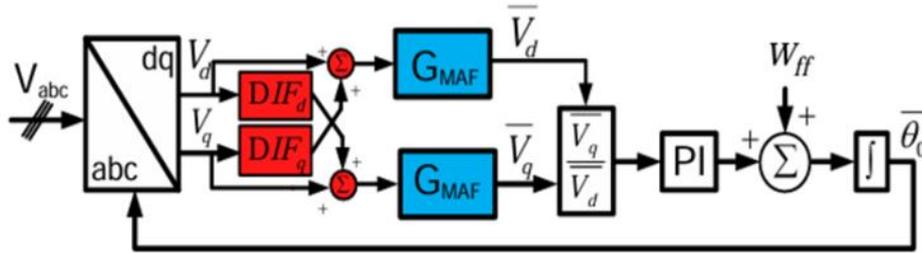


Рис. 3. Принципиальная схема DMAF-PLL

- MAF-PLL с PLC [9] (рис. 4), в котором в контур фазового детектора добавляется компенсатор фазового перехода (PLC), компенсирующий фазовую задержку, вызванную MAF, и, улучшающий динамическую характеристику.

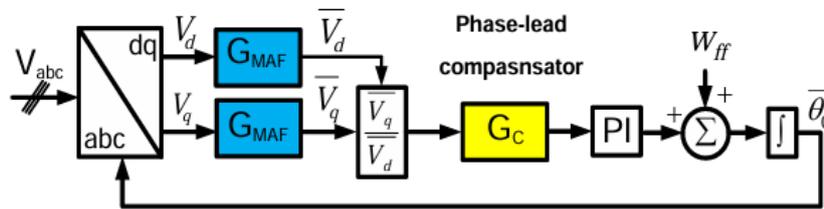


Рис. 4. Принципиальная схема MAF-PLL с PLC

- PMAF-PLL [9] (рис. 5), т. е. PLL со ступенью предварительной фильтрации на основе MAF. Этот метод удаляет блок MAF из контура фазового детектора PLL и заменяется каскадом предварительной фильтрации на основе MAF, который подается на вход PLL.

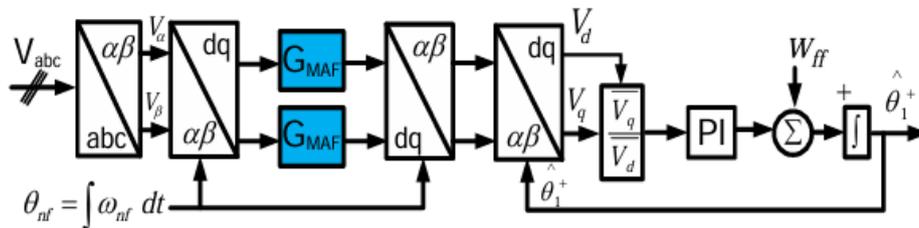


Рис. 5. Принципиальная схема PMAF-PLL

Для оценки скорости синхронизации на основе вышеприведенных алгоритмов проведено сравнительное исследование по результатам четырех экспериментов: падение амплитуды трехфазных напряжений на 50 %, падение частоты сети на 2 Гц, наложение третьей гармонической составляющей на напряжение сети, скачок фазы сети на  $20^\circ$ . Ознакомиться с результатами экспериментов можно в табл. 1.

На основе проведенных экспериментов можно сделать вывод, что линейный фильтр напряжения (MAF) значительно снижает перерегулирование, но при этом увеличивает время фазовой автоподстройки частоты. Добавление дифференциальной составляющей в контур фазового детектора, а также применение компенсатора фазового перехода позволяют компенсировать динамическую задержку в пределах более необходимых значений, а также максимально быстро реагируют на наложение гармоник. Алгоритм со ступенью предварительной фильтрации на основе MAF (PMAF) является наиболее результативным по всем критериям сравнения: преуспевает по времени приведения к частоте 50 Гц, в большинстве экспериментов преуспевает по времени автоподстройки частоты в пределах естественных колебаний энергосистемы (49,95...50,05 Гц), показывает наименьшие показатели перерегулирования.

Таблица 1. Результаты экспериментов по сравнению алгоритмов PLL

PLL	Режим	$T_s \pm 0,1 \%$	$T_{s \text{ уст.}}$	$h_{\max}$	$h_{\min}$
SRF	номинальный	2,451	3,025	50,96	49,11
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,368	2,660	50,70	49,15
	48 Гц	2,554	2,881	–	–
	наложение третьей гармоники	–	–	–	–
	скачок фазы на $20^\circ$	2,540	2,717	50,63	49,09
MAF	номинальный	2,881	3,083	50,84	49,17
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,443	2,999	50,68	48,91
	48 Гц	2,614	3,038	–	–
	наложение третьей гармоники	2,701	–	–	–
	скачок фазы на $20^\circ$	2,771	3,121	50,65	49,23
DMAF	номинальный	2,778	3,078	50,76	49,18
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,513	3,016	50,66	48,91
	48 Гц	2,617	2,949	–	–
	наложение третьей гармоники	2,512	–	–	–
	скачок фазы на $20^\circ$	2,689	3,126	50,72	49,22
MAF PLC	номинальный	2,735	3,178	50,86	49,17
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,564	3,026	50,61	48,92
	48 Гц	2,609	2,949	–	–
	наложение третьей гармоники	2,564	–	–	–
	скачок фазы на $20^\circ$	2,766	3,111	50,61	49,22
PMAF	номинальный	2,468	2,808	50,70	49,41
	50 % $U_{\text{ном}}$	2,331	2,607	50,64	49,10
	48 Гц	2,501	2,686	–	–
	наложение третьей гармоники	2,701	–	–	–
	скачок фазы на $20^\circ$	2,371	2,712	50,62	49,41

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources—An Overview // IEEE Xplore. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9181463> (дата обращения: 10.11.2024).
2. A fast hybrid PLL with an adaptive all-pass filter under abnormal grid conditions // ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620301097> (дата обращения: 10.11.2024).
3. Modeling and Adaptive Design of the SRF-PLL: Nonlinear Time-Varying Framework // IEEE Xplore. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8986569> (дата обращения: 10.11.2024).
4. Stability simulation and improvement of typical phase-locked loop of STATCOM with different equivalent grid R/L ratios // ScienceDirect. – URL: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723009459?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=8dfc76413838e959#b3](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723009459?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8dfc76413838e959#b3) (дата обращения: 10.11.2024).
5. Supplementary Control for Mitigation of Successive Commutation Failures Considering the Influence of PLL Dynamics in LCC-HVDC Systems // IEEE Xplore. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8993690> (дата обращения: 10.11.2024).
6. PLL Synchronization Stability of Grid-Connected Multiconverter Systems // IEEE Xplore. – URL: [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9580602?casa\\_token=Nz5V2pUxjLYAAAAA:hlMRpnCNQB47LHRv5OmF-sbzayjd2Om2jQcw4COVvrJ0FAUnnqzT6EETkynKU6LSnNIWGp3Z-lU](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9580602?casa_token=Nz5V2pUxjLYAAAAA:hlMRpnCNQB47LHRv5OmF-sbzayjd2Om2jQcw4COVvrJ0FAUnnqzT6EETkynKU6LSnNIWGp3Z-lU) (дата обращения: 10.11.2024).
7. Practical implementation of adaptive SRF-PLL for three-phase inverters based on sensitivity function and real-time grid-impedance measurements // Energies. – URL: [https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/133269/Practical\\_Implementation\\_of\\_Adaptive\\_SRF\\_PLL.pdf?sequence=1](https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/133269/Practical_Implementation_of_Adaptive_SRF_PLL.pdf?sequence=1) (дата обращения: 10.11.2024).
8. Derivation and Design of In-Loop Filters in Phase-Locked Loop Systems // IEEE Xplore. – URL: [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6088010?casa\\_token=a8mx\\_WaR4QMAAAAA:aeuPndNvNcF-W0Q8txbgMWTcrRSnykeiVOVM1wRIRipHxubnqRV7LTW7Ru2IYPZsJtuG2IONw7Q](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6088010?casa_token=a8mx_WaR4QMAAAAA:aeuPndNvNcF-W0Q8txbgMWTcrRSnykeiVOVM1wRIRipHxubnqRV7LTW7Ru2IYPZsJtuG2IONw7Q) (дата обращения: 11.11.2024).
9. Mohamed Mellouli, Mahmoud Hamouda, Jaleleddine Ben Hadj Slama A Comparative Study and Evaluation of Improved MAF-PLL Algorithms // International journal of renewable energy research. – 2017. – V. 1. – P. 7.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ В MICROGRID. ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**М.Д. Седелева**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5A13*

Научный руководитель: А.А. Суворов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### **Введение**

В настоящее время по ряду причин наблюдается переход от производства электроэнергии из традиционных источников к возобновляемым. К этим причинам относятся: постепенное истощение источников энергии (угля, газа и нефти), проблема растущего потребления энергии, большие потери электроэнергии на протяженных линиях электропередачи. Такой переход возможен благодаря развитию научно-технического прогресса, который привел к снижению стоимости оборудования возобновляемых источников энергии. Стоит отметить, что замещение традиционного источника позитивно отразится на экологическом аспекте. Но высокая распространенность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в существующей распределительной сети вызывает опасения в надежности и устойчивости системы из-за непредсказуемого характера их выработки электроэнергии, а также спроса на нагрузку.

Эти трудности могут быть сведены к минимуму путем разделения сети на зоны с индивидуальными потребностями. В таком случае эти небольшие сети способны регулировать свои собственные регионы без помощи сетевого управления, что возможно благодаря наличию в них собственных блоков управления. Эти микросети, microgrids, могут внести значительный вклад в решение электроснабжения отдаленных регионов России и сыграть важную роль в перестройке энергосистемы страны [1].

### **Microgrid**

Основная идея микросети заключается в интеграции ограниченного числа блоков распределительной генерации (Distributed generation) для оптимального управления ими без создания сложной сети.

Для получения качественных услуг от электросетевого предприятия и блоков централизованного управления, микрогриды подключаются к электросети через статический переключатель (Static Transfer Switch) в точке общей связи (a point of common coupling), см. рис.1. STS осуществляет автоматическое переключение между линиями в зависимости от соответствия параметров качества сети у данных источников, при этом коммутация не отражается на непрерывной работе нагрузки. Такой подход обеспечивает управление оборудованием в пределах определенного региона и позволяет рассматривать микросеть как единую диспетчерскую единицу с точки зрения электросети [1].

Оператор микрогрида может как подавать электроэнергию в энергосистему, если у микросети избыточная мощность, так и получать электроэнергию при необходимости. В микрогриде генераторы обеспечивают подачу энергии при определенном уровне напряжения при параллельной работе с электросетью и обеспечивают достаточную мощность, в том числе и для критических нагрузок. Обеспечение надежного электроснабжения является наиболее важным приоритетом микросети.

Микросеть может быть отключена в период ухудшения качества электроэнергии или аварийных ситуаций в сети, не влияя на местное электроснабжение [2].

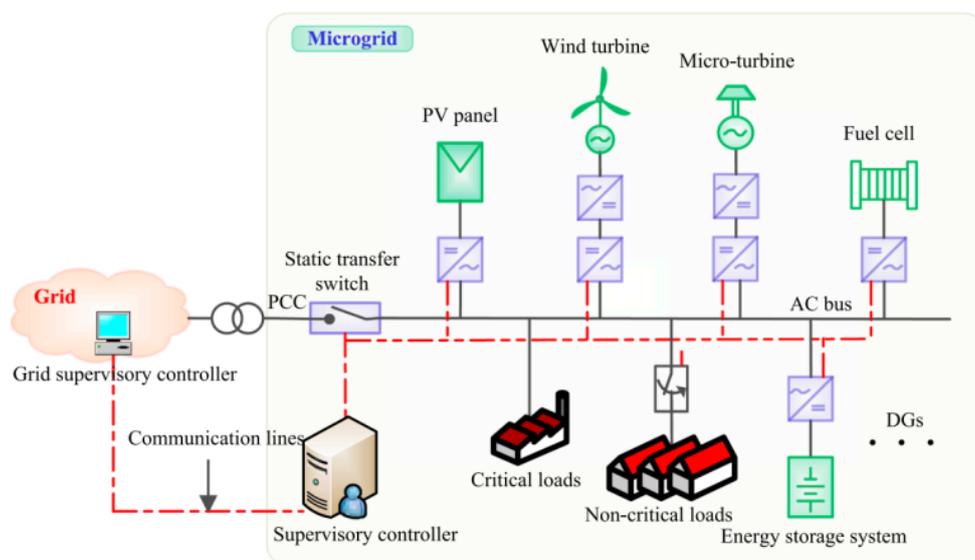


Рис. 1. Концепция microgrid

Когда микросеть, как единое целое, сталкивается с несбалансированным источником питания, она может намеренно изолироваться от электросети, чтобы сохранить качество электроэнергии, необходимое для чувствительных нагрузок. Эта функция обеспечивает надежность и может быть сравнима с работой систем бесперебойного питания (ИБП). Такая стратегия не только защищает оборудование в случае поломки основной энергетической линии или при нарушениях, но также оптимизирует работу микросети в период снижения энергопотребления.

Микросеть может быть установлена в любой промышленной зоне, официальном здании, коммерческом центре или жилом комплексе для обеспечения бесперебойного питания.

### Проблемы устойчивости microgrid

При решении задач по устойчивости энергосистемы возникают значительные трудности: небольшой уровень мощности, непредсказуемые изменения нагрузки и жесткие ограничения на выработку электроэнергии. Включение возобновляемых источников энергии в сеть не только увеличивает волатильность потребления, но и усугубляет ранее существовавшие проблемы генерации, тем самым повышая требования к быстрдействию. Использование возобновляемых источников энергии уменьшает инерцию энергосистемы из-за уменьшения влияния традиционного вращающегося энергооборудования. Следовательно, склонность этих систем к переходу в нестабильные режимы работы существенно возрастает, создавая критическую угрозу устойчивости, которая требует принятия упреждающих мер.

Для решения данной проблемы требуется применение передовых и эффективных мер по стабилизации. При этом не только повышение эффективности играет решающую роль, но и способность к немедленному реагированию на любые колебания в сети приобретает первостепенное значение для защиты от сбоев, способных нарушить работу микросетей и привести к существенным потерям. Функционирование таких сетей требует внедрения высокочувствительных, надежных механизмов управления, которые могут быстро адаптироваться к динамичным условиям, обеспечивая целостность системы в условиях сложностей, связанных с интеграцией возобновляемых источников энергии.

Ранее было отмечено, что микросети имеют возможность отключаться от основной электросети и функционировать самостоятельно. Такое переключение считается более сложным переходным процессом для микросетей. Резкое снижение мощности может привести к ла-

вине частоты, или лавине напряжения, изменению этих значений за пределы установленных норм, что, в свою очередь, может стать причиной полного отключения генерирующих установок микросети, вызывая дополнительные сложности в восстановлении стабильного энергоснабжения системы. Связано это с недостатком мощности в момент перехода, а также малым значением инерции генерирующих установок. Поэтому необходимо разработать специальные алгоритмы для плавного перехода микрогрида из параллельного режима в автономный [3].

Микросети характеризуются значительно большим соотношением активного сопротивления к реактивному в питающих линиях. Это напрямую связано с предпочтением использования именно кабельных линий в данных системах, в отличие от классических энергосистем, где доминируют воздушные линии и значение  $R/X$  существенно ниже. Высокая доля индуктивности замедляет динамику процессов; при уменьшении её влияния возрастает риск утраты устойчивости в системе.

Исследователи все еще стремятся усовершенствовать стратегии распределения мощности, используя новые методики управления и алгоритмы оптимизации, которые могут регулировать коэффициент полезного действия контроллеров для повышения производительности.

### Перспективы

В современной распределительной сети широкое распространение ВИЭ ограничено из-за серьезных проблем, связанных с электросетями, в то время как микросеть способна преодолеть эти проблемы благодаря своим уникальным особенностям регулирования.

Микрогриды пока не в состоянии заменить традиционные централизованные энергосистемы, особенно в масштабах крупных стран, тем не менее в России уже существуют проекты, направленные на создание взаимодействия микросетей с централизованными электростанциями и сетями. Внедрение позволит улучшить балансировку нагрузки, повысить эффективность использования ресурсов и обеспечить стабильность работы системы в целом. К тому же это большой шаг к переходу к возобновляемым источникам энергии.

Анализируя международный опыт, можно установить: применение локальных сетевых решений способствует значительному сокращению затрат на электричество для коммерческих организаций и промышленности – от 5 до 25 %, а в некоторых случаях даже больше, чем при традиционном подключении к централизованным системам. Экономический эффект напрямую зависит как от специфики самих предприятий-потребителей, так и их запросов по параметрам – стабильности и экологичности микросетей. Утверждение об этом подкрепляется данными сложных математических расчетов и опыта успешной реализации подобного подхода на международном уровне. Несмотря на то, что глобальный опыт в этой сфере пока ограничен, существуют конкретные примеры, приведенные в табл. 1, которые демонстрируют значительное снижение затрат для промышленных предприятий благодаря применению микросетевых технологий. Эти данные свидетельствуют о потенциале микрогридов как инструмента оптимизации энергетических процессов, особенно актуального в условиях повышенной требовательности к качеству и стабильности электроснабжения потребителей [4].

Основным фактором повышения экономической целесообразности микрогенерационных установок стал значительный научно-технический прорыв в области малых энергетических систем. В результате за последние годы наблюдается тенденция, при которой стоимость электроэнергии, производимой собственными источниками генерации, нередко оказывается ниже рыночных цен на электричество, распределяемое по централизованным сетям.

Компании видят перспективы внедрения децентрализованных микросетевых систем для удаленных территорий Дальнего Востока и Республики Саха (Якутия), в особенности на предприятиях добывающей и перерабатывающей промышленности. Это обусловлено как полным отсутствием, так и низким качеством (колебания напряжения, нестабильность часто-

ты электричества, частые аварийные отключения и другие технические сбои) подключения к традиционным энергетическим сетям.

Таблица 1. Коммерческие и промышленные микрогриды в мировой практике

Микрогрид	Конфигурация	Эффекты
<b>Longmedow park</b> Место: Йоханнесбург, ЮАР Потребители: промышленное предприятие Год ввода в эксплуатацию: 2016 Интегратор: ABB	Питание от сети Солнечные панели: 750 кВт СНЭ: 1 МВт – 380 кВт·ч Дизельные генераторы: 3 МВт	Снижение стоимости энергоснабжения: 25 % Снижение эмиссии CO <sub>2</sub> : 1000 тонн в год Повышение надежности электроснабжения
<b>Inland empire utilities agency</b> Место: Сан-Бернардино, США Потребители: система городского водоснабжения и канализации Год ввода в эксплуатацию: 2008–2017 Интеграторы и вендоры: AMS, SunPower, Tesla, Fuel Cell Energy	Питание от сети Солнечные панели: 3,5 МВт Ветрогенераторы: 1 МВт Топливные элементы: 2,8 МВт СНЭ: 3,65 МВт – 380 кВт·ч Дизельные генераторы: 2,5 МВт	Снижение стоимости энергоснабжения, в т. Ч. за счет участия на рынке управления спросом: 10 %
<b>Establishment labs</b> Место: Коста-Рика Потребители: промышленное предприятие Год ввода в эксплуатацию: 2016 Интегратор: ENEL	Питание от сети Солнечные панели: 276 кВт СНЭ: 500 кВт – 1 МВт·ч	Снижение стоимости энергоснабжения: 5 % Повышение надежности электроснабжения
<b>Boston one campus</b> Место: Бостон, США Потребители: коммерческая недвижимость Год ввода в эксплуатацию: 2017 Интегратор: Schneider Electric Источник: [5]	Питание от сети Солнечные панели: 448 кВт СНЭ: 500 кВт – 1 МВт·ч Резервный газопоршневой генератор	Снижение стоимости энергоснабжения: 5% Снижение эмиссии CO <sub>2</sub> : 5800 т в год

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Md Alamgir Hossaina,b, Hemanshu Roy Potaa, Md Jahangir Hossainc, Frede Blaabjerg. Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities.
2. Gupta N. Stochastic analysis of islanded microgrid // IEEE International Conference on Power Electronics. – 2021.
3. Димитриев А.А., Димитриев Р.А., Никифоров И.К. Проблемы выделения работы микрогрида в изолированный режим функционирования. – 2021.
4. Чаусов И., Бокарев Б., Сидорович В. Активные энергетические комплексы – первый шаг к промышленным микрогридам в России. – Инфраструктурный центр Энерджинет. – 2021.
5. Microgrids for Commercial and Industrial Companies. – World Business Council for Sustainable Development. – 2021.

## АНАЛИЗ ВНЕДРЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК 4 ТИПА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РОССИИ И МИРА

**Х.М. Шарифов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ31*

Научный руководитель: В.Е. Рудник, к.т.н., ассистент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### 1. Актуальность

Четвертый тип ветряных электростанций (ВЭС) отличается адаптивностью к изменчивым ветровым условиям благодаря способности регулировать угол наклона лопастей и их скорость вращения, что увеличивает генерацию электроэнергии в регионах с неравномерными

ветровыми ресурсами [1]. Конструкции этих ВЭС обладают повышенной стойкостью, способностью выдерживать экстремальные погодные условия и системами мониторинга для предотвращения сбоев. В России с её широкими территориальными ресурсами развитие ветроэнергетики поддерживается государством, и установки появляются в регионах с высоким ветровым потенциалом [1–3]. На международной арене лидерами ветроэнергетики являются Китай, США и Германия, активно развивающие инфраструктуру и технологии для интеграции ВЭС в национальные энергетические сети.

## 2. Виды ВЭС

Существует множество основных разновидностей этих систем, каждая из которых характеризуется уникальными техническими параметрами, конструкционными особенностями и областью применения.

- Наземные ветроэлектростанции (Onshore Wind Farms) устанавливаются на суше и являются самым распространенным типом. Они занимают большие территории, где турбины расположены на значительном расстоянии друг от друга для предотвращения затенения. Их основные достоинства включают легкость установки, удобство технического обслуживания и сниженные транспортные расходы [4].

- Шельфовые ветроэлектростанции, размещенные в морских акваториях, используют мощные и постоянные ветра, демонстрируя высокую эффективность. Строительство и эксплуатация таких станций сложны и затратны, однако они не ограничены в размещении и минимально влияют на ландшафт. Подключение шельфовых ВЭС к энергосистеме происходит через подводные кабели, которые проводят энергию на сушу. В зависимости от удаленности и мощности используют кабели высокого напряжения, переменного (HVAC) и постоянного тока (HVDC) [5].

- Гибридные ветроэлектростанции объединяют ветровую энергию с другими видами генерации, такими как солнечная энергетика и системы хранения энергии, для повышения стабильности энергоснабжения. Эти системы эффективно работают в изменчивых природных условиях, увеличивают эффективность производства электроэнергии и снижают зависимость от углеводородов. В условиях дефицита энергоресурсов и интереса к устойчивому развитию их применение становится особенно актуальным [6].

- Вертикальные ветроустановки (ВЭУ) с вертикальной осью вращения являются идеальными для городской среды и районов с ограниченным пространством благодаря своей гибкости в размещении и эксплуатации. Процесс интеграции ВЭУ в энергосистему начинается с выбора места с стабильным ветром и требует учета климатических, экологических и экономических факторов региона [1].

## 3. Проблемы внедрения ВЭС в России

Развитие ветроэнергетических станций в России осложняется неравномерным распределением ветра и трудностями транспортной доступности в регионах с высоким ветровым потенциалом, таких как Сибирь, Дальний Восток и северные территории, что влечет за собой высокие логистические затраты.

Для эффективного развития ветроэнергетики в России необходимы четкое правовое регулирование и стимулирование инвестиций, что затрудняется недостатком законодательной базы. Проблемы также возникают из-за ограниченности отечественных технологий и недостатка квалифицированных специалистов при переходе от теории к практике. Финансовый аспект является ключевым фактором: строительство ветряных электростанций требует значительных инвестиций, что создает сложности для инвесторов из-за нестабильной экономической ситуации и отсутствия субсидий [1]. Экологические последствия также вызывают

беспокойство, так как строительство ВЭС может приводить к нарушению экосистемы. Для преодоления этих проблем требуется разработка долгосрочной стратегии, включающей оптимизацию законодательства, стимулирование инвесторов и развитие научно-технической базы [4].

### Выводы

1. Был выполнен анализ литературы, касающийся обзора ветроэнергетических станций 4 типа.
2. Подробно рассмотрены основные виды ВЭС. Было выявлено, что наземные ветроэлектростанции инверторного включения используются намного чаще других видов.
3. Благодаря значительному прогрессу в технологиях производства ветроэлектростанций и снижению себестоимости энергии, ВЭС 4 типа становятся конкурентоспособными с традиционными источниками энергии.
4. Новые бизнес-модели и инвестиционные стратегии ускоряют внедрение ветроэнергетических проектов, способствуя их дальнейшему распространению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационный бюллетень рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития. Ассоциация развития возобновляемой энергетики. [Электронный ресурс]. – URL: <https://reda.ru/bulletin> (дата обращения: 20.10.2024)
2. Разживин И.А., Рубан Н.Ю., Аскарлов А.Б., Уфа Р.А. Разработка программно-технических средств моделирования ветроэнергетической установки 4 типа // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 1 (150). – С. 183–194.
3. Денисов Р.С., Елистратов В.В., Гзенгер Ш. Ветроэнергетика в России: возможности, барьеры и перспективы развития // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23. – № 2. – С. 17–27.
4. Щеглетов К.А. Экологическая безопасность и перспективы развития технологий использования энергии ветра // в сб.: Наука молодых. Сборник научных статей по материалам XII Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 276–284.
5. Generic Models and Model Validation for Wind and Solar PV Generation: Technical Update. EPRI, Palo Alto, CA: 2011, 1021763 [Online].
6. EPRI, «Proposed Changes to the WECC WT4 Generic Model for Type 4 Wind Turbine Generators», Prepared under Subcontract No. NFT-1-11342-01 with NREL, Issued to WECC REMTF and IEC TC88 WG27 12/16/11; (last revised 1/23/13) [Online].

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛА МЭК 61850 SAMPLED VALUES НА МИКРОКОНТРОЛЕРЕ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ В СОСТАВЕ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

**К.А. Ахтырский<sup>1</sup>, В.А. Кабиров<sup>2</sup>**

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
каф. ПрЭ, группа 242-2023*

*Томский политехнический университет,  
Старший лаборант Организационного отдела ИШЭ<sup>1</sup>;  
ООО «Вип Электроника», главный инженер<sup>2</sup>*

Научный руководитель: В.Д. Семенов, к.т.н., профессор, с.н.с. кафедры ПрЭ ТУСУРа

### Введение

Одним из главных недостатков схемы подключения устройств РЗА к измерительным трансформаторам тока и напряжения в составе электрической подстанции является необходимость прокладки большого количества проводов от измерительных устройств до тер-

миналов РЗА. Это приводит к значительным сложностям при модернизации подстанций, добавлении нового оборудования и проведении обслуживания устройств в составе подстанции. С развитием цифровых технологий появились новые возможности организации сетей передачи информации от измерительных устройств к терминалам РЗА. Это повлекло за собой появление нового типа подстанций – цифровых подстанций [1–3].

### **Преимущества цифровых подстанций**

В отличие от традиционных подстанций, в цифровых подстанциях передача данных между измерительными устройствами и терминалами РЗА происходит не в аналоговой, а в цифровой форме, что позволяет передавать большие объемы данных на большее расстояние, чем при традиционной организации электрической подстанции [4]. Кроме того, такой способ организации сети передачи данных позволяет значительно сократить количество проводов, передающих данные между устройствами. Это достигается за счет того, что все измерительные устройства и терминалы РЗА в составе цифровой подстанции соединяются общей «шиной процесса» – коммуникационной шиной данных, к которой подключаются измерительные устройства, коммутационные устройства и терминалы РЗА. По данной шине все устройства передают терминалам РЗА мгновенные значения измерений. Требования к шине процесса описываются протоколом МЭК 61850-1 и включают в себя [5]:

- Обеспечение передачи данных с высокой частотой и возможностью выбора частот (для целей релейной защиты используется меньшая частота, а для контроля качества электроэнергии – большая).
- Обеспечение минимальной задержки передачи данных в сети. От скорости передачи данных в сети зависит быстродействие устройств релейной защиты и автоматики.
- Высокая точность синхронизации по времени (не хуже  $\pm 1$  мкс) измерений, полученных от разных устройств в составе цифровой подстанции.
- Гибкость при формировании кадров данных. Протокол передачи данных должен предусматривать возможность передачи измерений токов и напряжений от измерительных трансформаторов в различных конфигурациях (настраиваемое количество и тип измерительных данных в пакете).

### **Протокол Sampled Values**

Для обеспечения передачи данных между устройствами в составе цифровой подстанции с учетом перечисленных требований существует протокол Sampled Values (SV), описанный в стандарте МЭК 61850-9-2 [6]. Передача данных по данному протоколу происходит через интерфейс Ethernet на канальном уровне сетевой модели OSI, что позволяет передавать и обрабатывать пакеты данных с высокой скоростью. Сообщения SV передаются по модели «издатель-подписчик». Это значит, что отправители («издатели») напрямую не привязаны к получателям («подписчикам») сообщений. Вместо этого сообщения делятся на классы. Получатели «подписываются» на необходимые классы сообщений, что позволяет им их получать. Стандарт МЭК 61850 предусматривает возможность выбора одного из двух вариантов частот передачи выборок измерительной информации по данному протоколу: 4800 Гц (96 выборок на период сигнала с частотой 50 Гц) и 14400 Гц (288 выборок на период), однако на практике также широко используются частоты 4000 Гц (80 выборок на период) и 12800 Гц (256 выборок на период). Каждый информационный блок пакета данных (блок APDU – Application Data Unit) представляет собой одну выборку мгновенных значений сигналов. В каждый информационный блок может входить до 8 мгновенных значений токов и напряжений (значения токов и напряжений фаз А, В, С и нейтрали) [7]. Каждое мгновенное значение представлено в виде 8-байтного кода, что позволяет передавать числа двойной точности (double). В

одном пакете данных SV может содержаться до 8 блоков APDU (их число зависит от количества выборок измерительных сигналов на период и определяется стандартом МЭК 61850). Синхронизация устройств в составе цифровой подстанции согласно протоколу МЭК 61850 обеспечивается с помощью секундного импульса (1PPS), который одновременно поступает на все измерительные устройства и обнуляет счетчик выборок измерительной информации, благодаря чему выборки информации от всех устройств цифровой подстанции синхронизируются между собой и принимающие устройства могут обрабатывать значения токов и напряжений от разных устройств, komponуя их по номерам выборок. Кроме того, в настоящее время допускается использование иных методов синхронизации устройств в составе цифровой подстанции, например с помощью протокола IEEE 1588-2008 PTP [8]. Каждый пакет SV содержит информацию о статусе синхронизации устройства:

- Глобальная синхронизация – устройство синхронизировано с внешним источником точного времени.
- Локальная синхронизация – устройство потеряло связь с внешним источником точного времени менее, чем 60 секунд назад.
- Синхронизация отсутствует.

### **Реализация протокола МЭК 61850 Sampled Values на микроконтроллере**

В связи с тем, что в настоящее время концепция цифровой подстанции только начинает внедряться в энергетическую систему России и мира, существует запрос на разработку измерительных устройств, передающих информацию в соответствии с принятыми стандартами для цифровых подстанций (МЭК 61850). Одним из важнейших компонентов цифровых измерительных устройств являются микроконтроллеры. Они позволяют обрабатывать измерительную информацию с высокой скоростью и передавать ее на другие устройства. Однако, на сегодняшний день в открытом доступе не существует реализаций протокола Sampled Values для микроконтроллеров. Наиболее распространенными реализациями данного протокола являются его реализации для операционных систем (ОС) Linux и Windows [9]. Встраивание вычислительных устройств, работающих на базе данных ОС, в измерительные устройства в составе цифровых подстанций влечет за собой существенные денежные затраты в то время, как микроконтроллеры являются сравнительно недорогими. В связи с этим в настоящее время существует задача реализации протокола Sampled Values на базе микроконтроллера.

Для реализации протокола SV авторами данной статьи был выбран микроконтроллер STM32F429. Данный микроконтроллер широко используется при разработке электронного оборудования и обладает аппаратной поддержкой интерфейса Ethernet, что облегчает реализацию поддержки протокола SV для него. Кроме того, микроконтроллеры серии STM32F4 обладают аппаратной поддержкой протокола IEEE 1588-2008 PTP, что позволит реализовать синхронизацию устройств на базе данного микроконтроллера не только с помощью секундного импульса, но и с помощью протокола PTP. Разработка протокола SV для микроконтроллера STM32F429 производилась на базе операционной системы реального времени FreeRTOS и библиотеки LWIP для работы с сетевыми протоколами. Реализация протокола SV на микроконтроллере предназначена для передачи измерительных данных с комбинированного цифрового трансформатора тока и напряжения на терминалы РЗА в составе цифровой подстанции. Возможность гибкой настройки работы протокола обеспечена с помощью веб-интерфейса управления, позволяющего задавать количество выборок измерений на период сигнала и MAC-адрес назначения пакетов данных (рис. 1).

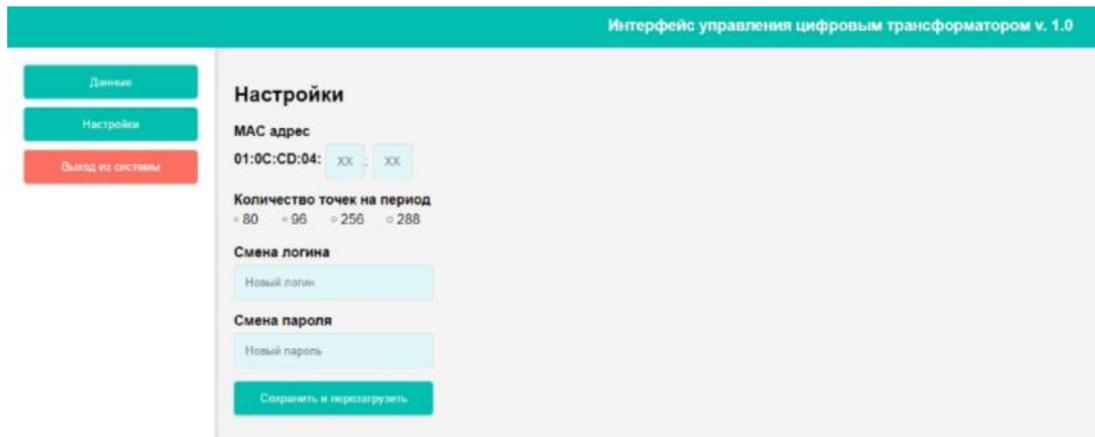


Рис. 1. Веб-интерфейс для настройки протокола SV на комбинированном цифровом трансформаторе тока и напряжения

Для проверки работоспособности разработанного протокола, цифровой трансформатор был подключен по интерфейсу Ethernet к ПК с установленным для анализа трафика цифровой подстанции «Сетевой анализатор» [10]. Цифровой трансформатор выступал издателем SV, а ПК – подписчиком. По протоколу SV передавались данные об измерении напряжений 230 В фаз А, В и С с частотой выборки 256 на период. Результаты работы представлены на рис. 2.

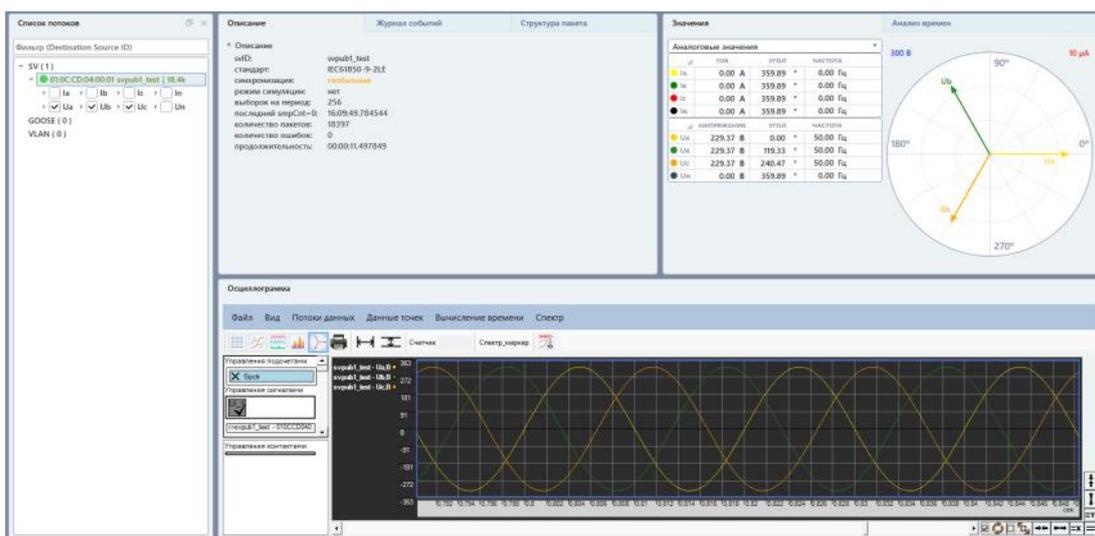


Рис. 2. Визуализация данных, полученных по протоколу SV от комбинированного цифрового трансформатора тока и напряжения, работающего на базе микроконтроллера STM32F429

## Заключение

Результаты эксперимента показали, что разработанная реализация протокола SV для микроконтроллера STM32F429 корректно передает данные о напряжениях от измерительного устройства к терминалу с необходимой скоростью. Полученные результаты могут быть применены при разработке измерительных устройств для цифровых подстанций. Разработанная реализация протокола SV для микроконтроллера STM32F429 выложена авторами в открытый репозиторий Github AkhtyrskiyKirill/STM32F4-IEC61850-SV [11]. Следующей задачей для разработки данного проекта является внедрение в веб-интерфейс управления комбинированным цифровым трансформатором тока и напряжения возможности настройки состава передаваемых по протоколу SV данных (выбор фаз тока и напряжения), а также отображения в реальном времени графиков изменения измеряемых параметров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головщиков В.О. Цифровая подстанция-основной элемент цифровой электроэнергетической системы // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2019. – Т. 1. – С. 224–225.
2. Лобов Б.Н., Лызарь И.О., Левчук В.Э. Понятие «цифровая подстанция» // Молодой исследователь Дона. – 2020. – № 3 (24). – С. 49–52.
3. Курьянов В.Н. и др. Цифровые подстанции. Опыт реализации // Наука, образование и культура. – 2018. – № 3 (27). – С. 9–12.
4. Ахмеров А.Г. Цифровые подстанции: преимущества в использовании // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований. – 2020. – С. 93–96.
5. Михайлов Д.С., Верещак А.В., Мардарьев С.Н. Применение стандарта МЭК 61850 в релейной защите и автоматике // Перспективы развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства. – 2022. – С. 134–139.
6. Баранов П.Ф. и др. Программное обеспечение для эмуляции передачи мгновенных значений измерений в соответствии со стандартом МЭК 61850 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 131–139.
7. Втюрин А.В. Структура цифровых потоков данных в протоколе МЭК 61850 // StudNet. – 2020. – Т. 3. – № 8. – С. 539–545.
8. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems – Redline, in IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002) – Redline, vol., no., pp.1-300, 24 July 2008
9. Kurek K. et al. Implementation of IEC 61850 power protection tester in Linux environment // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2020. – С. 689–696.
10. ПО «Сетевой анализатор» // Динамика. – URL: <https://dynamics.com.ru/production/61850/networkanalyzer> (дата обращения 14.11.2024).
11. IEC 61850 Sampled Values publisher library for STM32 // Github AkhtyrskiyKirill/STM32F4-IEC61850-SV. – URL: <https://github.com/AkhtyrskiyKirill/STM32F4-IEC61850-SV> (дата обращения 14.11.2024).

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И УСТРОЙСТВА СБОРА ДАННЫХ  
ДЛЯ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРИИ

А.В. Слива

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А13*

Научный руководитель: Ю.Д. Бай, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Системы телеметрии – совокупность устройств, осуществляющих получение, преобразование, передачу информации через каналы связи для дальнейшего приёма, обработки и регистрации данных о состоянии объектов и процессов, происходящих на них, с целью контроля на расстоянии.

В автоматизированных системах объектов электроэнергетики для работы автоматики необходимо использование устройств, которые преобразуют входной сигнал некоторой физической величины в выходной сигнал другого вида для удобства воздействия на последующие элементы. Также в рамках энергосистем необходимо осуществлять сбор и обработку информации на объектах для дальнейшей передачи на вышестоящие уровни. Для таких целей устанавливают измерительные преобразователи и устройства сбора данных [1].

На рис. 1 представлен измерительный преобразователь от компании «Энергосервис». Устройство представлено в модификации «Максимум». На лицевой панели устройства в верхней его части располагаются восемь дискретных входов (DI1–DI8), «←» внешнего источника питания 220 В (DIC), три винтовых клеммы для подключения через интерфейс RS-485-1 и три под питание как переменным, так и постоянным током. Слева размещен USB разъем для настройки через программное обеспечение производителя. В центре находятся четыре разъема под сетевой кабель RJ45. Разъем 24 V осуществляет питание внешних модулей, RS-485-2 предназначен для обмена данными с внешними модулями. Интерфейс Ethernet (LAN-1, LAN-2) необходим для передачи данных на вышестоящие уровни или другие устройства. В нижней части располагаются входы цепей напряжения и тока [2].



Рис. 1. Преобразователь измерительный многофункциональный



Рис. 2. Устройство сбора данных

Устройство сбора данных от компании «Энергосервис» в модификации ЭНКС-3М-220-4 представлено на рис. 2. На лицевой панели представлены 2 оптических интерфейса и двенадцать портов под RJ45, USB разъем для настройки устройства, три винтовых клеммы для питания устройства, как переменным, так и постоянным током.

Порты LAN-1 и LAN-2 поддерживают интерфейс Ethernet, порты COM-1 – COM-6, COM-9, COM-10 используют интерфейс RS-485, COM-7 и COM-8 используют интерфейс RS-232 [3].

### Протоколы обмена данными

Протоколы обмена данными – правила, по которым осуществляется порядок и особенности передачи информации между устройствами.

Обмен данными может осуществляться через один из протоколов: Modbus, МЭК 60870-5-101-2006, МЭК 60870-5-104-2004, SNMP, GOOSE (МЭК 61850 8-1).

Протокол Modbus разработан в 1979 году компанией Modicon (сейчас Schneider Electric). Для его работы используется интерфейс RS-485. Главными достоинствами протокола являются простота и массовость использования. Недостаток заключается в отсутствии обратной связи у подчиненного устройства. Также протокол не обладает обширным количеством функций по обеспечению безопасности от воздействия извне.

Протокол МЭК 60870-5-104 разработан в 2004 г. Техническим комитетом 57 Международной электротехнической комиссии. Для обмена данными используется интерфейс Ethernet. В отличие от Modbus у данного протокола существует механизм отправки данных от подчиненного к вышестоящему устройству без запроса от последнего. МЭК 60870-5-104 обладает более широкими возможностями защиты от кибератак.

Таким образом, рассмотренные типы протоколов являются совершенно разными по структуре и функционалу. Modbus лучше подходит для более простых систем, к которым не предъявляются большие требования безопасности. Стандарт МЭК 60870-5-104 наоборот был специально разработан для сложных производственных систем, требующих усиленной защиты при обмене данными [4].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ю.Ф. Измерительные преобразователи // Вестник ВУиТ. – 2009. – № 14. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritelnye-preobrazovateli> (дата обращения: 05.11.2024).
2. Тараканов В.П., Макеев М.С. Информационно-измерительная техника и электроника. Электрические измерения в системах электроснабжения. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 88 с.
3. Соколов А.А., Яновский Т.А., Ульянов Д.Г., Ползунов С.Е. Современные инструменты автоматизированного сбора и систематизации данных с устройств учёта потребления энергоресурсов и датчиков // Проблемы науки. – 2016. – № 12(13). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-instrumenty-avtomatizirovannogo-sbora-i-sistematizatsii-dannyh-s-ustroystv-uchyota-potrebleniya-energoresursov-i> (дата обращения: 05.11.2024).
4. Mikrodev. – URL: <https://www.mikrodev.com/comparison-of-modbus-and-iec-60870-5-104-communication-protocols/> (дата обращения: 05.11.2024)

## ГАЭС: ПРИНЦИП РАБОТЫ, АНАЛИЗ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ ПРИМЕНЕНИЯ

Р.Р. Абдуллаев, И.Ю. Кронвальд, Д.А. Баранов

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43

Научный руководитель: А.Б. Аскарров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

На фоне существования и эксплуатации большого количества вариаций тепловых энергосистем по всему миру, затмевается уникальность многих видов гидроэнергетики, одной из которых является гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС).

Особая технология ГАЭС, включающая в себя дневной и ночной режимы работы, представляет вариант двухкратной корректировки и регулировки мощности подстанций. Основное применение ГАЭС заключается в поддержании и оптимизации энергосистем путем непосредственного снабжения тех или иных систем электроэнергией, будь то атомных или тепловых электростанций, главным недостатком которых является большие расходы и потери при снижении выработки электроэнергии. Они разрешают вопросы, связанные с сохранением энергии, достигая этого за счет перекачки воды из нижнего резервуара в резервуар, расположенный выше. Дальнейшее же получение энергии может быть достигнуто путем использования энергии этой воды.

Обычно конфигурация ГАЭС зависит от топографии региона и конкретной местности, и используются области с большим перепадом высот. Они также не очень масштабируемы и требуют большого объема инфраструктуры.

Основным оборудованием ГАЭС можно назвать обратимые гидроэлектродвигатели или составные их части, которые, в свою очередь, включают в себя генераторы и систему насосов большой мощности, выполняющие свои функции в соответствии с текущим режимом работы станции. В этом заключается уникальность принципа работы ГАЭС.

Аккумулирующая составляющая ее работы состоит из процесса перехода энергии воды из потенциальной в кинетическую. Когда начинается интервал работы станции с самой маленькой электрической нагрузкой, при котором расходы на выработку малы, активизируются насосы, которые начинают качать воду в бьеф, расположенный на некой высоте  $H$  (рис. 1).

Позже по ходу работы станции при наступлении ее пиковой нагрузки, которая характеризуется большой потребностью в электроэнергии, поднимаясь вода поступает под напором в нижний резервуар, что и приводит во вращение гидротурбины. Работа с переменной скоростью еще больше оптимизирует эффективность работы ГАЭС.

В разновидности ГАЭС, в системе которых бьефы находятся в закрытом состоянии, избегается внешнее воздействие в виде естественных притоков. По контрасту же в гидроэлектростанциях реверсивного характера, в которых сочетается комбинация насосного хранения и обычных гидроэлектростанций с верхним резервуаром, время от времени наполняющегося при помощи приливов рек и ручьев.



Рис. 1. Упрощенная схема ГАЭС [1]

Так, по состоянию на 2024 год, суммарная мировая мощность гидроаккумулирования составляет свыше 127 ГВт, из которых Европейский союз составляет 38,3 ГВт (36,8 % мировой мощности) из своего общего количества в 140 ГВт гидроэнергии, что является 5 % от общей чистой электрической мощности. В США насчитывается 39 ГАЭС с суммарной мощностью 20,8 млн кВт, что делает страну одной из самых гидроаккумулированных в мире. А ГАЭС Феннин в КНР, основное строительство которой было завершено в конце 2021 года, стала крупнейшей ГАЭС в мире с установленной мощностью 3600 МВт [3].

На рис. 2:  $N$  – мощность выработки электроэнергии в процентах, НР и ТР – насосный и турбинный режимы, СК и ВР – синхронный компенсатор и вращающийся резерв мощности.

Делая анализ применения ГАЭС можно утверждать, что наибольшее свое развитие они получили в странах, зависимых от мощности атомных и тепловых электростанций. Такая зависимость не является коммерчески разумной в связи с высокой стоимостью обслуживания и невозможностью быстрого снижения выработки электроэнергии при ночном снижении энергопотребления. В таких случаях ГАЭС являются ресурсоэффективными и оптимизируют использование других режимов работы теплоэнергетической техники (в том числе и транзитных) и повышают надежность энергоснабжения путем снижения потери энергетического сырья при ночном режиме работы.

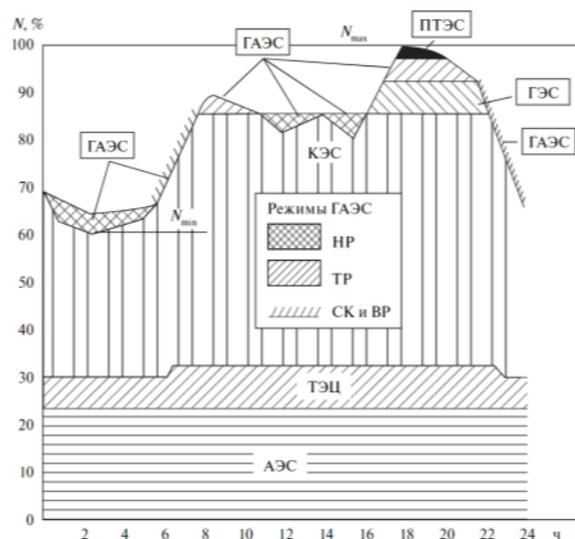


Рис. 2. Нагрузки энергетической системы за 24 часа [1]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. – Москва: ЭНАС, 2017. ISBN 978-5-93196-917-6.
2. Валиуллин К.Р., Чернова А.Д. Введение в электроэнергетику. – Оренбург: ОГУ, 2020. – 115 с. ISBN 978-5-7410-2483-6.
3. Ушаков В.Я. Современные проблемы электроэнергетики: учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2014. – 447 с. ISBN 978-5-4387-0521-5.

## ЛЭП БУДУЩЕГО: СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ

**А.О. Танишев, М.К. Снегирёв, М.Д. Федорков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43*

Научный руководитель: А.Б. Аскарков, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Линии электропередачи (ЛЭП) играют ключевую роль в поддержании стабильности и надежности электрических сетей, являясь неотъемлемой частью современной энергетической системы.

ЛЭП нашего времени являются также неотъемлемой частью энергетической инфраструктуры, однако их эксплуатация и расположение несут в себе ряд существенных недостатков, которые стоит учитывать.

Одним из основных минусов является негативное воздействие ЛЭП на окружающую среду. Они могут оказывать влияние как на флору, так и на фауну, а также нарушать естественный ландшафт.

Кроме того, ЛЭП могут привести к снижению эстетической привлекательности местности, особенно если они проходят через живописные природные уголки или же расположены близко к жилым зонам.

ЛЭП представляют потенциальную угрозу для здоровья человека. Существуют исследования, которые указывают на возможное негативное влияние электромагнитного излучения ЛЭП на организм человека.

ЛЭП могут стать источником опасности в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, таких как стихийные бедствия или техногенные аварии. Падение опор или повреждение проводов может привести к поражению электрическим током или же к другим не менее серьезным последствиям.

Отметим, что строительство и обслуживание ЛЭП требует значительных финансовых ресурсов, что может стать бременем для бюджета энергетических компаний. Кроме того, возможные компенсационные выплаты местным жителям за негативное воздействие ЛЭП также влекут за собой дополнительные расходы.

Таким образом, несмотря на свою важность для обеспечения стабильной работы энергетической системы, ЛЭП имеют ряд недостатков, которые требуют тщательного изучения.

В современном мире, где технологии развиваются с невероятной скоростью, особое внимание уделяется энергетике и эффективному распределению энергии. ЛЭП, которые являются ключевым элементом в системе снабжения электроэнергией, также не стоят на месте. В данной работе рассматривается более эффективная, эргономичная и экологичная опора ЛЭП нового типа. На рис. 1 представлен внешний вид такой опоры.



Рис. 1. Вариант опоры ЛЭП *Bystrup*

Опора ЛЭП от бюро *Bystrup* – это качественная опора в форме стройной и компактной башни, которая впишется в любой ландшафт: в зависимости от местных условий (например, загрязненности атмосферы), ее можно покрасить, оцинковать, выполнить из нержавеющей стали или стали кортен. Проводники расположены по треугольному профилю, что сокращает площадь магнитных полей и уменьшает потери электроэнергии при ее передаче.

Одна из технологий, способных существенно изменить сферу электроэнергетики – это сверхпроводники. Сверхпроводники представляют собой уникальные материалы, обладающие удивительными свойствами, которые привлекают внимание ученых и исследователей по всему миру. Эти материалы способны проводить электрический ток без каких-либо сопротивлений, что делает их крайне перспективными для применения в различных сферах современной науки и техники. Сверхпроводники снижают потери энергии в процессе ее передачи,

что, в свою очередь, может привести к экономии ресурсов и снижению затрат на эксплуатацию энергетической сети.

Внедрение современных технологий также позволяет повысить уровень безопасности эксплуатации ЛЭП и уменьшить воздействие на окружающую среду. Интерес к сверхпроводникам не угасает уже многие десятилетия, поскольку они открывают новые горизонты в разработке технологий, которые могут кардинально изменить наше представление о многих аспектах повседневной жизни и промышленности.

В настоящий момент использование сверхпроводников в ЛЭП не считается возможным в связи с необходимостью поддерживать экстремально низкую температуру на протяжении огромного расстояния, однако в будущем это может стать хорошей альтернативой стальным и алюминиевым проводам.

С 1864 года ведутся исследования на тему беспроводной передачи энергии. Одним из первых данной проблемой заинтересовался Джеймс Максвелл во время работы над математическим описанием электромагнитного поля. Идею подхватил Никола Тесла и в 1893 году представил на Всемирной научной выставке в Чикаго беспроводное освещение люминесцентными лампами.

Радиоволновую передачу энергии можно сделать более направленной, уменьшив длину волны до микроволнового диапазона, также это позволяет значительно увеличить расстояние, на которое передается энергия. Однако короткие волны могут поглощаться атмосферой и блокироваться инородными частицами в воздухе.

Таблица 1. Компонентный состав и свойства некоторых сверхпроводящих материалов

Сверхпроводящий материал	Критическая температура (°C)
Свинец	-265,74
Олово	-269,31
Тантал	-268,62
Алюминий	-271,82
Цинк	-272,12
Вольфрам	-272,9

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. THE T-PYLON // PowerPylons. – URL: <https://www.powerpylons.com/t-pylon> (дата обращения: 12.11.2024)
2. Беспроводная передача электричества // Википедия – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0\\_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%B0%D1%87%D0%B0_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0) (дата обращения: 12.11.2024).
3. Сверхпроводник // Википедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA> (дата обращения: 12.11.2024)
4. Вильф Ф.Ж. Основы физики сверхпроводников. – М.: Едиториал УРСС, 1998. – 355 с.
5. Устройство беспроводной передачи электроэнергии // Портал поддержки дистанционных мультимедийных интернет-проектов. – URL: [https://xn--d1ailn.xn--p1ai/files/works/455\\_6269.pdf](https://xn--d1ailn.xn--p1ai/files/works/455_6269.pdf) (дата обращения: 12.11.2024).

## ГРОЗОЗАЩИТНЫЕ ТРОСЫ НА ЛЭП. МОЛНИЕЗАЩИТА ЗДАНИЙ. ГРОВОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

**А.Л. Кондратьев, М.В. Бурнашев, К.В. Гладилин**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43*

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

При попадании молнии на линии электропередач (ЛЭП) возникают перенапряжения, способные вывести из строя различное оборудование. Для защиты от прямых ударов молний в ЛЭП используются грозозащитные тросы.

В данном докладе рассмотрены основные аспекты защиты от молний, включая использование грозозащитных тросов на ЛЭП, молниезащиту для зданий и защиту от грозовых перенапряжений.

Грозозащитные тросы создаются из высокопрочных материалов (стали, алюминия). Их сечения варьируются в зависимости от номинального напряжения ЛЭП, от 35 до 70 мм<sup>2</sup> (рис. 1).

Трос должен обеспечивать необходимый угол защиты, равный 20–30°. При ударе молнии в защитный трос энергия молнии передается через заземляющее устройство в землю. Это позволяет избежать повреждения изоляции и самого оборудования. Грозозащитные тросы обычно располагаются на высоте над фазными проводами, что позволяет эффективно защищать ЛЭП от молний.

Молниезащита зданий включает в себя комплекс мероприятий, направленных на предотвращение разрушительных последствий удара молнии. Система молниезащиты включает установку молниеотводов, заземляющих устройств и системы защиты от перенапряжений.

Молниеотвод – это устройство, предназначенное для направления молнии в землю, обеспечивая безопасность здания и людей. Молниеотводы бывают разных типов:

Стержневые – вертикальные молниеотводы, размещенные на крыше.

Тросовые – металлические тросы, натянутые над объектом.

Сетчатые – металлические сетки, устанавливаемые на крыше или фасаде здания.

Заземляющая система молниезащиты важна для того, чтобы безопасно отвести электрический ток молнии в землю. В этой системе используются электроды, которые соединяются с молниеотводами. Эффективность заземления зависит от проводимости грунта и правильности его устройства.

Для защиты электрооборудования от повреждений, вызванных грозовыми перенапряжениями, в здании устанавливаются устройства защиты от перенапряжений (УЗП). Эти устройства ограничивают уровень напряжения в электрических цепях, предотвращая повреждения, вызванные скачками напряжения, которые могут возникать во время гроз.

Грозовые перенапряжения – это резкие кратковременные повышения напряжения в электрических цепях, возникающие из-за молнии. Эти перенапряжения могут привести к выходу из строя оборудования и к повреждениям.

Причины возникновения перенапряжений:

Прямой удар молнии – когда молния попадает в ЛЭП или в здание.

Наведенные перенапряжения – когда молния ударяет в землю рядом с объектом, индуцируя электромагнитное поле, которое вызывает скачки напряжения в проводах.

Грозовые перенапряжения могут повредить электрооборудование, вызвать обрывы линий, повреждения изоляции и даже привести к пожарам.

Таким образом, грозозащитные тросы, молниезащитные системы для зданий и устройства защиты от перенапряжений играют важную роль в предотвращении ущерба от молний и гроз. Современные технологии и подходы в области защиты от молний позволяют эффективно минимизировать риски и обеспечить безопасность как для объектов, так и для людей. Важно продолжать развивать эти системы и внедрять новейшие технологии для повышения их эффективности.

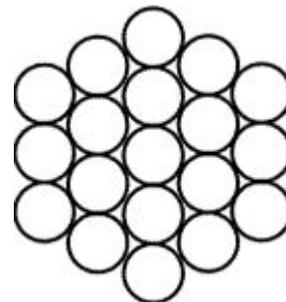


Рис. 1. Грозотрос  
ГОСТ 3063-80

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30530-97. Грозозащита и молниезащита зданий и сооружений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1998.
2. Лагутенков А.Г. Грозозащита и заземление // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – № 8.

## КОМПЬЮТЕРЫ БУДУЩЕГО. КОНЕЦ ЭПОХИ КРЕМНИЯ

**В.А. Гупалов, А.Д. Кривошапова**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43*

Научный руководитель: А.Б. Аскаров, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

История квантовых вычислений начинается с невозможности считать числа, расчеты которых не способны выполнить компьютеры, основанные на обычных кремниевых процессорах.

Пространство квантовых состояний стремительно растет. По аналогии с экспонентой в степени  $N$ , что делает невозможным моделирование данных состояний на обычных компьютерах со значения переменной, равного десяти. Решение данной задачи впервые приведено в 1981 и 1983 году Ричардом Фейнманом и Стивеном Визнером соответственно [1].

Отметим, что квантовый компьютер в отличие от обычного компьютера на кремниевых процессорах использует законы квантовой механики, такие как квантовый параллелизм и квантовая запутанность. Так, обычный процессор при выполнении вычислений может принимать два состояния – логический ноль или единица. В квантовом же компьютере из-за наличия той самой квантовой механики процессор может находиться в обоих состояниях одновременно [1].

По ходу выполнения квантовых вычислений информация представляется в квантовом виде. После же завершения вычислений она переводится в классический вид посредством проведения измерения конечного состояния регистра. При выполнении квантовой операции в сравнении с обычной имеет место возможность одновременного изменения нескольких, множества коэффициентов квантовых состояний, содержащих внутри себя информацию в классическом, традиционном ее понимании.

Когда процессор в двух состояниях одновременно, как было отмечено ранее, то есть логический ноль и единица одновременно, это называется кубитом. Так, для полного описания системы из  $N$  битов необходимо задействовать  $N$  нулей и единиц. В то время как для описания системы из  $N$  кубитов необходимо существенно меньше комплексных чисел –  $(2N - 1)$ . Данное явление обусловлено тем, что  $N$ -кубитная система может быть представлена как вектор в двухмерном гильбертовом пространстве. Таким образом, система, состоящая из кубитов, может вместить в себя гораздо больше информации, чем система битов, в традиционном ее понимании [6].

Однако важно учитывать, что, увеличивая экспоненциально систему, вычислительная мощность не будет увеличиваться в прямой зависимости от нее, в связи со сложностью кодирования и считывания информации.

Из чего же могут состоять кубиты? Это множество разных типов объектов: холодные атомы, фотоны, дефекты в кристаллической решетке, а также контакты Джозефсона. Наиболее широко используются кубиты на основе искусственных атомов – сверхпроводящие квантовые системы. Данные системы гораздо больше в размерах в соотношении с другими типами, но для их изготовления могут быть использованы стандартные для современной микроэлектроники технологии литографии и напыления.

Так же у кубитов есть свойство – декогеренция. Данное явление приводит к потере состояния суперпозиции под действием внешних факторов (излучений, тепла, вибраций).

Схемы вычислений. Основных схем (алгоритмов) подсчета пять:

- 1) алгоритм Гровера;
- 2) алгоритм Шора;
- 3) алгоритм Залки–Визнера;
- 4) алгоритм Дойча–Йожи;
- 5) алгоритм Саймона.

Данные схемы не могут запускаться на любом квантовом компьютере, под каждый алгоритм и задачу строится отдельная установка, и это один из минусов использования данных установок – отсутствие унитарности.

Основным направлением использования квантовых вычислительных машин является работа с «огромными» числами, которые не способен посчитать обычный компьютер за относительно небольшое количество времени. В числе таких функций это [5]:

- 1) криптография;
- 2) базы данных;
- 3) вероятности;
- 4) молекулярное моделирование.

Также для выполнения обычных повседневных несложных задач квантовый компьютер можно запрограммировать при помощи логических выражений, но скорость их выполнения не будет сильно отличаться от обычного кремниевого процессора. Однако создать постоянную программу невозможно, так как кубиты неспособны долго находиться в определенном состоянии и довольно быстро меняют позицию, данное явление называется – когерентность. Для сверхпроводниковых кубитов когерентность это неконтролируемое воздействие со стороны в виде флуктуаций напряжения или тока [4].

В чем плюсы и минусы каждого типа? Компьютер – это не обязательно системный блок, мышка и монитор, к данной категории относится также мобильный телефон или мультимедиа в автомобиле. Цена данных устройств доступна обычному потребителю.

Если оценивать квантовый компьютер, то с ним куда сложнее. Квантовые компьютеры – это не одна маленькая коробочка, а большая установка, работающая только при абсолютном нуле – 0К (–273,15 °С), и занимающая целую лабораторию. Цена данных устройств составляет примерно 10–15 млн долларов США. На данный момент в мире есть только одна компания, поставляющая на рынок коммерческие квантовые компьютеры – D – Wave, Канада. Все остальные компании пока занимаются лабораторными экспериментами. Опять-таки, данные устройства не могут быть использованы под любой алгоритм. Второй по мощности компьютер создала компания IBM в 2023 году под названием Quantum Condor, оснащенный 1121 кубитом [2].

Квантовые компьютеры на данный момент времени еще не способны опередить обычные компьютеры на кремниевых процессорах. Их возможности хоть и велики, но еще в полной мере не раскрыты. Цена данных машин довольно высока, что определяет не доступность в покупке обычному потребителю. Также, в отличие от обычных вычислительных машин, квантовые, в свою очередь, не располагают своей унитарностью в обычной повседневной жизни: размеры и сложность постройки сильно этому препятствуют.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: Википедия (дата обращения: 15.11.2024).
2. Квантовый компьютер: его превосходство, несходство и недосходство в сравнении с классическим. – URL: ХАБР (дата обращения: 15.11.2024).
3. Кафедра. АППиЭ КОНФЕРЕНЦИИ. Дни науки АмГУ 2016. Секция Автоматика, управление и моделирование. 29. Ялама. Нанoeлектроника – URL: Кафедра АППиЭ (дата обращения: 14.11.2024).
4. QMLCourse. Сверхпроводниковые кубиты. Декогеренция в сверхпроводниковых кубитах. – URL: QMLCourse (дата обращения: 10.11.2024).
5. Шемякина М.А. Квантовые вычисления // Моделирование квантовых алгоритмов на классическом компьютере. – 2019. – № 4. – С. 90–98.
6. Рубит. РуВики. – URL: РуВики (дата обращения: 10.11.2024).
7. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация: Пер. с англ. – М.: Мир, 2006. 824 с. ISBN 5-03-003524-9.
8. Основы высокопроизводительных вычислений: учебное пособие / К.Е. Афанасьев, С.Ю. Завозкин, С.Н. Трофимов, А.Ю. Власенко. – Кемерово: КемГУ, [б. г.]. – Том 1: Высокопроизводительные вычислительные системы – 2011. – 228 с. – ISBN 978-5-8353-1098-2.
9. Гладких А.А., Дементьев В.Е., Чилихин Н.Ю. Основы современных криптографических систем и перспективы их развития. – Ульяновск: УлГТУ, 2020. – 214 с.

## ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПОДСТАНЦИИ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ

А.П. Ковалев

Томский политехнический университет, ИШЭ, группа 5АМ41

Научный руководитель: А.Б. Аскарров, к.т.н., старший преподаватель ИШЭ ТПУ

Автоматизированная система управления технологическими процессами подстанций (АСУ ТП ПС) – это система, которая предназначена для контроля и управления технологическими процессами на подстанциях. Она представляет собой комплекс программного и технического обеспечения. [1]. АСУ ТП ПС позволяет управлять энергетическими объектами, контролировать процессы производства и распределения электроэнергии, а также оперативно мониторить работу подстанций.

Возможности АСУ ТП подстанций предоставлены на рис. 1.



Рис. 1. Возможности АСУ ТП подстанций

Функции АСУ ТП подстанций предоставлены на рис. 2.



Рис. 2. Функции АСУ ТП подстанций

В связи с ростом количества новых подстанций с высоким уровнем автоматизации увеличилась потребность в высококвалифицированных кадрах в области проектирования, монтажа, технического обслуживания и ремонта таких подстанций. Для подготовки компетентных в данной области специалистов в ФГБОУ ВО Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ) (г. Улан-Удэ) в 2014 г. была произведена коренная реконструкция существующей подстанции 35/10 кВ «Учебная».

В ходе реконструкции на учебной подстанции было установлено новое электрооборудование 35, 10 кВ, а также внедрена АСУ ТП фирмы Siemens.

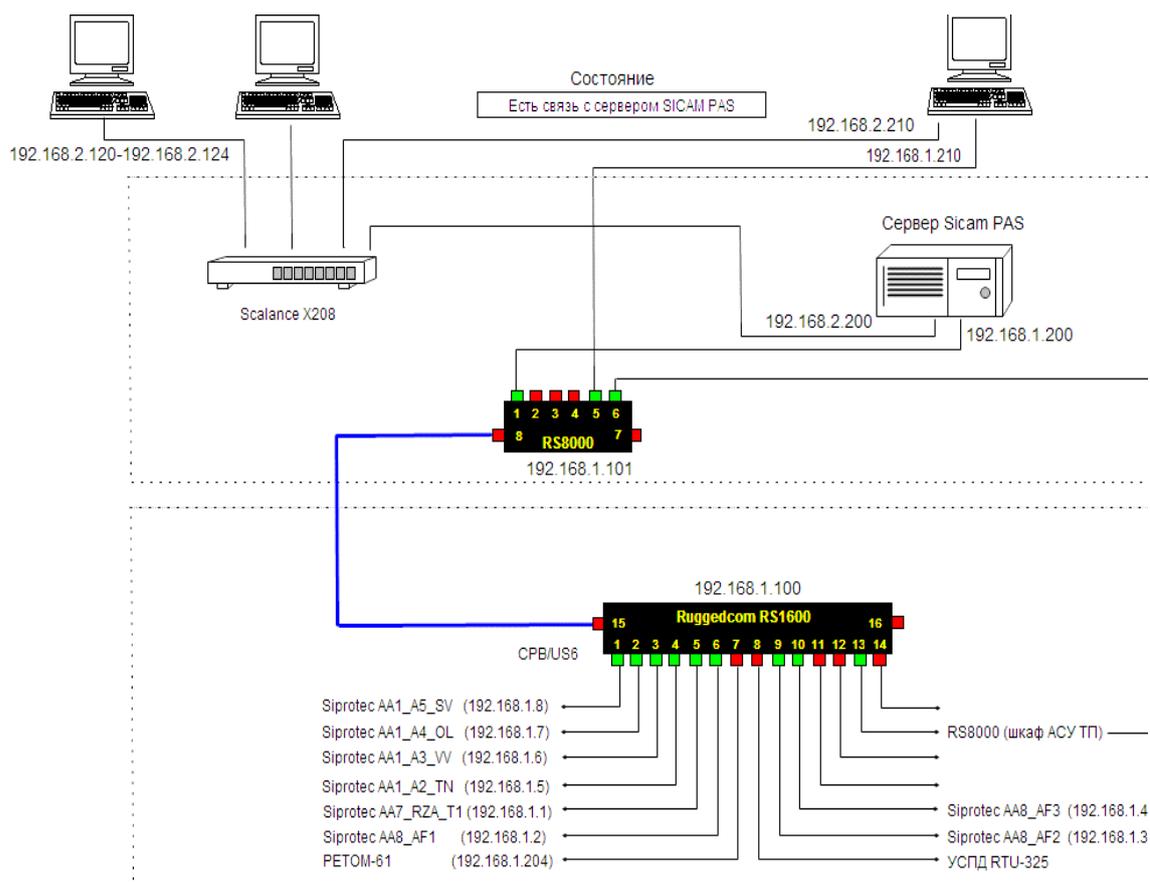


Рис. 3. Архитектура АСУ ТП подстанции «Учебная»

На рис. 3 показана структура автоматизированной системы управления технологическими процессами на подстанции «Учебная». За работу и исправность оборудования отвечают интеллектуальные электронные устройства Siprotec-4 от компании Siemens. Они используются на нижнем уровне системы.

Устройства Siprotec 4 укомплектованы модулем EN-100, он позволяет подключить устройства к системе управления и автоматизации через Ethernet, используя протоколы МЭК 61850. [2]. Этот интерфейс обеспечивает не только интеграцию в систему управления, но и связь с программным обеспечением DIGSI и другими интеллектуальными электронными устройствами посредством GOOSE-сообщений. С помощью программы DIGSI производят необходимые настройки устройств Siprotec 4. Например, можно задать или изменить параметры конфигурации и настройки, сконфигурировать пользовательские логические функции. Программа позволяет просматривать рабочие сообщения и измеренные значения, узнавать условия работы устройства и полученные значения, а также отправлять управляющие команды. [3].

На верхнем уровне АСУ ТП подстанции «Учебная» находятся:

- сервер связи на базе промышленных компьютеров;
- сетевые коммутаторы Ruggedcom;
- персональные компьютеры с автоматизированным рабочим местом (АРМ) инженера РЗА и АРМ оперативного персонала.

Все информационные соединения на подстанции «Учебная» цифровые. Они формируют общую линию для передачи данных в соответствии со стандартом МЭК 61850.

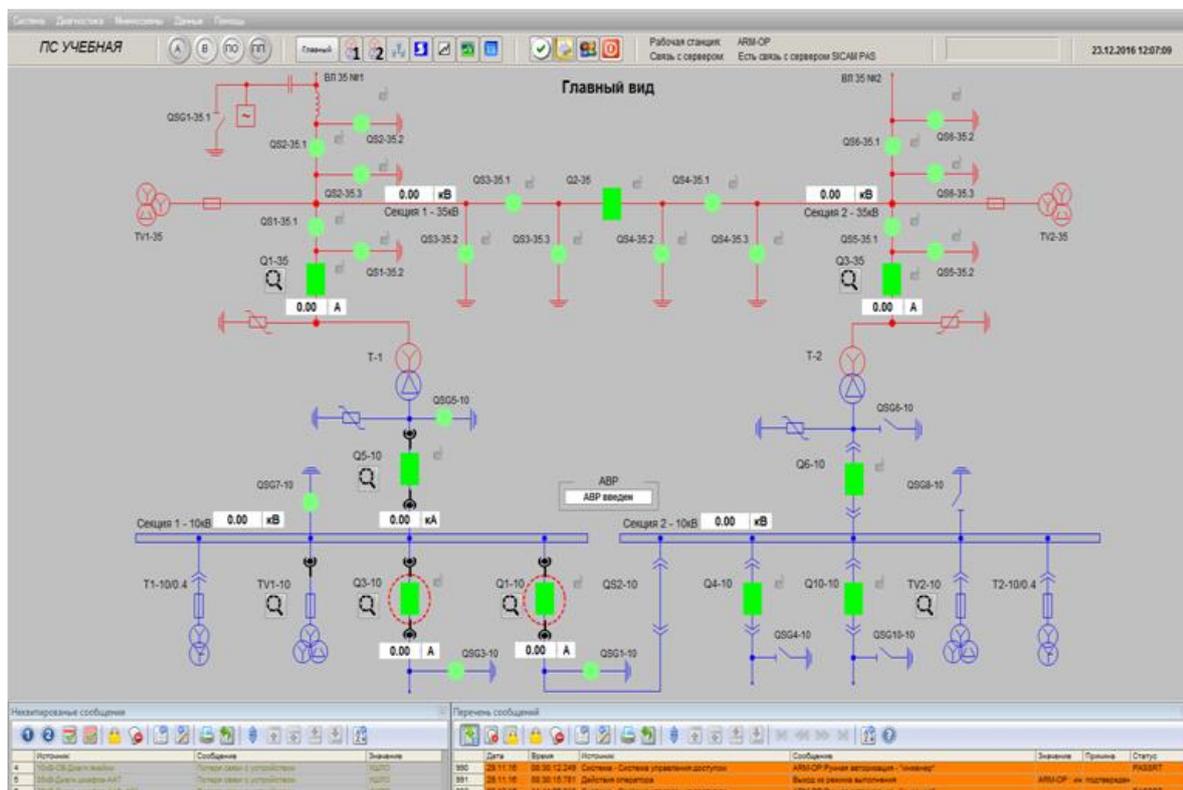


Рис. 4. Мнемоническая схема подстанции «Учебная»

На верхнем уровне АСУ ТП подстанции «Учебная» применяется SCADA-система Simatic WinCC (Windows Control Center). Она включает в себя набор инструментов для создания пользовательского интерфейса, представленного на рис. 4.

Simatic WinCC – это система человеко-машинного интерфейса, которая позволяет отслеживать параметры энергосистемы и на их основе информировать о нештатных ситуациях. [4].

Из учебного класса с помощью АРМ оперативного персонала обучающиеся могут выполнять дистанционное управление всеми компонентами подстанции: включение, отключение коммутационных аппаратов, диагностика систем.

АРМ инженера РЗА позволяет выполнять тестовые проверки, имитацию различных сигналов с помощью испытательного комплекса для релейной защиты и автоматики РЕТОМ-61 [5]. Данный комплекс позволяет как в ручном, так и в автоматическом режимах осуществить проверку и наладку устройств РЗА всех поколений – от электромеханических панелей до микропроцессорных терминалов, работающих по стандарту МЭК 61850 .

С помощью комплекса РЕТОМ-61 обучающиеся могут имитировать различные режимы работы оборудования подстанции «Учебная». Параметры задаваемых режимов фиксируют ИЭУ Siprotec-4. При помощи программного обеспечения DIGSI 4 и SIGRA 4 осуществляется просмотр и анализ полученных данных.

Установленное оборудование и программно-техническое обеспечение подстанции «Учебная» воссоздают настоящую производственную среду инженерно-технического персонала современных подстанций. Таким образом, подготовка специалистов на базе учебной подстанции ВСГУТУ идет на основе получения опыта работы с реальным и современным оборудованием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптимизация системы управления программно-аппаратного комплекса для учета электроэнергии / Г.И. Волович, Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский, А.А. Таксимов // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2023. – Т. 23. – № 4. – С. 57–65.
2. Многофункциональные интеллектуальные электронные устройства для цифровых подстанций / А.В. Мокеев, Д.Н. Ульянов // Энергетик. – 2023. – № 3. – С. 52–57.
3. Опыт реализации подсистемы телемеханики цифровой подстанции / И.Н. Боченков, Д.С. Доброхотов, И.С. Негодин, А.В. Трофимов // Электрические станции. – 2023. – № 4 (1101). – С. 36–39.
4. Опыт наладки и эксплуатации МП устройств РЗА на ЦПС / Е.П. Егоров, И.А. Кошельков, М.А. Хе, Н.А. Тойдеряков // Релейщик. – 2022. – № 2 (43). – С. 20–25.
5. Применение комплекса ретом-71 для проверки сложных устройств и систем РЗА /
6. Зайцев Б.С., Шалимов А.С. // Релейная защита и автоматизация. – 2016. – № 4 (25). – С. 45–48.

## БЕСПИЛОТНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ НУЖД ЭНЕРГЕТИКИ

**А.А. Тримасов, А.В. Цуканов, И.Е. Пожидаев**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43*

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В статье приведен сводный анализ экономической и технической эффективности решений по использованию беспилотных авиационных систем (БАС) для мониторинга линий электропередачи (ЛЭП).

БАС, а в частности дроны, уже сегодня применяются для решения широкого спектра прикладных задач, в том числе в нефтегазовой сфере и сфере электроэнергетики. Одна из задач – диагностика объектов линейной инфраструктуры, например ЛЭП и трубопроводов. Здесь с помощью дронов проводят плановую диагностику, облет и фотосъемку ЛЭП на различных высотах, инспекцию текущего состояния ЛЭП и охранных зон, а также выявление дефектов ЛЭП, нарушений ее габаритов и близлежащей растительности.



Рис. 1. Съемка ЛЭП с дрона

Кроме того, БАС применяются при проведении аварийно-восстановительных работ, например выполняют облет ЛЭП на средних высотах при различных погодных условиях, в дневное и ночное время, с использованием фотовспышки, тепловизора и иного оборудования.

По снимкам обнаружить все имеющиеся дефекты ЛЭП, в ручном режиме, для сотрудника является достаточно трудоемкой задачей. Так, для повышения эффективности обработки собранных с помощью дронов данных снимки передаются в геоинформационную систему (ГИС), в том числе для обеспечения возможности оперативного доступа к результатам обследования в последующем.

ГИС, в свою очередь, позволяют качественно и количественно анализировать местность, выводить обнаруженные дефекты и создавать трехмерные модели местности и ЛЭП.

*Преимущества использования БАС в энергетике:*

- **Эффективность:** БАС могут быстро охватывать большие территории, что значительно сокращает время, необходимое для инспекции объектов.
- **Безопасность:** Использование дронов позволяет избежать рисков, связанных с работой на высоте или в труднодоступных местах.
- **Точность:** Современные дроны оснащены высококачественными камерами и датчиками, что позволяет получать детализированные изображения и данные о состоянии объектов.

*Применение БАС для диагностики ЛЭП:*

- **Обследование ЛЭП:** БАС могут проводить регулярные визуальные проверки на наличие повреждений, коррозии, износа или других проблем.
- **Тепловизионная диагностика:** С помощью тепловизоров дроны могут выявлять перегрев оборудования, что может сигнализировать о его неисправности.
- **Мониторинг состояния опор:** Дроны могут оценивать состояние опор ЛЭП и выявлять трещины или другие дефекты.

*Применение БАС для диагностики трубопроводов:*

- **Обнаружение утечек:** С помощью специализированных датчиков БАС могут быстро обнаруживать утечки газа или нефти.
- **Оценка состояния трубопроводов:** Дроны могут проводить визуальный осмотр и использовать различные сенсоры для оценки состояния трубопроводов, что позволяет предотвратить аварии.
- **Мониторинг коррозии:** БАС могут фиксировать изменения в состоянии труб, связанные с коррозией, что способствует более эффективному планированию ремонтов.

Таким образом, БАС открывают новые горизонты для диагностики объектов линейной инфраструктуры в энергетике. Их использование не только повышает эффективность и безопасность, но и способствует более качественному мониторингу состояния объектов. В будущем ожидается дальнейшее развитие данных технологий, что сделает дроны еще более полезными в этой и ряде других областей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбасов В.К., Гречищев А.В. Мультироторные беспилотные летательные аппараты, представленные на российском рынке: обзор // Инженерные изыскания. – 2014. – № 8. – С. 27–31.
2. ГК «Геоскан» [Электронный ресурс]. – URL: [https:// www.geoscan.ru/ru](https://www.geoscan.ru/ru) (дата обращения: 15.11.2024).
3. ГК «Беспилотные системы» [Электронный ресурс]. – URL: [https:// supercam.aero](https://supercam.aero) (дата обращения: 15.11.2024).
4. Компания «АФМ-Сервис» [Электронный ресурс]. – URL: [http:// ptero.ru/](http://ptero.ru/) (дата обращения: 15.11.2024).

## РАЗРАБОТКА АНАЛОГОВОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ БПЛА ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ПОЛЮ ВЛ

И.Д. Николаев

Новосибирский государственный технический университет,  
факультет энергетики, ТЭВН, группа ЭН2-11

Научный руководитель: О.И. Лаптев, к.т.н. НГТУ

Данная работа была выполнена в рамках НИОКР по разработке автоматической системы управления БПЛА для диагностирования ЛЭП ВН, основанной на измерении электрического и магнитного полей промышленной частоты (заказчик – ПАО «Россети»). В качестве датчиков магнитного поля используются катушки индуктивности с количеством витков порядка 6500 [1], в качестве датчиков электрического поля – пластины омеднённого текстолита (плоские конденсаторы) толщиной 100 мкм и размером 9×14 см (ёмкость – 3,8 нФ). При удалении БПЛА от проводов ВЛ на 15–20 м уровень сигнала в этих датчиках составит меньше 1 мВ – этот сигнал необходимо усилить и выделить только составляющую частотой 50 Гц [2]. На рис. 1 отражен принцип полета летательного аппарата.

Изначально рассматривалось использование активного, либо пассивного фильтра, но по итогу был выбран именно активный фильтр, так как на частоте 50 Гц, потребовались бы либо большие индуктивности, либо большие емкости, что негативно бы сказалось как на габаритах, так и весе итогового устройства. Также внутреннее сопротивление источника очень велико, и необходим фильтр усилитель с большим входным сопротивлением – этому критерию удовлетворяет только активный фильтр на основе операционного усилителя. На рассмотрение были два типа фильтра: фильтр Саллена–Кея и MFB фильтры- фильтры с множественной обратной связью. Был выбран второй вариант, поскольку разброс номиналов элементов значительно меньше сказывается на итоговом результате усиления сигнала [3].

Итоговая принципиальная схема фильтра приведена на рис. 2. Фильтр состоит из повторителя, двух каскадов полосовых MFB фильтров и инвертирующего повторителя.

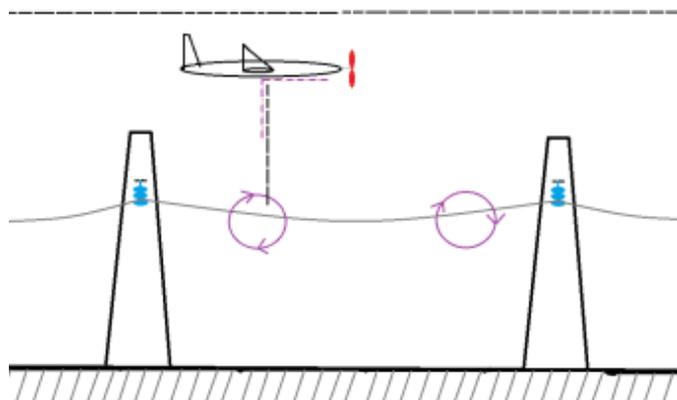


Рис. 1. Принцип полета БПЛА

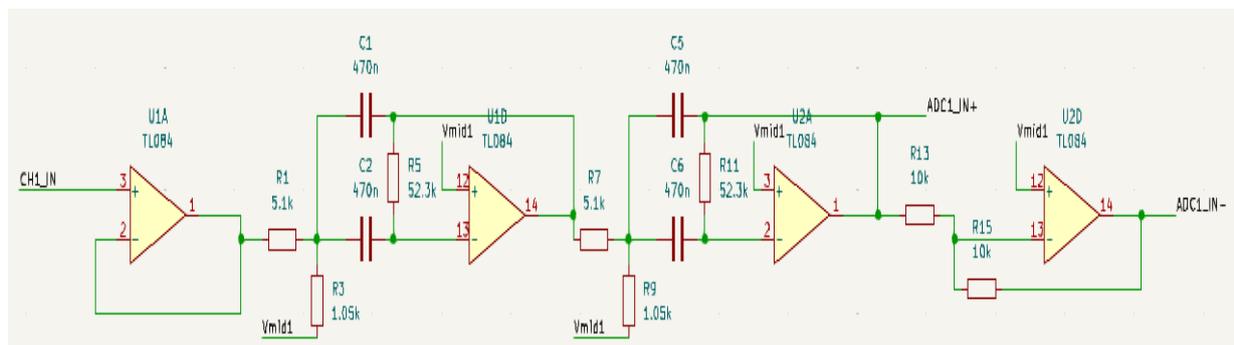


Рис. 2. Принципиальная схема фильтра

Далее производилась трассировка платы. К трассировке были представлены следующие требования: печатная плата должна быть максимально компактной и лёгкой (жесткие ограничения габаритов и веса при размещении в консолях крыльев БПЛА), при условии изготовления с шелкографией, то есть у каждого элемента должна быть подпись на плате. Обязательно наличие надёжных разъёмов для подключения датчиков и подключения платы к контроллеру. Элементы – SMD, основной размер – 0603 (1,6×0,8 мм). Размер микросхем операционных усилителей – TSSOP-14 (5×5 мм). Трассировка печатной платы выполнялась в пакете KiCAD 8. Результат представлен на рис. 3. Получившийся размер платы – 60×22 мм.

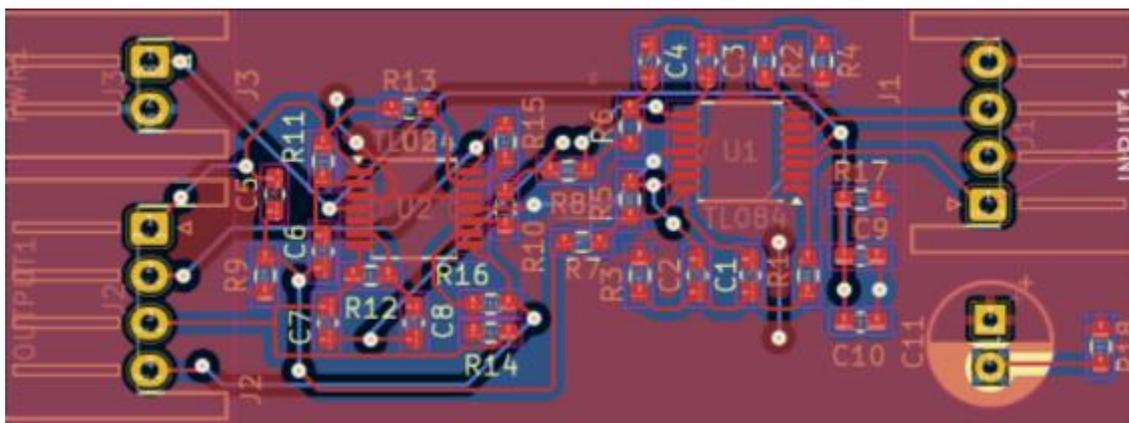


Рис. 3. Трассировка платы

С помощью 3D моделирования в пакете KiCAD 8 можно увидеть, как будет выглядеть плата по завершению всех процессов. На рис. 4 представлена 3D-модель будущей платы.

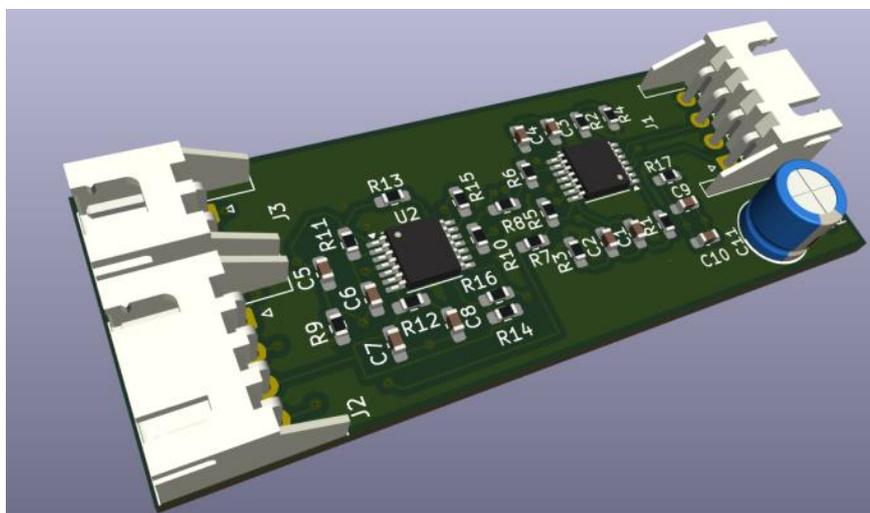


Рис. 4. 3D обзор будущей платы

Был выполнен расчёт активных фильтров для условия использования конденсаторов с изоляцией NPO, максимальная ёмкость которых в типоразмере 0603 составляет 33 нФ. Условия расчёта: коэффициент усиления одного каскада фильтра: 5, добротность фильтра 3–4, резонансная частота – 50 Гц. Для расчёта использовались выражения (1):

Выражения для расчёта фильтра:

$$H(s) = \frac{-\frac{1}{R_1 C_1} \cdot s}{s^2 + \left( \frac{1}{R_3 C_2} + \frac{1}{R_3 C_1} \right) \cdot s + \frac{1}{R_3 C_1 C_2} \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}. \quad (1)$$

Результаты расчёта:  $R_1 = 75$  кОм,  $R_2 = 15$  кОм,  $R_3 = 750$  кОм,  $C_1 = C_2 = 33$  нФ; фактический коэффициент усиления на частоте 50 Гц равен 49,8, фактическая добротность – 3,87. Расчётная АЧХ аналоговой части приведена на рис. 4.

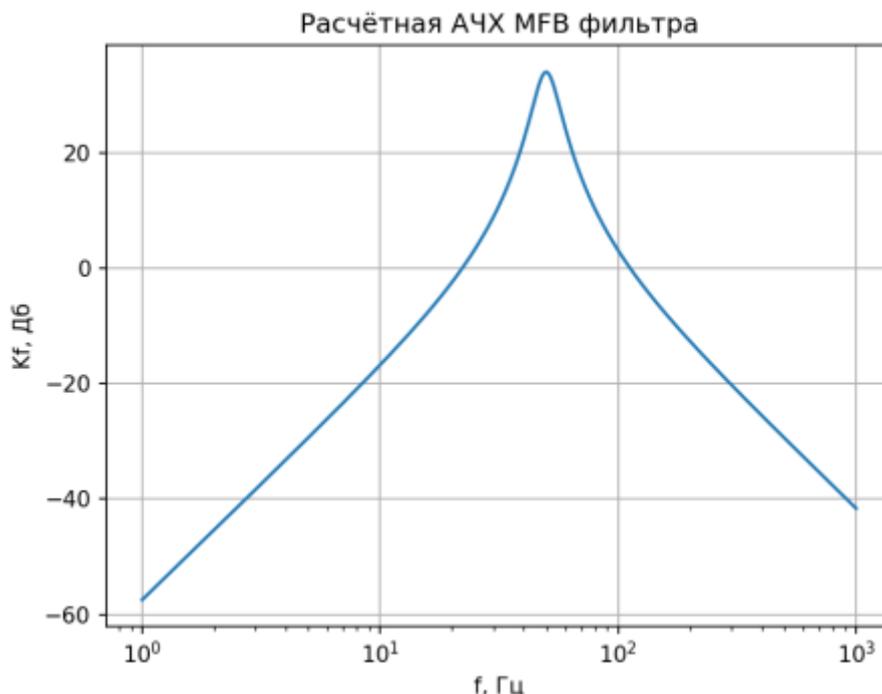


Рис. 4. Расчётная АЧХ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев Г.С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники: методическое руководство к практическим занятиям для магистрантов и инженеров 5 курса РЭФ (направление 550700, специальность 200400) дневного отделения / Новосиб. гос. техн. ун-т; [сост. Г. С. Зиновьев и др.]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 46 с.: ил.
2. Богданов В.В., Зибарев А.Ю. Электротехника и электроника (раздел «Электропривод и элементы электрооборудования летательных аппаратов»): методическое руководство к лабораторным работам для самолетостроительного факультета / Новосиб. электротехн. ин-т; [сост.: В.В. Богданов, А.Ю. Зибарев, Б.А. Иткин]. – Новосибирск: НЭТИ, 1985. – 35 с.: ил.
3. Кризе С.Н., Черных Ю.В. Современные высококачественные усилители звуковой частоты. – М.: Знание, 1987. – 61 с.

## ЛАЗЕР: ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ, КОНСТРУКЦИЯ, СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

**Е.С. Минголеев, С.В. Мироненко**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43*

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### Что такое лазер? История создания лазера

Лазер – это уникальное устройство, которое излучает узкую и монохроматическую энергию света. Его история началась в середине XX в., когда ученые начали исследовать возможности создания нового типа источника света.

Первые идеи о возможности создания лазера появились еще в начале XX в., но только в 1958 году физики Артур Шоулоу и Чарльз Таунс представили первый концепт работы лазера. Они предложили использовать эффект усиления света через вынужденное излучение, чтобы

создать уникальный источник света. В этом же году Теодор Мейман создал первый лазер, который работал на рубине. Этот прототип стал первым шагом на пути разработки новой технологии, которая стала называться лазером. Мейман смог получить узкий пучок света с высокой интенсивностью, что отличало его изобретение от всех существующих источников света. В последующие годы были созданы новые типы лазеров, такие как полупроводниковые и газовые. Каждый из них имел свои уникальные характеристики и мог использоваться в различных областях науки и техники. С развитием технологий, лазеры стали широко использоваться в медицине, научных исследованиях, промышленности и других областях. Они стали неотъемлемой частью современной жизни и привнесли много новых возможностей в различные отрасли. Сегодня лазеры используются для обработки материалов, измерения расстояний, обнаружения поверхностей, исследования звезд и планет, лечения заболеваний и многих других целей. Их уникальные свойства позволяют делать то, что ранее было невозможно.

### Конструкция лазера

Конструкция лазера включает в себя несколько основных элементов: активную среду, стимулирующую среду, резонатор и источник питания [1, 2].

Активная среда – это вещество, способное возбуждаться внешними источниками энергии и излучать световые кванты при переходе атомов или молекул на более низкие уровни энергии. Примерами активных сред могут служить гелий-неоновая смесь, твердотельные кристаллы, газовые смеси, полупроводники.

Стимулирующая среда – это источник энергии, который стимулирует активную среду к излучению света. Это может быть флэш-линейка, электромагнитное поле, оптическая модуляция и другие методы.

Резонатор – это система зеркал или призм, отражающих световые лучи и создающих узкий пучок света внутри лазерного кавитета.

Источник питания – это источник энергии, который обеспечивает необходимую мощность для работы лазера.

Существует несколько типов лазеров, различающихся по принципу действия и конструкции. Например, газовые лазеры используют газовую среду в качестве рабочего вещества, твердотельные лазеры работают на основе кристаллических материалов, полупроводниковые лазеры используют полупроводниковые кристаллы. Конструкция лазера должна быть строго откалибрована и настроена для достижения максимальной эффективности и точности излучения света. В современных лазерных технологиях применяются самые современные методы и материалы для создания мощных и компактных лазеров, способных решать широкий спектр задач в науке, медицине, промышленности и других областях [3].

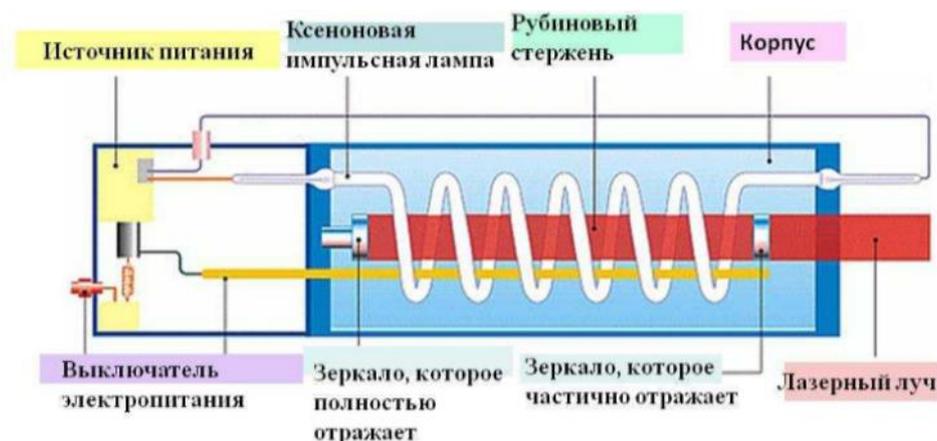


Рис. 1. Основные элементы конструкции лазера

Принцип работы лазера заключается в использовании стимулированного излучения атомов, ионов или молекул, что приводит к усилению света и созданию когерентного луча. Процесс основан на следующих основных этапах.

**Создание инверсной населенности.** В активном элементе лазера (например, газе, жидкости или твердом теле) используется система накачки для создания инверсной населенности энергетических уровней – состояние, при котором на верхнем энергетическом уровне находится больше частиц, чем на нижнем. Это достигается путем введения дополнительной энергии в систему с помощью различных методов, таких как электрический разряд, химическая реакция, оптический или электронный пучок.

**Ускорение электронов.** В случае газового лазера электроны ускоряются напряжением, приложенным к электродам, и сталкиваются с атомами газа, передавая им свою энергию. В результате этого процесса атомы переходят на более высокие энергетические уровни.

**Релаксация.** Атомы, которые находятся на высоких энергетических уровнях, спонтанно возвращаются на свои основные энергетические уровни, излучая фотоны. Некоторые из этих фотонов вызывают возбуждение других атомов, переводя их на верхние энергетические уровни и создавая таким образом лавину фотонов.

**Усиление.** Фотоны, генерируемые в процессе релаксации, распространяются через активный элемент, вызывая стимулированное излучение у других атомов. Этот процесс создает усиление света, которое приводит к формированию когерентных лазерных лучей.

**Отбор частоты и направления.** Лазерные резонаторы, состоящие из двух зеркал, установленных под углом друг к другу, обеспечивают отбор частоты и направление пучка излучения. В них происходит многократное прохождение света через активную среду, в результате чего происходит усиление только тех фотонов, которые распространяются в нужном направлении и имеют нужную частоту.

В результате этих процессов лазеры создают когерентный свет, который может быть использован для различных применений, таких как лазерная резка, маркировка, медицинские процедуры, научные исследования и другие [4].

*Сферы применения лазеров.* В современном мире лазеры применяются во множестве сфер деятельности, начиная от медицины и заканчивая строительством космических кораблей [5, 6]. Они являются незаменимыми инструментами, обеспечивают высокую точность и эффективность работы в различных областях.

Одной из самых распространенных областей применения лазеров является медицина. С их помощью проводятся операции на глазах, коже, удаляются опухоли и рубцы. Лазерная терапия используется для лечения различных заболеваний, таких как рак, диабет, артрит и другие. Благодаря точности и мощности лазеров специалисты могут обеспечить пациентам наилучшее качество лечения.

Еще одной сферой применения лазеров является наука и исследования. С их помощью изучаются свойства различных материалов, проводятся эксперименты в физике, химии и биологии. Лазеры используются в спектроскопии, анализе материалов, создании новых материалов и компонентов.

Также лазеры широко применяются в промышленности. Они используются для резки, сварки, маркировки материалов. Лазерные устройства увеличивают производительность и качество выпускаемой продукции, позволяют экономить ресурсы и улучшать рабочие процессы.

В строительстве лазеры используются для измерения расстояний, углов, высот, для создания точных чертежей и планов строительных объектов. Они позволяют ускорить процесс строительства, повысить его точность и безопасность.

Лазеры играют важную роль в оборонной промышленности. Они используются для навигации, атаки и обороны. Лазерное оружие способно поразить цель на больших расстояниях с высокой точностью и мощностью.

В энергетике лазеры применяются для исследования плазмы, создания ядерного синтеза, очистки источников энергии. Они способны генерировать высокую энергию и использоваться для производства электроэнергии.

Спутниковая связь также не могла бы существовать без лазеров. Они используются для связи между спутниками и Землей, передачи данных с большой скоростью и точностью. Лазерные системы обеспечивают стабильную и надежную связь между объектами в космосе.

В искусстве и развлечениях лазеры также занимают важное место. Они используются для создания шоу, концертов, световых инсталляций. Лазерное освещение и проекции создают уникальные эффекты и атмосферу мероприятий.

Таким образом, лазеры являются неотъемлемой частью современного мира.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир, 1990. – 560 с.
2. Айрапетян В.С., Ушаков О.К. Физика лазеров. – М.: СГГА, 2012. – 134 с.
3. Щербаков И.А. Лазер. Большая российская энциклопедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/lazer-430c3c> (дата обращения: 15.11.2024).
4. Макаров Д. Лазер. Устройство, принцип работы, свойства, применение лазера. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/lazer.html> (дата обращения: 15.11.2024).
5. Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / под общ. ред. П.К. Галенко. – Ижевск: Удмуртский университет, 2011. – 187 с.
6. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие. – СПб.: Лань, 2016. – 304 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ АВТОЭНКОДЕРОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ СКАНИРОВАНИЯ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

**М.И. Волков**

*Томский политехнический университет, ИШФВП, гр. АЗ-05*

Научный руководитель: А. Э. Шевелев, к.ф.-м.н., научный сотрудник

Метод компьютерной томографии является одним из способов исследования внутренней структуры образца без его разрушения. Таким способом часто исследуется внутренняя структура образцов горных пород или бетонов. Исследование образцов рентгеновским излучением основывается на различии в прохождении рентгеновского излучения в зависимости от плотности объектов в породе (например, излучение спокойно проходит через воздушные поры и практически не проходит через очень плотные камни) [1].

После проведения компьютерной томографии исследуемого образца на выходе получают последовательно идущие связанные между собой изображения, которые отличаются степенью зашумленности, контрастом, типом наблюдаемого шума и многими другими параметрами [2, 3]. Помимо этого, полученные результаты будут зависеть от используемого оборудования и программного обеспечения. Качество сканирования для одного и того же томографа и программного обеспечения будет зависеть от параметров сканирования, важную роль в которых играет усреднение – процесс, при котором несколько проекций комбинируются для создания одного итогового изображения. Усреднение помогает уменьшить влияние случайных шумов и артефактов, которые могут возникнуть в процессе сканирования. Чем больше значения усреднения, тем меньше шума будет на изображении и тем больше высококачественных деталей будет сохранено.

В данной работе представлены результаты по восстановлению высококачественных деталей для отдельных объектов на изображениях.

В качестве входных данных выступали томографические изображения образца бетона. Набор данных представлял из себя пары изображений. Одна пара содержала изображения с усреднениями 1 и 4. Усреднение помогает уменьшить влияние случайных шумов и артефактов, которые могут возникнуть в процессе сканирования. Обучая нейросеть на таких данных, подавая на вход изображение с усреднением 1, а в качестве целевого – изображение с усреднением 4, получим автоэнкодер, способный улучшить качество изображений для подобного рода данных.

Обучающая выборка представляла из следующие пары изображений: на входе – изображения с усреднением 1, а на выходе – с усреднением 4. Ожидалось, что обученная нейросеть обучится на улучшение качества границ и мелких деталей на изображении. Помимо этого, такую нейросеть может быть использована для уменьшения времени сканирования похожих образцов: проводится достаточно качественное сканирование первого образца, далее нейросеть обучается на этих результатах и сканирование последующих образцов проводится с минимальным усреднением, но с дальнейшей обработкой нейросетью. Пример одной пары изображений из тестовой выборки представлен на рис. 1, а и б.

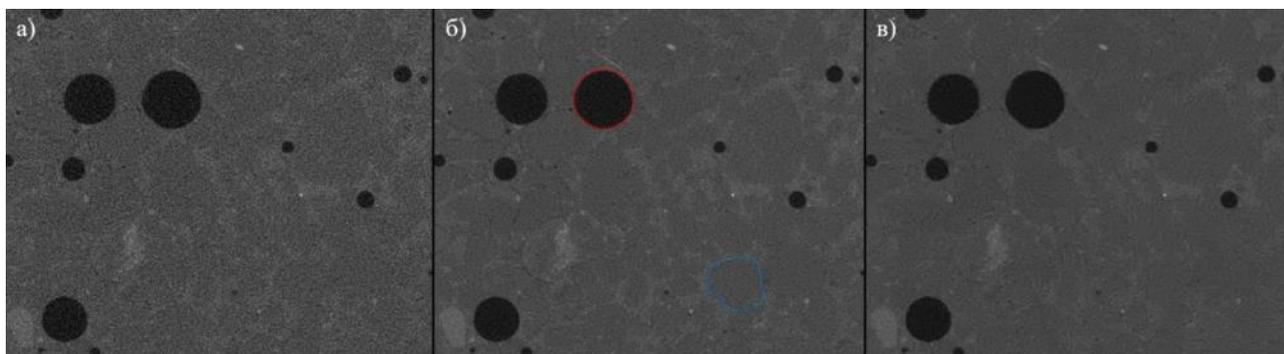


Рис. 1. Изображение среза бетона с усреднением 1 (а), с усреднением 4 (б) и изображение с усреднением 1 после обработки VM3D (в). Красным цветом показан объект воздуха, синим – объект гальки

В качестве эталонного инструмента по шумоподавлению в данной работе использован метод пространственной фильтрации VM3D, который базируется на методе Non-local means и Вейвлет преобразовании. Данный метод шумоподавления выбран вследствие простоты использования и высокой степени подавления шума на обрабатываемых изображениях (по критерию SNR) [4]. Пример проведения шумоподавления методом VM3D для изображения с усреднением 1 представлен на рис. 2, в. Среднее значение SNR, взятое для нескольких объектов, для воздуха увеличилось со значения 1,67 до 5,42, для объектов гальки с 4,35 до 12,7. К минусам данного метода можно отнести появление артефактов и размытие изображения.

В качестве нейросети использовалась U-Net архитектура [5] которая использовалась для задачи сегментации. Количество выходных каналов было изменено на значение 1, функция активации softmax заменена на линейную. Удалены слои batch\_normalization поскольку их наличие приводило к низкой эффективности работы нейросети по метрикам. Для уменьшения переобучения нейросети в несколько раз уменьшено число ее параметров (фильтров), что положительно сказалось на эффективности ее работы.

Обучение нейросети производилась с использованием библиотеки Pytorch на языке Python. Для обучения и тестирования моделей использовался ПК с видеокартой NVIDIA GeForce RTX 4090, процессор – AMD Ryzen 9 7950 16-Core 4.5 ГГц и размером оперативной памяти 64 Гб. Обучающие и проверочные данные использовались на этапе обучения модели, тестовые – для проверки результатов обучения. Для обучения и проверки нейросети использовались 85 пар изображений с размерами 2048×2048. Каждое такое изображение разбивалось на изображения

размерами  $256 \times 256$ . После этого, размер общей выборки составил 5440 изображений. В качестве метода аугментации выступали повороты изображений. После аугментации общее число изображений составило 27200. Параметры обучения представлены в табл. 1.

Таблица 3. Параметры обучения нейросети

Параметр	Значение
Число обучающих изображений ( $256 \times 256$ )	24480
Число проверочных изображений ( $256 \times 256$ )	2720
Число тестовых изображений ( $2048 \times 2048$ )	9
Batch size	16
Скорость обучения (Learning rate)	0.001
Сокращение веса (Weight decay)	0
Число эпох обучения	80
Функция потерь	MSE
Используемые метрики	PSNR, SSIM

Зависимости метрик PSNR и SSIM от числа эпох для обучающей и проверочной выборок в процессе обучения приведена на рис. 2.

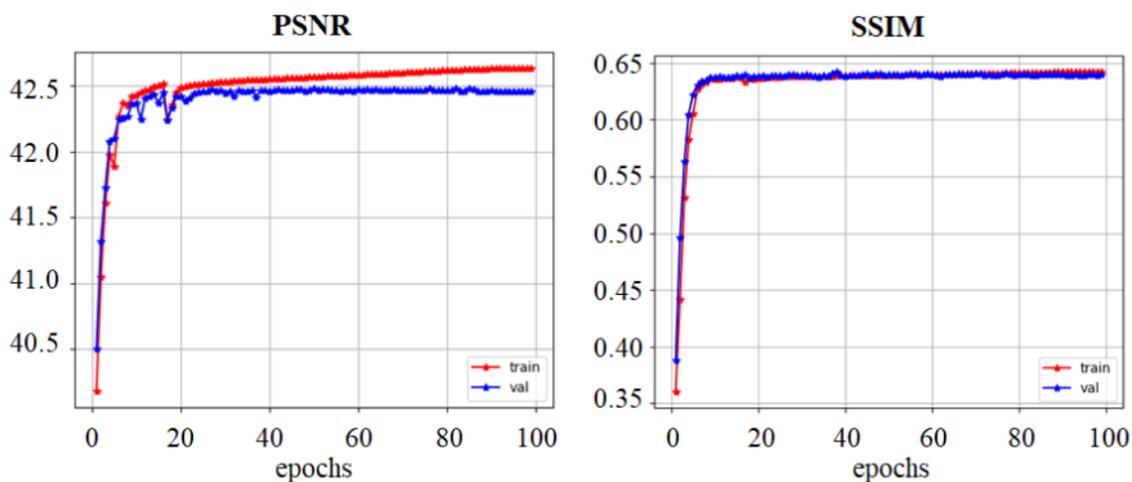


Рис. 2. Зависимость PSNR (слева) и SSIM (справа) на обучающей и проверочной выборках от числа эпох

Среднее время предсказания одного изображения размерами  $2048 \times 2048$  для нейросети составило 0,13 с (для метода VM3D составляет 6,12 с). Примеры результатов предсказания для тестовых изображений представлены на рис. 3.

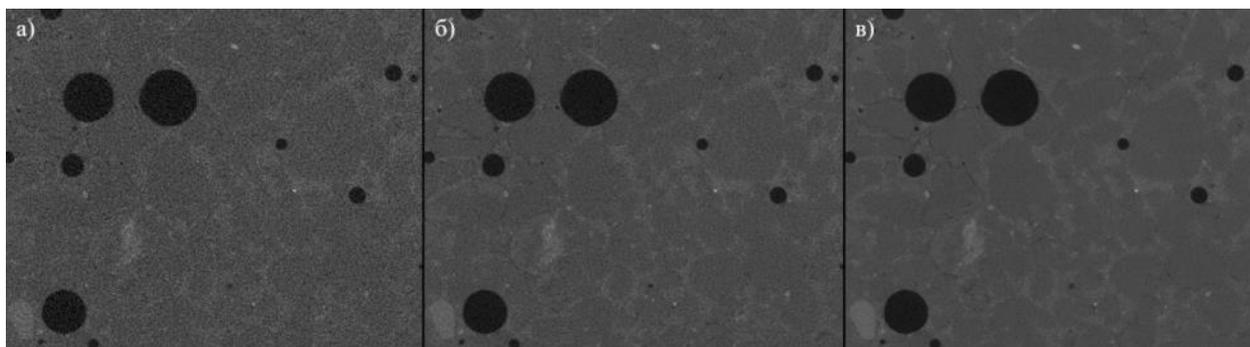


Рис. 3. Сравнение изображений с усреднениями 1 (а) и 4 (б) с результатом предсказания 1-го варианта нейросети (в)

Результаты сравнения SNR для изображений из тестовой выборки для объектов воздуха и крупной гальки представлены в табл. 2. (Данные по SNR представлены усреднены для 3х изображений).

Таблица 2. Результаты сравнения SNR для обучающих данных

	Воздух	Галька
Изображение с усреднением 1	1,66	4,98
Изображение с усреднением 4	2,94	8,71
Изображение с усреднением 1 после BM3D	5,94	14,75
нейросеть	5,45	16,05

В ходе проделанной работы реализована часть программного обеспечения по восстановлению высококачественных деталей для отдельных объектов на изображениях и проведено сравнение их результатов с результатами, полученным при шумоподавлении исходных изображений методом BM3D.

Значения SNR для объектов воздуха и гальки у 1-й вариант нейросети на тестовой выборке составили 5,45 и 16,05 соответственно, что достаточно близко к значениям от обработки изображений с усреднением 1 методом BM3D (воздух – 5,94, галька – 14,75). Помимо этого, использование 1-го варианта нейросети улучшило качество границ и мелких деталей на тестовых изображениях в отличие от BM3D. Исходя из этого данную нейросеть можно использовать для уменьшения времени сканирования похожих образцов, применяя её к изображениям с усреднением 1. Среднее время предсказания одного изображения размерами 2048×2048 для нейросети составило 0,13 с в то время как для метода BM3D это заняло 6,12 с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов М.К., Бурлин Ю.К., Калмыков Г.А. Петрофизические методы исследования кернового материала. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2008. – 115 с.
2. Digital Rocks // Browse Projects. 2024. – URL: [www.digitalrocksportal.org/projects/](http://www.digitalrocksportal.org/projects/) (дата обращения 18.11.2024).
3. Зиньков А.В., Макишин В.Н. Цифровизация керна. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. – 73 с.
4. Python package index // bm3d 4.0.1. 2024. – URL: <https://pypi.org/project/bm3d/> (дата обращения 18.11.2024).
5. Kaggle // UNet for Building Segmentation (PyTorch). 2020. – URL: <https://www.kaggle.com/code/balraj98/unet-for-building-segmentation-pytorch> (дата обращения 18.11.2024).

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ ПАК RTDS

**Д.И. Шахнович**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ41*

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В связи с постоянным развитием электрических сетей актуальной проблемой остается переход действующих объектов электросетевого хозяйства на более эффективные устройства защиты. Результаты данной работы могут быть использованы при проверке устройств релейной защиты (РЗ), что положительно отразится на надежности энергосистемы. Преимущество современных систем релейной защиты, кроме измерения и контроля совокупности параметров сети, в том, что они дополнительно оснащаются вычислительными комплексами и различными пользовательскими интерфейсами, включёнными в микропроцессорные терминалы.

В данной работе будет рассматриваться блок микропроцессорной релейной защиты БМРЗ-51 производства НТЦ «Механотроника», г. Санкт-Петербург. Блок модульной релейной защиты предназначен для установки в различных электрических устройствах для защиты от ненормальной работы сети с напряжением 6–10 кВ [6].

Данный блок является программируемым устройством с «гибкой логикой» и двухуровневым ПО. Такая гибкость и настраиваемость делают этот блок удобным и эффективным средством обеспечения надежной релейной защиты в различных условиях и на различных объектах энергетики [6].

Симулятор RTDS позволяет проводить тестирование как в разомкнутом, так и в замкнутом цикле с реальными условиями работы, что обеспечивает максимально точное моделирование силовых электронных схем.

С помощью симулятора RTDS возможно тщательно изучать влияние новых установок на электрическую сеть, обучать персонал без риска для реальной системы, проверять блоки управления генераторами и проводить тестирование систем защиты в режиме реального времени. Это позволяет создавать безопасные и эффективные сети электропередачи, а также обеспечивает проверку и анализ взаимодействия различных устройств и реле [10],[11].

Общая схема для тестирования в замкнутом цикле релейной защиты представляет собой методику, используемую для проверки и настройки систем релейной защиты электроэнергетических систем в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

Для проверки выбранных функций защит, таких как: ТО; МТЗ; ЛЗШ; ОЗЗ; ЗОФ; АПВ, скомпонована схема электрической сети (рис. 1). В качестве защищаемого объекта была выбрана ЛЭП 10,5 кВ ПС2 – ПС3.

Для создания данной модели в ПК «RSCAD/Draft» использовались такие модели как:

- модель синхронной машины;
- модель силового трансформатора;
- модели элементов шин, линий электропередач, выключатели;
- модель ШБМ и пассивной нагрузки;
- ветвь короткого замыкания.

Для проведения симуляции используется программа управления в режиме реального времени RSCAD/RunTime.

Построив графики напряжения и токов в узлах установки БМРЗ-51, найдем действующие значения (графики тока и напряжения в узлах приведены на рис. 2).

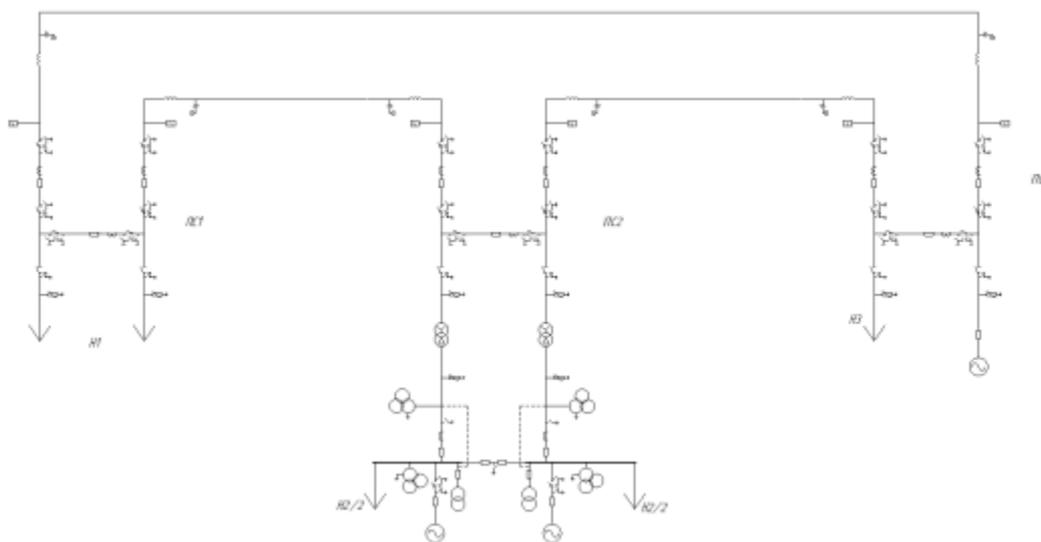


Рис. 1. Схема электрических соединений

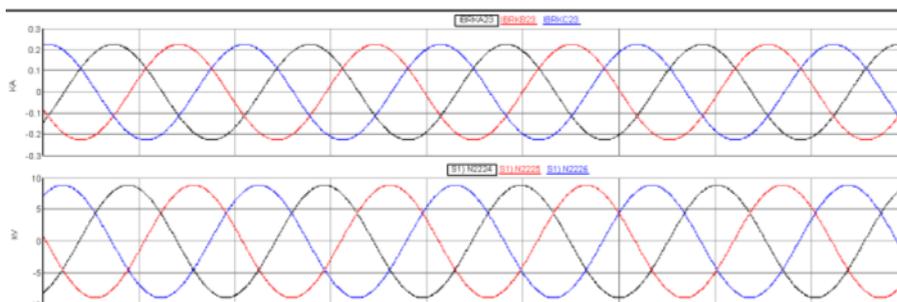


Рис. 2. График напряжения и тока в узлах в УР

Для отображения значений напряжений на шине используется трехфазный измеритель действующих значений (RMS). На рис. 3 изображен измеритель на виртуальном стенде непрерывно обновляющий значения на шине ПС2.

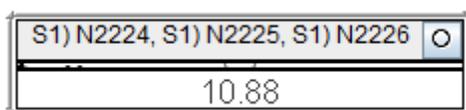


Рис. 3. Измеритель напряжения на шине в УР

Для внесения значений уставок в БМРЗ-51 необходимо первичные значения перевести во вторичные [6]. Для этого примем значение коэффициент ТТ для фазных токов  $\frac{400}{5}$ , тока нулевой последовательности коэффициент ТТ  $\frac{10,5 \cdot 10^3}{1}$ . Коэффициент ТН  $\frac{100}{\sqrt{3}}$ . На рис. 4–5 представлены значения, внесенные в блок БМРЗ-51.

Коэффициенты трансформации	Значение		Комментарий
	В блоке	В проекте	
Ктр Ia	?	80	Коэффициент трансформации трансформатора тока фазы А
Ктр Ic	?	80	Коэффициент трансформации трансформатора тока фазы С
Ктр 3I0	?	100	Коэффициент трансформации трансформатора тока 3I0
Ктр 3U0	?	181	Коэффициент трансформации трансформатора напряжения 3U0

Рис. 4. Коэффициенты трансформации

Внесение уставок ТО в БМРЗ во вторичных значениях рис. 5.

Уставка	Программа 1		Программа 2		Комментарий
	В блоке	В проекте	В блоке	В проекте	
S101	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ввод первой ступени ТО
1.0 TO PT1	8.21	8.21	3.00	3.00	Уставка по току срабатывания первой ступени ТО, А
S102	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Ввод второй ступени ТО
1.0 TO PT2	7.12	7.12	2.50	2.50	Уставка по току срабатывания второй ступени ТО, А
TO T2	0.40	0.40	0.30	0.30	Уставка по времени срабатывания второй ступени ТО, с

Рис. 5. Уставки ТО

При вводе в работу зависимой времятоковой характеристики время срабатывания первой ступени МТЗ определяется в зависимости от выбранной времятоковой характеристики.

При возникновении трехфазного КЗ при нормальной нагрузке на ЛЭП на расстоянии 8 км от ПС 2, БМРЗ зафиксировала осциллограмму, рис. 6. Также на осциллограмме можем видеть снижение значение тока КЗ, что привело к перезапуску первой ступени МТЗ и отсчета времени времятоковой характеристики.

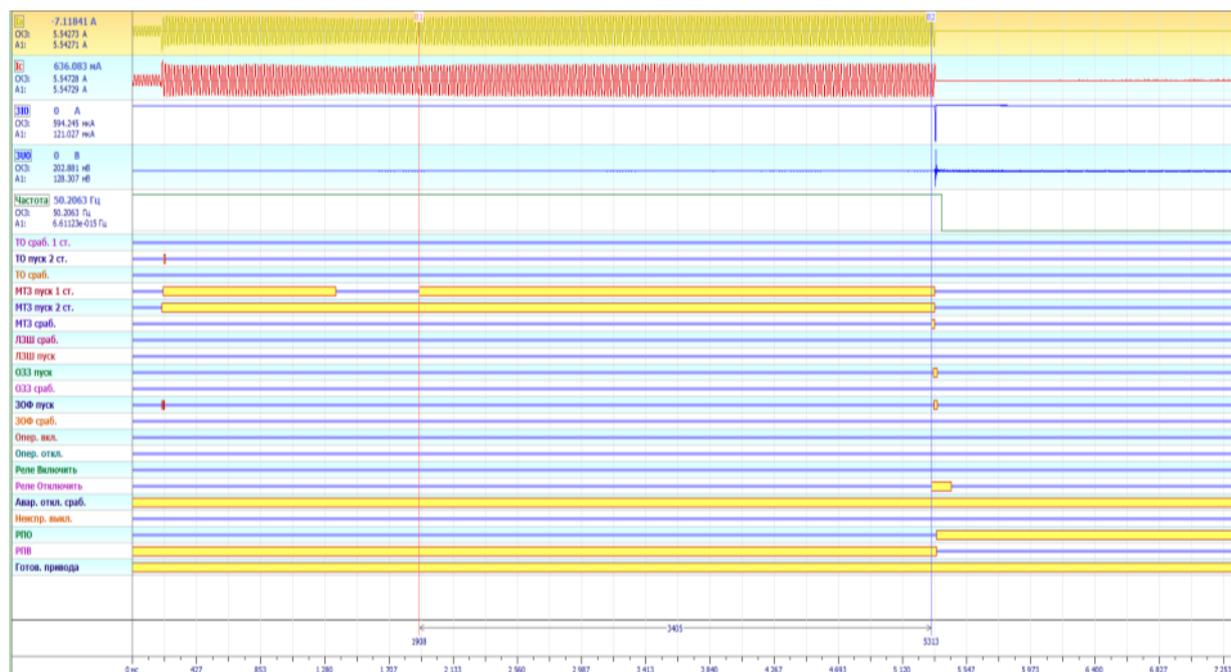


Рис. 6. Осциллограмма при возникновении трехфазного КЗ в середине ЛЭП при нормальном режиме

Время срабатывания защиты по осциллограмме:  $t_x = 3,405$  с.

Найдем время срабатывания первой ступени МТЗ при введенной в работу инверсной времятоковой характеристики по формуле (1) [6].

$$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_{C.3}}\right)^{0,02} - 1} \cdot K = \frac{0,14}{\left(\frac{6,18}{5,56}\right)^{0,02} - 1} \cdot 0,05 = 3,31 \text{ с.} \quad (1)$$

Так же стоит отметить, ток КЗ это среднее значение тока на протяжении времени выдержки времятоковой характеристики.

Пределы допустимой абсолютной/относительной основной погрешности по времени срабатывания для ступеней с зависимыми времятоковыми характеристиками для  $1,2 \leq I/I_{C.3} \leq 20$ : при  $t \leq 1$  с составляют не более  $\pm 30$  мс, при  $t > 1$  с составляют не более 5 %. Погрешность расчетного и измеренного времени вычислим по формуле (2) [6].

$$\Delta t = \frac{t_x - t}{t} \cdot 100 \% = \frac{3,405 - 3,31}{3,31} \cdot 100 \% = 3,02 \% \quad (2)$$

Погрешность не превышает теоретическое значение, МТЗ с времятоковой характеристикой работает исправно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копьев В.Н. Релейная защита. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита. – 5-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1974. – 679 с.: ил.
3. Кривенков В.В. Новелла В.Н. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учебн. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 328 с., ил.
4. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматика и релейная защита электроэнергетических систем. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2017.
5. Никитин А.А. Нелинейные элементы электронных и микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики. – Чебоксары, 2021. – 108 с.
6. Руководство по эксплуатации: Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ / НТЦ «Механотроника». – Санкт-Петербург, 2023. – 109 с.

7. Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А. Основы техники релейной защиты. – 6-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 375 с.: ил.
8. Серебряков А.С., Семенов Д.А., Чернов Е.А. Автоматика: учебник и практикум для вузов; под общ. Ред. А.С. Серебрякова. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2021. – 476 с.
9. Испытательные системы серии «РЕТОМ» и их применение для проверки устройств релейной защиты и автоматики: учебное пособие / С.М. Юдин [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011.
10. Руководство по эксплуатации и настройке RTDS. – Чебоксары, 2015. – 311 с.

## ПРИКЛАДНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

**Г. Поспелов**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А13*

Научный руководитель: В.В. Гречушников, Старший преподаватель, ОЭЭ

### **Введение**

В настоящее время на большинстве предприятий прогнозирование энергопотребления осуществляется в «ручном» режиме, когда прогноз проводится аналитическим методом одним из сотрудников предприятия на основе прогнозов погоды, представленных провайдером, и фактических данных. Простейших арифметических операций недостаточно для обеспечения требований точности, которые устанавливают современные тенденции развития цифровых технологий и подходы к технико-экономическому управлению.

Эффективным решением данной задачи является уход от человеческого ресурса к автоматизированной математической модели, прогнозирующей графики энергопотребления за необходимый период. Такой подход к прогнозированию позволяет сократить время и повысить точность прогнозирования.

Любой потребитель электроэнергии при планировании доходов и расходов всегда учитывает объём потребляемой электроэнергии, и, соответственно финансы на оплату запланированных объёмов потреблённой энергии. При отклонении фактического объёма потреблённой электроэнергии от запланированного, возникают дополнительные финансовые расходы, которые необходимо покрывать, что приводит к незапланированному росту расходов.

Таким образом, решение данной проблемы является актуальной для потребителя с финансовой точки зрения, а с точки зрения энергосбытовой компании знание объёмов энергопотребления на ближайший период позволяет заранее подготавливаться к часам максимальной и минимальной нагрузки. Тем самым более эффективно управлять режимом электростанции и снижать издержки при производстве электроэнергии.

### **Выбор нейронной сети для решения поставленной задачи**

В табл. 1 приведены примеры поставленных задач и соответствующие ИНС, способные частично или полностью решить поставленную задачу.

Обучение – одно из главных преимуществ искусственных нейронных сетей перед традиционными инструментами моделирования и прогнозирования. В процессе обучения НС способна на основе переданных ей данных («опыт прошлых лет») вырабатывать новые. Однако полагаться только на определённую нейронную сеть, например, Кохонена или Перцетрон не стоит.

Таблица 4. Соотношение задач и ИИ, используемых для решения этой задачи

Задача	Требование	Название ИНС и её алгоритм обучения
Идентификация и моделирование	Моделирование электромагнитного и электромеханического переходных процессов	Гибридная сеть прямого/обратного обучения
Контроль	Поддержка установившегося режима энергосистемы	Гибридная сеть прямого/обратного обучения
Прогнозирование	Прогнозирование профиля нагрузки (сут.) Прогнозирование краткосрочных и долгосрочных нагрузок	Сети Кохонена с самоорганизацией Перцептрон

Вместо этого для решения поставленной задачи стоит использовать комплекс методов, каждый из которых, по отдельности, имеет свои преимущества: НС позволяют выявить скрытые и неочевидные взаимосвязи входных и выходных данных, эволюционное моделирование позволяет отобрать на основе «естественного отбора» новых особей, наиболее удовлетворяющих заданным критериям оценки, фильтр Винера показывает в виде временных рядов правильные результаты в обработке данных. Совокупность трех вышеперечисленных подходов позволит исключить погрешность, вызванную применением метода эволюционного моделирования, а также ошибок НС.

### Прогнозирование потребления электрической энергии комплексной математической моделью

Для создания комплексной математической модели построения прогноза потребляемой электрической энергии предлагается объединить каждый метод с помощью линейного выражения:

$$r(t) - (a_1v(t) + a_2s(t) + a_3m(t)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $r(t)$  – настоящий объём потребления электроэнергии;  $v(t)$  – функция зависимости объёма потребляемой электроэнергии от времени, полученная с применением фильтра Винера;  $s(t)$  – функция зависимости объёма потребляемой электроэнергии от времени, полученная с применением ИНС;  $m(t)$  – функция зависимости объёма потребляемой электроэнергии от времени, полученная с применением эволюционного моделирования.

Полученные в результате решения данного выражения коэффициенты  $a_i \geq 0, \sum_i a_i = 1, i = 1,2,3$  будут использованы для построения прогноза потребляемой электроэнергии потребителем.

Наиболее подходящим показателем качества комплексной математической модели является коэффициент расхождения Тэйла – показатель, наглядно показывающий отклонение действительного значения от спрогнозированного; в числителе этого показателя – среднеквадратичная ошибка прогноза, а в знаменателе – корень квадратный из среднеквадратичного значения действительного значения:

$$\vartheta = \frac{\sqrt{\sum (P_t - A_t)^2}}{\sqrt{\sum A_t^2}}, \quad (2)$$

где  $P_t$  и  $A_t$  – соответственно прогнозируемое и действительное (реализованное) изменение переменной; Соотношение, показанное в формуле выше, равное 0, то есть  $\vartheta = 0$ , возможно только в случае равенства  $P_t = A_t$  (случай совершенного прогнозирования);  $\vartheta = 1$ , когда процесс прогнозирования приводит к среднеквадратичной ошибке;  $\vartheta > 1$ , когда предсказанный прогноз сильно не совпадает с действительным.

Коэффициент расхождения Тейла показывает несовпадение прогнозируемой и действительной величин и чем ближе это соотношение к нулю, тем ближе сравниваемые величины.

По результатам исследований, проведённых на основе базы данных показателей энергопотребления в Костромской области за 2005 год, показатель расхождения Тейла составил: для фильтрации Винера – 0,0329, для эволюционного моделирования – 0,0436, для нейронной сети – 0,0322 и для комплекса методов – 0,0239.

Из результатов проведённого исследования видно, что объединение нескольких методов прогнозирования позволило увеличить точность прогнозирования, которая выросла в 1,3—1,8 раз по сравнению с каждым методом по отдельности.

Однако применение сразу нескольких методов вычисления и прогнозирования. Закономерно, привело к увеличению временных затрат, уменьшить которые возможно с применением параллельных вычислений. Параллельная реализация каждого из методов прогнозирования приведёт к сокращению количества времени, затрачиваемые на прогнозирование энергопотребления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсеева А.В. Прогнозирование энергопотребления при помощи гибридного алгоритма с применением технологии CUDA: научная работа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-energopotrebleniya-pri-pomoschi-gibridnogo-algoritma-s-primeneniem-tehnologii-cuda](https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-energopotrebleniya-pri-pomoschi-gibridnogo-algoritma-s-primeneniem-tehnologii-cuda) (дата обращения: 30.10.2024).
2. Ильиных М.В. Применение методов искусственного интеллекта при прогнозировании энергопотребления: научная статья [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-dlya-prognozirovaniya-elektropotrebleniya-energobytovoy-kompanii](https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-dlya-prognozirovaniya-elektropotrebleniya-energobytovoy-kompanii) (дата обращения: 30.10.2024).
3. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
4. Пискунов Е.Ю. Модификация коэффициента Тейла: научная статья [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-koeffitsienta-teyla](https://cyberleninka.ru/article/n/modifikatsiya-koeffitsienta-teyla) (дата обращения 9.10.2024).

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**А.В. Бахмадов**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Э2 ВИЭ, группа Э2-13М*

Научный руководитель: Е.Ю. Локтионов, к.т.н., доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана

В современном мире, где возобновляемые источники энергии играют ключевую роль в устойчивом развитии, важность точного анализа и прогнозирования производительности энергосистем постоянно растет. Эффективное использование данных, связанных с производительностью солнечных панелей, позволяет не только оптимизировать их работу, но и развивать более точные модели прогнозирования, основанные на машинном обучении. Одним из ключевых этапов в этом процессе является сбор и анализ разнообразных данных, отражающих как характеристики окружающей среды, так и технические параметры работы систем. Настоящее исследование представляет собой подробный набор данных, собранных в различных местах, который может быть использован для разработки, обучения и тестирования моделей машинного обучения.

Данные, собранные в 12 местах, будут использованы для обучения и тестирования моделей машинного обучения – данные доступны для дальнейшего анализа [1].

Тестовые системы в каждом месте представляют температуру окружающей среды, относительную влажность, временную метку и выходную мощность для каждой панели. Высота, широта и четыре погодные переменные из NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) также были добавлены в набор данных. Метеостанции, которые регистриро-

вали данные NOAA о скорости ветра, облачности, видимости и атмосферном давлении, располагались в аэропортах не далее, чем в 8 км от каждой испытательной системы [2]. Данные о облачности измеряли самый нижний слой облаков с непрозрачностью 5/8 или более, а значение 22 км указывало на отсутствие облачного покрова.

Данные включают 15 независимых параметров и одну зависимую переменную, которая является выходной мощностью PolyPwr. Необработанные данные, полученные с этих сайтов, были предварительно обработаны, чтобы сделать их пригодными для обучения. Коды для всех методов обучения были написаны на Python. Была получена корреляционная матрица для выведения статистической связи между параметрами, чтобы предотвратить переобучение данных (рис. 1). Значения матрицы были получены с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Эта тестовая статистика измеряет статистическую связь и находит связь между различными непрерывными переменными. Она использует формулу ковариации. Она измеряет линейную корреляцию между двумя переменными, скажем, M и N, и ее диапазон составляет от -1 до +1.

RFE – это метод отбора признаков, который итеративно удаляет наименее важные признаки из модели, пока не останется заданное число признаков. На рис. 2 показана относительная важность каждого признака, рассчитанная RFE. Этот анализ указывает на то, что для прогнозирования целевой переменной наибольшее влияние оказывают временные характеристики (час) и климатические условия (температура). Географическое положение (широта) также играет заметную роль. В то время как дата, месяц, время и влажность оказывают меньшее влияние на предсказание.

На рис. 3 представлен график зависимости перекрестной валидационной оценки (Cross validation score) от количества выбранных признаков (Number of features selected) для модели RFECV (Recursive Feature Elimination with Cross-Validation). График демонстрирует монотонно возрастающую кривую с насыщением. Ось X отображает количество выбранных признаков от 1 до 14, а ось Y показывает значение перекрестной валидационной оценки (R2) от 0 до 0,7. Кривая имеет следующие характеристики:

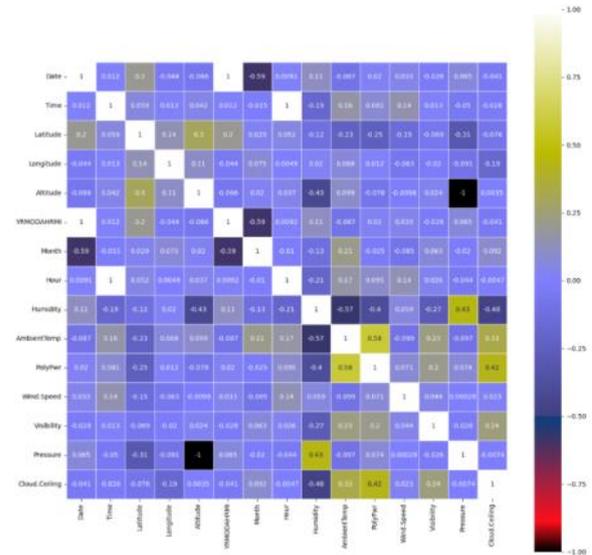


Рис. 1. Матрица корреляции

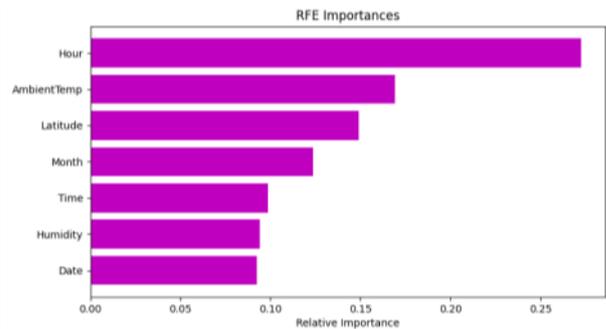


Рис. 2. Диаграмма важности признаков (RFE)

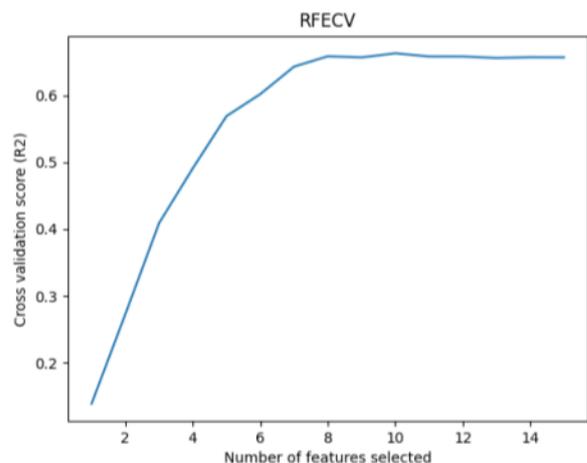


Рис. 3. Зависимость перекрестной валидационной оценки

- быстрый рост в начале (от 1 до 6 признаков);
- замедление роста и выход на плато примерно после 8 признаков;
- максимальное значение R2 достигается около 0,65–0,7.

Добавление новых признаков сначала значительно улучшает производительность модели, а затем наступает насыщение, когда дополнительные признаки уже не приносят существенного улучшения. Данный анализ позволяет определить оптимальное количество признаков для модели, балансируя между сложностью модели и ее производительностью.

На рис. 4 представлены распределения истинных и предсказанных значений, полученные с использованием трех различных моделей: регрессионного леса (RFR), и многослойного перцептрона (MLP). Фиолетовая область представляет собой плотность распределения истинных значений. Красная кривая отображает плотность распределения предсказанных значений с помощью модели RFR, а зеленая кривая – с помощью модели MLP. Визуально можно оценить соответствие предсказанных значений каждой модели распределению истинных значений.

Наблюдается, что кривые предсказанных значений для обеих моделей (RFR и MLP) в целом следуют за формой кривой истинных значений. Однако, визуально, кривая, построенная по предсказаниям модели RFR, кажется более близкой к кривой истинных значений, чем кривая, построенная по предсказаниям модели MLP, особенно в области значений, близких к максимуму.

Сравнительный анализ эффективности двух моделей машинного обучения представлен в табл. 1.

Средняя абсолютная ошибка (MAE): Измеряет среднее абсолютное отклонение предсказанных значений от фактических значений. Более низкое значение MAE указывает на лучшую точность модели. В данном случае, RFR демонстрирует меньшую MAE, чем MLP, что свидетельствует о её большей точности. Среднеквадратичная ошибка (RMSE): Измеряет среднеквадратичное отклонение предсказанных значений от фактических значений. RMSE чувствительнее к большим ошибкам, чем MAE. Аналогично MAE, RFR превосходит MLP по этой метрике. Коэффициент детерминации (R2): Показывает долю дисперсии зависимой переменной, объясняемую моделью. Значение R2 варьируется от 0 до 1, где 1 соответствует идеальной модели. RFR демонстрирует более высокое значение R2, чем MLP, что указывает на лучшее соответствие модели данным.

Результаты показывают, что модель RFR превосходит модель MLP по всем трем использованным метрикам, что свидетельствует о её большей эффективности в данной задаче регрессии.

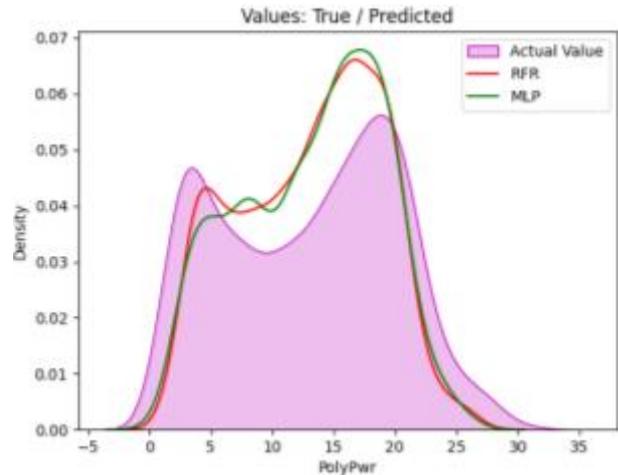


Рис. 4. Распределение истинных и предсказанных значений

Таблица 1. Сравнение эффективности моделей RFR и MLP по метрикам MAE, RMSE и R2

Метрики	RFR	MLP
MAE	2,598470	2,892070
RMSE	3,954061	4,162410
R2	0,698836	0,666262

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hines P.A., Wagner T.J., Koschnick C.M., Schuldt S.J. Analyzing the Efficiency of Horizontal Photovoltaic Cells in Various Climate Regions // J. Energy Nat. Resour. – 2019. –V. 8. – P. 77–86. [CrossRef]
2. National Oceanic and Atmospheric Administration. – National Center for Environmental Information. – 2019. Available online: [https:// www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/](https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/) (accessed on 24 October 2024).

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОВМЕСТНО С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ ПРИ РАБОТЕ ИНВЕРТОРА В РЕЖИМЕ «ВЕДУЩИЙ»**

**П.П. Радько, Я.Ю. Малькова**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А4-42*

Научный руководитель: А.А. Суворов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### **Введение**

Основной проблемой эксплуатации возобновляемых источников энергии является стохастический характер первичного источника, иначе говоря, нестабильность силы ветра для ветроэлектрических установок (ВЭУ) и солнечной инсоляции для фотоэлектрических установок (ФЭУ). При этом данную проблему решить почти невозможно, из-за чего коэффициент использования установленной мощности объектов возобновляемой энергетики является наименьшим среди остальных типов электростанций (14,4 % для ФЭУ и 28,31 % для ВЭУ) [1].

Системы накопления электрической энергии за счет способности накапливать избыточные объемы электроэнергии, производимые объектами ВИЭ в периоды пиковой выработки, с целью ее выдачи в другие часы, позволяют существенно увеличить эффективность использования возобновляемых источников. Примером успешного применения этого подхода служит проект, реализованный во Франции на острове Ла-Реюньон, где была установлена система накопления электрической энергии (СНЭЭ) с аккумуляторной батареей энергоемкостью 9 МВт·ч в составе солнечной электростанции установленной мощностью 9 МВт [2]. Российским примером совместной работы ФЭУ и СНЭЭ можно считать Бурзянскую солнечную электростанцию мощностью 10 МВт со встроенной системой накопления электроэнергии емкостью 8 МВт·ч. [3]

Тенденция внедрения СНЭЭ для совместной работы с ВИЭ касается в том числе и в распределенной генерации. В таких условиях улучшение стабильности электроснабжения перекликается в том числе с экономической выгодой: максимизация потребления электроэнергии, вырабатываемой собственными ФЭУ, а также минимизация экспорта ее излишков в энергосистему является более предпочтительным режимом работы [4].

Однако для корректной взаимосвязи объекта ВИЭ и СНЭЭ, а также для эффективного учета заряда необходимы системы управления инвертором, позволяющие оценивать и контролировать соответствующие параметры. При этом стоит отметить, что наиболее распространены топологии, при которых к одному инвертору подключены как объекты ВИЭ, так и СНЭЭ, что вынуждает использовать двунаправленный гибридный инвертор с продвинутой системой управления. Конфигурация системы управления на базе виртуального синхронного генератора ВСГ [5] позволяет учесть сложную топологию энергосистемы с совместно работающими возобновляемыми источниками и системами накопления, обеспечивая корректное регулирование режимных параметров в темпе переходного процесса.

### **Исследуемая модель**

Наиболее наглядно сравнение эффективности системы электроснабжения с накопителями электрической энергии и без них приведено в [6]. В данной работе формируется топология системы управления гибридным инвертором на базе ВСГ, а также приводится топология подключения объекта распределенной генерации (СНЭЭ, ФЭУ, инвертор и фильтр) к электрической сети (рис. 1).

Затем проводится моделирование различных возмущений в 18-узловой системе, схожей с европейской распределительной сетью низкого напряжения. В эту систему, приведенную на рис. 2, включены сразу три объекта распределенной генерации (DG).

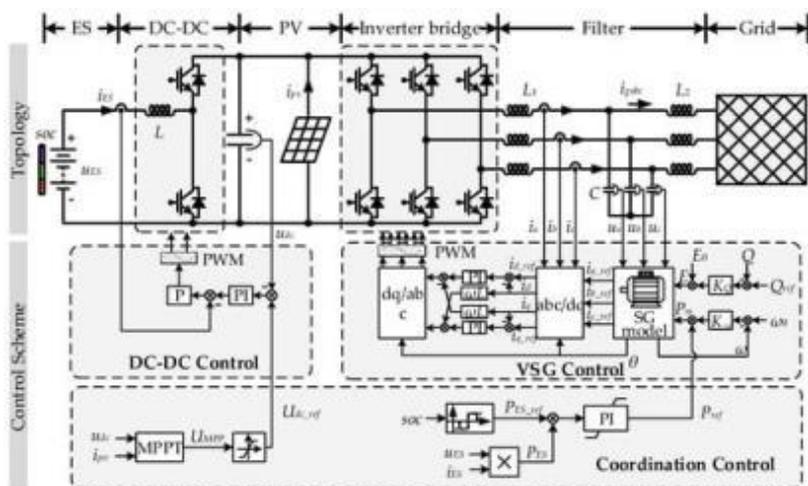


Рис. 1. Схема ВСГ при исследовании повышения эффективности системы электроснабжения с объектами ВИЭ

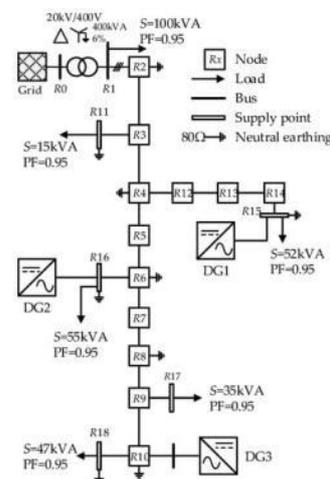


Рис. 2. Топология модели при исследовании повышения эффективности системы электроснабжения с объектами ВИЭ

### Результаты экспериментов

В качестве возмущений в данной работе выступают изменение нагрузки в узле R11 от 15 до 25 кВт; трехфазное короткое замыкание в узле R17; изменение солнечной инсоляции на  $50 \text{ Вт/м}^2$  в DG3. Результаты приведены на рис. 3–5.

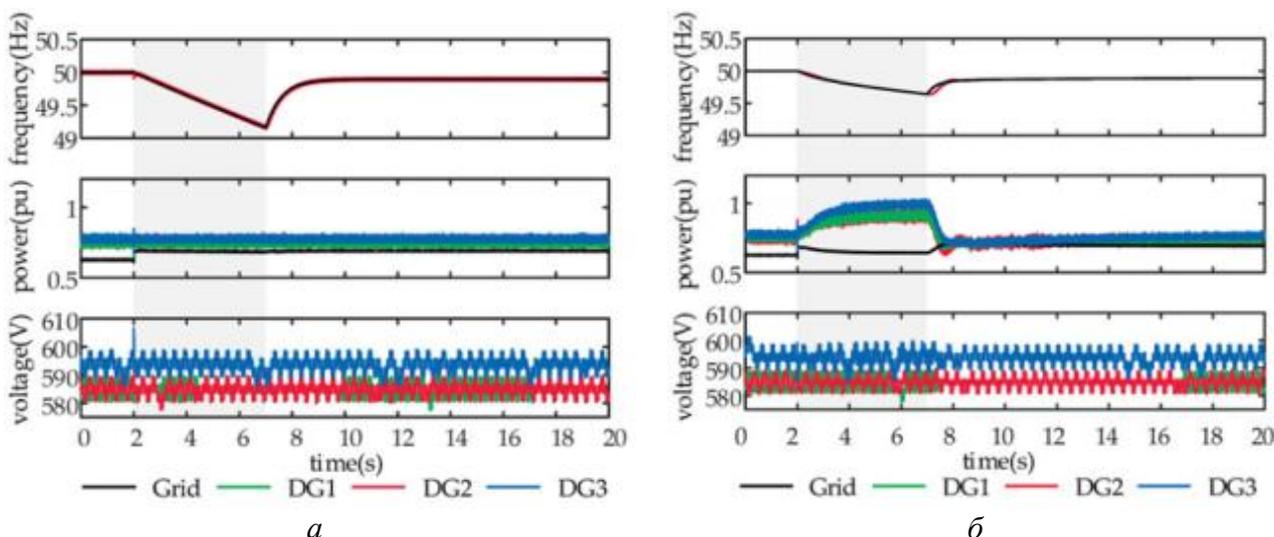


Рис. 3. Осциллограммы частоты, активной мощности и напряжения при увеличении нагрузки при использовании: а – ФЭУ; б – ФЭУ, СНЭЭ и ВСГ

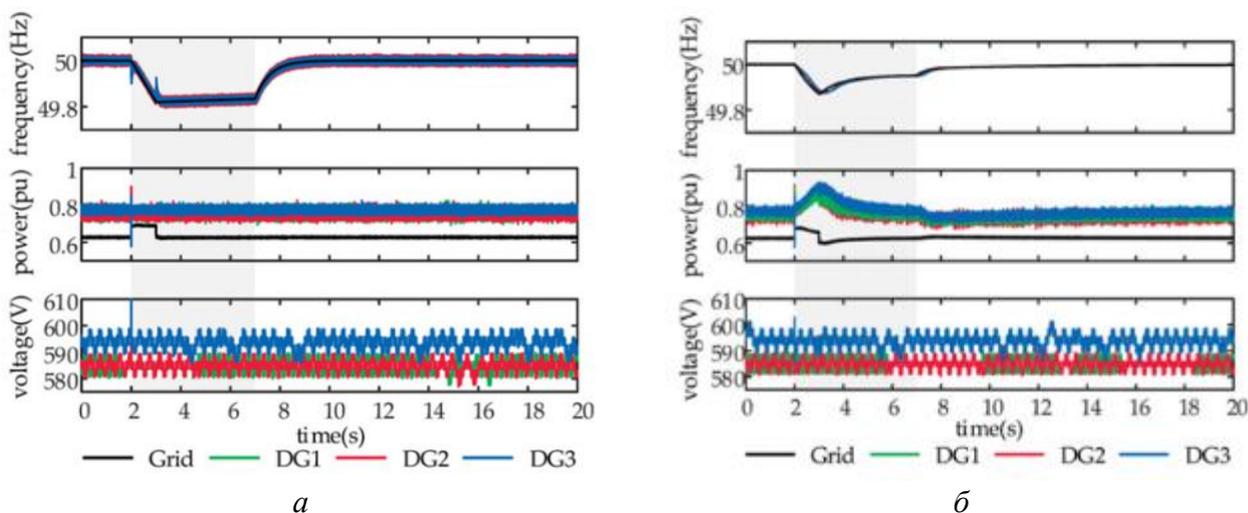


Рис. 4. Осциллограммы частоты, активной мощности и напряжения при трехфазном коротком замыкании при использовании: а – ФЭУ; б – ФЭУ, СНЭЭ и ВСГ

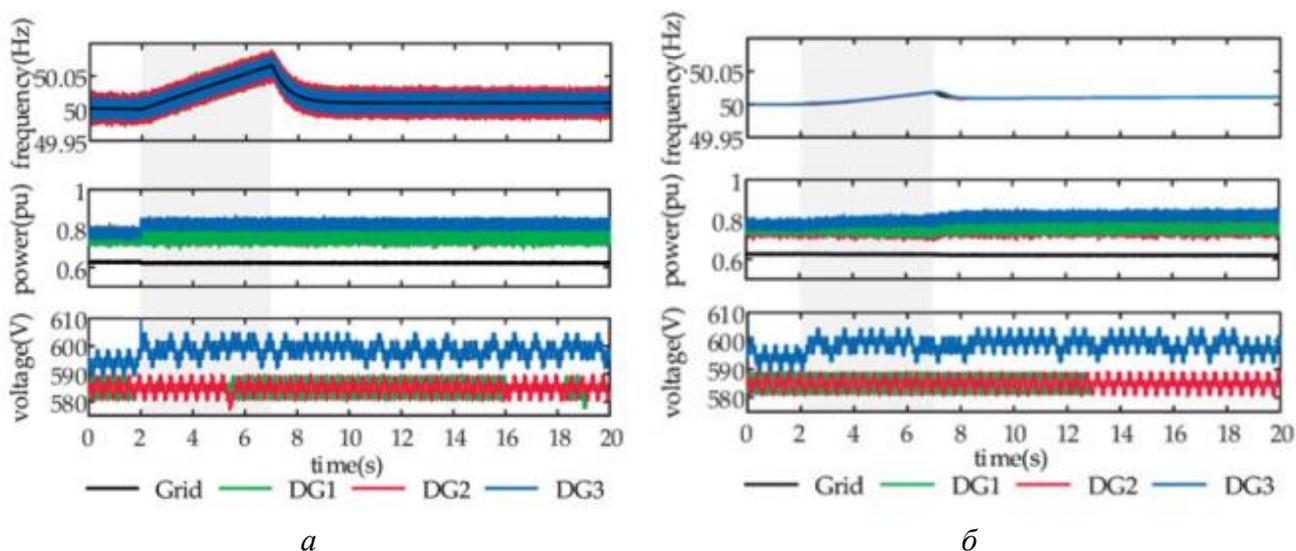


Рис. 5. Осциллограммы частоты, активной мощности и напряжения при изменении инсоляции при использовании: а – ФЭУ; б – ФЭУ, СНЭЭ и ВСГ

### Анализ результатов и развитие структуры виртуального синхронного генератора

Из результатов видно, что применение СНЭЭ с ВСГ позволяет значительно сократить отклонения значений режимных параметров (в частности частоты) от номинальных, за счет своевременного использования накопленной активной мощности. В случае изменения нагрузки предельное отклонение частоты сокращается с 0,87 до 0,25 Гц, обеспечивая сокращение данного параметра на 70 %. Аналогичная картина наблюдается и при моделировании коротких замыканий. Предельное отклонение частоты сокращается примерно на 40 %, при том, что при использовании СНЭЭ и ВСГ частота сводится к номинальному значению более плавно. При изменении инсоляции отклонение частоты сокращается на 65 % за счет поступательного набора мощности.

Также стоит отметить, что поскольку система управления на основе ВСГ позволяет добавлять и изменять контуры управления, появляется множество работ, посвященных модернизации конфигурации ВСГ. Исследования сосредоточены на обеспечении более адаптивного регулирования параметров, таких как виртуальный момент инерции [7, 8] и коэффициент

демпфирования [9, 10]. Помимо этого, существуют работы по добавлению вспомогательных контуров, к примеру, для коррекции демпфирования [11] или стабилизации по напряжению [12].

### Выводы и рекомендации по модернизации систем электроснабжения

Учитывая множество структур ВСГ, необходимо выбрать и оптимизировать систему управления под конкретные рассматриваемые схемно-режимные условия. Как правило все структуры ВСГ оказывают благоприятное влияние на переходные процессы по сравнению с традиционной системой управления, однако нагромождение лишними контурами усложняет настройку и может негативно сказаться на адаптивности системы управления.

Также требуется учесть, что помимо СНЭЭ к инвертору подключены и объекты ВИЭ, а значит в регулировании режимных параметров могут участвовать не только накопители, тем более в случае обеспечения на объектах ВИЭ резерва мощности. Распределение задач в плане регулирования и контроля также доступно в случае применения системы управления на основе ВСГ, чем можно воспользоваться на этапе проектирования системы электроснабжения.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00004.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.soups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/>
2. IRENA. Electricity Storage Valuation Framework: Assessing system value and ensuring project viability. 2020. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/>
3. Немченко А.В., Короткий Р.П., Ханин Ю.И., Лихолетов Е.А. Особенности инновационного развития возобновляемых источников энергии на примере солнечных электростанций // МНИЖ. – 2021. – № 6-1 (108).
4. Георгиевский И. Д. Увеличение доли генерирующего оборудования на основе ВИЭ в составе энергосистем за счет применения систем накопления электроэнергии // Всероссийская Школа Молодых Ученых. – С. 38.
5. Shadoul M., Ahshan R., AlAbri R.S., Al-Badi A., Albadi M., Jamil M.A. Comprehensive Review on a Virtual-Synchronous Generator: Topologies, Control Orders and Techniques, Energy Storages, and Applications // Energies. – 2022. – V. 15. – P. 8406. <https://doi.org/10.3390/en15228406>
6. Xu H., Su J., Liu N., Shi Y. A Grid-Supporting Photovoltaic System Implemented by a VSG with Energy Storage // Energies. – 2018. – V. 11. – P. 3152. <https://doi.org/10.3390/en11113152>
7. Alipoor J., Miura Y., Ise T. Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2015. – V. 3, no. 2. – P. 451–458. doi: 10.1109/JESTPE.2014.2362530.
8. Hu Y., Wei W., Peng Y., Lei J. Fuzzy virtual inertia control for virtual synchronous generator // 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China. – 2016. – P. 8523–8527. doi: 10.1109/ChiCC.2016.7554718.
9. Li D., Zhu Q., Lin S., Bian X.Y. A self-adaptive inertia and damping combination control of VSG to support frequency stability // IEEE Trans. Energy Convers. – 2017. – V. 32. – P. 397–398.
10. Cloughley M., Muttaqi K.M. Du Haiping. Damping of low-inertia machine oscillations using Takagi-Sugeno stabiliser tuned by genetic algorithm optimisation to improve system stability // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2014. – V. 8, no. 2. – P. 339–352.
11. Dong S., Chen Y.C. Adjusting synchronverter dynamic response speed via damping correction loop // IEEE Trans. Energy Convers. – 2017. – V. 32. – P. 608–619.
12. Esfahani M.M., Habib H.F., Mohammed O.A. Microgrid Stability Improvement using a Fuzzy-Based PSS Design for Virtual Synchronous Generator // SoutheastCon. – 2018. – St. Petersburg, FL, USA, 2018. – P. 1–5. doi: 10.1109/SECON.2018.8478982.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТЕВОГО ИНВЕРТОРА В РЕЖИМЕ «ВЕДУЩИЙ» В ОДНОМАШИНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

**Б.Д. Малюта**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа АЗ-42*

Научный руководитель: А.А. Суворов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### **Введение**

В современных энергосистемах (ЭС) все большую роль играют силовые преобразователи (СП). Они активно используются в составе устройств FACTS, в различных нагрузках и в генерации: так, значительное число генерирующих электроустановок на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – к таковым относятся солнечные панели и ветроустановки 4-го типа – подключаются к энергосистемам посредством СП – инверторов. Для управления такими преобразователями, как правило, используется подход, согласно которому инвертор является «ведомым» по отношению к сети [1]. Таким образом, инвертор «подстраивается» под частоту сети, а скорость изменения частоты и амплитуды выходного тока/напряжения зависит только от инерционности силовых ключей и регуляторов. Следствием этого является существенное снижение общей инерции энергосистемы, что, с учетом невозможности регулирования частоты и амплитуды напряжения в таких инверторах, а также особенностей контуров фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1], приводит к значительному ухудшению динамических свойств ЭС.

Для решения вышеуказанных проблем была предложена иная структура управления СП. Согласно ей, инвертор работает как «ведущий» по отношению к сети, самостоятельно формируя частоту и амплитуду выходного напряжения. Одним из наиболее распространённых подходов к реализации такой структуры является виртуальный синхронный генератора (ВСГ). В рамках данного подхода СП имитирует работу синхронного генератора, обеспечивая за счёт алгоритмов традиционный инерционный отклик и возможность участия в процессах регулирования частоты и напряжения.

В то же время, ввиду новизны данного подхода, актуальными являются вопросы исследования его влияния на характер переходных процессов в ЭС, взаимодействия с другими СП нагрузок и генерирующих установок, а также с традиционными синхронными машинами [2, High penetration]. Для исследования данного влияния активно применяется инструментальный математического моделирования, предоставляющий широкий спектр способов анализа процессов, протекающих в ЭС с СП. В рамках данного доклада проводится анализ динамических свойств одномашиной ЭС с СП на базе алгоритма ВСГ-Т. Для этого используется анализ в области как больших, так и малых сигналов.

Доклад структурирован следующим образом: в первой части приводится описание модели и алгоритма управления, затем проводится модальный анализ и анализируются его результаты, после чего приводятся и анализируются результаты моделирования в мгновенных значениях.

### **Структура исследуемой системы**

Одномашиная ЭС, модель которой была использована для исследования, приведена на рис. 1. Она состоит из энергосистемы, в соответствии с теоремой Тевенена представленной в виде трёхфазного источника напряжения и RL-сопротивления, трёхфазного инвертора, подключённого к ЭС через RLC-фильтр на стороне переменного тока, и источника постоянного напряжения на стороне постоянного тока инвертора.

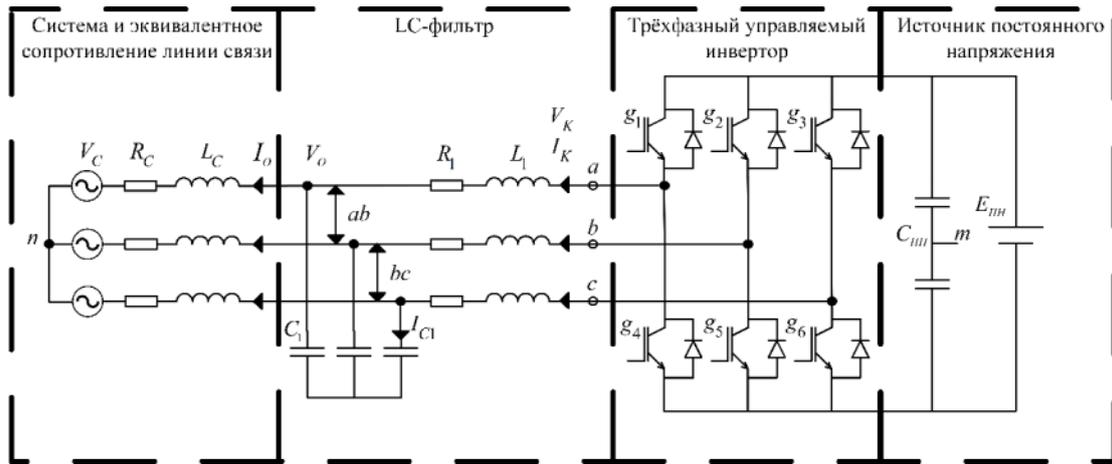


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой ЭС

Структурная схема алгоритма управления инвертором приведена на рис. 2 [1].

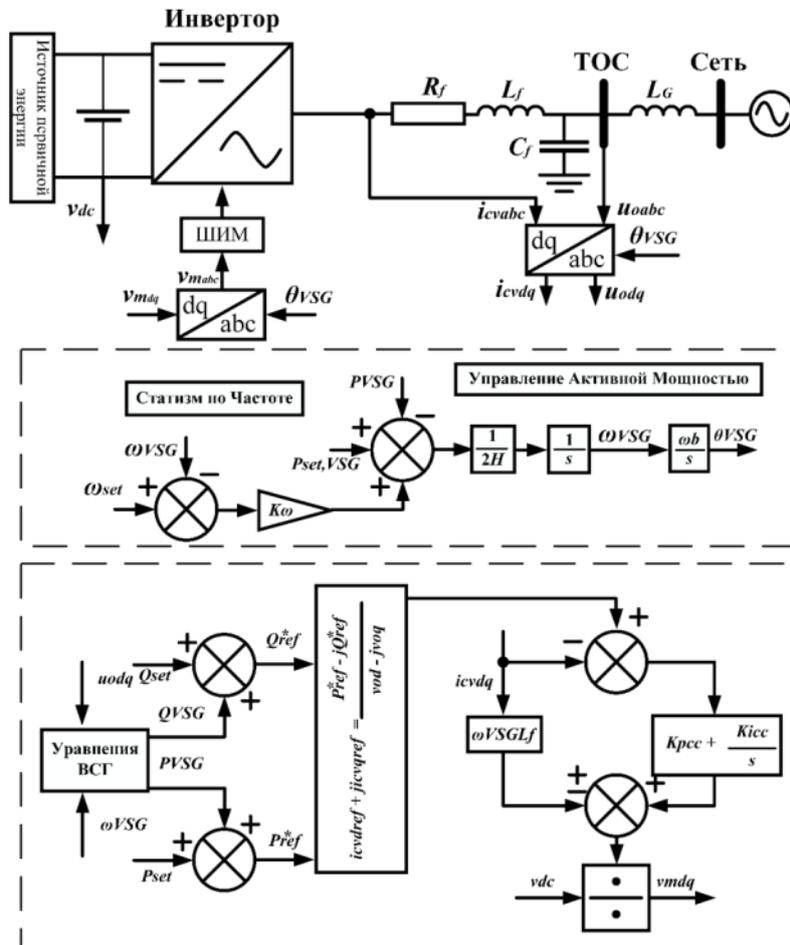


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ВСГ-Т

В данном алгоритме отсутствует контур ФАПЧ, таким образом для dq-преобразования выходных токов и напряжений используется собственный угол инвертора, определяемый из уравнения движения. Также реализован функционал статизма по активной и реактивной мощностям. Управляющие воздействия для ШИМ получают посредством ПИ-регулятора по току.

## Модальный анализ

Модальный анализ основывается на понятии мод колебаний, характеризующих характер возможных колебательных процессов в рассматриваемой системе. Для их расчёта необходимо составить модель в пространстве состояний и линеаризовать её. Матрицу полученных коэффициентов при переменных состояния называют матрицей состояния системы, а моды в таком случае являются собственными числами для данной матрицы.

Рассматриваемая модель обладает 14-м порядком и, ввиду ограничений на объём доклада, не может быть в нём представлена. Рассчитанные моды колебаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. Собственные числа исследуемой системы

№	Величина	Частота, Гц	Декремент	№	Величина	Частота, Гц	Декремент
1,2	$-10,3 \pm 4354,5i$	693,04	0,00	9,10	$-55,6 \pm 99,2i$	15,79	0,49
3,4	$-22,9 \pm 3883,8i$	618,13	0,01	11,12	$-6,8 \pm 13,6i$	2,16	0,45
5,6	$-42,6 \pm 406,1i$	64,63	0,10	13	-2,4	0,00	1,00
7,8	$-157,8 \pm 354,5i$	56,42	0,41	14	-5,4	0,00	1,00

Моды с высокими частотами колебаний (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) влияют, как правило не на характер изменения выходной величины, а на её дополнительные колебания. Такие, например, видны у откликов детальной модели.

Чем меньше собственная частота колебаний моды, тем больше влияния она оказывает на тенденцию изменения выходной величины. Частота колебаний как активной мощности, так и частоты (рис. 3) совпадает с частотой мод 11, 12, хотя данная мода демпфирована значительно лучше мод 1, 2, 3, 4, 5, 6, и примерно так же, как моды 7, 8 и 9, 10.

## Детальное моделирование

Моделирование мгновенных значений или же детальное моделирование позволяет получить наиболее приближенный к реальности отклик модели. Для моделирования рассматривалось возмущение при изменении уставки по активной мощности от 0 до 0,2 о.е. Кривые частоты и активной мощности приведены на рис. 3. Также на них приведены кривые линеаризованной модели, использованной для модального анализа, для её верификации.

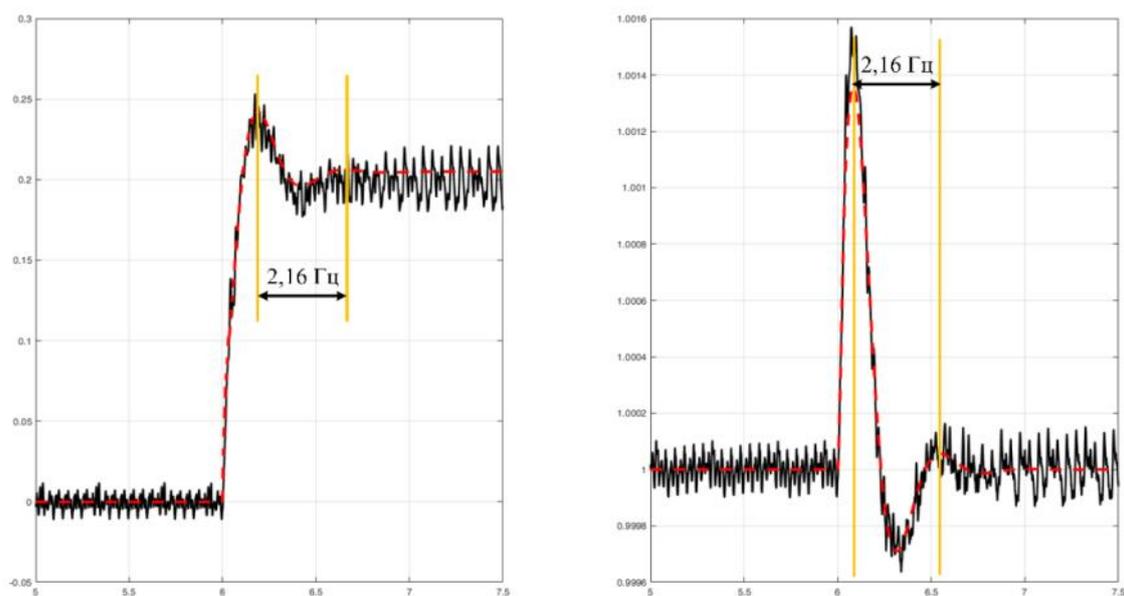


Рис. 3. Сравнительные отклики линеаризованной (красный пунктир) и детальной (чёрная сплошная линия) моделей по активной мощности (слева) и частоте (справа)

Из кривых заметен реализованный в рамках алгоритма инерционный отклик, аналогичный традиционным синхронным генераторам, как по активной мощности, так и по частоте. При этом заметны высокочастотные колебания, обусловленные модами с невысоким декрементом и значительной частотой собственных колебаний. Также стоит отметить, что моды с наименьшей собственной частотой определяют общий характер переходного процесса – из кривых заметно, что его частота совпадает с частотами мод 11 и 12.

При этом заметны общие тенденции в линеаризованной и детальной моделях, хотя в линеаризованной модели отсутствуют высокочастотные колебания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suvorov A., Askarov A., Bay Y., Maliuta B., Achitayev A., Suslov K. Comparative small-signal stability analysis of voltage-controlled and enhanced current-controlled virtual synchronous generators under weak and stiff grid conditions // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2023. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108891
2. Chen M., Zhou D., Blaabjerg F. High penetration of inverter-based power sources with VSG control impact on electromechanical oscillation of power system // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2022. – V. 142. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108370>

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПО РЕПЕАТ

**А.Е. Петрова**

*АО «ИТЦ «ДЖЭТ», Проектный офис «Фабрика»*

Научный руководитель: Б.Д. Малюта, инженер 3 категории ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

С развитием интеллектуальных энергетических систем происходит внедрение новых источников возобновляемой энергии и устройств FACTS (Flexible alternating current transmission system – гибкие системы передачи на переменном токе), изменение топологии сетей за счет перехода к распределенной энергетике. Эти изменения влияют на значения и характер изменения параметров режима энергосистемы, её устойчивость. В таком случае встает вопрос о настройке и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), поскольку от их функционирования напрямую зависит надёжная и устойчивая работа энергосистемы. Для получения информации об установившихся и переходных процессах в защищаемых объектах энергосистем, как правило, используется математическое моделирование. При этом программные комплексы располагают моделями основного электроэнергетического оборудования (синхронных генераторов, линии электропередач и т. д.), тогда как модели РЗА встречаются довольно редко. В связи с этим актуальным является вопрос о математическом моделировании устройств РЗА, необходимом для анализа их работы и корректного задания параметров. Среди отечественных программных продуктов для такого моделирования предлагается использовать программный комплекс РЕПЕАТ.

В данной работе демонстрируется применение математического моделирования для расчёта уставок дифференциально-токовой защиты (ДТЗ) трёхфазного двухобмоточного трансформатора со схемами соединения обмоток Y/D. Для моделирования использовалось ПО РЕПЕАТ. Расчет проводился согласно [1, 2], логика работы защиты реализована на базе шкафа защиты трансформатора типа ШЭ2607 041 фирмы «ЭКРА». Функциональная схема реализованной логики работы ДТЗ приведена на рис. 1.

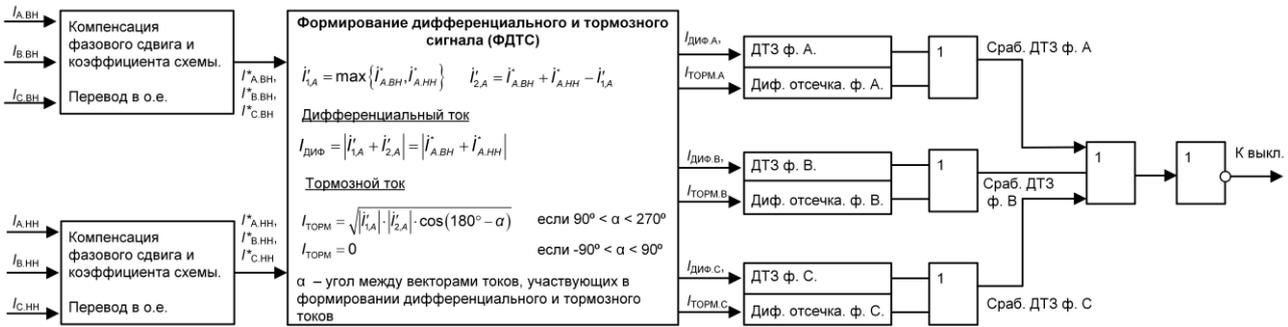


Рис. 1. Функциональная схема ДТЗ силового трансформатора

Алгоритм работы ДТЗ был реализован с использованием библиотеки «Автоматика», а также блока «Jython» и функционала пользовательского блока. Силовая часть шкафа упрощённо представлена идеальными трансформаторами тока на сторонах ВН и НН, соединённым по схеме «звезда».

Логика работы схемы ДТЗ в каждой фазе следующая: для формирования токов защиты используются входные токи схемы на сторонах ВН и НН, при этом осуществляется компенсация фазового сдвига тока и приведение его значения к базисному. Затем происходит расчет дифференциального и тормозного токов, после чего данные токи сравниваются с уставками срабатывания и участвуют в формировании характеристики чувствительного реле ДТЗ. При коротком замыкании (КЗ) в зоне защиты токи  $i'_{1,A}$  и  $i'_{2,A}$  (формируются из токов по концам защищаемого объекта, см. рис. 1) будут сонаправлены, что приведет к увеличению дифференциального и уменьшению тормозного тока – защита сработает. При КЗ вне зоны защиты токи  $i'_{1,A}$  и  $i'_{2,A}$  направлены противоположно – происходит увеличение тормозного тока и уменьшение дифференциального, за счет чего рабочая точка будет располагаться в области несрабатывания защиты [1]. На рис. 2 приведен фрагмент реализованной в ПО REPEAT схемы ДТЗ, где происходит определение дифференциального и тормозного тока для фазы А.

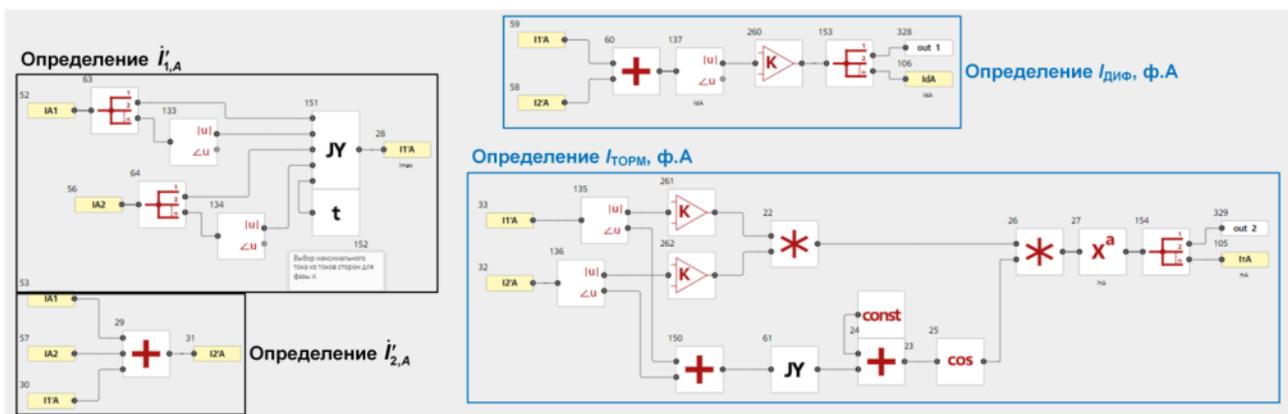


Рис. 2. Фрагмент схемы ДТЗ силового трансформатора в ПО REPEAT

Для моделирования действия ДТЗ силового трансформатора в REPEAT была реализована модель энергосистемы с помощью блоков библиотеки «Электроника». Внешний вид модели приведен на рис. 3.

В качестве защищаемого объекта выбран трансформатор типа ТДН-40000/110/35 со схемой соединения обмоток  $Y_i/D$ . Приведенная модель также содержит источник напряжением 110 кВ; две линии электропередач на напряжении 35 кВ, выполненных проводом АС-70/11 длиной 15 км и 20 км; две нагрузки на напряжении 35 кВ мощностью  $(8 + j6)$  МВА каждая.

В качестве трансформаторов тока используются идеальные двухобмоточные трансформаторы с коэффициентами трансформации 400/5 на стороне ВН и 1500/5 на стороне НН.

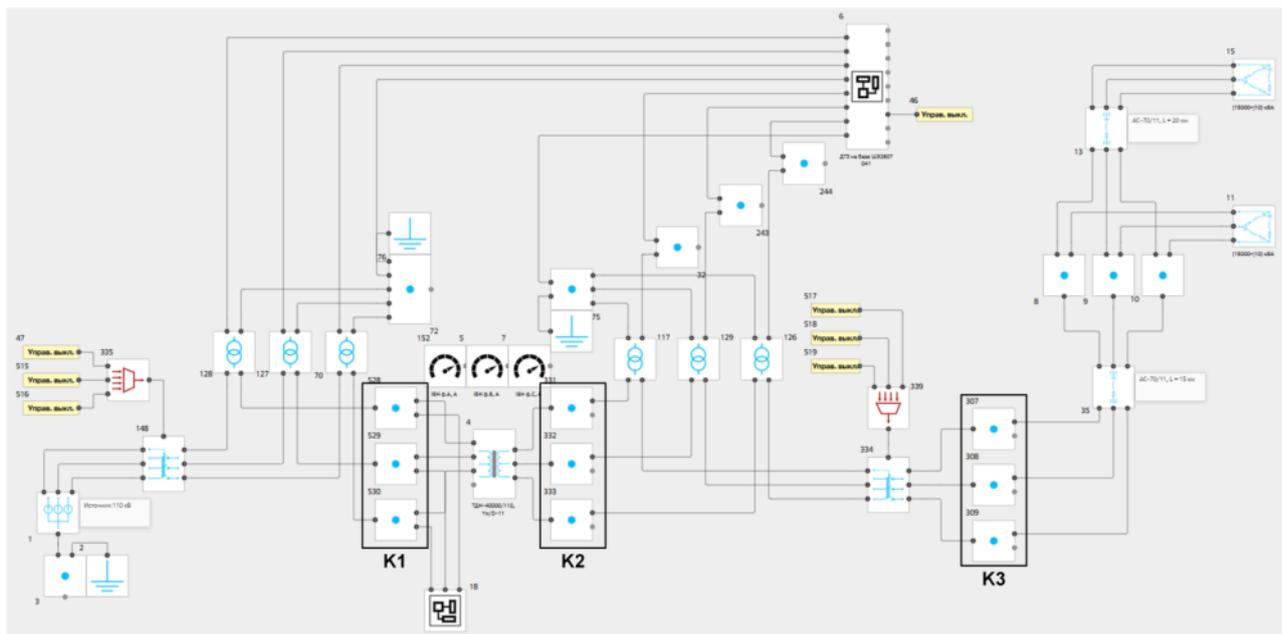


Рис. 3. Модель энергосистемы для исследования ДТЗ силового трансформатора в ПО REPEAT

Для ДТЗ выбранного трансформатора согласно [1, 2] были рассчитаны следующие параметры:

- базисный ток стороны ВН  $I_{\text{баз.ВН}}$ ;
- базисный ток стороны НН  $I_{\text{баз.НН}}$ ;
- ток начала торможения ДТЗ  $I_{\text{T,0}}$ ;
- начальный ток срабатывания ДТЗ  $I_{\text{Д,0}}$ ;
- коэффициент торможения ДТЗ  $K_{\text{T}}$ ;
- ток торможения блокировки ДТЗ  $I_{\text{T,БЛ}}$ ;
- ток срабатывания дифференциальной отсечки  $I_{\text{ОТС}}$ .

Результаты расчета указанных параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры срабатывания ДТЗ силового трансформатора

Параметр	$I_{\text{баз.ВН}}, \text{ А}$	$I_{\text{баз.НН}}, \text{ А}$	$I_{\text{T,0}}, \text{ о.е.}$	$I_{\text{Д,0}}, \text{ о.е.}$	$K_{\text{T}}, \text{ о.е.}$	$I_{\text{T,БЛ}}, \text{ о.е.}$	$I_{\text{ОТС}}, \text{ о.е.}$
Значение	2,51	2,109	1	0,43	0,5	2	6,5

В рамках исследования ДТЗ были реализованы трёхфазные КЗ как в зоне срабатывания защиты (на выводах трансформатора), так и за ее пределами. Для анализа результатов с помощью встроенного в REPEAT ноутбука JupyterLite были построены характеристики срабатывания ДТЗ для каждого возмущения. На рис. 4–9 приведены осциллограммы дифференциального и тормозного токов фазы А и характеристики срабатывания защиты.

При КЗ в защищаемой зоне на сторонах ВН и НН наблюдается кратное увеличение дифференциального тока (рис. 4, 6), характеристики ДТЗ расположены в области срабатывания (рис. 5, 7) – защита срабатывает и происходит отключение защищаемого элемента. При КЗ вне защищаемой зоны напротив, наблюдается кратное увеличение тормозного тока (рис. 8), характеристика ДТЗ расположена в области несрабатывания (рис. 9) – срабатывания защиты не происходит.

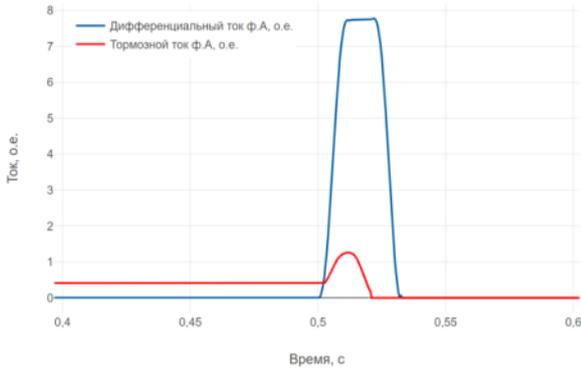


Рис. 4. Осциллограммы дифференциального и тормозного тока в фазе А (КЗ в точке К1)

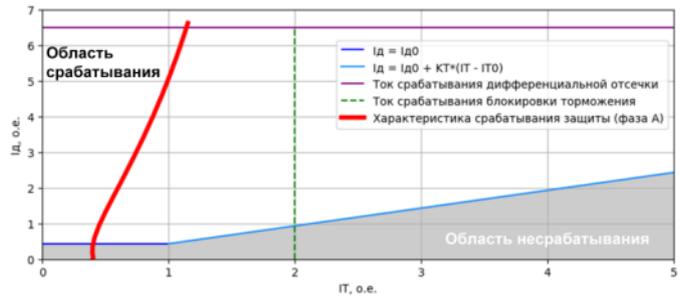


Рис. 5. Характеристика срабатывания ДТЗ в фазе А (КЗ в точке К1)

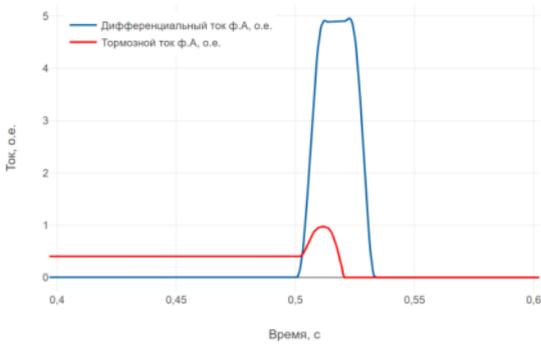


Рис. 6. Осциллограммы дифференциального и тормозного тока в фазе А (КЗ в точке К2)

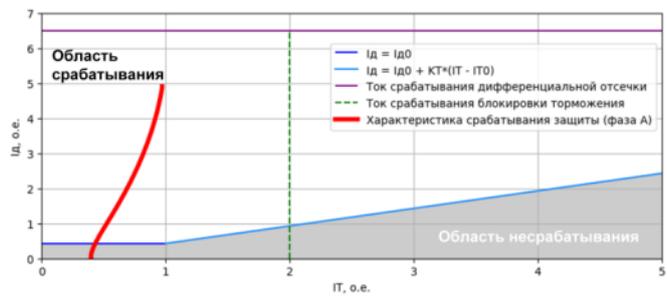


Рис. 7. Характеристика срабатывания ДТЗ в фазе А (КЗ в точке К2)

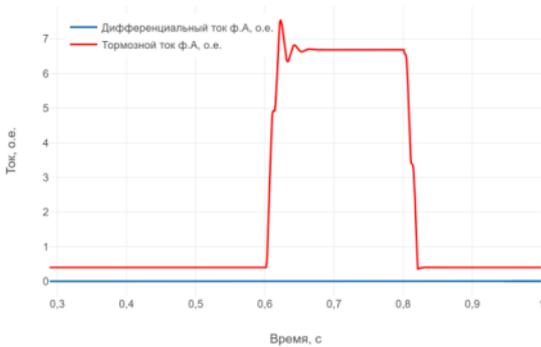


Рис. 8. Осциллограммы дифференциального и тормозного тока в фазе А (КЗ в точке К3)

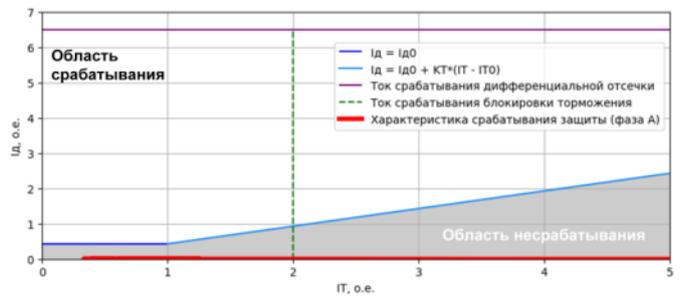


Рис. 9. Характеристика срабатывания ДТЗ в фазе А (КЗ в точке К3)

Таким образом, ДТЗ корректно отрабатывает при КЗ как внутри защищаемой зоны, так и за ее пределами. Это позволяет сделать вывод о корректности как реализованной логики работы защиты, так и рассчитанных параметров срабатывания.

Стоит отметить, что ПО REPEAT позволяет успешно моделировать не только энергосистемы, но и устройства РЗА. При этом функционал программного обеспечения позволяет создавать недостающие блоки, объединяя несколько блоков в группу. В дальнейшем из таких групп можно делать пользовательские блоки и использовать их в разных проектах. В частности, приведенный блок ДТЗ силового трансформатора можно также использовать в различных проектах для защиты силовых трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/D, изменяя только параметры срабатывания защиты.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. СТО 56947007-29.120.70.99-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА». – ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. – 216 с.
2. ЭКРА.656453.031 Р. Шкаф защиты трансформатора типа ШЭ2607 041. – ООО НПП «ЭКРА», 2020. – 179 с.

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ****В.В. Ясунов***Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А21*

Научный руководитель: В.Е. Рудник, к.т.н., ассистент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

**Введение**

В статье рассматривается проблема обеспечения кибербезопасности цифровых подстанций в условиях глобального технологического развития. Анализ включает в себя анализ и выделение видов цифровых подстанций, их сравнение, преимущества и недостатки реализации существующей архитектуры, а также меры по обеспечению кибербезопасности цифровых подстанций, включая использование современных технологий и методов защиты данных.

Объектом исследования служит цифровая электрическая подстанция.

Предметом исследования служит обеспечение кибербезопасности электрического оборудования на подстанции.

Статья представляет интерес для специалистов в области электроэнергетики, кибербезопасности и информационных технологий, а также для всех, кто интересуется проблемами обеспечения безопасности цифровых систем.

**Основная часть**

Согласно нормативным правовым актам федеральной сетевой компании (системный оператор) [1], цифровой подстанцией называется подстанция, в которой организация всех потоков информации при решении задач мониторинга, анализа и управления осуществляется в цифровой форме, а параметры такой передачи определяются единым файлом электронного проекта. В качестве основной среды передачи данных в рамках цифровой подстанции используется локальная вычислительная сеть (ЛВС) на базе технологии Ethernet, а в качестве коммуникационных протоколов применяются протоколы, описанные стандартом Международной электротехнической комиссии

Для цифровой подстанции разработан стандарт по передаче цифровых сигналов международной энергетической компании МЭК 61850, имплементацию которого в России сделали такие компании, как «Россети», «Единый системный оператор». Выделяют три вида архитектуры цифровой подстанции [2]

Первый вид предполагает подключение устройств релейной защиты и автоматики, контроллеров присоединения, счетчиков электрической энергии в систему АСУ ТП (автоматизированная система управления технологическим процессом) по единому протоколу информационного обмена – MMS (Multimedia Messaging Service). При этом передача управляющих команд, сигналов между устройствами уровня присоединения, измерений и т. д. между устройствами осуществляется по контрольным медным кабелям, распространено название «условно цифровая», так как данный тип станции архитектурно не позволяет управлять с помощью электронно-вычислительных машин (ЭВМ) данной подстанцией, но позволяет снимать показания электроприборов и передавать их на ЭВМ для дальнейших принятых решений.

Второй тип предполагает также использование протокола MMS для передачи данных в систему АСУ ТП. Помимо этого, дискретные сигналы от устройств уровня присоединения к преобразователям дискретных сигналов, а также передача данных устройств уровня присоединения между собой осуществляется по протоколу GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event), который позволяет управлять устройствами релейной защиты и автоматики. Протокол служит для замены медных кабельных связей, предназначенных для передачи дискретных сигналов между устройствами. Под событиями в определении понимаются срабатывания и пуски устройств РЗА, изменения положения коммутационного оборудования и так далее. К данному виду предъявляются дополнительные требования по обеспечению безопасности – шкафы преобразователей дискретных сигналов, установленные в непосредственной близости от первичного оборудования.

Третий тип предполагает реализацию второго вида подстанций, однако данный вид подстанций с устройствами уровня присоединения должны выполняться в соответствии с протоколом SV (Sampled Values), который служит для получения значений от электротехнических устройств на подстанции.

Другими словами, существуют три типа цифровых станций, которые отличаются протоколами передачи данных. Первый тип – «условно цифровой» – предполагает подключение устройств релейной защиты и автоматики к АСУ ТП по единому протоколу MMS и передачу команд по контрольным медным кабелям. Второй тип использует протокол GOOSE для обмена данными между устройствами уровня присоединения, что позволяет управлять устройствами релейной защиты и автоматики без использования медных кабелей. Третий тип основан на втором и использует протокол SV для получения значений от электротехнических устройств. На рис. 1 схематично показаны отличия данных архитектур [3]



Рис. 1. Сравнение архитектур цифровых подстанций

Можно сказать, что цифровые подстанции позволяют снимать метрики с электроприборов, а также дистанционно управлять приборами управления, тем самым позволяя создать на основе данных цифрового двойника и использовать его на «цифровом полигоне» для тестирования и улучшения передачи и потребления электроэнергии. Такие преимущества несут такие риски, которые позволяют злоумышленникам получить доступ извне к локальной сети, что может привести к колоссальным потерям. Для предотвращения этого используются защитные протоколы, а также меры по предотвращению несанкционированного взлома.

Согласно оцениванию рисков реализации кибератак [4] наибольшую угрозу для цифровых подстанций представляют заражение оборудование вредоносного обеспечения, несанкционированное уничтожение чувствительных данных, внедрение вредоносных программ для скрытого доступа к информационным ресурсам, однако в обзоре отсутствуют меры защиты от таких атак, поэтому необходимо дополнить материал.

Для обеспечения кибербезопасности [5] в области заражения оборудования следует использовать следующие практики: использование SIEM решений (Security Information and Event Management) – это комплексное решение для обеспечения информационной безопасности, которое объединяет управление информацией о безопасности (SIM) и управление событиями безопасности; использование антивирусных программ; ограничение доступа на установку программного обеспечения со стороны пользователя, а также предварительное тестирование на уязвимости программ до установки на промышленное оборудование.

В случае, когда идет речь об угрозе несанкционированного удаления чувствительных данных следует использовать следующие практики: использование системы резервирования данных, которые могут быть реализованы как использование готовых сервисов или запуск и наладка ЭВМ согласно рекомендациям ФСТЭК или ФСБ: SecaaS (Security as a service), Raid Массив, VPS; разделение архитектуры информационных сервисов предприятия на «микросервисы» с установлением сообщений между сервисами; ограничение пользователей ЭВМ на запись и чтение данных.

Бывают случаи, когда необходимо защита от внедрения вредоносных программ для скрытого доступа к информационным ресурсам. Для защиты необходимо придерживаться и использовать следующие практики: использование многоуровневой защиты, разделение ЭВМ сетей, разрешение доступа на чтение и запись по аутентификации, использование отечественных операционных систем, адаптированных под промышленное оборудование, использование антивирусных программ

В заключение хотелось бы отметить, что в данной презентации проанализирована существующие угрозы и риски, связанные с цифровизацией электроэнергетической отрасли, а также предложение мер по повышению уровня защиты цифровых подстанций от кибератак для распространенных уязвимостей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 56947007-29.240.10.299-2020. – Россети: [сайт]. – URL: [https:// www.rosseti.ru/upload/iblock/545/t0vad6zka3qcfwt4dqjpv1v3ubtqaffw.pdf?ysclid=m3buddaiwj970753695](https://www.rosseti.ru/upload/iblock/545/t0vad6zka3qcfwt4dqjpv1v3ubtqaffw.pdf?ysclid=m3buddaiwj970753695) (дата обращения: 10.11.2024).
2. Практическая реализация требований серии стандартов МЭК 61850 на энергетических объектах России / В.В. Никитин, Т.Б. Эзирбаев, А.С. Варавин, Р.А.М. Магомадов // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2022. – Т. 7, № 2(28). – С. 118–127. – DOI 10.25744/genb.2022.92.42.013. – EDN DGLNKN.
3. Презентация: Требования предъявляемые к оборудованию подстанций работающему в составе Цифровых ПС. [Электронный ресурс] // Digital Substation : [сайт]. – URL: [https:// digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/12/10-Slesarchuk-Trebovaniya-k-oborud-TSPS-LEP.pdf](https://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2018/12/10-Slesarchuk-Trebovaniya-k-oborud-TSPS-LEP.pdf) (дата обращения: 12.11.2024).
4. Карпенко В.Г. Карантаев В.И. Разработка экспертной системы для оценки влияния деструктивных воздействий компьютерных атак на подстанции с высшим классом напряжения 500 кВ с децентрализованной архитектурой вторичных подсистем // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: Материалы науч.-техн. конф. Чебоксары. – 2021. – № 1. – С. 186–199.
5. Не тушите свет: как защитить АСУ ТП от атак с Industroyer и подобным ВПО / [Электронный ресурс]. – URL: [https:// SecurityLab.ru](https://SecurityLab.ru) : [сайт]. – URL: [https:// www.securitylab.ru/analytics/516258.php?ysclid=m3dzk902hg602351283](https://www.securitylab.ru/analytics/516258.php?ysclid=m3dzk902hg602351283) (дата обращения: 12.11.2024).

## **РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ УЧЁТА, МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ АКУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ**

**К.Р. Раменский<sup>1</sup>, О.А. Манякина<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
ИШИиЭС, 6ВМ31ПИШ*

*<sup>2</sup> Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета,  
Электроэнергетика и электротехника, Гидроэлектростанции, ГЭ24-01М*

Научный руководитель: Т. Е. Мамонова, к.т.н., доцент ОИС ИШИиЭС

Современные системы управления техническими объектами требуют высокой точности и предсказуемости для обеспечения надежной эксплуатации оборудования и сокращения рисков непредвиденных поломок. Одним из эффективных методов, который используется для управления сложными объектами, является технология цифровых двойников. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта, которая отражает его текущее состояние, поведение и возможное развитие в будущем на основе данных о работе и эксплуатации объекта. Первоначально концепция цифрового двойника была предложена NASA для управления сложными космическими системами [1].

Цифровые двойники могут применяться для моделирования различных процессов, включая предсказание состояния и срока службы аккумуляторных батарей (АКБ), которые широко используются в энергетических системах, таких как гидроэлектростанции (ГЭС). В данной статье рассматривается возможность применения цифровых двойников для мониторинга, прогнозирования и оптимизации работы аккумуляторов в составе систем энергоснабжения ГЭС.

На крупных объектах, таких как ГЭС, использование свинцово-кислотных аккумуляторов критически важно для бесперебойной работы аварийных систем и обеспечения их автономности в случае отключения электроснабжения. Однако срок службы аккумуляторов ограничен, и их износ со временем снижает эффективность работы системы.

Задача заключается в создании системы цифрового двойника, которая позволила бы:

- учитывать и отслеживать установленные аккумуляторы на объекте;
- предсказывать срок службы каждого аккумулятора на основании текущих данных и условий эксплуатации;
- оповещать о необходимости замены или пополнения запасов на складе;
- моделировать саморазряд аккумуляторов и корректировать планы по их замене.

Цифровой двойник аккумуляторов может представлять собой систему учета и мониторинга, где каждый аккумулятор описан набором характеристик, включая тип, серийный номер, дату производства, текущее состояние и параметры эксплуатации. Все данные об аккумуляторах собираются и сохраняются в базе данных, доступной через веб-интерфейс. Подобная система может включать такие модули, как:

Мониторинг состояния АКБ. Оценка текущего состояния аккумулятора может производиться на основе параметров, таких как напряжение, сопротивление, емкость и другие показатели состояния аккумулятора (State of Health, SoH). Прогнозирование поведения аккумуляторов позволяет заранее определить момент, когда аккумулятор выйдет из строя или его производительность снизится до критических значений [2].

Предсказание срока службы и саморазряда. Один из ключевых аспектов работы с аккумуляторами – это учет саморазряда, который напрямую влияет на состояние АКБ при длитель-

ном хранении. Различные математические модели, в том числе методы машинного обучения, могут использоваться для прогноза саморазряда [3].

Система учета и мониторинга аккумуляторных батарей разработана с использованием объектно-ориентированного подхода, где каждое устройство описывается с помощью соответствующих классов. Основные компоненты системы включают:

- *Классы типов аккумуляторов.* Эти классы содержат информацию о номинальных характеристиках батареи, таких как напряжение, емкость, внутреннее сопротивление и другие технические параметры.
- *Классы тестовых индикаторов.* Отдельные классы хранят результаты тестов АКБ, таких как коэффициент здоровья батареи (SoH), коэффициент заряда (SoC), напряжение, внутреннее сопротивление и другие параметры, полученные в ходе диагностики.
- *Классы аккумуляторов.* Каждый объект класса «аккумулятор» содержит информацию о типе батареи, месте установки, серийном номере и истории тестирования. Это позволяет точно отслеживать состояние каждого устройства в системе и своевременно реагировать на изменения.

Основная часть системы – алгоритмы предсказания состояния аккумуляторов. Например, расчет саморазряда осуществляется с учетом процентной потери емкости в зависимости от времени хранения на складе. Алгоритмы анализа данных включают:

- *Моделирование саморазряда.* Рассчитывается снижение емкости аккумулятора в зависимости от времени с использованием показателя саморазряда.
- *Предсказание оставшегося срока службы.* На основе данных о текущей емкости и характеристиках аккумулятора можно предсказать, когда его рабочие параметры снизятся до критического уровня.
- *Графики изменения состояния.* Система позволяет построить графики зависимости емкости от времени, что наглядно демонстрирует поведение аккумулятора в различных условиях эксплуатации.

В процессе разработки были реализованы несколько полезных графиков для анализа состояния аккумуляторов:

- *График саморазряда.* Показывает, как изменяется емкость аккумулятора в зависимости от времени хранения. Это помогает оценить, насколько долго аккумулятор может храниться без потери рабочих характеристик.
- *Зависимость емкости от срока службы.* Построение графиков зависимости емкости аккумулятора от срока службы в буферном режиме позволяет предсказать его поведение при эксплуатации.

Для иллюстрации работы системы учета аккумуляторных батарей, приведены два графика, которые наглядно демонстрируют поведение аккумуляторов в зависимости от их состояния.

Рис. 1. На первом графике показана зависимость емкости от срока службы для аккумулятора Delta DT 1207. Синяя линия представляет прогноз емкости по мере старения аккумулятора. Важным моментом является то, что в точке 5.74 Ah (около 3 лет службы) система отображает текущую емкость батареи (выделена красной точкой). Анализ этого графика помогает оценить, когда аккумулятор достигнет критической точки, и предсказать время его замены.

Рис. 2. Второй график отображает процесс саморазряда аккумулятора Delta DT 1207 в течение времени. Синяя пунктирная линия показывает медленное снижение емкости в результате саморазряда. Данный график можно использовать для оценки состояния аккумуляторов, находящихся на складе. Он позволяет предсказать, когда емкость может снизиться до критического уровня и будет необходимо провести техническое обслуживание или заменить батарею.

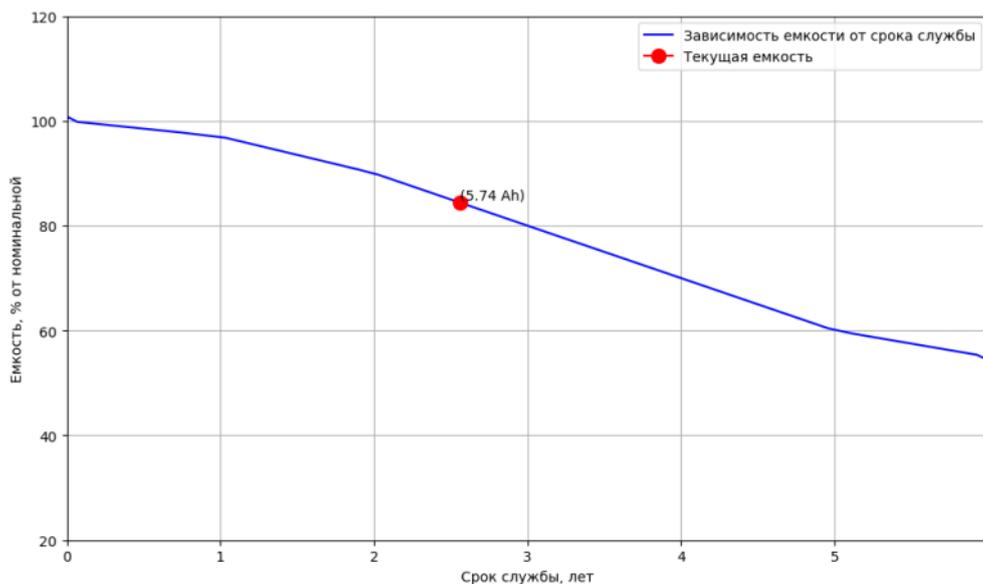


Рис. 1. График зависимости емкости от срока службы аккумуляторной батареи в буферном режиме

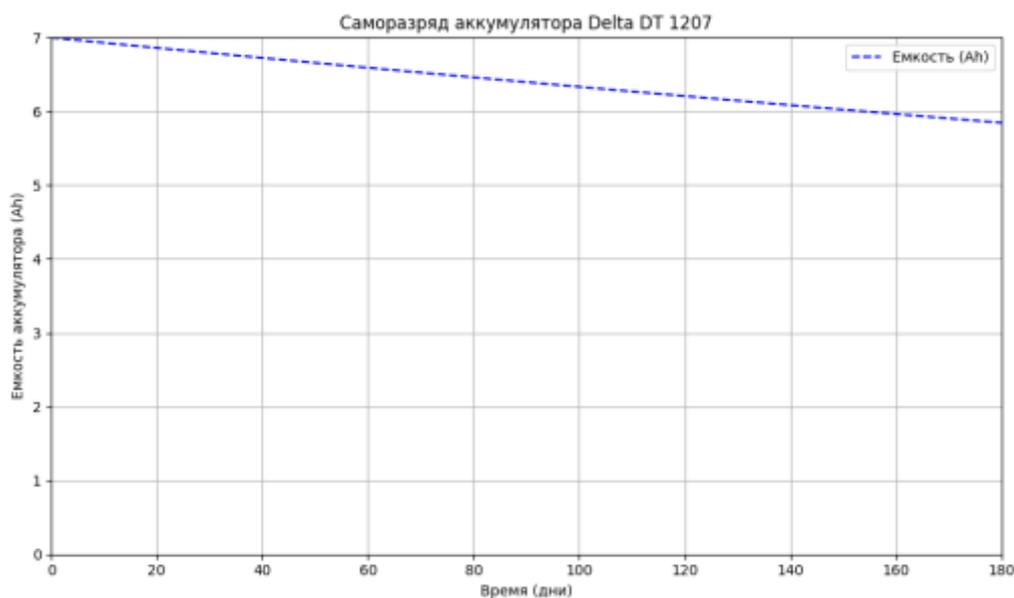


Рис. 2. График саморазряда аккумуляторной батареи Delta DT 1207, которая находилась на складе в течение 180 дней (полгода)

Анализ данных графиков позволяет делать точные прогнозы по времени замены аккумуляторов и времени проведения планового обслуживания, что оптимизирует работу персонала и снижает затраты на поддержание работоспособности оборудования. Таким образом, взглянув на оба графика видно, что данный аккумулятор можно использовать в буферном режиме более трёх лет.

Для точного прогноза саморазряда и общего срока службы аккумулятора в системе цифрового двойника могут использоваться алгоритмы, основанные на эмпирических данных и физических моделях. В работе применялась модель, в которой учитывается процент саморазряда аккумуляторов в зависимости от времени и температуры хранения. Например, для свинцово-кислотных аккумуляторов можно использовать данные о снижении емкости в буферном режиме эксплуатации [4].

На основе полученных данных система может уведомлять пользователей о необходимости замены аккумуляторов или корректировке условий их хранения. Это позволит более эффективно управлять запасами АКБ на складах и предотвратить непредвиденные поломки оборудования из-за выхода батарей из строя.

Прогнозирование состояния аккумуляторов в рамках системы цифрового двойника основано на моделировании зависимости емкости от времени и учета других ключевых факторов, таких как температура и саморазряд. В данной работе использовались математические модели, учитывающие изменения емкости АКБ в зависимости от времени эксплуатации и условий окружающей среды. Подобный подход описан в ряде работ, посвященных анализу состояния аккумуляторов с использованием регрессионных моделей и эмпирических данных [5].

Кроме того, важную роль в прогнозировании играет температура эксплуатации аккумуляторов, так как емкость батарей значительно снижается при низких температурах. Это особенно актуально для ГЭС, где температурные условия могут варьироваться в широком диапазоне [6].

Применение системы цифрового двойника на ГЭС позволяет решить ряд важных задач:

Автоматизация учета АКБ. Система позволяет вести учет всех аккумуляторов, установленных на объекте, и анализировать их состояние в реальном времени.

Предсказание замены АКБ. Благодаря предсказательным алгоритмам система может своевременно уведомить персонал о необходимости замены АКБ на складе или на объекте, что позволяет избежать аварийных ситуаций и продлить срок службы оборудования.

Оптимизация работы персонала. Уведомления о необходимости замены АКБ или пополнении запасов позволяют оптимизировать работу сотрудников и минимизировать время на планирование обслуживания.

Хотя основной акцент данной работы сделан на аккумуляторах, система цифрового двойника может быть использована для оптимизации работы не только самого оборудования, но и персонала. Система учета и мониторинга АКБ позволит операторам на ГЭС своевременно получать информацию о состоянии всех аккумуляторов и принимать решения о необходимости их замены или ремонта, что сократит затраты на обслуживание и повысит надежность системы энергоснабжения [7].

Разработка цифровых двойников для аккумуляторных батарей позволяет существенно улучшить управление их состоянием и предсказать срок службы, что, в свою очередь, способствует более эффективному использованию ресурсов и снижению затрат. Система учета АКБ на ГЭС, основанная на цифровом двойнике, позволяет не только отслеживать состояние батарей, но и уведомлять персонал о необходимости их замены, тем самым оптимизируя рабочие процессы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – NASA, 2014.
2. Zhang Y., Lee J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196, № 15. – P. 6007–6014.
3. Eddahech A., Briat O., Vinassa J.M. Determination of lithium-ion battery state-of-health based on constant-voltage charge phase // Journal of Power Sources. – 2012. – Vol. 258. – P. 218–227.
4. Ganesan S., Haran B., Popov B.N., White R.E. Self-discharge of lithium-ion batteries: A theoretical study // Journal of Power Sources. – 2003. – Vol. 123, № 1. – P. 153–158.
5. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006.
6. Ge S., Wang C.Y., Yang X.G. A physics-based lithium-ion battery model with chemical/mechanical degradation physics for long-term capacity fade prediction // Journal of Power Sources. – 2015. – Vol. 282. – P. 382–391.
7. Phan L., Rohrer S., Otte P. Optimizing maintenance schedules using a digital twin of a gas turbine // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 72. – P. 590–595.

## **ЦИФРОВЫЕ ПОДСТАНЦИИ: АРХИТЕКТУРЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ВИДЫ ПРОТОКОЛОВ**

**И.С. Щепёткин, И.С. Сухушин, А.М. Аугервальд**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А43*

Научный руководитель: А.Б. Аскарлов, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В современном мире цифровизация проникает во все сферы деятельности человека, включая энергетику. Цифровая подстанция – это автоматизированная подстанция, оснащенная взаимодействующими цифровыми информационными и управляющими системами, функционирующая без постоянного присутствия дежурного персонала. Характеризуется высокой степенью автоматизации и большой надежностью.

Говоря об архитектуре цифровых подстанций, хочется отметить, что все процессы обмена информацией и управления работой отдельных элементов подстанции осуществляются в цифровом виде на основе универсального стандарта МЭК 61850 [1].

Архитектуры цифровых подстанций делятся на два типа: централизованную, где функции защиты, управления и измерений находятся на одном сервере, и децентрализованную, где каждое устройство отвечает за свою функцию.

Архитектура цифровой подстанции включает в себя несколько ключевых компонентов, таких как: первичное и вторичное оборудование, системы связи и программное обеспечение.

В первичное оборудование цифровой подстанции входят: вычислительные устройства, локальные вычислительные сети, передача и обработка информации, автоматическое управление подстанцией.

Основные особенности такого оборудования связаны с использованием цифровых измерительных приборов, оптических и электронных, и встроенных систем диагностики оборудования.

Вторичное оборудование включает в себя: релейную защиту, управление электроэнергией, систему мониторинга и диагностики оборудования, средства связи и передачи данных.

Это оборудование работает на основе протоколов МЭК 61850 и использует преобразователи аналоговых сигналов и выносные устройства связи для подключения коммутационных аппаратов.

Коммуникационные сети на цифровых подстанциях включают: волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) для передачи сигналов между устройствами, проводные линии связи для подключения оборудования к локальным вычислительным сетям. Беспроводные технологии, такие как Wi-Fi и Bluetooth, SCADA-системы для сбора и обработки информации о состоянии оборудования и протекании процессов.

Эти сети обеспечивают быстрый и надежный обмен информацией между устройствами, что повышает эффективность работы подстанции и безопасность ее эксплуатации.

Программное обеспечение для цифровых подстанций включает: конфигураторы IED-устройств (Cheaz IED Configuration Tool), САПР для цифровых подстанций (Cheaz Substation Configuration Tool), программно-технический комплекс «КВАНТ-ЧЭАЗ».

Эти инструменты позволяют проектировать, конфигурировать, настраивать и отслеживать оборудование цифровых подстанций, обеспечивая эффективное и успешное внедрение цифровых технологий в энергетике.

Рассматривая применяемые в цифровых подстанциях технологии, можно сказать, что их не так много, но каждая из них включает в себя большое количество других технологий. Приводя анализ списка технологий, можно выделить основные из них: сети Ethernet (исполь-

зуются для скоростной передачи данных между устройствами), протоколы связи МЭК 61850, DNP3, MODBUS (позволяют стандартизировать общение между системами), системы управления SCADA (собирают и обрабатывают данные, обеспечивая дистанционное управление подстанцией), системы автоматизации PLC (Programmable Logic Controllers) – программируемые логические контроллеры, используются для управления технологическими процессами [2].

Также хочется отметить системы безопасности, такие как защита от несанкционированного доступа к управлению подстанцией и системы видеоконтроля.

Как уже было сказано, на цифровых подстанциях используются протоколы, описанные международным стандартом МЭК 61850 [1]. Безусловно, могут использоваться и другие протоколы, разработанные под конкретный объект (MODBUS, DNP3), но МЭК 61850 позволяет объединить все входящие и исходящие данные в одну систему, что является неоспоримым плюсом в удобстве использования.

В стандарте описаны два основных протокола: MMS и GOOSE. Рассмотрим их подробнее.

Протокол MMS (Manufacturing Message Specification) – определяет наборы стандартных объектов (устройства и приборы на подстанции), стандартных сообщений (в каком виде передаются сообщения) и правил кодирования (как кодировать и декодировать сообщение во время передачи).

Несмотря на название, коммуникационным протоколом MMS не является, он лишь определяет откуда и в каком виде информация передается. MMS использует коммуникационный протокол TCP/IP, который, в свою очередь, также описывает семейство протоколов передачи информации, включая в себя такие протоколы как: HTTP, IP, TCP, DNS, WLAN, Ethernet и другие.

Протокол GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) – предназначен для связи между устройствами релейной защиты. Сообщения этого протокола имеют повышенный приоритет и передаются в обход стандартных протоколов.

Важно понимать, что сетевые протоколы зачастую являются абстракциями, для определения задач протокола нужен лишь верхний их уровень.

Поднимая тему преимуществ цифровых подстанций перед обычными, хочется отметить некоторые из них: высокая надежность, обеспечиваемая за счет исключения из работы человеческого фактора, удешевление эксплуатации, так как цифровые подстанции почти не требуют задействования персонала и занимают намного меньше места, чем стандартные, повышение эффективности использования ресурсов, возможное за счет более точной информации о состоянии сети и оборудования, а также высокая экологичность, ведь автоматика позволяет снизить потери электроэнергии [3, 4].

В заключение отметим, что цифровые подстанции являются будущим всей сферы распределения электроэнергии. Они обладают рядом существенных преимуществ, позволяющих повысить безопасность, снизить затраты на эксплуатацию и повысить экологичность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МЭК 61850-5:2003 «Сети и системы связи на подстанциях. Часть 5. Требования к связи для функций и моделей устройств».
2. Лобур И.А., Назаров К.А. К вопросу об автоматизации цифровой подстанции // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2022. – № 3. – С. 16–22.
3. Жукова Е. Цифровая подстанция – важный элемент интеллектуальной энергосистемы [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.ruscable.ru/news/2017/09/26/TSifrovaya\\_podstantsiya\\_vazhnyj\\_element\\_intellekt/](https://www.ruscable.ru/news/2017/09/26/TSifrovaya_podstantsiya_vazhnyj_element_intellekt/) (дата обращения: 15.11.2024).
4. Полковниченко Д.В., Яковенко Д.В. Анализ построения цифровых подстанций // Материалы 10-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Т. 2. Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2024. – С. 183–190.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ВКЛЮЧЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА ЗАРЯД ОТ ИСТОЧНИКА ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

М.М. Попов

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, старший преподаватель

Научный руководитель: Б.В. Лукутин, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Сложностью в моделировании энергосистемы с применением АКБ является трудность в представлении вольтамперной характеристики (ВАХ) АКБ, в момент начала процесса заряда. Это необходимо для упрощения математических моделей данных систем.

Отмечая высокорастущую популярность аккумулирующих систем в энергоблоках различного назначения, интерес представляют параметры литий-феррумных АКБ большой емкости, как узла ВИЭ, которые можно определить, как следующие:

- зарядные характеристики при различных уровнях разряда;
- разрядные характеристики при разных уровнях тока разряда.

В нашем случае мы будем опираться на уже имеющиеся сравнительные характеристики АКБ в исследованиях других ученых [1].

Для оптимального управления генерирующим и преобразующим энергетическим оборудованием автономной системы электроснабжения автором работы предлагается структура инверторной микроГЭС и алгоритм управления ее энергетическим оборудованием по критериям оптимального выбора и стабилизации режима работы генератора [2] при условии обеспечения электроэнергией потребителя и рационального рабочего режима аккумуляторных накопителей электроэнергии в соответствии с возмущающим воздействием – суточным графиком нагрузки [3].

Для решения задачи аппроксимации ВАХ АКБ, предлагается экспериментальная масштабируемая физическая установка – спарка двигатель – генератор, с автоматическим регулятором возбуждения. Схема установки представлена на рис. 1.

Синхронный генератор с обмоткой возбуждения, подключенной к системе автоматического регулирования возбуждения (АРВ) приводится в движение с помощью коллекторного двигателя переменного тока. Система АРВ получая питание от аккумуляторной батареи возбуждает генератор и через диодный узел вырабатывает постоянное напряжение 12–14 вольт.

На экспериментальной установке был проведен эксперимент, с фиксацией зарядного тока, в момент подключения аккумуляторной батареи к электромашинному генератору. В качестве измерительного шунта, использован резистор сопротивлением 50 ом, подключенный в цепь АКБ. На рис. 2 представлен переходный процесс в момент подключения аккумуляторной нагрузки на заряд.

В результате данного исследования, автором была разработана экспериментальная модель микроГЭС, с применением инвертора и накопителя электроэнергии для расчета электромеханических переходных процессов.

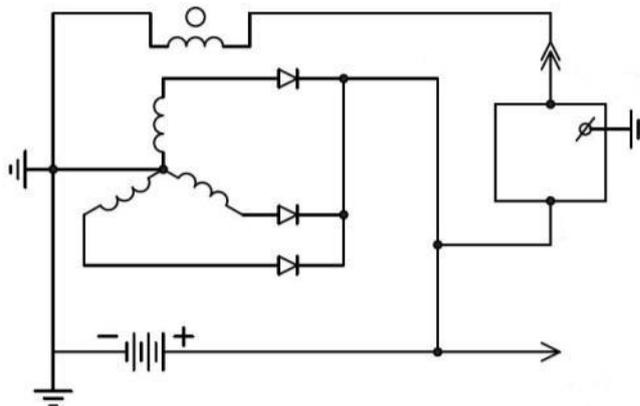


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

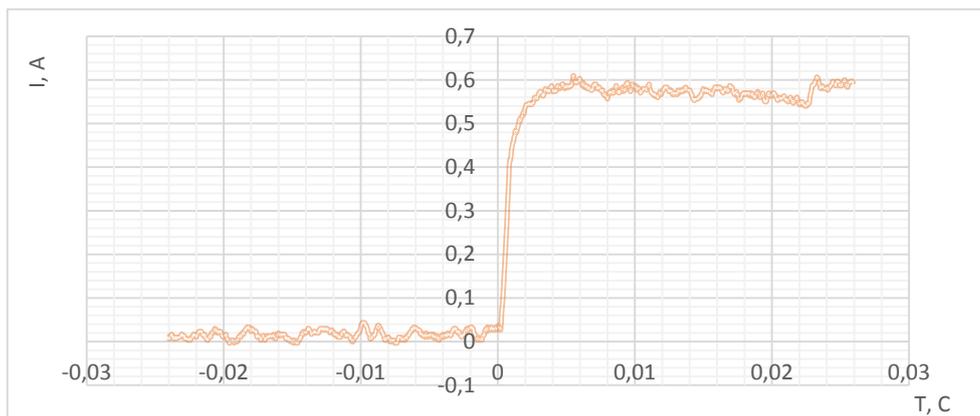


Рис. 2. Переходный процесс зарядного тока в момент подключения генератора к аккумулятору

На основе данной модели был сделан вывод о том, что переходный процесс имеет минимальное влияние на параметры механической системы в дискретизации 1 час на действующее значение напряжения генератора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Safwat I.M., Li W., Wu X. A Novel Methodology for Estimating State-Of-Charge of Li-Ion Batteries Using Advanced Parameters Estimation // *Energies*. – 2017. – № 11 (10). – С. 1751.
2. Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Попов М.М. Режимы работы микрогидроэлектростанции со стабилизацией выходного напряжения при помощи управления инвертором // *Известия Томского политехнического университета*. – 2023. – Т. 334. – № 8. – С. 51–58
3. Лукутин Б.В., Попов М.М. Повышение техникоэкономической эффективности инверторной микрогидроэлектростанции деривационного типа // *Омский научный вестник*. – 2023. – V. 3 (187). – С. 68–76.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ

М.А. Яхъяев<sup>1</sup>, Д.Т. Гериханов<sup>1</sup>, Я.Ю. Малькова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, г. Грозный

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: И.Х. Саламов<sup>1</sup>, старший преподаватель кафедры АТПП,  
ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова

Углеродный баланс нашей планеты является одним из фундаментальных показателей, определяющих климатическую стабильность и здоровье всех экосистем. Среди существующих инструментов поддержания углеродного баланса можно выделить частичный или же полный переход на возобновляемые источники энергии, в частности ввод в эксплуатацию солнечных электростанций. Снижение удельного потребления энергии и сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу являются основными показателями позитивного воздействия солнечных электростанций на экологическую обстановку и состояние окружающей среды в целом [1]. Согласно проведенным оценкам [2–4], в среднем каждое удвоение мощности солнечных электростанций ведет к снижению удельного потребления энергии на 10–12 %, при этом выбросы парниковых газов сокращаются более существенно, на 18–24 %.

Для проведения оценки экологической эффективности солнечных электростанций используются методы сравнения вредных выбросов от сжигания твердого или жидкого топлива для

генерации 1 кВт·ч электроэнергии [5]. Также отметим, что согласно открытым данным [6, 7], в целом, доля вредных выбросов в атмосферу от генерирующих объектов в суммарном объеме выбросов от всей экономической деятельности людей в нашей стране составляет 23,3 %. Для обозначения объема вредных выбросов от генерирующих объектов используется термин «Углеродоемкость энергии».

Согласно открытым данным, среднее значение углеродоемкости электроэнергии для тепловых электростанций в России составляет 605 грамм CO<sub>2</sub> эквивалента на 1 кВт·ч электроэнергии [8, 9]. Также в некоторых источниках приводятся цифры порядка 358 г CO<sub>2</sub> эквивалента на 1 кВт·ч. Ниже, на рис. 1 приведен график помесичной выработки сетевой солнечной электростанции 15 кВт, функционирующей на территории Чеченской Республики, за 2023 г., а также анализ ее экологической эффективности, выраженной в граммах CO<sub>2</sub> эквивалента сокращения объема выбросов.

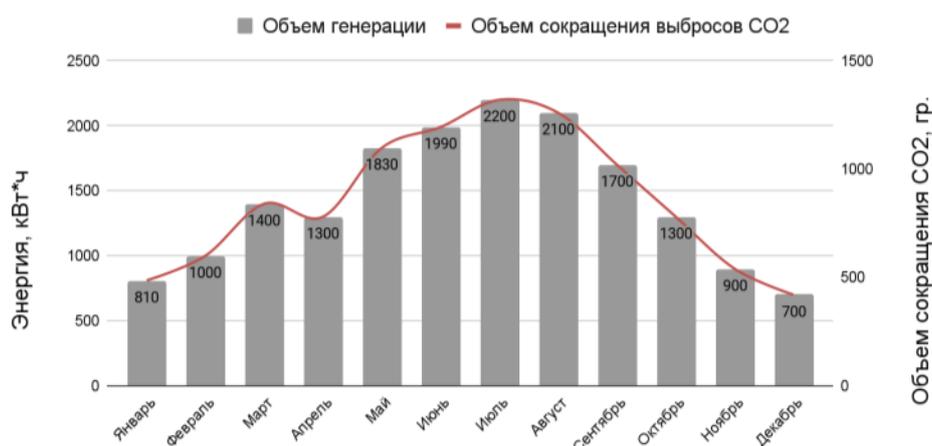


Рис. 1. Анализ выработки и экологической эффективности сетевой солнечной электростанции 15 кВт, функционирующей на территории Чеченской Республики, за 2023 г.

В приведенном на рис. 1 графике объем сокращения выбросов CO<sub>2</sub> эквивалента в атмосферу считается классическим методом – линейной зависимостью объемов CO<sub>2</sub> от объема генерации. Общий объем выработки электроэнергии за 2023 год составил 17,2 МВт·ч, общий объем сокращения выбросов CO<sub>2</sub> – 10,3 т. Однако известно, что в реальных эксплуатационных условиях солнечные электростанции оказывают влияние на локальный энергетический баланс посредством эффекта теплового острова [9]. Кроме того, имеет место негативное воздействие на окружающую среду в разрезе полного жизненного цикла солнечной электростанции, если брать в рассмотрение этапы производства и утилизации отдельных ее компонентов.

Анализ секвестрации углерода показывает, что потенциал суши составляет 23,8 Гт CO<sub>2</sub> эквивалента, а почва способна поглощать до 5,5 млрд т в год [10]. Однако при локальном тепловом воздействии (например, обозначенный выше эффект фотоэлектрического теплового острова) поглощающая способность почвы теоретически может уменьшиться, что также сказывается на общем углеродном балансе.

При проектировании и выполнении анализа инвестиционной привлекательности ввода новых объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии важным этапом является прогнозирование их выработки, которое включает в себя:

- анализ локального уровня инсоляции,
- анализ метеорологических данных,
- прогноз снижения уровня секвестрации CO<sub>2</sub> почвой из-за теплового воздействия фотоэлектрических модулей и др.

Концептуальная структура подобной автоматизированной системы проектирования и прогнозирования выработки объекта генерации представлена далее, на рис. 2. Структура включает в себя как классические этапы проектирования с прогнозированием выработки и анализом энергопотребления объекта, так и этап прогнозирования в рамках экологического аспекта.

Согласно исследованиям, потенциал секвестрации углерода почвой с нулевой обработкой составляет 0,34 тонны/Га в год или 34 кг на 1000 м<sup>2</sup> [10]. Например, сетевая солнечная электростанция «Наурская», функционирующая на территории Чеченской Республики с 2021 г., имеет номинальную мощность 5 МВт и занимает площадь 27 тыс. м<sup>2</sup>. При этом, потенциально почва указанной площади без обработки, теплового и другого антропогенного воздействия может поглощать до 1000 кг СО<sub>2</sub> эквивалента. Одна из крупнейших солнечных электростанций России в Самарской области занимает площадь 216 Га. Потенциал секвестрации углерода почвой той же площади – 73,4 т в год.

Таким образом, в работе установлено, что при проектировании ввода объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии, в частности солнечных электростанций, необходимо выполнять прогнозирование не только потенциальной выработки мощности по базам данных с метеорологическими параметрами, но и также возможного экологического эффекта в виде сокращения объема выбросов в СО<sub>2</sub> эквиваленте.



Рис. 2. Структура системы автоматизированного проектирования и прогнозирования выработки солнечной электростанции с учетом экологического аспекта (СЭС – солнечная электростанция)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Louwen A., van Sark Wilfried G.J.H.M., Faaij Andre P.C., Schropp Ruud E.I. Re-assessment of net energy production and greenhouse gas emissions avoidance after 40 years of photovoltaic development // Nature Communications. – 2016. – V. 13728. – P. 1–9.
- Огнивцев С.Б. Глобальные климатические изменения, углеродные балансы и влияние на них сельского хозяйства // Актуальные вопросы современной экономики. – 2022. – № 7. – С. 238–249.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. The Physical Science Basis. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 996 p.
- Бобыль А.В., Малышкин В.Г., Эрк А.Ф. Методы оценки экономической эффективности солнечных электростанций // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 4(97). – С. 49–56.
- Simple Levelized Cost of Energy (LCOE) Calculator Documentation // U.S. Department of Energy. URL; <https://www.nrel.gov/analysis/tech-lcoe-documentation.html> (дата обращения: 15.11.2024).
- Зверева Э.Р., Фарахов Т.М., Исхаков А.Р. Снижение вредных выбросов тепловых электростанций // Вестник КГЭУ. – 2011. – № 1(8). – С. 39–44.
- Николаев А.Н., Дмитриев А.В., Латыпов Д.Н. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе. – Казань: ЗАО «Новое знание», 2004. – 135 с.
- Санеев Б., Иванова И., Ижбулдин А., Майсюк Е. Оценка территориальной структуры выбросов диоксида углерода от объектов энергетики в Российской Федерации // Энергетическая политика. – 2022. – № 11(177). – С. 92–103.
- Barron-Gafford Greg A., Minor Rebecca L., Allen Nathan A., Cronin Alex D., Brooks Adria E., Pavao-Zuckenman Mitchell A. The photovoltaic heat island effect: larger solar power plants increase local temperatures // Scientific Reports. – 2016. – V. 6. – P. 1–7.
- Bossio D.A., Cook-Patton S.C., Ellis P.W. et al. The role of soil carbon in natural climate solutions // Nature Sustainability. – 2020. – V. 3. – P. 391–398.

## ОБЗОР СИСТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

М.А. Яхъяев<sup>1</sup>, Х.Ш. Садаев<sup>1</sup>, Я.Ю. Малькова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, г. Грозный

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г. Томск

Научный руководитель: И.Х. Саламов, старший преподаватель кафедры АТПП, ГГНТУ  
им. акад. М. Д. Миллионщикова

Для проведения оценки экономической эффективности солнечных электростанций необходимо точно спрогнозировать выработку используемых в них фотоэлектрических модулей [1]. Процесс проектирования солнечных электростанций и прогнозирования их выработки включает в себя несколько этапов:

- расчет интенсивности солнечного излучения локально, в месте потенциального размещения электростанции;
- выбор типа фотоэлектрических модулей;
- определение параметров инверторов и другой электроники, физического размещения фотоэлектрических модулей на местности.

Для оценки фактического уровня инсоляции на конкретной территории используются различные базы данных, в том числе базы данных Национального агентства аэронавтики и исследований космического пространства США – NASA [2]. Также существуют системы [3], например, Global Solar Atlas [4], включающие в себя необходимый набор программных инструментов для проектирования энергоустановок. В данной работе проанализированы три существующие системы проектирования и прогнозирования выработки солнечных энергоустановок: Global Solar Atlas, SolarEdge Designer [5] и Калькулятор E-Solarpower [6]. Для верификации полученных прогнозных данных были использованы реальные данные с сетевой солнечной электростанции мощностью 15 кВт, функционирующей на территории Чеченской Республики. Характеристики данной сетевой станции приведены далее, в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сетевой солнечной электростанции 15 кВт

Характеристика	Значение
Тип инвертора	Сетевой, GoodWe GW15KN-DT
Номинальная мощность инвертора	15 кВт
Максимальный КПД инвертора	98,3 %
Тип фотоэлектрических модулей	Монокристаллический кремний, Технология HJT
КПД фотоэлектрических модулей	19,17 %
КПД фотоэлектрических ячеек	23,5 %
Общая номинальная мощность	15,55 кВт

Оценка эффективности [7, 8] применения этих трех систем проектирования и прогнозирования выработки солнечных энергоустановок проведена посредством моделирования работы солнечной электростанции, с характеристиками, приведенными в табл. 1, для обеспечения возможности осуществления последующей верификации полученных результатов с фактическими историческими данными с данной электростанции. Территория для прогнозирования выработки – Чеченская Республика.

Прогноз выработки фотоэлектрической системы мощностью 15 кВт в Global Solar Atlas – 18,10 кВт·ч ежегодно. Отметим, что данное значение (из трех рассчитанных) наиболее приближено к фактической выработке за рассматриваемый период – с января по декабрь 2023 г. Фактическая выработка и рассчитанные прогнозные значения по месяцам приведены далее, в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение прогнозных значений и фактической выработки солнечной электростанции 15 кВт за 2023 г., МВт·ч

Месяц	Фактическая выработка	Global Solar Atlas	E-Solarpower	SolarEdge
Январь	0,81	0,90	1,00	0,79
Февраль	1,00	1,10	1,20	0,93
Март	1,40	1,50	1,67	1,55
Апрель	1,30	1,70	2,15	2,00
Май	1,83	1,90	2,37	2,11
Июнь	1,99	2,00	2,58	2,30
Июль	2,20	2,10	2,55	2,33
Август	2,10	2,10	2,57	2,17
Сентябрь	1,70	1,70	2,20	1,93
Октябрь	1,30	1,40	1,58	1,27
Ноябрь	0,90	1,00	1,10	0,84
Декабрь	0,70	0,70	0,84	0,73
Итого:	17,23	18,10	21,81	18,95

На рис. 1 приведена диаграмма, отражающая отклонение прогнозных значений от фактической выработки. Как видим, наиболее точный месячный прогноз получен посредством применения системы Global Solar Atlas, за исключением существенного отклонения в апреле (что имеет место для всех трех систем). Менее же точным оказался прогноз, рассчитанный в Калькуляторе E-Solarpower, при том, что в описании данной системы указано использование баз данных NASA.

Одной из особенностей систем проектирования и прогнозирования выработки солнечных энергоустановок является то, что в них используются разные базы данных метеорологических условий. В то же время, даже при использовании одних и тех же баз данных по уровню инсоляции на конкретной территории, в месте потенциального размещения электростанции, например, что может быть реализовано в системах Global Solar Atlas и Калькулятор E-Solarpower, прогнозные данные не являются идентичными. Калькулятор E-Solarpower не учитывает метеоусловия, что в данном случае (рис. 1) приводит к существенному завышению прогнозных значений относительно фактических (практически на треть, а именно на 27 %).

На фактическую выработку солнечной электростанции, помимо уровня инсоляции, влияет множество факторов [9], в том числе таких как температура окружающей среды, облачность, роза ветров и т. д. Таким образом, наиболее точным является прогноз с использованием локальной базы данных по метеорологическим условиям (по нескольким параметрам) на конкретной территории, на которой планируется размещение солнечной электростанции, например, с собственной метеостанции.

Завышение прогнозных значений приводит к завышению ожидаемой экономической эффективности от рассчитываемой солнечной электростанции, ввиду чего при проведении анализа инвестиционной привлекательности того или иного объекта генерации на базе возобновляемых источников энергии крайне важно использовать точные и эффективные инструменты для прогнозирования потенциальной выработки и в целом, оценки функционирования данного объекта.

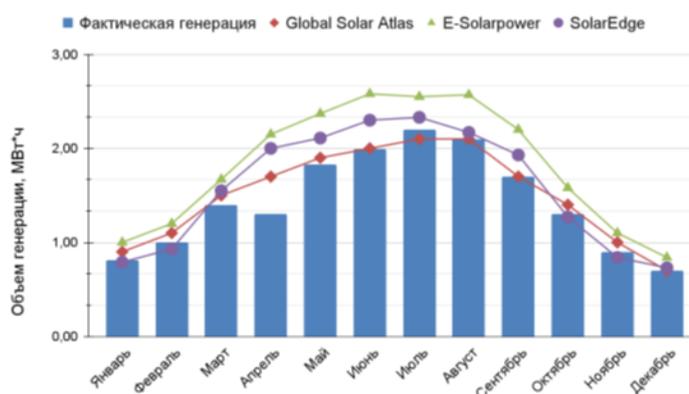


Рис. 1. Сравнительная диаграмма прогнозных значений и фактической выработки солнечной электростанции 15 кВт за 2023 г. (помесечно) в климатических условиях Чеченской Республики

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекиров Э.А., Сокут Л.Д. Основные этапы расчета параметров солнечной электростанции // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2013. – № 17(139). – С. 29–35.
2. Ярымбаш Д.С., Даус Ю.В. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций // Электротехника и энергоэнергетика. – 2014. – № 1. – С. 74–78.
3. Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учеб. пособие / под ред. В.И. Виссарионова. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 144 с.
4. Глобальный атлас инсоляции GLOBAL SOLAR ATLAS // Energydata.info. – URL: [https:// globalsolaratlas.info/map](https://globalsolaratlas.info/map) (дата обращения: 15.11.2024).
5. Конструктор солнечных станций Designer // SolarEdge. – URL: <https:// designer.solaredge.com/> (дата обращения: 15.11.2024).
6. Калькулятор солнечных батарей // E-Solarpower. – URL: <https:// e-solarpower.ru/kalkulyator-vyrabotki-sb/> (дата обращения: 15.11.2024).
7. Тюньков Д.А., Сапилова А.А., Грицай А.С., Алексеенко Д.А., Хамитов Р.Н. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация // ЭСиК. – 2020. – № 3(48). – С. 4–10.
8. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс: учеб. пособие. – 6-е изд., перераб. – М.: Дело, 2004. – 576 с.
9. Моргоева А.Д., Гудиев Т.Т., Хасцаев Б.Д., Хмара В.В. Повышение эффективности функционирования автоматизированной системы диспетчерского управления с помощью разработки подсистемы прогнозирования электрической нагрузки на примере подстанции 110 кВ // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2023. – Т. XIX. – № 4(34). – С. 15–25.

## ПОВЫШЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМА ВИРТУАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**М.О. Перцевой**

*Саяно-Шушенский филиал СФУ, ГГЭЭС, группа ГЭ22-01Б*

Научный руководитель: А.А. Ачитаев, к.т.н., ведущий специалист департамента инновационного развития ПАО «РусГидро»

### Анализ проблематики

Поскольку альтернативные источники энергии в составе с инвертором, работающим в режиме «ведомый» не обладают инерционными свойствами, то при изменении солнечной инсоляции, скорости ветра и т. д. фазовая автоподстройка частоты (ФАПЧ) теряет связь с ЭЭС, происходит мгновенное изменение баланса мощности системы, что приводит к падению активной мощности и, как следствие, уменьшению частоты ЭЭС. Данное явление вызывает «лавину» частоты, при которой происходит выход ЭЭС из строя с последующим отключением потребителей. Кроме того, при изменении выработки безынерционных машин в ЭЭС протекают низкочастотные и субсинхронные колебания, соответствующие высшим гармоникам. Низкочастотные колебания – периодическое изменения режимных параметров с частотой до 3 Гц. Высшие гармоники – токи или напряжения, которые больше частоты ЭЭС и кратны данным частотам. Данные явления приводят к асинхронному режиму работы СГ, повреждению трансформаторов, пробоем изоляторов сетей, перегрузке линий электропередач (ЛЭП), срабатыванию средств релейной защиты и автоматики, а также большим электрическим потерям генератора. На рис. 1 представлен сигнал, соответствующий высшим гармоникам ЭЭС магнитудой 10 %.

Кроме того, на рис. 2 представлен экспериментальный результат частотной характеристики системы, показывающий провал частоты изолированной ЭЭС, содержащей альтернативные возобновляемые источники энергии.

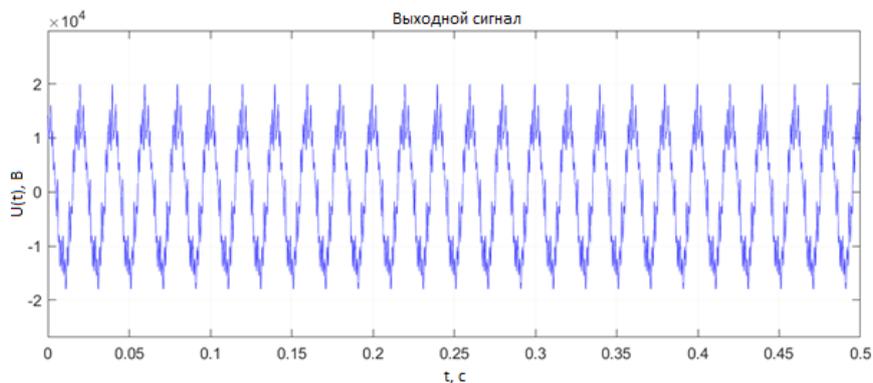


Рис. 1. Высшие гармоники ЭЭС магнитудой 10 %

Стоит отметить, что именно такие провалы частоты приводят к перечисленным последствиям для ЭЭС. Кроме того, так как ЭЭС обладает разными конфигурациями, то помимо вышечисленных проблем внедрения фотоэлектрических систем в ЭЭС существует проблема соответствия способа реализации алгоритма ВСГ от топологии системы. Суть данной проблемы заключается в невозможности применения единого алгоритма управления модулей широтно-импульсной модуляции (ШИМ), входящей с состав инвертора.

В общем случае ВСГ представлен на рис. 3.

Структура ВСГ состоит из средства накопления электрической энергии (СНЭЭ), инвертора и системы управления виртуальной инерцией. Виртуальная инерция интегрируется путём управления активной мощностью инвертора в обратной пропорции к частоте вращения ротора. Вследствие компенсации инерции инерционное управление системой должно поглощать или отдавать активную мощность, следовательно, заряд в СНЭЭ должен работать на 50 % от номинальной мощности в устойчивом состоянии. Но в связи с различными ситуациями состояния заряда работа регулятора инерции может изменяться в зависимости от заданных пределов. Когда происходит понижение частоты ЭЭС, а именно уменьшение генераторных мощностей, система работает в режиме управления инерции системы, а случае повышения частоты, то есть избыточность генераторных мощностей, – в режиме виртуальной нагрузки.

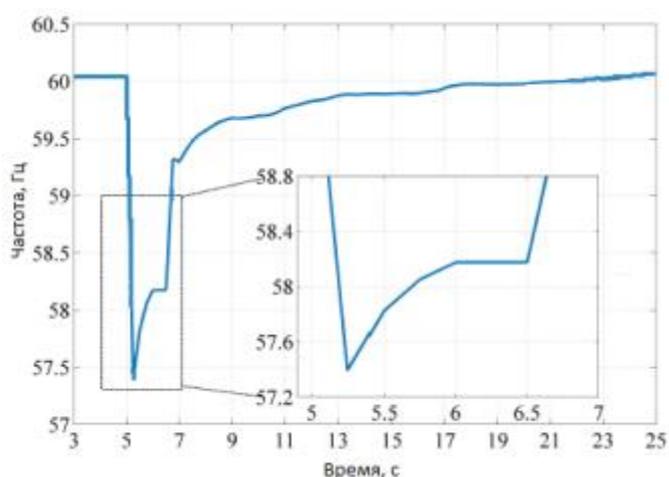


Рис. 2. Частотная характеристика системы, содержащей безынерционные машины

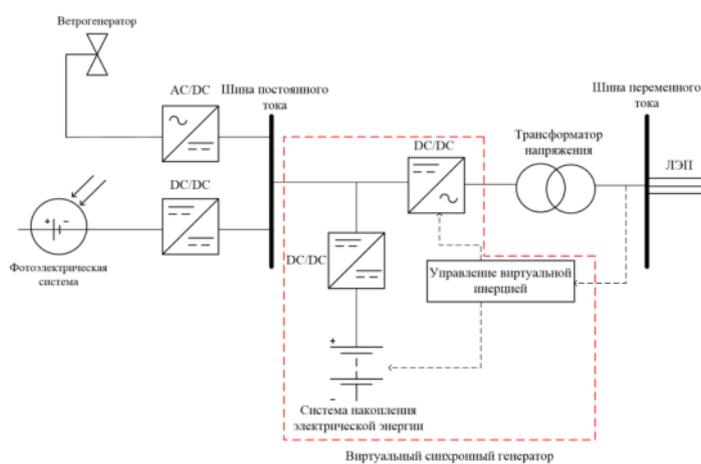


Рис. 3. Структура ВСГ

### Анализ эффективности ВСГ и тесты, проводимые при помощи математической модели ВСГ

Проведённые испытания выполнены при помощи математической модели в программе Matlab, где алгоритм ВСГ применён для ветроустановки.

На рис. 4 представлено изменение частоты ЭЭС без алгоритма ВСГ и при включении алгоритма ВСГ.

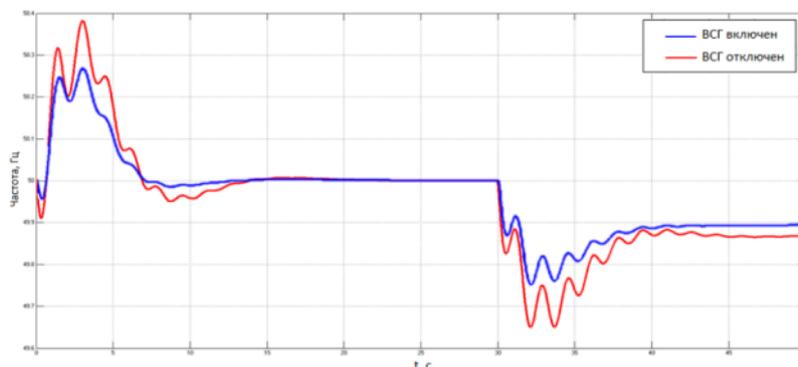


Рис. 4. Изменение частоты без ВСГ и при его включении

Без ВСГ скачки частоты сопровождаются быстрым изменением: при первом изменении частота изменяет значение от 49,91 до 50,38 Гц за 3 с, при втором изменении – от 50 до 49,65 Гц за 2 с. Алгоритм ВСГ позволяет уменьшить изменение данных параметров и выполнить его плавно. Стоит отметить, что скачки зависят от коэффициента инерции: при увеличении данного коэффициента скачки параметров уменьшаются и становятся плавными.

Во время работы алгоритма ВСГ возникает мощность инерции, зависимость от времени которой представлена на рис. 5.

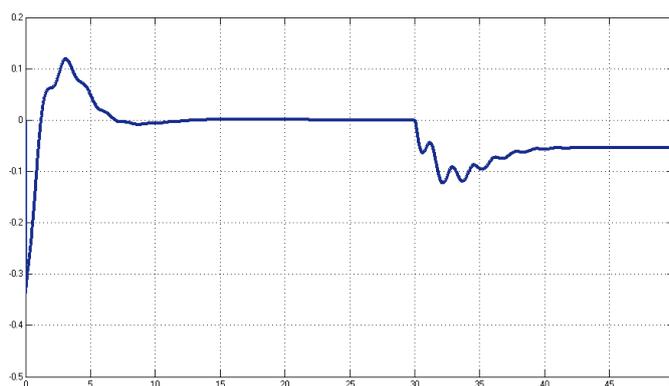


Рис. 5. Изменение активной мощности инерции во времени во время работы ВСГ

### Технико-экономическое обоснование выбора СНЭЭ

Средства накопления электроэнергии являются важной частью ВСГ, поскольку именно они позволяют сглаживать провалы активной мощности и, как следствие, частоты. Существуют проточные накопители, которые основаны на ионном обмене двух электролитов. В отличие от литиевых батарей данный вид накопителей может работать 20 лет. Также проточные накопители электроэнергии обладают лучшими компоновочными свойствами при сравнении с остальными СНЭЭ, быстрым временем отклика при разрядке, отсутствием выбросов в атмосферу и возможностью стабильной работы в арктической среде. Из недостатков можно отнести низкую скорость зарядки и дороговизну технологии из-за ванадия, входящего в состав электролита. Наиболее подходящим СНЭЭ для АГЭЖ является проточный накопитель по причине высоких компоновочных свойств, высокой мобильности, быстрого времени отклика и отсутствию взрывоопасности.

## Выводы

В статье рассматриваются результаты исследований внедрения алгоритма ВСГ на основе АГЭЖ. Был проведён литературный обзор, анализ частотного регулирования изолированных ЭЭС, были приведены математическое описание ВСГ в общем случае, для ветроустановок и фотоэлектрических установок, показана разница изменения частоты между ЭЭС, содержащих алгоритм ВСГ, и систем без данного алгоритма управления инвертором, а также технико-экономическое обоснование выбора СНЭЭ. Результаты исследований и проведённых тестов утверждают об ВСГ и внедрения в данную систему проточных накопителей электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ алгоритмов управления виртуальной инерцией ветроустановок ветроэлектрических станций / В.Ю. Астапов, А.А. Ачитаев, А.В. Домышев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 95-го заседания Международного научного семинара. Выпуск 74 / отв. редактор В.А. Стенников. – пос. Хужир (оз. Байкал), 09–15 июля 2023 года. – 2023. – С. 693–702. ил. ISBN 2413-8665.
2. Ачитаев А.А. Демпфирование субсинхронных колебаний в электроэнергетических системах с ветроэнергетическими установками // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы 95-го заседания Международного научного семинара. Выпуск 74 / отв. редактор В.А. Стенников. – пос. Хужир (оз. Байкал), 09–15 июля 2023 года. – 2023. – С. 693–702. ил. ISBN 2413-8665.
3. Мигранов Р.М., Доброскок Н.А. Исследование влияния инерционных свойств виртуального синхронного генератора на устойчивость системы // Молодёжная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. – Санкт-Петербург. – 2021. – С. 69–72. ил. ISBN 978-5-7629-2374-3.
4. Ачитаев А.А., Перцевой М.О. Идентификация низкочастотных колебаний и синхронных качаний методами искусственного интеллекта // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сб. материалов X Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов и школьников: 24–28 апреля 2023 г.: сборник. – Саяногорск ; Черемушки : СШФ СФУ, 2023. – С. 346–355. ил. ISBN 978-5-7638-4880-9.
5. Dynamic Inertia Evaluation for type-3 Wind Turbines Based on Inertia Function / Xiang Guo; Donghai Zhu; Xudong Zou; Bingchen Jiang; Yihang Yang; Yong Kang; Li Peng // IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems – 2021. – С. 28–38.
6. Frequency support in a micro-grid using virtual synchronous generator based charging station / K. Dhingra, M. Singh // IET Renewable Power Generation. – 2018. – С. 1034–1044.

## РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОЙ РАЗГРУЗКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

А.В. Киевец<sup>1</sup>, Ю.Д. Бай<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром трансгаз Югорск»

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ, к.т.н., доцент

Особенность работы электроэнергетических систем подразумевает постоянный баланс генерируемой и потребляемой электроэнергии, при нарушении которого, в сторону увеличения генерации влечет за собой необходимость использования различных регуляторов, а резкое возникновение небаланса, вследствие аварийных ситуаций различного характера влечет за собой необходимость использования противоаварийной автоматики (ПА). Использование ПА особенно важно для сохранения синхронной работы генераторов в случае возникновения избыточной энергии ротора турбоагрегата, с этой целью существует три вида управляющий воздействия ПА:

- электрическое торможение;
- отключение генератора,
- кратковременная разгрузка турбины энергоблока (КРТ).

Учитывая специфику функционирования названных выше УВ, выделяется использование КРТ, т. к. данный вид является наиболее экономически выгодным и технологически совершенным, поскольку позволяет выполнить разгрузку генератора на любой необходимый уровень с последующим возвратом до требуемого послеаварийного значения. Следует обозначить, что ожидаемая эффективность УВ КРТ достигается лишь при условии его оптимальной настройки, суть которой заключается в задании определенных значений его настроечных параметров. Однако определения названных параметров является не тривиальной задачей, т. к. для этого требуется обладать информацией о функционировании всех элементов системы регулирования и турбины турбоагрегата. При использовании усредненных параметров УВ КРТ возможно удастся сохранить динамическую устойчивость, однако этот процесс будет сопровождаться переходным процессом с большой амплитудой и длительностью, в противном случае к нарушению синхронной работы и возникновению асинхронного режима [1].

Принцип кратковременной разгрузки турбины заключается в быстром снижении механической мощности, подводимой к ротору генератора, чтобы предотвратить накопление избыточной кинетической энергии в аварийных режимах электроэнергетической системы. Этот процесс выполняется за счет временного уменьшения подачи пара или другого рабочего тела в турбину с использованием специально разработанных управляющих алгоритмов.

Основные этапы работы КРТ заключаются в следующем:

- при возникновении возмущения в сети КРТ инициируется на основе сигналов аварийной автоматики;
- подача пара в турбину уменьшается, что снижает механическую мощность и замедляет вращение ротора;
- избыточная кинетическая энергия ротора, которая могла бы привести к неустойчивости в сети, компенсируется за счет уменьшения механической мощности;
- после стабилизации режима системы параметры подачи пара постепенно возвращаются к исходным значениям.

Этот принцип позволяет быстро адаптироваться к аварийным изменениям в энергосистеме, минимизируя амплитуду синхронных колебаний, снижая риск перехода в асинхронный режим и повышая общую устойчивость системы. КРТ используется в сочетании с высокоточными математическими моделями и системами автоматического управления для обеспечения эффективной работы энергоблоков.

Важнейшим условием эффективной настройки УВ КРТ является необходимость обладания информацией о процессе функционирования УВ КРТ, для чего была синтезирована математическая модель турбины и ее системы регулирования (рис. 1). Представленная модель обеспечивает получение полной и достоверной информации, необходимой для оптимальной настройки УВ КРТ, при которой достигаются ее наилучшие экономические и технологические характеристики [1, 3, 4].

Учитывая, что все процессы, особенно аварийного характера и функционирования ПА, оказывают в разной степени влияние друг на друга, оказывается очевидным, что для полноценного анализа необходимо рассматривать функционирование УВ КРТ совместно со всей энергосистемой, с целью учета их взаимовлияния на переходный процесс. Подобные аварийные эксперименты в реальной ЭЭС невозможны по множеству причин, а физическое моделирование ограничено в своих возможностях. Единственным способом обеспечить необходимую полноту информации для настройки УВ КРТ является математическое моделирование.

Учитывая вышесказанное необходимо определиться с инструментом реализации синтезированной модели и учете влияния на процесс разгрузки остальное оборудования ЭЭС. Однако современные программы обладают некоторыми ограничениями в моделировании больших современных энергосистем, что приводит к необходимости упрощения используемых математических моделей.

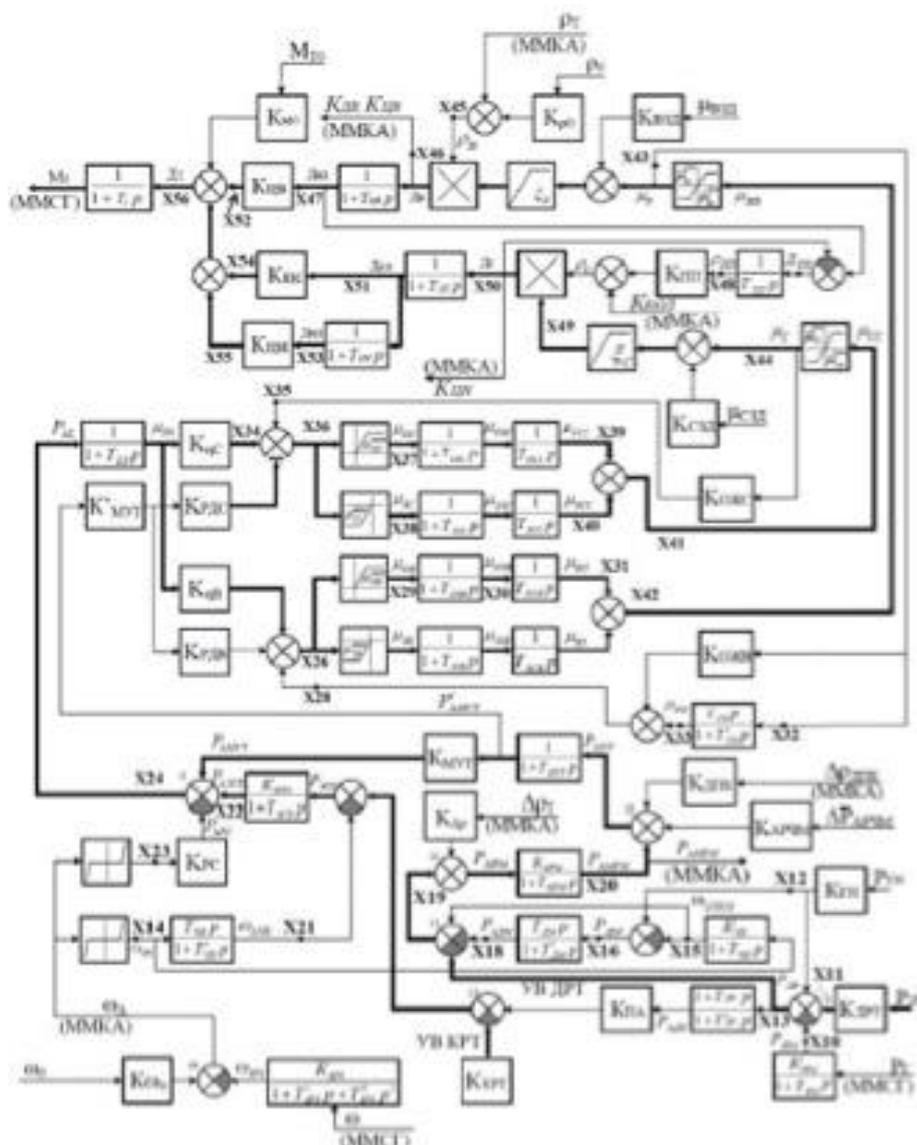


Рис. 1. Структурная схема математической модели турбины и ее системы регулирования

Для анализа процесса разгрузки с учетом влияния как системы регулирования и турбины, так и всей электроэнергетической системы (ЭЭС), был применен гибридный подход к моделированию. Этот подход реализован во Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), разработанном в Томском политехническом университете.

Модернизация ВМК РВ ЭЭС включала использование специализированной платы (рис. 2), основанной на математической модели, реализуемой на аналоговом уровне. Применение ключевого свойства конденсатора, обеспечивающего точное интегрирование без необходимости численных методов решения дифференциальных уравнений, позволило отказаться от упрощения математических моделей оборудования. Такой подход открывает широкие возможности для дальнейшего усовершенствования и развития ВМК РВ ЭЭС, обеспечивая высокую точность моделирования.

Для оценки работоспособности созданной детализированной математической модели турбины, её системы регулирования и средств реализации был проведён эксперимент, включающий сценарий работы кратковременного регулирования турбины (рис. 3).

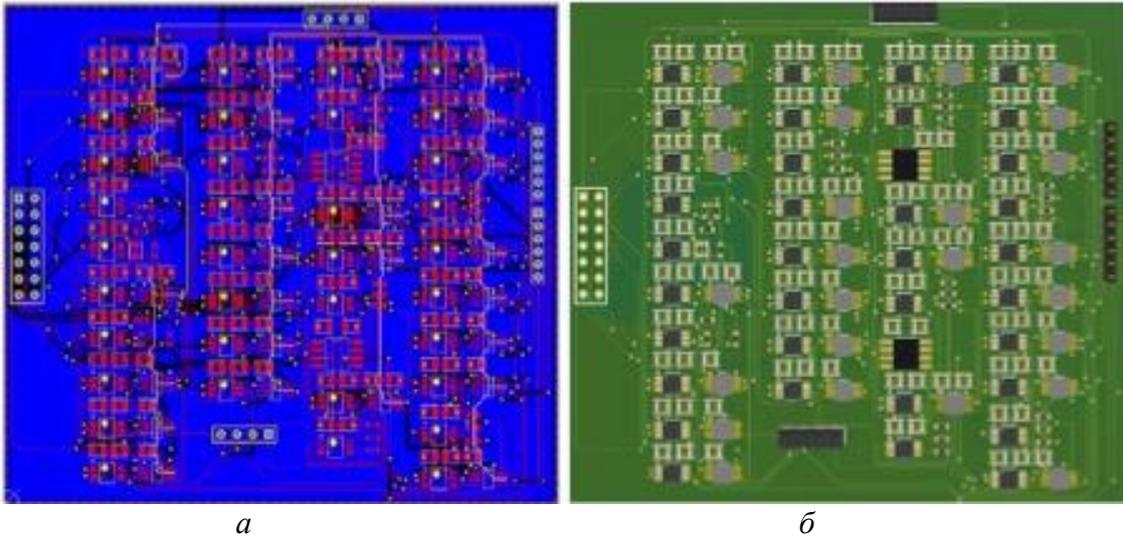


Рис. 2. Трассировка печатной платы (а), печатная плата, реализующая разработанную математическую модель (б)

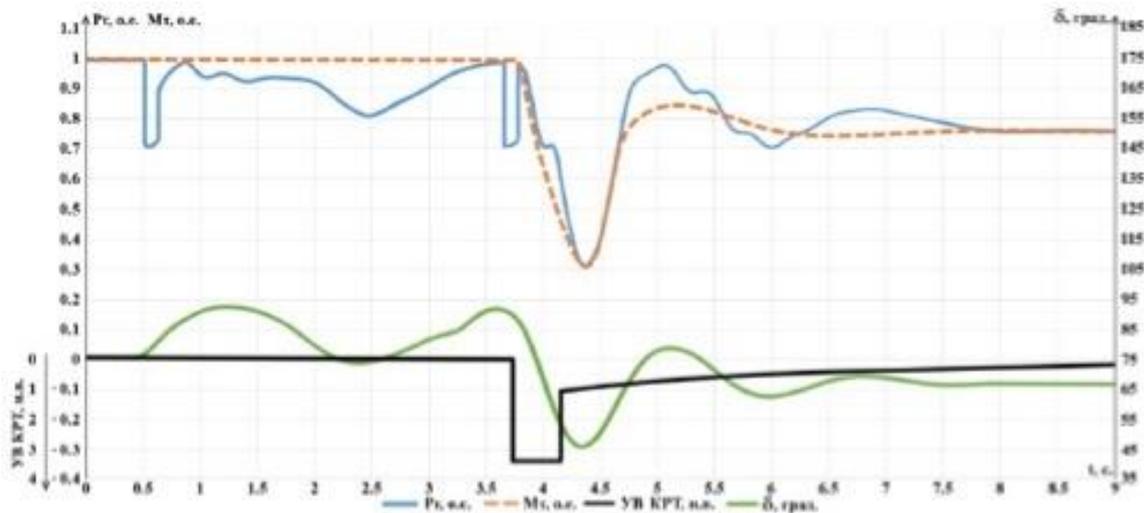


Рис. 3. Осциллограмма электрической мощности генератора и момента турбин разгружаемого агрегата

Анализ полученной осциллограммы демонстрирует, что разработанные инструменты моделирования успешно и с высокой точностью воспроизводят процессы, происходящие в турбогенераторе в условиях работы КРТ.

Проведённое исследование подтвердило, что УВ в виде КРТ является наиболее эффективным способом компенсации избыточной кинетической энергии роторов в аварийных режимах электроэнергетических систем. Благодаря высокой точности управления и возможности адаптации параметров под конкретные условия, КРТ обеспечивает устойчивость энергосистемы, минимизирует амплитуду синхронных колебаний и снижает риск перехода в асинхронные режимы.

Разработка и внедрение детализированных математических моделей турбин и их систем регулирования, реализованных в программно-аппаратной форме, позволяют достоверно воспроизводить процессы, происходящие в турбогенераторах, и открывают новые перспективы для дальнейшего совершенствования КРТ. Это делает данный подход незаменимым инструментом для повышения надёжности и эффективности работы современных электроэнергетических систем

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982. – 311 с.
2. Kievets A., Ruban N., Andreev M., Suvorov, A. Turbine Fast Valving Setting Method Based on the Hybrid Simulation Approach // *Energies* – 2023. – Vol. 16 (4).
3. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. – М.: Энергия, 1975. – 216 с.
4. Портной М.Г., Рабинович Р.С. Управление энергосистемами для обеспечения устойчивости. – М.: Энергия, 1978. – 352 с.
5. Баринов В.А. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике // под общей ред. Ю.Н. Руденко и В.А. Семенова. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 648 с.
6. Ершевич В.В., Зейлигер А.Н., Илларионов Г.А. и др. Справочник по проектированию электроэнергетических систем // под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
7. Божанов С.А., Батхон И.С., Баумштейн И.А. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения // под ред. И.А. Баумштейна и М.В. Хомякова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 656 с.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОЛОННЫ ГАЗОРАЗДЕЛЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

**А.В. Уфимцев**

*Томский политехнический университет, ИШИТР, гр. 8Т11, avu34@tpu.ru*

В данной работе приведён анализ существующих методов оптимизации параметров протекающего технологического процесса путём численного моделирования и тестирования оптимальных параметров функционирования на примере ректификационной колонны в нефтехимической отрасли. Представленная работа предлагает решение по обнаружению недостатков в работе колонны и предложение технических решений для оптимизации процесса выделения бутана. Полученные результаты имеют практическую значимость для инженеров и специалистов в области управления технологическими процессами промышленных предприятий, а также представляют интерес для всех, кто работает в области проектирования химического оборудования и технологических процессов.

**Ключевые слова:** идентификация, ректификационная колонна, многопараметрический контроллер, математическое моделирование, трендовые группы, T-Softt.

### Введение

В данной работе рассматривается идентификация динамических моделей многопараметрического контроллера с целью повышения эффективности функционирования ректификационной колонны, применяемой для выделения бутана в технологических процессах нефтехимической промышленности. В работе рассматриваются исторические данные и методы анализа, а также шаги по оптимизации процесса на основе проведенных исследований. Ректификационная колонна является ключевым устройством в процессах физического разделения вещества с получением целевых продуктов заданного качества. Системой для идентификации данных технологического процесса модели в промышленном программном обеспечении T-Soft.

Особое внимание уделено исследованию реальных данных численного моделирования, составление и последующий анализ трендовых групп для реализации пошагового теста. Направленного на определение оптимальных параметров функционирования колонны. Исследование, представленное в данной статье, имеет практическую значимость для технических специалистов и инженеров, занимающихся проектированием и управлением технологическими процессами в промышленности, поскольку проделанная в статье работа направлена на обнаружение и устранение недостатков в работе ректификационной колонны, а также

предложение эффективных технических решений для оптимизации процесса, что приведет к повышению качества и эффективности производства выделения бутана.

### Описание функционирования системы

В данной работе рассмотрим исторические данные о протекании технологического процесса с ректификационной колонной выделения бутана.

Ректификационная (дистилляционная) колонна – это вертикальный цилиндрический аппарат, который предназначен для физического разделения вещества с получением целевых продуктов требуемого качества. При проведении процессов испарения и конденсации в колонне получают пары более богатые низкокипящими компонентами и жидкость (флегму) более богатую высококипящими компонентами, чем исходное вещество. Процесс многократного контактирования паровой и жидких фаз называется процессом ректификации. Колонна имеет тарелки, это контактное устройство на которых происходит теплообмен между паровой и жидкой фазами [1].

Принципиальная схема колонны с нанесением основных параметров технологического процесса представлена на рис. 1.

На данной колонне был заменён датчик, после чего был проведён анализ трендовых групп. На рассматриваемом периоде найдены участки данных подходящие для идентификации модели. Такими участками являются ступенчатые модели входа со стабильными показаниями возмущающих переменных. На этих участках данных и была проведена идентификация [2].

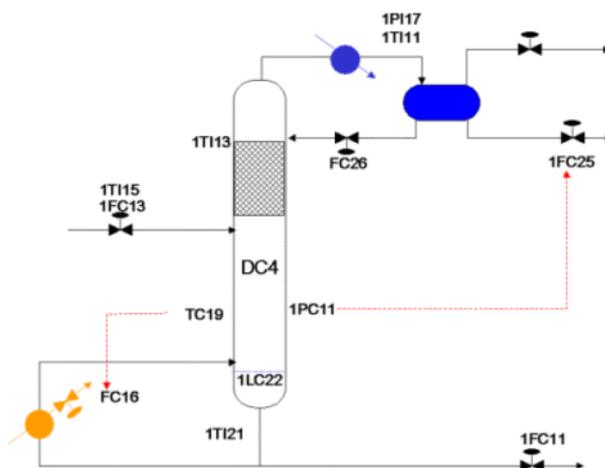


Рис. 1. Структурная схема колонны выделения бутана

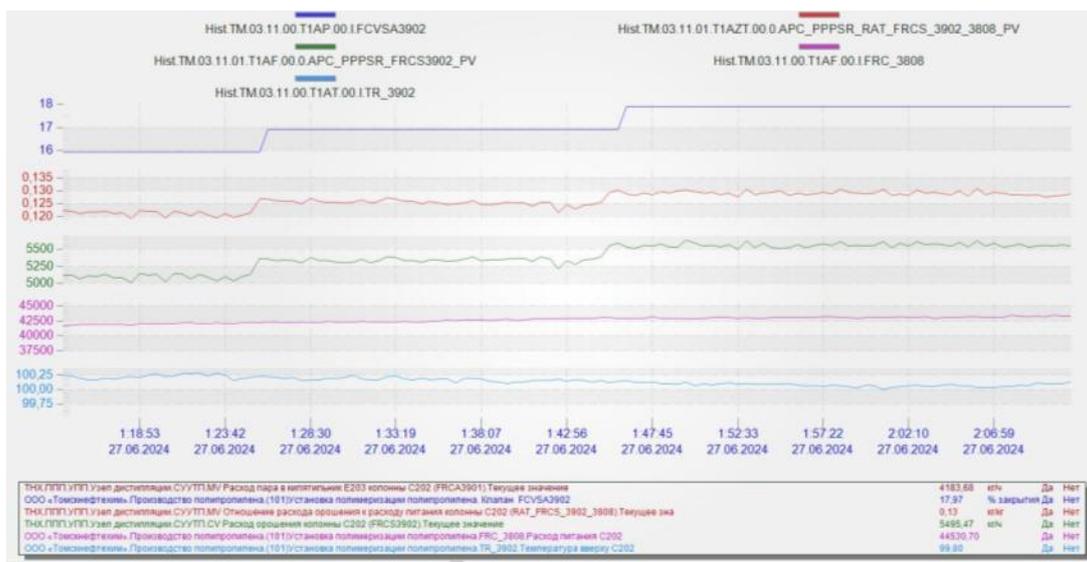


Рис. 2. Анализ трендовых групп

Исходя из проведённого анализа, можно сказать, что величины шагов орошения колонны не достаточны, поэтому нужен планируемый пошаговый тест. Были выгружены данные из проведённого анализа и загружены в симуляцию. На вход подаются две переменные – отно-

шение расхода орошения к питанию и расход орошения колонны. На выходе находится температура шлема (верха). По результату моделирования представленным на рис. 3 можно сказать, что модель построить нельзя, так как она не выполняет показатели качества [3].

Необходимо запланировать и выполнить пошаговый на производстве с колонны для получения данных, которые будут удовлетворять качеству моделирования. Для того, чтобы провести пошаговый тест, необходимо аналитическим путём рассчитать примерные величины орошения колонны. Из рис. 2 видно, что от увеличения орошения колонны на 200–300 кг/ч изменение температуры составляет всего 0,25 °С.

На текущий момент отклики при увеличении орошения находятся на уровне шума, поэтому величины для шагов пошагового теста необходимо увеличить в 3 раза. По рекомендации эксперта в управлении ректификационной колонны, было принято решение об увлечении орошения колонны от 500 до 1000 кг/ч и запланирован пошаговый тест, в результате которого будут получены новые значения для создания модели [4].

В результате изменения величин орошения колонны и проведённого пошагового теста на производстве, с ректификационной колонны были получены следующие результаты, представленные на рис. 4.

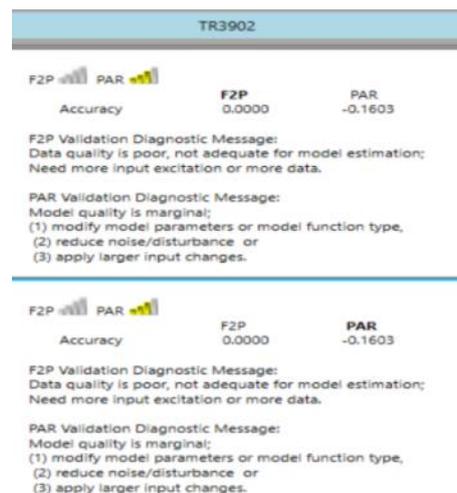


Рис. 3. Результат модели по текущим данным

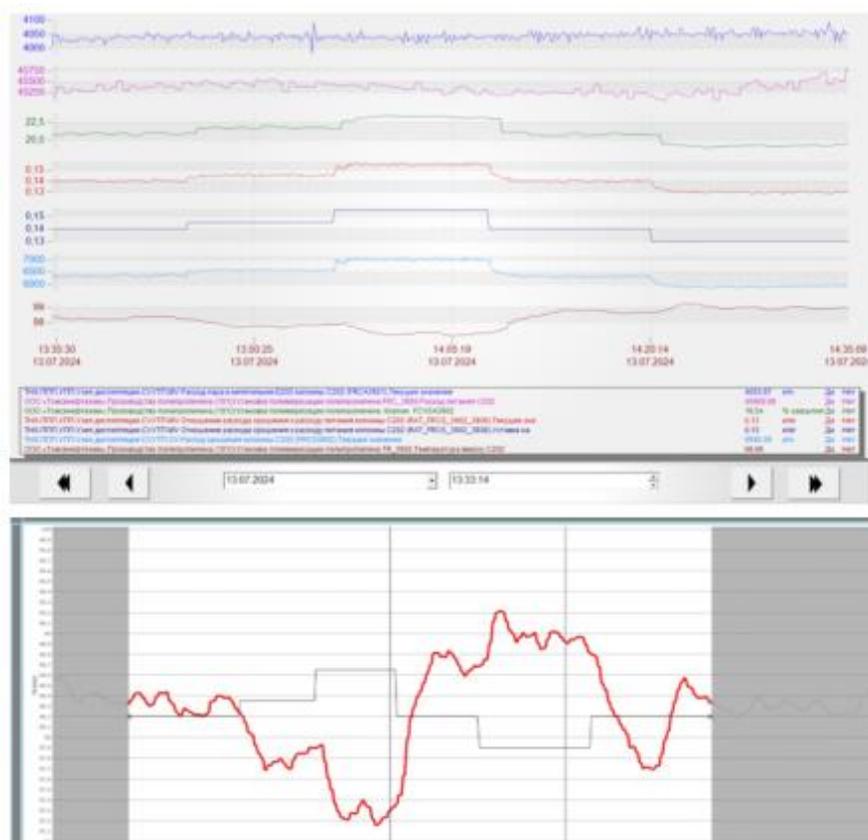


Рис. 4. Результат пошагового теста с колонны и зависимость температуры от орошения после пошагового теста в симуляции

В результате пошагового теста чётко видна зависимость температуры от орошения колонны, орошение в виде подачи специального вида масла способствует снижению температуры колонны и интенсивности подачи пара. Данное техническое решение обеспечивает целевое регулирование автоматического управления.

### **Заключение**

В ходе выполнения данной исследовательской работы был проведён анализ исторических данных до замены датчика, что позволило выявить необходимость планируемого пошагового теста для оптимизации процесса поскольку моделирование по текущим данным не позволило построить модель, удовлетворяющую качеству и показателям. Проведённый в последствии пошаговый тест со значительным увеличением орошения колонны привел к получению новых данных, демонстрирующих явную зависимость температуры от орошения колонны. Представленные результаты степ-теста позволяют судить об достигнутой эффективности управления технологическим процессом. Таким образом, предложенный подход к оптимизации процесса выделения бутана через ректификационную колонну оказался успешным и позволяет эффективно управлять производством, обеспечивая целевое качество продукции.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Работников М.А., Шумихин А.Г. Применение адаптируемых моделей в системах упреждающего управления процессами органического синтеза – Текст: электронный Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2023 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-adaptiruemyh-modeley-v-sistemah-uprezhdayuschego-upravleniya-protsessami-organicheskogo-sinteza> (дата обращения 15.02.2024)
2. Мищенко Д.Д. Моделирование распределённой системы идентификации динамических моделей – Текст: электронный Science Time, 2015 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-raspredelyonnoy-sistemy-identifikatsii-dinamicheskikh-modeley> (дата обращения 12.03.2024)
3. Черешко А.А., Шундерюк М.М. Границы применимости алгоритмов усовершенствованного управления с прогнозирующей моделью в условиях неопределённости объекта управления – Текст: электронный Проблемы управления, 2020. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/granitsy-primenimosti-algoritmov-usovershenstvovannogo-upravleniya-s-prognoziruyushey-modelyu-v-usloviyah-neopredelennosti-obekta> (дата обращения 27.04.2024)
4. Сайделов А.Р. Разработка оперативной диагностики изменения характеристик объекта – Текст: электронный Символ науки, 2021 – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-operativnoy-diagnostiki-izmeneniya-harakteristik-obekta> (дата обращения 18.05.2024)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ» В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ**

**А.А.-В. Садулаев**

*Грозненский государственный нефтяной технический университет  
имени акад. М.Д. Миллионщикова, ИЭ, АТПП, группа АТПП-24м*

Научный руководитель: Х.А. Садыков, ст. преподаватель каф. АТПП ГГНТУ

Современные технологии учета электроэнергии играют ключевую роль в оптимизации потребления ресурсов и повышения эффективности энергетических систем. Одними из наиболее прогрессивных решений являются интеллектуальные системы учета, которые позволяют собирать, обрабатывать и анализировать данные о потреблении электроэнергии в реальном времени [1]. Для возможности изучения подобного рода системы создаются различные учебно-лабораторные стенды, с помощью которых можно не только закрепить теоретический материал, но и развить практические навыки работы с системой.

Создание учебно-лабораторного стенда для изучения интеллектуальных систем учета электроэнергии имеет определенное значение для будущего специалиста в области энергетики, т. к. работая на данном стенде, студент может закреплять полученные знания своей профессии. С этой целью компанией «РКС-энерго» был разработан учебно-лабораторный стенд «Интеллектуальная система учета электроэнергии». В качестве основного оборудования на данном стенде используются счетчики электроэнергии от компаний «ФОБОС» [2] и «МИЛУР» [3], т. к. они используют современные технологии учета и анализа потребления электроэнергии. Внешний вид стенда представлен на рис. 1.

Основными целями при работе с данным учебно-лабораторным стендом являются:

- ознакомление студентов с принципами работы интеллектуальных систем учета электроэнергии;
- развитие навыков эксплуатации и настройки счетчиков «ФОБОС» и «МИЛУР»;
- проведение экспериментов по анализу и оптимизации потребления электроэнергии.

Задачи стенда:

- создание модели реальной энергосистемы;
- изучение методов сбора и обработки данных о потреблении электроэнергии;
- проведение экспериментов по многотарифному учету и управлению нагрузкой.

Компания «ФОБОС» занимается разработкой и производством оборудования для учета и регулирования электроэнергии. Их счетчики предназначены как для бытового, так и для коммерческого использования, обеспечивая высокую точность измерений и возможность дистанционного считывания данных.

Компания «МИЛУР» также предлагает широкий спектр решений в области учета электроэнергии. Их продукция включает в себя как традиционные, так и интеллектуальные счетчики, которые могут интегрироваться в системы автоматизации.

Технические характеристики используемых счетчиков:

- счетчики «ФОБОС»:
- высокая точность измерений (класс точности 1.0 или 0.5);
- поддержка различных протоколов передачи данных (RS-485, MODBUS);
- возможность дистанционного управления и мониторинга;
- счетчики «МИЛУР»:
- многофункциональность (учет активной и реактивной энергии);
- встроенные функции защиты от несанкционированного доступа;
- поддержка интеграции в системе «умного города».

На данном учебно-лабораторном стенде студенты могут проводить эксперименты такие, как:

- измерение потребления электроэнергии в различных режимах работы;
- анализ данных о качестве электроэнергии (напряжение, частота, гармоники);
- оценка эффективности использования многотарифного учета;
- проведение сравнительного анализа работы счетчиков «ФОБОС» и «МИЛУР» в разных условиях.

Полученные данные и результаты экспериментов могут быть использованы:

- для подготовки курсовых и дипломных работ;
- разработки рекомендаций по оптимизации учета электроэнергии;
- улучшения процесса обучения студентов в области энергетики.

Учебно-лабораторный стенд «Интеллектуальная система учета электроэнергии» является важным инструментом для подготовки специалистов в области энергетики. Он предоставляет уникальные возможности для практического обучения и исследования, что способствует развитию инновационных подходов в управлении электроэнергией и повышению энергоэффективности.



Рис. 1. Внешний вид учебно-лабораторного стенда  
«Интеллектуальная система учета электроэнергии»

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садулаев А.А.В., Садыков М.С. Интеллектуальная система управления спросом на электроэнергию бытовых потребителей // Бутаковские чтения : сборник статей II Всероссийской с международным участием молодежной конференции. – 2022. – С. 83–86.
2. ФОБОС 3 – Трехфазный электросчетчик со встроенным NB-FI радиомодемом 2024. – URL: <https://waviot.com.ru/prod/3.html> (дата обращения 18.11.2024).
3. Счетчики электроэнергии МИЛУР / Российский производитель интеллектуальных приборов учета 2024. – URL: <https://miluris.ru/?ysclid=m3opdji341729194343> (дата обращения 18.11.2024).

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

**А.А. Тетерюков, И.Б. Мухачев**

*Белорусский национальный технический университет,  
ФИТР, РТС, группа 10703223 и 10703123*

Научный руководитель: Н.В. Воюш, ст. преподаватель кафедры РТС ФИТР БНТУ

Сфера цифровизации и автоматизации различных промышленных процессов с использованием искусственного интеллекта и компьютерного зрения интенсивно развивается на протяжении последних десятилетий. Компьютеры способны анализировать огромные объемы информации и принимать оптимальное решение на основе имеющихся визуальных данных. Эта сфера безгранична, и инженеры со всего мира находят ей применение в военных, гражданских и космических целях. Но в данной статье более подробно рассматривается именно сфера энергетики, способы применения в ней компьютерного зрения, а также выделяем как положительные аспекты такого внедрения, так и явные недостатки.

Начать стоит с мазутной промышленности, ведь именно с мазутных электростанций происходит большая часть энергии, поэтому в этой сфере наблюдается интенсивный рост внедрения искусственного интеллекта.

Здесь компьютерное зрение может быть использовано:

- для высокой скорости обработки и структурирования данных (из-за огромного количества переменных человек физически не способен анализировать такие объемы данных самостоятельно);
- уменьшения влияния человеческого фактора (как ни странно, зачастую из-за человеческих ошибок происходят различные аварии и утечки);
- считывания буквенных и цифровых меток;
- контроля использования сотрудниками средств индивидуальной защиты.



Рис. 2. Пример распознавания работников

При этом из минусов стоит отметить дороговизну такого оборудования, а также к нему требуется высококвалифицированный специалист. Тем не менее это лишь малая часть задач, выполняемых с помощью компьютерного зрения на таких подстанциях и ежегодно этот список пополняется нововведениями.

Саму пользу от компьютерного зрения с точки зрения непосредственной оптимизации процессов вместе с искусственным интеллектом можно заметить уже на современных проектах и станциях. Выделяют несколько основных видов использования компьютерного зрения на предприятиях: мониторинг в реальном времени, точная аналитика, расширенная автоматизация, обнаружение аномалий, экономия энергии, интеллектуальные энергосистемы, интеграция возобновляемых источников энергии.

Как пример отметим ход собственной разработки в данном направлении, а именно разработка продукта на основе искусственного интеллекта при помощи машинного зрения для мониторинга и своевременного реагирования в случае чрезвычайной ситуации на предприятии. Программа нацелена на контроль ношения средств индивидуальной защиты, таких как каски, различного рода маски и др. Камеры и датчики фиксируют визуальные данные, которые затем обрабатываются алгоритмами компьютерного зрения, способными распознавать не только самого человека, но и какая именно защита на нем в данный момент. Это способствует снижению рисков незапланированных травм, аварий на предприятии, и в целом халатного отношения со стороны работников.

Для разработки такого продукта на Python были использованы различные технологии и библиотеки. OpenCV – библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обеспечивает возможности компьютерного зрения, выполняя предварительную обработку изображений и помогая выделять объекты, такие как каски и маски. TensorFlow и Keras являются популярными библиотеками для создания и обучения нейронных сетей. Они позволяют создавать модели для классификации изображений, обнаружения объектов и сегментации. TensorFlow также поддерживает экспорт моделей для работы на различных устройствах. В нашем же проекте они используются для создания и обучения нейронных сетей, способных классифицировать и распознавать средства индивидуальной защиты на изображениях. Также применялся алгоритм YOLO (You Only Look Once) для высокоточного распознавания и отслеживания объектов в реальном времени, что позволяет системе эффективно фиксировать наличие защитной экипировки. Подобные продукты еще находятся в разработке, но можно с уверенностью сказать, что в будущем они будут точно применяться на большинстве предприятий:

Системы компьютерного зрения могут применяться в следующих сферах:

- **Мониторинг в реальном времени:** основная функция компьютерного зрения, при которой искусственный интеллект следит за работой всех систем в реальном времени, что позволяет предотвратить множества проблем. Также это дает расширенные возможности для упреждающих действий.
- **Точная аналитика:** в данной сфере большей части затрагивается искусственный интеллект, нежели компьютерное зрение. Вообще точная аналитика необходима на каждом предприятии, чтобы с помощью нужных алгоритмов обнаружить потери энергии и оптимизировать процессы связанные с энергетикой и автоматизаций.
- **Расширенная автоматизация:** это функция позволяет работать с более энергоемкими процессами, что обеспечивает значительное повышение эффективности на предприятии. Благодаря этому достигается оптимальная производительность, так как минимизируются временные и трудные в человеческом исполнении ручные операции. Внедрение таких технологий помогает компаниям эффективно справляться с большими объемами работ, повышая общую производительность.
- **Обнаружение аномалий** предоставляет возможность отслеживать и вовремя реагировать на отклонения в работе оборудования и других систем, что категорически важно для поддержания бесперебойной работы предприятия. Своевременное обнаружение аномалий позволяет предотвратить поломки оборудования и минимизировать время простоя, что приводит к снижению вероятности дорогостоящих ремонтов.
- **Экономия энергии:** этот модуль нацелен на выявление оптимальных решений, которые способствуют уменьшению потребления ресурсов. Такая оптимизация использования ресурсов помогает рационально разделять нагрузки. Это способствует экономии средств и улучшению экологической устойчивости за счет минимизации отходов и предотвращения ненужного расхода энергии.
- **Интеллектуальные энергосистемы:** представляют собой решения, нацеленные на эффективное управление энергопотреблением. Они используют передовые технологии, такие как искусственный интеллект для оптимизации работы энергетической инфраструктуры. Это дает возможность снизить пиковую нагрузку, уменьшить потери при передаче энергии и повысить общую надежность системы.
- **Интеграция возобновляемых источников энергии:** в отличие от традиционных источников, возобновляемые ресурсы (далее ВИЭ) обладают переменной выработкой, что усложняет их интеграцию. Интеллектуальные энергосистемы с использованием компьютерного зрения и искусственного интеллекта могут предсказывать объемы производства источников ВИЭ, прогнозировать погодные условия и оптимизацию потребления в реальном времени.

В заключении стоит отметить, что цифровизация в электроэнергетике и развитие интеллектуальных энергосистем позволяют находить новые возможности для повышения эффективности, надежности и устойчивости энергетической инфраструктуры предприятия. Интеграция искусственного интеллекта и компьютерного зрения позволяет оптимизировать процессы, минимизировать потери, уменьшить влияние человеческого фактора и повысить безопасность. Эти технологии не только способствуют снижению эксплуатационных затрат и экономии энергии, но и обеспечивают переход к экологически чистым источникам энергии. Внедрение интеллектуальных систем, таких как мониторинг в реальном времени и точная аналитика, является важным шагом к созданию гибкой, адаптивной и экологически устойчивой энергосистемы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сборник материалов пятнадцатой национальной научно-практической конференции с международным участием молодых ученых, аспирантов и студентов. Часть 2. – Ярославль, 2024. – С. 143–148. – URL: [https://mubint.ru/about/science/molodaya\\_nauka\\_2024\\_2.pdf](https://mubint.ru/about/science/molodaya_nauka_2024_2.pdf)
2. Искусственный интеллект в электроэнергетике: зачем и на что он способен. Пример ИИ-системы. – URL: <https://habr.com/ru/articles/674110/> (дата обращения 06.11.2024).
3. Искусственный интеллект в электроэнергетике. – URL: <https://www.digital-energy.ru/wp-content/uploads/2024/07/ИИ-в-Электроэнергетике.pdf> (дата обращения 06.11.2024).

## РЕАЛИЗАЦИЯ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕРЕАТ И ПРОВЕДЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТОКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**М.Р. Лифанов**

*АО «ИТЦ «ДЖЭТ», Проектный офис «Фабрика»*

Научный руководитель: Б.Д. Малюта, инженер 3 категории ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

Несмотря на подавляющее преобладание переменного тока в современных электроэнергетических системах, технология постоянного тока сохраняет свою значимость и находит все большее применение. Ее неуклонно возрастающая роль обусловлена активным развитием возобновляемой энергетики, использованием устройств FACTS, а также распространением нагрузок, питание которых осуществляется модулированным напряжением. Одним из актуальных применений данной технологии является вставка постоянного тока. В энергосистемах ее используют для решения следующих задач [1]:

- соединение двух электрических сетей одной номинальной частоты, но разных нефиксированных фазовых сдвигов;
- соединение электрических сетей различных частот и фаз;
- повышение пропускной способности элементов сети, которые содержат «слабые» связи;
- согласование работы сетей при возникновении аварийных ситуаций и восстановление электроснабжения после ликвидации нарушений.

Вставка постоянного тока (ВПТ) представляет из себя подстанцию, которая преобразует поступающий из электрической сети переменный ток в постоянный с помощью выпрямителя, а затем на выходе преобразует постоянный ток в переменный исходной или иной частоты посредством инвертора. Важной задачей для применения инверторов является разработка соответствующих алгоритмов управления, способных обеспечить устойчивую и корректную работу этих устройств. При разработке и настройке алгоритмов активно применяется аппарат математического моделирования, позволяющий оценить влияние алгоритма на работу

энергосистемы, в которую он будет интегрирован, и принять необходимые решения при проектировании. Среди отечественных программных продуктов для такого моделирования предлагается использовать программный комплекс REPEAT.

В рамках данной работы произведено моделирование вставки постоянного тока в тестовой энергосистеме с описанием решений и допущений, принятых при создании модели, а также оценкой результатов моделирования.

Моделируемый объект представляет из себя две несинхронно работающие энергосистемы с частотами 60 и 50 Гц соответственно, соединенные между собой вставкой постоянного тока (рис. 1). Построение энергосистем произведено с помощью блоков библиотеки «Электроника» в REPEAT. Энергосистема с частотой 60 Гц представлена трехфазным источником напряжения 25 кВ, фазы которого соединены по схеме «звезда с изолированной нейтралью». Источник присоединен к трансформатору 25/0,6 кВ со схемами соединения обмоток Y/D. Преобразовательная часть ВПТ выполнена последовательно соединенными выпрямителем и инвертором (рис. 1). Переменное напряжение от источника выпрямляется по мостовой схеме, содержащей две последовательно соединенные трехфазные группы диодов, а затем проходит через индуктивно-емкостной фильтр (0,2 мГн и 5 мФ) для минимизации пульсаций и подается на двухуровневый IGBT-инвертор, образующий переменное напряжение с частотой 50 Гц. Инвертор выполнен на транзисторных ключах, фиксируемых обратными диодами.

На выходе инвертора имеется индуктивно-емкостной фильтр (2 мГн и 22,04 мкФ), необходимый для формирования требуемой синусоидальности выходного тока, осуществляющего питание нагрузки ЭС-2 мощностью 50 кВт.

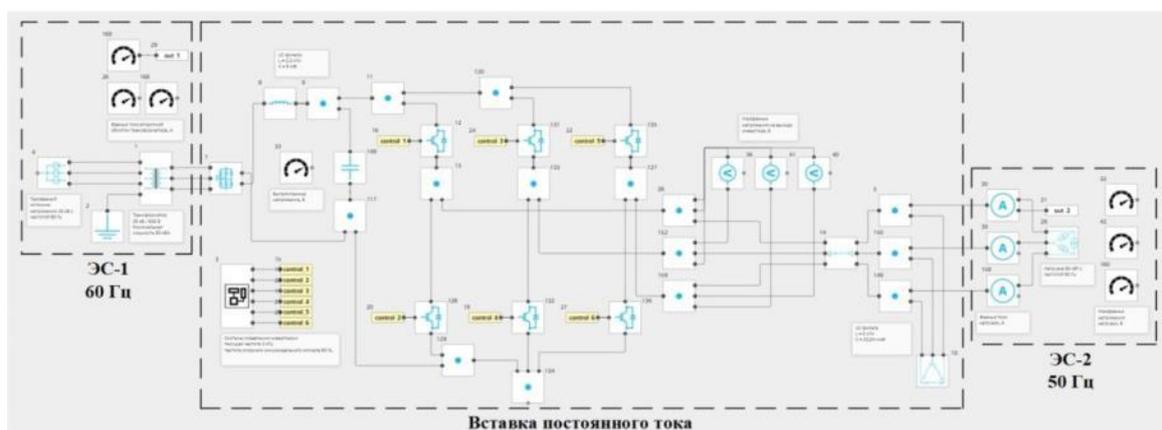


Рис. 1. Схема реализованной модели вставки постоянного тока в ПО REPEAT

Система управления инвертором выполнена с помощью блоков библиотеки «Автоматика» и представлена на рис. 2. Приведенный алгоритм реализует синусоидальную широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) треугольным сигналом на несущей частоте 2 кГц. Управление транзисторами инвертора осуществляется посредством сравнения опорных сигналов, образующих трехфазную систему напряжений синусоидальной формы, с заданным треугольным сигналом. Каждой паре управляемых ключей ставят в соответствие свой несущий сигнал, определяющий моменты коммутаций в точках пересечения с нормированным мгновенным значением заданного напряжения [2].

На рис. 3–6 приведены осциллограммы напряжений и токов на разных участках схемы, которые демонстрируют работу силовых преобразовательных элементов реализованной ВПТ, использующих описанные решения и алгоритмы. Результаты моделирования соответствуют теоретическому представлению о преобразовании напряжения средствами силовой электроники [3], в следствии чего можно заявить о корректности выполнения и работы модели в ПО REPEAT.

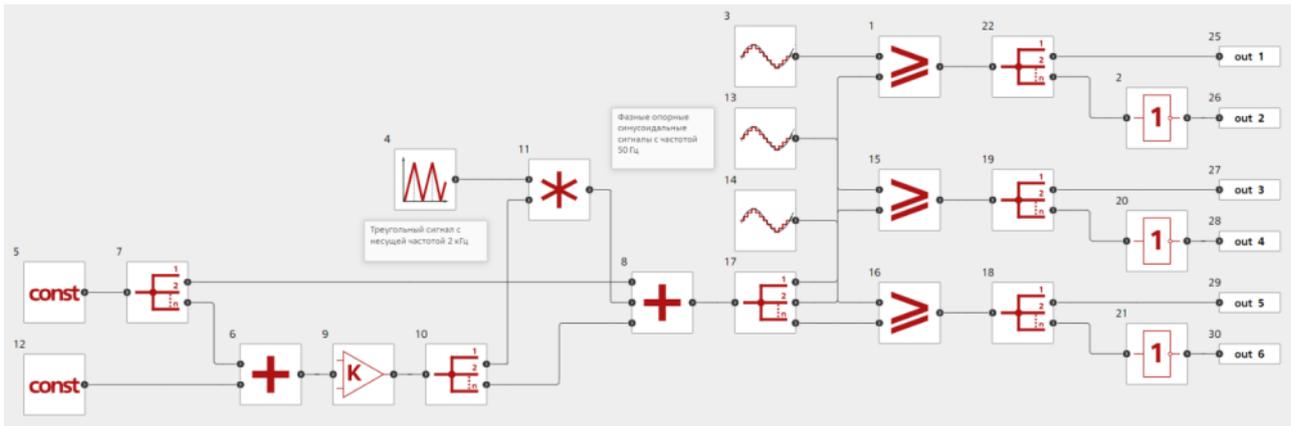


Рис. 2. Система управления инвертором

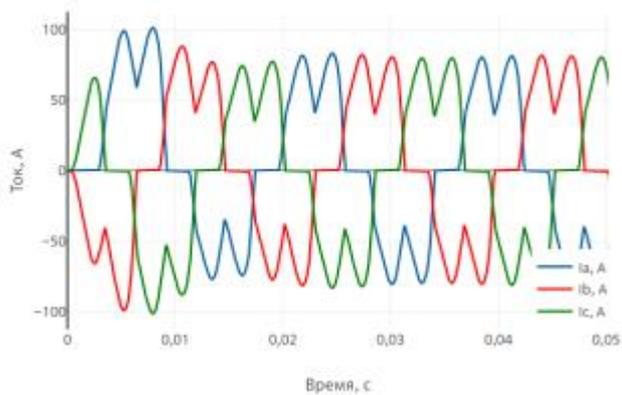


Рис. 3. Ток источника напряжения ЭС-1 (60 Гц)

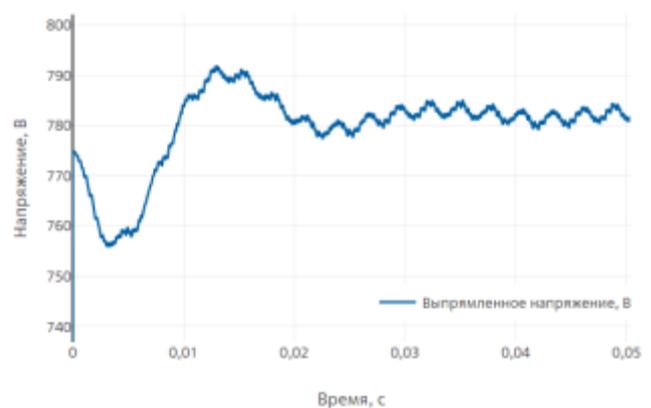


Рис. 4. Выпрямленное напряжение, прошедшее через фильтр в звене постоянного тока

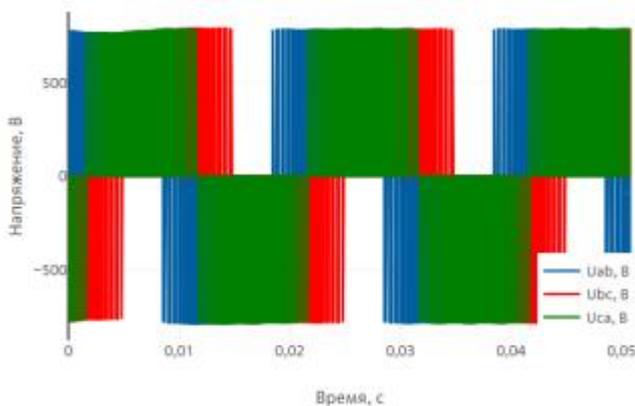


Рис. 5. Модулированное напряжение на выходе инвертора

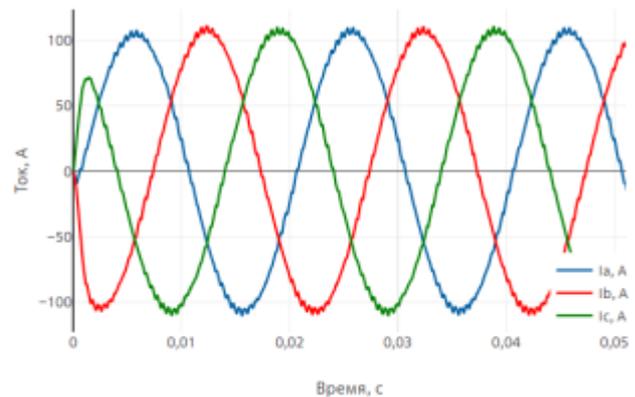


Рис. 6. Ток нагрузки ЭС-2 (50 Гц)

Для проведения гармонического анализа токов ЭС-1 и ЭС-2 выполненной модели воспользуемся в REPEAT встроенным инструментом JupyterLite, с помощью которого можно реализовать программу для обработки результатов моделирования через быстрое преобразование Фурье. Нормированные частотные спектры анализируемых токов, отражающих степень гармонических искажений, приведены на рис. 7 и 8 (значения гармоник берутся в процентном соотношении от основной гармоники тока).

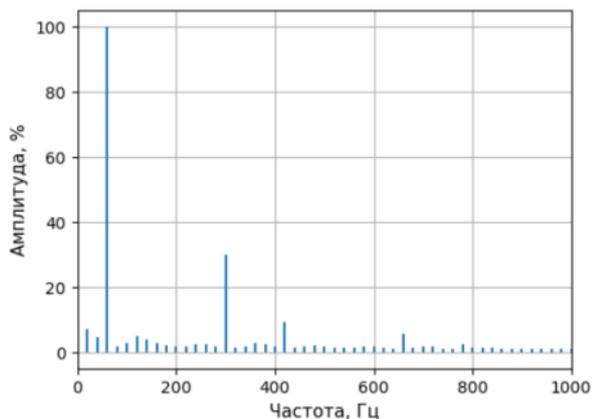


Рис. 7. Нормированный частотный спектр тока фазы А источника напряжения ЭС-1

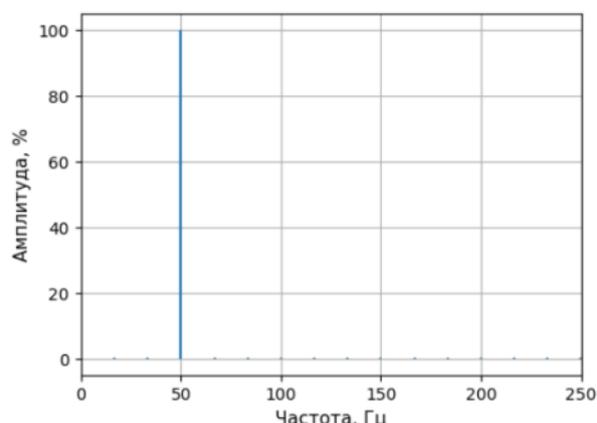


Рис. 8. Нормированный частотный спектр тока фазы А нагрузки ЭС-2

Количественным показателем, характеризующим степень гармонических искажений тока, является суммарный коэффициент гармонических составляющих (total harmonic distortion – THD), который равен отношению в процентах корня суммы квадратов среднеквадратичных значений всех гармоник, кроме основной, к ее среднеквадратичному значению [4]:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $V_n$  – среднеквадратичное значение  $n$ -й гармоники,  $V_1$  – среднеквадратичное значение основной гармоники.

По результатам вычислений в JupyterLite имеем:

- для тока фазы А источника напряжения ЭС-1 – THD = 35,62 %;
- для тока фазы А нагрузки ЭС-2 – THD = 2,55 %.

Полученные значения коэффициентов гармонических составляющих свидетельствуют о низкой гармонической искаженности тока ЭС-2 по отношению к току ЭС-1, форма которого обусловлена влиянием нелинейности преобразователей ВПТ. Явное преобладание основной гармоники достигается за счет действия широтно-импульсной модуляции и индуктивно-емкостного фильтра на выходе инвертора, что позволяет обеспечить необходимую синусоидальность тока в ЭС-2 с частотой 50 Гц. Данный анализ свидетельствует об эффективности принятых мер по улучшению гармонического состава тока, питающего нагрузку ЭС-2.

Таким образом, использование вставки постоянного тока является необходимым для решения ряда задач, характерных для современных энергосистем. В данной работе с использованием ПО REPEAT разработана модель ВПТ и алгоритм управления преобразовательными элементами. Результаты моделирования демонстрируют корректную реализацию модели и эффективность принятых решений. Данная модель может быть использована в энергосистемах с иными топологиями и параметрами, а также при отличных настройках элементов ВПТ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вставки постоянного тока. <http://www.m-volt.ru/products/vpt/vpt.html?PHPSESSID=169312c38e31e1c1a8de8b2654400c49> (дата обращения: 10.11.2024).
2. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2018. – 184 с.
3. Саввин Н.Ю., Гарбузов Д.Д. Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // Вестник кибернетики. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 46–58.
4. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. – 29 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ SEPIC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ПЛАТФОРМЕ REPEAT****А.А. Боргояков***АО «ИТЦ «ДЖЭТ», Проектный офис «Фабрика»*

Научный руководитель: Н.С. Иванов, инженер 3 категории ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

В настоящее время в современных энергосистемах заметны тенденции по активному внедрению возобновляемых источников энергии (ВИЭ), силовых преобразователей и различных цифровых технологий. В таких энергосистемах все большую роль играют силовые преобразователи, а корректность их настроек, таким образом, оказывает влияние на устойчивость энергосистем. Для определения корректных параметров настройки этого оборудования часто используется математическое моделирование. Кроме того, оно находит все более активное применение при проектировании энергосистем и их оборудования, так как это позволяет проанализировать их работу как в установившихся режимах, так и при возникновении переходных процессов.

Данная статья посвящена разработке математической модели SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter)-преобразователя на платформе REPEAT. Данный преобразователь может применяться при подключении солнечных электростанций (СЭС) к энергосистеме или при автономном электроснабжении от фотоэлектрических модулей с аккумуляторными батареями. Из-за стохастического и переменного характера выработки электроэнергии СЭС, и как следствие изменения выходного напряжения фотоэлектрического модуля, необходим преобразователь постоянного напряжения, который будет корректно реагировать на такие изменения и поддерживать установленный уровень выходного напряжения. Это также относится к аккумуляторным батареям, у которых по мере разряда снижается выходное напряжение.

SEPIC-преобразователь или несимметричный преобразователь постоянного напряжения на катушках индуктивности – это преобразователь постоянного напряжения в постоянное, который выдает заданное напряжение на выходе вне зависимости от входного, которое может быть как выше, так и ниже уставки по выходному напряжению. Схема данного преобразователя основана на базе повышающего преобразователя постоянного напряжения [2]. Модель SEPIC-преобразователя в REPEAT представлена на рис. 1. Для создания модели применялись блоки библиотек «Электроника» и «Автоматика».

Входное напряжение обуславливается управляемым источником напряжения (блок № 19), а также постоянно-кусочной функцией (блок № 1), с помощью которой изменяется напряжение источника. Выходное напряжение снимается с помощью вольтметра (блок № 11) и его значение передается в систему управления (группа блоков № 32). Нагрузку для системы обеспечивает резистор (блок № 10) со значением сопротивления 101,1 Ом.

Принцип работы SEPIC-преобразователя основан на циклах зарядки и разрядки индуктивностей и конденсаторов. Изначально ключ закрыт и при подключении питания первый конденсатор (блок № 14) заряжается при протекании тока через индуктивности (блок № 3 и блок № 7), причем на конденсаторе будет то же напряжение, как и на источнике. Далее при открытии ключа ток протекает через первую индуктивность (блок № 3) и непосредственно через MOSFET транзистор (блок № 5), при этом первый конденсатор передает заряд на вторую индуктивность (блок № 7). После закрытия транзистора вторая индуктивность меняет полярность и отдает накопленный заряд через диод на нагрузку [3]. При этом повышение или понижение напряжения на выходе зависит от ширины управляющего импульса на открытие ключа. При широком импульсе управления, напряжение на выходе повышается, так как при большем времени протекания тока через первую индуктивность она сильнее насыщается и ее напряжение самоиндукции растет.

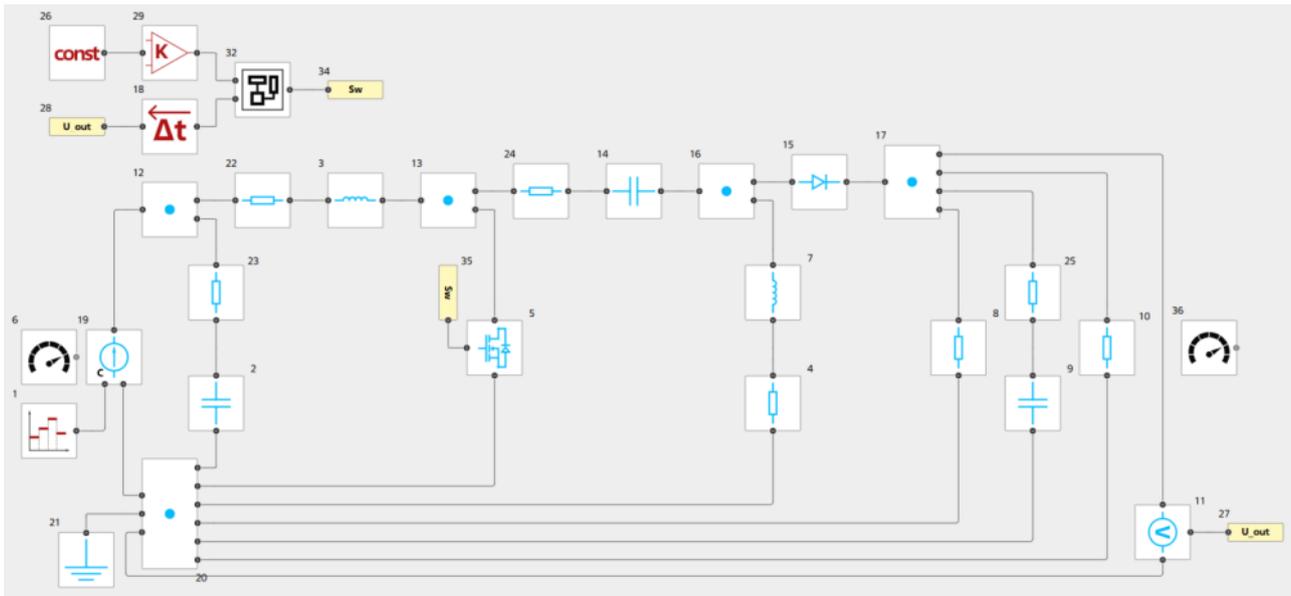


Рис. 1. Модель SEPIC-преобразователя в REPEAT

Система управления выполнена на базе ПИ-регулятора и ШИМ генератора. ПИ-регулятор формирует ширину управляющего сигнала для ШИМ генератора, сравнивая уставку и действительное значение выходного напряжения. Схема системы управления представлена на рис. 2.

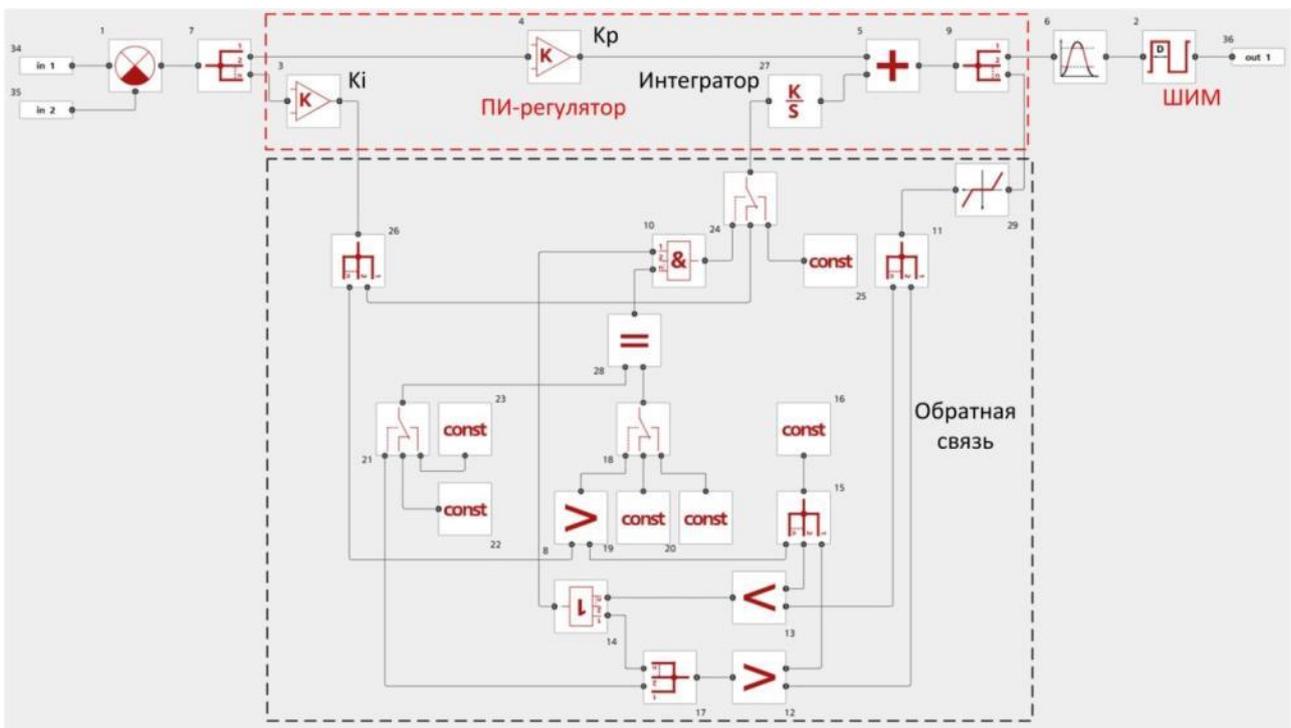


Рис. 2. Система управления SEPIC-преобразователем в REPEAT

Был произведен первый опыт, при котором напряжение на источнике изначально составляет 36 В, в момент времени 0,175 с оно повышается до 80 В, после чего в момент времени 0,35 с падает до 54 В. Уставка по выходному напряжению (блок № 26 на рис. 1) составляет 60 В. Результаты моделирования представлены на рис. 3–4.

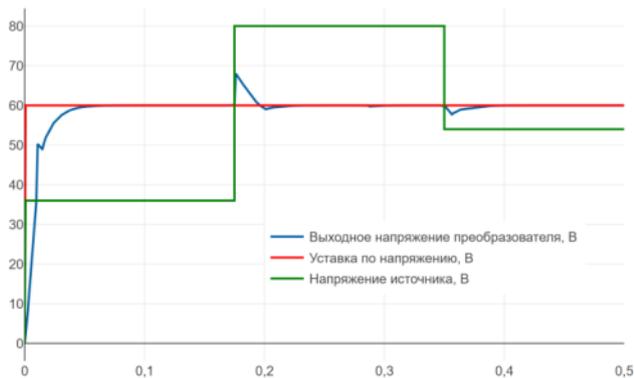


Рис. 3. Графики выходного, опорного и входного напряжения в первом опыте

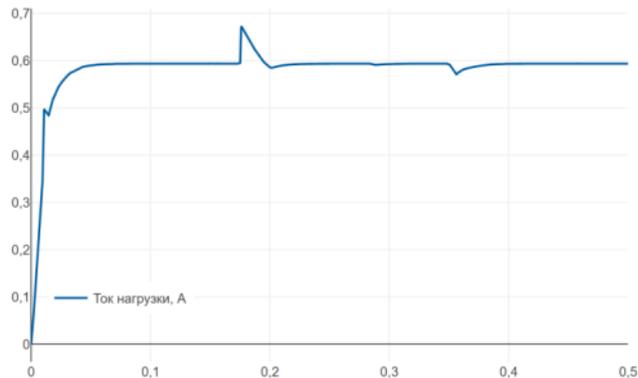


Рис. 4. График тока нагрузки в первом опыте

Из рис. 3–4 видно, что выходное напряжение поддерживает установленное значение 60 В, и при изменении напряжения источника наблюдаются отклонения, которые вскоре нивелируются. В самом начале плавно набирается заданное значение напряжения, из-за работы цикла зарядки-разрядки индуктивностей и конденсаторов. Ток на нагрузке повторяет график выходного напряжения в своих значениях с учетом сопротивления нагрузки.

Далее был произведен второй опыт, при котором сначала задается источнику напряжения значение 24 В, далее следует его падение до 15 В, после чего еще одно падение до 6 В. Уставка по выходному напряжению 12 В. Результат моделирования представлен на рис. 5–6.

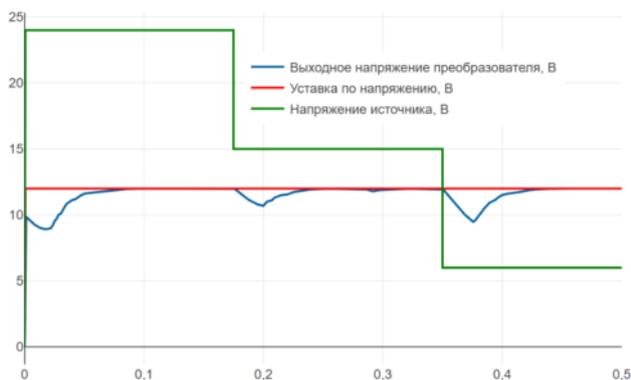


Рис. 5. Графики выходного, опорного и входного напряжения во втором опыте

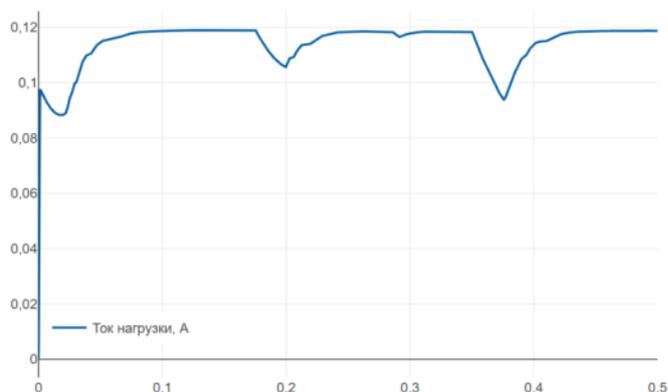


Рис. 6. График тока нагрузки во втором опыте

Из рис. 5–6 видно, что выходное напряжение поддерживается на уровне уставки в 12 В, и также наблюдаются его отклонение во время изменения напряжения источника, после чего выходное напряжение возвращается к опорному значению. Ток на нагрузке также повторяет график выходного напряжения.

Проведенные опыты показали, что модель SEPIC-преобразователя позволяет поддерживать выходное напряжение на заданном уровне вне зависимости от напряжения источника. В будущем планируется модификация модели SEPIC-преобразователя, а также возможно ее внедрение при моделировании СЭС и систем управления аккумуляторными батареями.

Таким образом ПО REPEAT позволяет моделировать преобразователи постоянного напряжения и другие устройства на базе силовой электроники, а также производить их настройку, что может способствовать оптимизации расчета и проектирования, а также работы систем с возобновляемыми источниками энергии и аккумуляторными батареями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chiang S.J., Shieh H.-J., Chen M.-C. Modeling and Control of PV Charger System With SEPIC Converter // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Nov. 2009. – V. 56, no. 11. – P. 4344–4353, doi: 10.1109/TIE.2008.2005144.
2. Maroti P.K., Padmanaban S., Holm-Nielsen J.B., Sagar Bhaskar M., Meraj M., Iqbal A. A New Structure of High Voltage Gain SEPIC Converter for Renewable Energy Applications // IEEE Access. – 2019. – V. 7. – P. 89857–89868. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2925564.
3. Анализ преобразователя SEPIC // Компоненты и технологии. – URL: [https:// kit-e.ru/analiz-preobrazovatelya-sepic/](https://kit-e.ru/analiz-preobrazovatelya-sepic/) (дата обращения 19.11.2024).

## СИСТЕМА ТОКОВОГО РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**Д.Д. Поснов, А.Д. Токарев**

*Ульяновский государственный технический университет, группа ЭАмд-11*

Научный руководитель: Я.К. Старостина, к.т.н., доцент «Электропривод и АПУ» УлГТУ

Синтез комплекса токового регулятора с помощью нейросети позволяет улучшить динамические характеристики системы управления, повысить точность и стабильность её работы. Кроме того, использование нейронных сетей позволяет снизить энергопотребление и увеличить срок службы оборудования.

Для решения этой проблемы предлагается использовать нечеткую логику, которая позволяет учесть неопределенность и размытость данных в системе управления. Нечеткий регулятор может адаптироваться к изменяющимся условиям и требованиям, что делает его более эффективным в сравнении с классическими регуляторами [2].

Гибридный регулятор на основе нейронной сети с нечеткой логикой имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами управления. Он способен обрабатывать большие объемы данных и адаптироваться к изменяющимся условиям быстрее и эффективнее. Также он обладает способностью к самообучению, что позволяет ему улучшать свои результаты с течением времени. Системы управления на основе нейронных сетей с нечеткой логикой широко используются в различных областях, таких как промышленность, автоматизация, робототехника и другие. Они позволяют улучшить производительность, повысить качество управления и сократить расходы на обслуживание и ремонт.

Тем не менее, при использовании гибридного регулятора необходимо учитывать, что процесс обучения нейронной сети может быть трудоемким и требовать больших ресурсов. Также необходимо учитывать возможные ограничения и осложнения в работе системы, связанные с её сложностью и спецификой моделирования динамических систем.

В целом, регуляторы на основе нейронных сетей с нечеткой логикой представляют собой мощный инструмент для управления динамическими системами и промышленными комплексами, который позволяет совместить преимущества нейронных сетей и нечеткой логики для создания эффективной и адаптивной системы управления.

Этот нейросетевой регулятор использует интеллектуальный нечеткий нейрорегулятор для управления токовым контуром ЦСП. Он состоит из нескольких слоев: Input, Inputmf, Rule, Outputmf и Output. Входной слой представляет собой значения выхода нейронной сети для фазификации, в то время как слой Inputmf отображает функции принадлежности для конкретных значений входных данных. Слой Rule определяет степень истинности предпосылок каждого правила базы значений системы, а слой Outputmf выполняет вычисления для формирования выходных значений. Наконец, слой Output осуществляет операцию дефазификации [3].

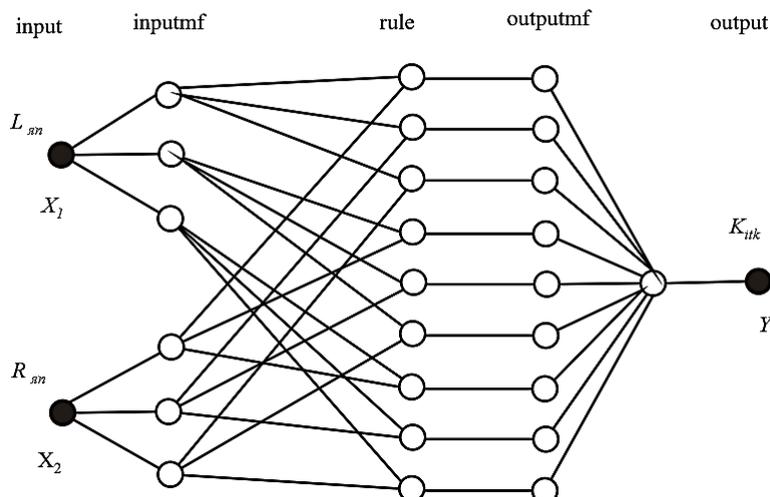


Рис. 1. Структура гибридной нейронной сети с нечеткой логикой

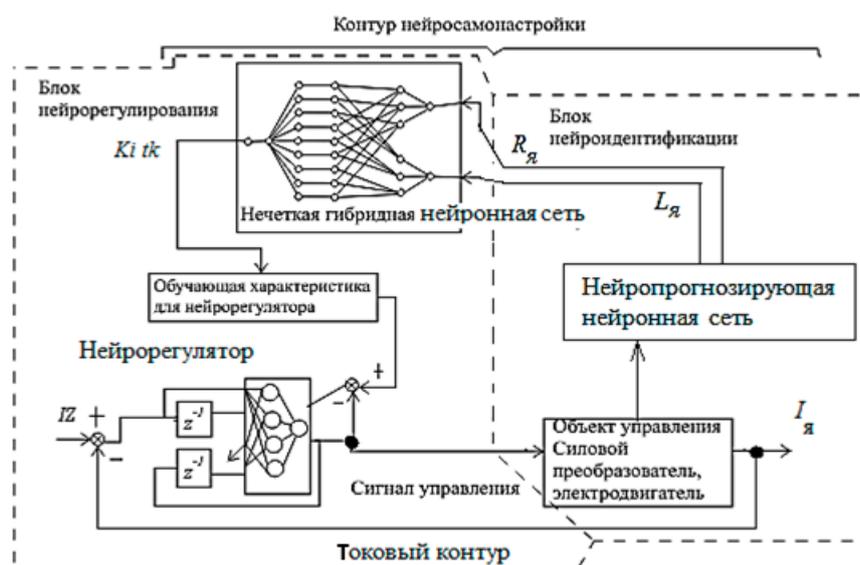


Рис. 2. Система интеллектуального нейронного управления токовым контуром ЦСП

На рис. 2 продемонстрирована модель синтеза преобразователя электропривода и цифровой нейронной программы. Нейросеть производит моделирование переходных процессов, затем вычисляет и сравнивает желаемые и реальные значения для снижения ошибки перерегулирования.

Данный метод моделирования позволяет просто и эффективно управлять работой электродвигателя благодаря использованию нейросетевого регулятора. Из-за синтеза нейронной сети и регулятора тока удалось снизить энергопотребление электродвигателя, увеличить качество переходных процессов, более точно подстроить механизм в различных режимах работы. Это позволит более гибко настраивать различные системы и комплексы под определенные производственные задачи и требования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буянкин В.М. Синтез системы искусственного нейроэлектротехнического интеллекта для токового регулятора электродвигателя с использованием нечеткой логики // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 64-1. – С. 20–30.
2. Клепиков В.Б., Сергеев С.А., Махотило К.В., Обруч И.В. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 2–6.
3. Гафаров Ф.М., Галимянов А.Ф. Искусственные нейронные сети и их приложения – Казань, 2018.

## ПУТИ РАЗВИТИЯ SMART GRID В РОССИИ

С.Н. Гук

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-11*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент, ЭФ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

В настоящее время активно идет процесс создания условий для разработки и развития цифровых сервисов и решений, а также распространения внедрения цифровых технологий [1].

Интеллектуальная система Smart Grid представляет собой инновационный подход к контролю энергетических систем, основанных на автоматизации процесса и использовании современных информационных технологий.

Внедрение Smart Grid является одним из ключевых направлений развития энергетики. Обосновано тем, что интеллектуальная сеть характеризуется такими свойствами как доступность, надежность, гибкость. Данная система позволяет в автоматическом режиме обнаружить опасные участки электросети и отрегулировать параметры для минимизации потерь. С внедрением инструментов анализа статистических данных, можно построить систему прогнозирования аварийных ситуаций на основе показателей, регистрируемых интеллектуальной системой. Так, можно мгновенно узнать об аварии или о вероятности выхода из строя элементов электрической сети.

Энергосистема России является централизованной, и управляется единым оператором. Основная часть вырабатывается крупными электростанциями и передается потребителям. Преимущество этого устройство в том, что поддерживает баланс между потреблением и производством электроэнергии [2]. Только в случае нарушения баланса возникают колебания частоты, что приводит к износу оборудования, а в дальнейшем ведет к снижению надежности системы электроснабжения. В компании ПАО «Россети Центр и Приволжье» износ оборудования составляет 74 %, поэтому необходимы оперативные переключения [3].

При внедрении Smart Grid в систему электроснабжения может производить интеграцию с другими источниками, что приводит к более эффективному использованию энергии и снижению затрат. Интеллектуальная сеть позволит эффективно управлять распределением электроэнергии, автоматически регулировать потребление в зависимости от нагрузки на сеть, тем самым предотвращая аварийные ситуации. Также система может анализировать данные о потреблении электроэнергии и предоставлять рекомендации по ее экономии.

Значительным аспектом работы интеллектуальной системы Smart Grid является возможность распределения генерации, таких как внедрение возобновляемых источников энергии, такие как солнечные панели, которые позволяют снизить зависимость от традиционных источников энергии и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Smart Grid может в динамическом режиме управлять потоками электроэнергии, переключать на резервные источники питания, оптимизировать распределение электроэнергии, автоматически реагировать на изменение в потреблении электроэнергии и автоматически реагировать на аварии [4], что обеспечивает стабильность и эффективность электроснабжения в динамическом режиме, быстро адаптируясь к изменениям в потреблении электроэнергии, авариям или подключению новых источников энергии [5].

Таким образом, развитие Smart Grid в России является важным шагом на пути к созданию современной и эффективной энергетической системы, способной обеспечить устойчивое развитие страны.

В заключении можно сказать, что внедрение интеллектуальной системы Smart Grid в России представляет собой перспективное направление развития энергетической отрасли, кото-

рое может принести значительные преимущества. Только для успешного внедрения интеллектуальной системы, необходимо устранить ряд проблем.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р // Правительство Российской Федерации официальный сайт. – 2020.
2. Алексеенко А.А., Подгурская И.Г. Преимущества использования сетей SMART GRID и способы реализации в электроэнергетике // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2023. – № 103. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/preimuschestva-ispolzovaniya-setey-smart-grid-i-sposoby-realizatsii-v-elektroenergetike> (дата обращения: 04.11.2024).
3. Показатели деятельности [Электронный ресурс] // ПАО «Россети Центр и Приволжье»: [сайт]. – URL: [https://www.mrsk-cp.ru/stockholder\\_investor/performance/index.php?iblock\\_id/](https://www.mrsk-cp.ru/stockholder_investor/performance/index.php?iblock_id/) (дата обращения: 05.11.2024).
4. Врублевских А.А., Горемыкин Е.В. Технология SMART GRID и альтернативная энергетика // StudNet. – 2021. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-smart-grid-i-alternativnaya-energetika> (дата обращения: 06.11.2024).

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В РОССИИ

**Н.А. Балашов**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-14*

Научный руководитель: И.А. Павличенко, ассистент ЭФ ЭПП АлтГТУ

В текущее время технологии развиваются с очень быстро, делается огромный упор на цифровизацию в повседневной жизни, и электроэнергетика не является исключением. Однако для таких важных объектов, как электрические подстанции, цифровизация открывает как большие возможности, так и большие риски. Цифровые подстанции представляют собой современное решение, которое может значительно улучшить эффективность и надёжность работы электроэнергетических систем. В этой статье рассмотрим перспективы развития цифровых подстанций в России.

Цифровые подстанции имеют ряд преимуществ перед традиционными подстанциями:

1. *Повышение эффективности.* Цифровые технологии позволяют автоматизировать процессы, что снижает вероятность ошибок и повышает эффективность работы.
2. *Снижение затрат.* Автоматизация процессов также снижает затраты на персонал и оборудование.
3. *Повышение надёжности.* Цифровые системы мониторинга и управления позволяют быстро обнаруживать и устранять неисправности, что повышает надёжность работы подстанции.

Развитие цифровых подстанций в России имеет большой потенциал. Они могут стать ключевым элементом модернизации электроэнергетической системы страны. Вот несколько причин, почему развитие цифровых подстанций перспективно в России:

1. *Модернизация электроэнергетической системы.* Цифровые подстанции могут стать основой для модернизации электроэнергетической системы России (ЭЭС). Они позволят повысить эффективность, надёжность и безопасность работы энергосистемы.
2. *Интеграция с возобновляемыми источниками энергии.* Цифровые подстанции могут интегрировать возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечные и ветровые электростанции, в общую электроэнергетическую систему (ЭЭС). Это позволит увеличить долю возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе страны, что положительно скажется на экологии.

3. *Развитие интеллектуальных сетей и Big Data (большие данные).* Цифровые подстанции являются основой для развития интеллектуальных сетей (система Smart Grid). Интеллектуальные сети позволяют оптимизировать работу электроэнергетической системы, повысить её эффективность и снизить затраты. А использование технологии Big Data позволит быстро и точно прогнозировать отказы оборудования, оптимизировать ценообразование, создать цифровых двойников для хранения данных о состоянии всего оборудования подстанции.
4. *Повышение безопасности.* Цифровые системы управления и мониторинга позволяют быстро обнаруживать и устранять неисправности, что повышает безопасность работы подстанции.
5. *Появление новых рабочих мест.* Развитие цифровых подстанций может создать новые рабочие места для проектировщиков, электромонтажников и электромонтёров подстанций.
6. *Сотрудничество с международными партнёрами.* Россия может сотрудничать с международными партнёрами в области разработки и внедрения цифровых технологий в электроэнергетику. Это позволит обмениваться опытом и знаниями, а также ускорить процесс модернизации электроэнергетической системы.

Однако развитие цифровых подстанций также сталкивается с некоторыми проблемами:

1. *Высокая стоимость.* Цифровые технологии напрямую связаны со значительными инвестициями в оборудование, программное обеспечение и обучение персонала. Это будет проблематично для небольших и средних компаний.
2. *Сложность интеграции.* Цифровые подстанции требуют разработки новых стандартов для интеграции с существующими системами. Это может вызвать проблемы совместимости и потребовать дополнительных ресурсов.
3. *Отказоустойчивость и безопасность.* Цифровые системы могут быть уязвимы для кибератак и различных технических сбоев. Это, в свою очередь, потребует дополнительных мер по обеспечению безопасности и надёжности работы подстанций.

В заключение можно добавить, что перспективы развития цифровых подстанций в России выглядят весьма оптимистично. Они могут стать ключом к модернизации электроэнергетической системы страны, повышению её эффективности, надёжности и безопасности. Однако для успешного развития цифровых подстанций необходимо решить ряд проблем, связанных с высокой стоимостью оборудования и разработкой стандартов и протоколов. Широкое внедрение ЦПС позволит также решить задачи по выявлению различных закономерностей потребления и генерации электроэнергии с использованием систем BigData. В конечном итоге это снизит затраты на производство и передачу электроэнергии, а также повысит надёжность электроснабжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.В., Петров И.С. Цифровизация энергетики: новые технологии и их влияние на развитие подстанций. – Москва: Энергия, 2021. – 256 с.
2. Громов С.Н. Цифровые подстанции: от концепции к реализации. – Санкт-Петербург: Научно-технический центр, 2020. – 180 с.
3. Кузнецов В.А., Сидорова Е.В. Перспективы внедрения цифровых технологий в энергетике России. – Екатеринбург: УралГЭТУ, 2022. – 220 с.
4. Лебедев И.П. Инновационные технологии в энергетике: цифровые подстанции. – Новосибирск: Сибирское издательство, 2021. – 300 с.
5. Михайлов А.В., Федорова Н.А. Цифровизация подстанций: вызовы и возможности. – Казань: Казанский университет, 2023. – 150 с.
6. Соловьев Д.И. Будущее энергетики: цифровые подстанции и их роль в устойчивом развитии. – Москва: Энергетический институт, 2022. – 200 с.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

**М.А. Сильванович, М.Р. Пильковская, А.С. Мелькова**

*Белорусский национальный технический университет, ЭФ, ЭОП, группа 10607122*

Научный руководитель: Е.П. Корсак, старший преподаватель  
кафедры экономики и организации энергетики, м.э.н.

Прежде чем перейти углубиться в тему, необходимо разобраться с понятием «цифровизация» в контексте энергетического сектора. Под цифровизацией подразумевается применение цифровых технологий для управления, мониторинга и оптимизации процессов производства, распределения и потребления энергии.

Цифровизация стала настоящей революцией для энергетической отрасли, предоставив компаниям возможность улучшить эффективность своих процессов и внедрить инновационные услуги. За счет интеграции цифровых решений энергетические фирмы могут снизить эксплуатационные затраты, увеличить надежность сетей и в конечном итоге повысить уровень удовлетворенности клиентов.

Некоторые из ключевых технологий, способствующих цифровизации в энергетической отрасли, включают интернет вещей, искусственный интеллект, большие данные и облачные вычисления. Эти технологии позволяют энергетическим компаниям собирать, анализировать и извлекать информацию из данных в режиме реального времени, чтобы принимать более эффективные решения и оптимизировать потребление энергии.

Процесс цифровизации уже несколько лет идет в различных отраслях экономики и промышленности, однако энергетический сектор, а именно атомная промышленность, начала активно заниматься цифровой трансформацией лишь относительно недавно. Интерес к цифровым продуктам в сфере энергетики быстро растет. Крупные компании осознают потенциал данной области и работают над созданием цифровых решений. Цифровые технологии, такие как передовые датчики, аналитика данных и искусственный интеллект, интегрируются в различные аспекты ядерных операций. От систем управления реакторами до технического обслуживания и безопасности, цифровизация имеет потенциал для революции в отрасли [1].

Цифровая трансформация помогает решить ряд важных задач в атомной энергетике, таких как повышение операционной эффективности, улучшение качества конечной продукции с помощью цифровых инструментов, снижение себестоимости и сокращение сроков выполнения процессов. Цифровизация становится ключевой тенденцией для атомной отрасли, поскольку даже в самых оптимальных условиях атомные электростанции представляют собой значительную нагрузку в отношении как капитальных, так и эксплуатационных затрат.

Технология цифровых двойников, с ее способностью создавать виртуальные копии физических систем, предлагает беспрецедентные возможности для оптимизации ядерных операций. Эта технология может применяться в различных областях ядерной энергетики, включая проектирование и эксплуатацию реакторов, управление отходами и вывод из эксплуатации. При проектировании и эксплуатации реакторов цифровые двойники могут использоваться для моделирования различных сценариев реактора, которые можно анализировать для оптимизации производительности и безопасности. Их также можно использовать для прогнозирования и предотвращения отказов компонентов, что снижает вероятность аварий и незапланированных отключений. При управлении отходами цифровые двойники могут использоваться для моделирования сценариев хранения и транспортировки отходов, выявления потенциальных угроз безопасности и оптимизации методов управления отходами.

Хотя преимущества цифровизации очевидны, это также создает множество проблем. Одной из основных проблем является кибербезопасность. Поскольку ядерные объекты становятся все более связанными и зависимыми от цифровых систем, они становятся потенциальными целями для кибератак. Последствия успешной атаки на ядерный объект могут быть катастрофическими, что делает кибербезопасность главным приоритетом в развитии атомных цифровых технологий.

Помимо этого, сложность цифровых систем на ядерных объектах создает определенные трудности для регулирующих органов. Обеспечение безопасности и надежности таких систем требует глубокого понимания как ядерных технологий, так и цифровых решений. Регуляторам необходимо находить баланс между поддержанием строгих стандартов безопасности и поощрением инновационных разработок.

Регулирование в ядерной сфере всегда было на первом месте из-за возможных рисков, связанных с этой отраслью. Однако с внедрением цифровых технологий регулирующие органы сталкиваются с необходимостью адаптации к быстро развивающимся технологическим реалиям [4].

К важным нормативным аспектам, требующим внимания, относятся:

1. *Стандарты кибербезопасности*: регуляторы обязаны установить и следить за строгим соблюдением стандартов кибербезопасности, чтобы защитить ядерные объекты от киберугроз. Это включает периодические оценки состояния систем, тестирования на проникновение и постоянный мониторинг цифровых решений.
2. *Лицензирование и сертификация*: операторы ядерных установок должны получать лицензии для своих цифровых систем, что гарантирует их соответствие жестким критериям безопасности. Процессы сертификации также должны учитывать уровень квалификации персонала, ответственного за эксплуатацию и обслуживание цифровых систем.
3. *Конфиденциальность и целостность данных*: необходимы правила, регулирующие сбор, хранение и распространение конфиденциальных данных, создаваемых цифровыми системами. Защита этих данных и обеспечение их целостности играют ключевую роль в поддержании общего уровня безопасности.
4. *Регулярные аудиты и инспекции*: регуляторы должны проводить регулярные аудиты и инспекции ядерных объектов для обеспечения соответствия цифровым нормам. Эти оценки должны быть тщательными и адаптироваться к меняющемуся технологическому ландшафту.
5. *Международное сотрудничество*: учитывая глобальный характер ядерной промышленности, международное сотрудничество и стандартизация имеют важное значение. Регулирующие органы по всему миру должны работать вместе, чтобы установить общие цифровые стандарты и передовой опыт.

Кроме того, многие регулирующие органы начинают учитывать необходимость внедрения международных стандартов и практик, чтобы ресурсами и инноваторами можно было обмениваться на глобальном уровне. Это открывает новые горизонты для сотрудничества, что может привести к более гармонизированным подходам к регулированию и повышению надежности систем ядерной безопасности.

Цифровизация становится одной из главных тенденций в атомной отрасли, существенно влияя на управление и эффективность атомных электростанций. Даже в наилучших условиях эксплуатация ядерных объектов сопряжена с высокими капитальными и эксплуатационными затратами. Внедрение цифровых технологий, таких как автоматизация процессов и анализ больших данных, может значительно снизить эти расходы и повысить уровень безопасности и надежности.

Тем не менее, на пути к цифровизации существуют определенные препятствия. К ним относятся необходимость модернизации устаревших систем, сложности интеграции новых

технологий с имеющимися процессами, а также нормативные ограничения, касающиеся контроля и безопасности. Кроме того, отсутствие квалифицированных специалистов, способных работать с современными цифровыми решениями, представляет собой значительную проблему для многих операторов.

Тем не менее, несмотря на эти вызовы, потенциал цифровизации в атомной отрасли впечатляет. Применение технологий интернета вещей, искусственного интеллекта и машинного обучения сможет не только оптимизировать процессы управления, но и улучшить мониторинг состояния оборудования, что в свою очередь поможет предотвратить аварийные ситуации и минимизировать время простоя.

На практике это означает, что с помощью цифровизации возможно создание более устойчивых и эффективных атомных электростанций, которые могут реагировать на изменения в спросе на электроэнергию и адаптироваться к новым условиям работы. Например, интеграция системы дистанционного мониторинга и анализа данных позволит операторам заранее выявлять потенциальные неисправности и проводить профилактическое обслуживание, что существенно сократит непредвиденные затраты.

Следствием всех этих улучшений станет то, что цифровизация может стать актуальным инструментом для повышения конкурентоспособности атомной отрасли. В ближайшие десятилетия мы можем ожидать, что цифровые технологии будут активно внедряться в практику эксплуатации атомных электростанций, принеся положительные изменения в их функционирование и управление.

Таким образом, несмотря на существующие трудности, цифровизация в атомной промышленности – это не просто тренд, а необходимость для достижения новых уровней эффективности и безопасности. В конечном итоге, ее успешная реализация может стать катализатором для глубоких трансформаций в отрасли, что приведет к значительным улучшениям в области управления ресурсами и минимизации рисков.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

3. Цифровизация как конкурентное преимущество госкорпорации «Росатом» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vestnik.guu.ru/jour/article/view/3273>. Дата доступа: 03.10.2024.
4. Дуненкова Е.Н., Гуреев П.М., Прохорова И.С., Болдырев В.А., Камчатова Е.Ю., Фаюстов А.А., Дегтярева В.В. Развитие инновационной деятельности в условиях цифровой экономики: монография / отв. ред. А.Т. Волков, Е. Н. Дуненкова. – М.: Издательский дом ГУУ, 2019. – 139 с.
5. Влияние цифровизации на энергетику [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.es-jobs.de/jobs-in-der-energiewirtschaft/die-auswirkungen-der-digitalisierung-auf-die>. – Дата доступа: 03.10.2024
6. Цифровая трансформация ядерной промышленности [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://cohesivegroup.com/digitalization-challenges-in-nuclear-industry-regulation/#:~:text=Digital%20technologies%20such%20as%20advanced,potential%20to%20revolutionize%20the%20industry>. – Дата доступа: 03.10.2024

## Секция 2

# Теплофизические аспекты энергетических технологий

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ВБЛИЗИ ЦИЛИНДРА СО СТЕРЖНЯМИ-ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

С. А. Князев, В. В. Сероштанов, А. А. Гусаков

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ВШАуТЭ, группа 3251401/00101*

Научный руководитель: В. В. Сероштанов, к.т.н., доцент ВШАиТЭ СПбПУ

Актуальное направление в теплофизике – повышение эффективности теплообмена с помощью поверхностных интенсификаторов [1]. Управление потоком вблизи теплопередающих поверхностях позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи (КТО) и снизить гидравлическое сопротивление. Интенсивность течения и теплообмена повышается вследствие изменения потока в пограничном слое.

При обтекании цилиндра наблюдается монотонное снижение местного КТО вплоть до точки отрыва и наличие явного минимума. Применение турбулизаторов в виде тонких стержней на одиночном цилиндре позволяют избежать этого минимума путем ускорения ламинарно-турбулентного перехода [1].

Исследовано влияние стержней-турбулизаторов на течение и теплообмен вблизи одиночного цилиндра с помощью PIV и градиентной теплотометрии. Опыты проводились для числа Рейнольдса  $Re = 9600$  в аэродинамической трубе Научно-образовательного центра «Теплофизика в энергетике» СПбПУ [2]. Аэродинамическая труба замкнутого типа оснащена системой охлаждения воздушного потока, что позволяет поддерживать его температуру практически постоянной ( $\pm 0,2$  К).

Экспериментальной моделью служит полый круговой цилиндр диаметром 66 мм и длиной 600 мм из листа стали толщиной 0,1 мм. Цилиндр имеет три патрубка, в один из которых непрерывно подается насыщенный водяной пар при атмосферном давлении парогенератором мощностью 4,2 кВт; два других патрубка обеспечивают отвод конденсата и излишков поступающего пара. Таким образом на поверхности цилиндра обеспечивалось постоянство температуры, которое контролировалось с помощью тепловизора.

Установка позволяла проворачивать исследуемый цилиндр вокруг оси на угол  $\varphi = 0 \dots 180^\circ$  с шагом измерения  $10^\circ$ . Для определения плотности теплового потока на поверхность цилиндра устанавливался градиентный датчик теплового потока (ГДТП) [3–5] (рис. 1, а).

Батарейный ГДТП выполнен из монокристаллического висмута размерами  $2 \times 2 \times 0,2$  мм. Вольт-ваттная чувствительность датчика составляет 4,7 мВ/Вт [6]. Измерения сигнала ГДТП производилось с помощью вольтметра АК ИП В7-78/2.

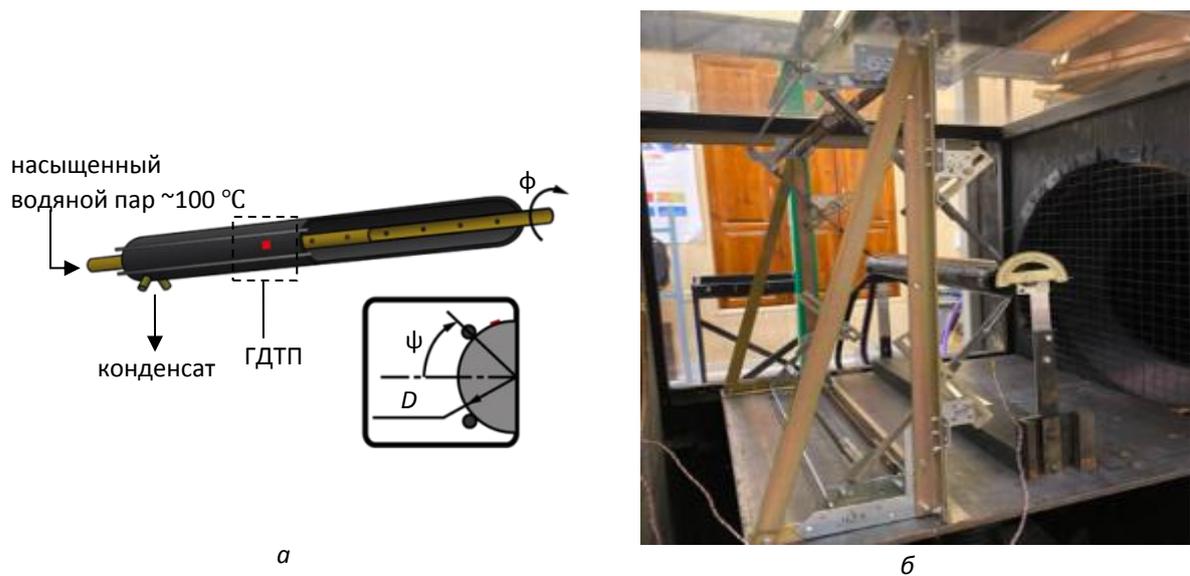


Рис. 1. Схема (а) и фото (б) исследуемой модели со стержнями-турбулизаторами

Два стержня-турбулизатора устанавливаются на поверхность цилиндра вдоль его образующих симметрично относительно лобовой точки на угол  $\psi$ . Для жесткого крепления стержней была изготовлена специальная рамка (рис. 1, б). Стойка с рамкой не вызывали дополнительных возмущений в потоке, так как выступали за пределы выходного отверстия конфузора аэродинамической трубы. В работе использованы два набора стержней диаметром 1,6 и 3,2 мм, которые устанавливались на угол  $\psi = 15 \dots 90^\circ$  (рис. 1, б).

На рис. 2 представлены распределения местного числа Нуссельта, отнесенного к значению в лобовой точке, и картина течения близи цилиндра при установке стержней на угол  $\psi = 15^\circ$ .

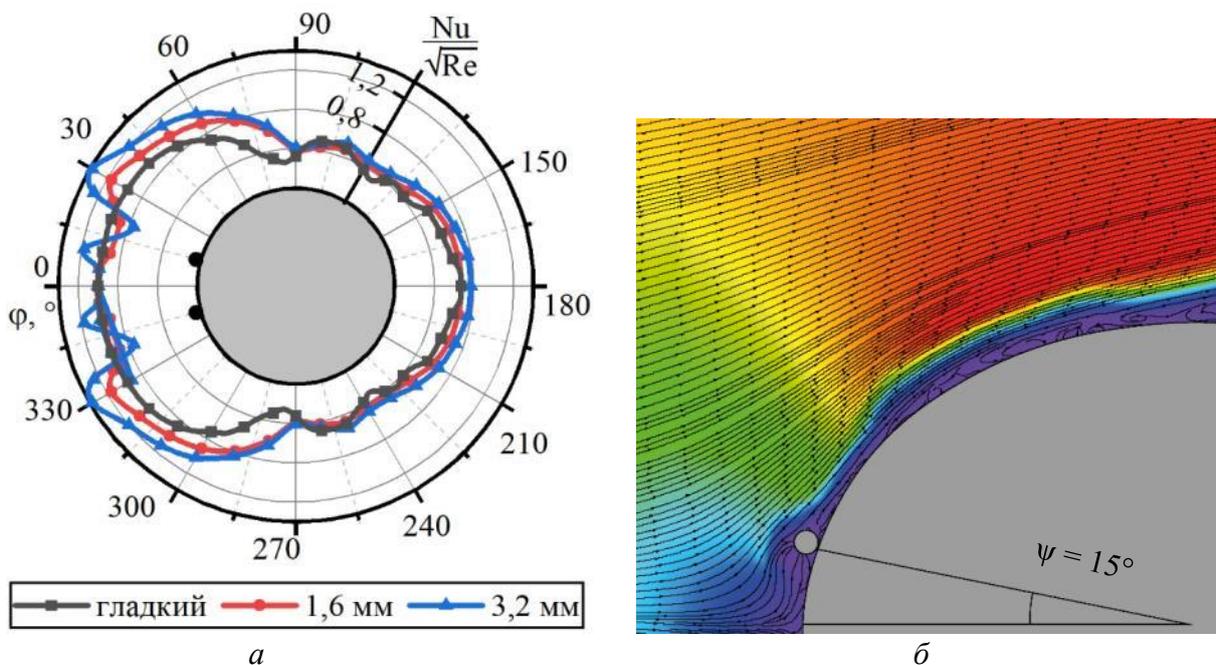


Рис. 2. Распределение местного числа Нуссельта (а) и картина течения близи цилиндра с турбулизаторами  $d = 3,2$  мм (б) при  $\psi = 15^\circ$

При установке стержней на угол  $\psi = 15^\circ$  в области за турбулизатором наблюдается повышение местного КТО: в сравнении с гладким цилиндром, местный КТО выше вплоть до точки отрыва пограничного слоя. При том сама точка отрыва смещается ниже по потоку. Резкое утолщение пограничного слоя, значительное (до 20 %) повышение местного КТО и смещение точки отрыва свидетельствуют об изменении режима течения в пограничном слое. Распределение местного КТО по поверхности цилиндра в кормовой части имеет схожий характер, что и для гладкого цилиндра, однако численно превосходит его значения. Средний по поверхности цилиндра КТО со стержнями  $d = 1,6$  мм больше на 13 %; со стержнями  $d = 3,2$  мм – на 25 % относительно гладкого цилиндра.

Результаты, полученные для углового положения  $\psi = 45^\circ$  показывают, что при разных режимах и толщинах турбулизатора распределения КТО сильно отличаются (рис. 3, а). При установке стержней диаметром 1,6 мм наблюдается картина течения, аналогичная случаю  $\psi = 15^\circ$ , однако среднее значение КТО на поверхности цилиндра не отличается от такового, полученного для гладкого цилиндра. Для турбулизатора  $d = 3,2$  мм отрыв потока происходит непосредственного с его поверхности без последующего повторного прилипания, свойственного рассматриваемому числу Рейнольдса. В области за стержнями образуются разнонаправленные вихревые структуры (рис. 3, б). Пограничный слой возвратного течения претерпевает отрыв в области  $\varphi = 60^\circ$ , в то время как для гладкого цилиндра эта точка соответствует  $\varphi \approx 125^\circ$ . Положение стержней при  $\psi = 45^\circ$  требует более детального изучения и рассмотрения углов  $\psi = 40 \dots 60^\circ$  с малым шагом.

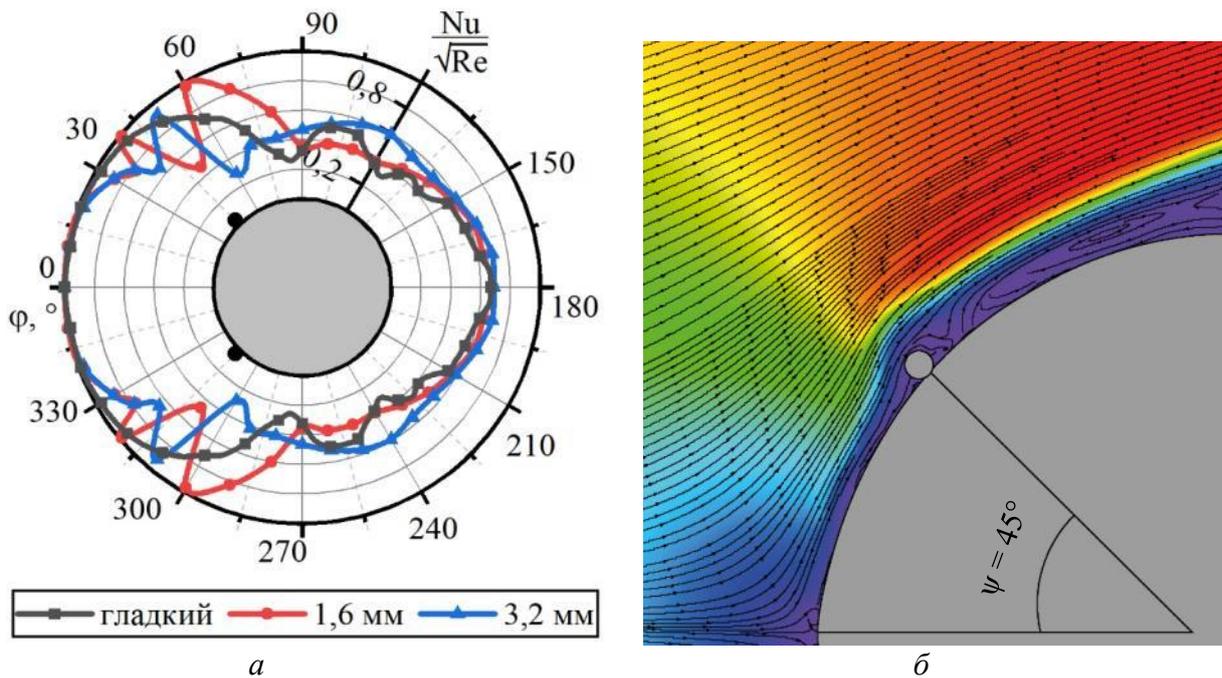


Рис. 3. Распределение местного числа Нуссельта (а) и картина течения близ цилиндра с турбулизаторами  $d = 3,2$  мм (б) при  $\psi = 45^\circ$

При обтекании цилиндра со стержнями-турбулизаторами, установленными на угол  $\psi = 60^\circ$  (рис. 4), отрыв потока происходит с поверхности турбулизаторов без повторного прилипания для обоих диаметров стержней. Несмотря на более плавное нарастание пограничного слоя в сравнении с меньшими  $\psi$ , средний по поверхности КТО остается практически неизменным для стержня  $d = 1,6$  мм, а в случае стержня диаметром 3,2 мм – уменьшает его значение.

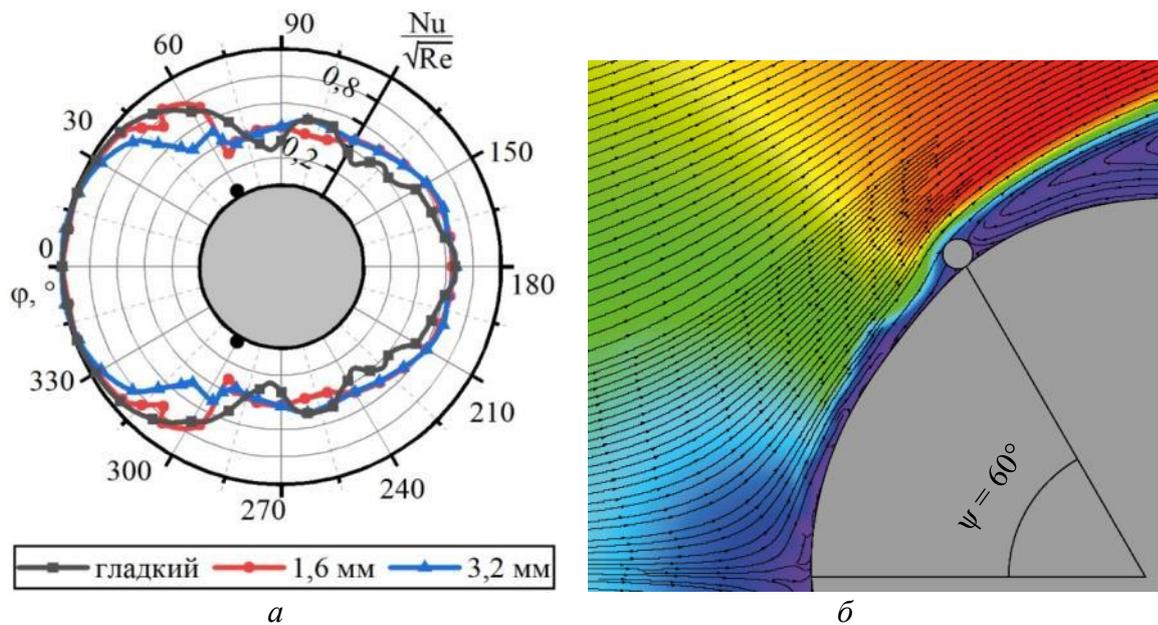


Рис. 4. Распределение местного числа Нуссельта (а) и картина течения близки цилиндра с турбулизаторами  $d = 3,2$  мм (б) при  $\psi = 60^\circ$

Установка стержней-турбулизаторов на угол  $\psi = 90^\circ$  не влечет существенных изменений в распределение значений местного КТО по поверхности цилиндра [6]. Картина течения заметно не изменяется кроме того, что отрыв потока происходит с поверхности турбулизатора.

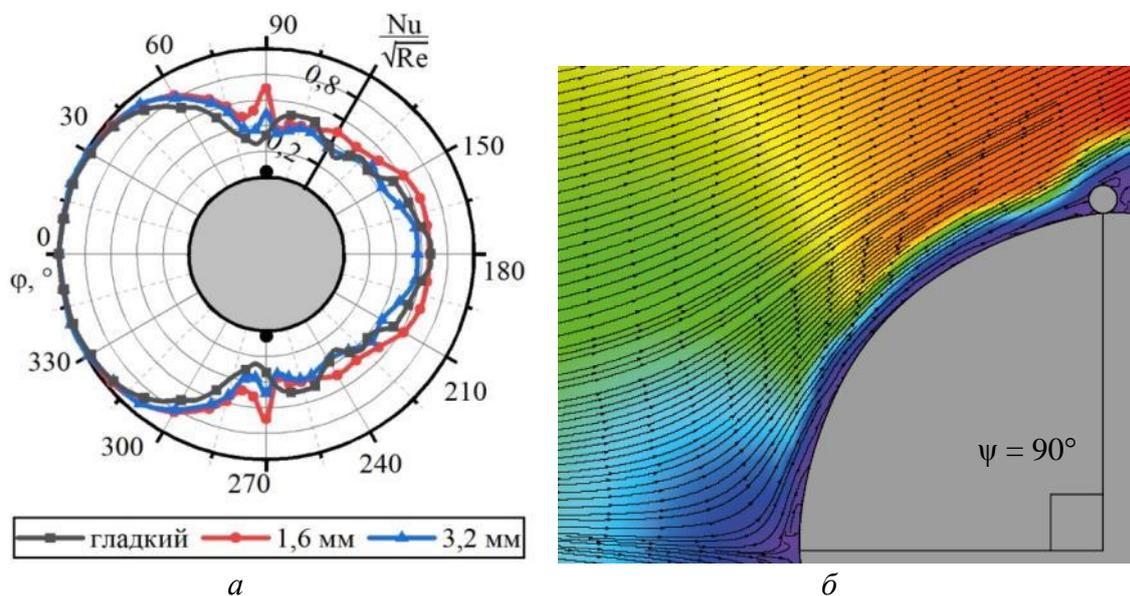


Рис. 5. Распределение местного числа Нуссельта (а) и картина течения близки цилиндра с турбулизаторами  $d = 3,2$  мм (б) при  $\psi = 90^\circ$

В результате комплексного исследования удалось определить влияние стержней-турбулизаторов на структуру потока в лобовой части цилиндра и, как следствие, на распределение местного коэффициента теплоотдачи. Наиболее эффективным оказался угол установки  $\psi = 15^\circ$ , причем для стержней обоих диаметров. Меньшее влияние на осредненный по поверхности КТО наблюдается при углах  $\psi = 60$  и  $90^\circ$ , однако тонкий стержень эффективен в более широком диапазоне углов  $\psi$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
2. Интенсификация теплообмена в одиночной овально-граншейной лунке на пластине при изменении угла наклона от 0 до 90° / М.Д. Селезнева, С.А. Князев, А.А. Ключ, В.В. Сероштанов // Аэрокосмическая техника и технологии. – 2023. – Т. 1, № 4. – С. 30–41.
3. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков Основы градиентной теплотометрии А.В. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2012. – 203 с.
4. Градиентная теплотометрия в исследовании теплообмена при кипении в большом объеме недогретой воды и жидкости с добавлением микрочастиц  $Al_2O_3$  / А.В. Павлов, П.Г. Бобылев, С.З. Сапожников // Теплоэнергетика. – 2023. – № 3. – С. 40–48.
5. Исследование капельно-ручейковой конденсации методом градиентной теплотометрии / Э.Р. Зайнуллина, В.Ю. Митяков // Теплофизика высоких температур. – 2023. – Т. 61, № 5. – С. 730–735.
6. Теплообмен в паре круговых цилиндров при их рядном и шахматном расположении / В.А. Маслов, М.Д. Селезнева, С.А. Князев, В.В. Яковлева // Бутаковские чтения: Сборник статей II Всероссийской с международным участием молодежной конференции, Томск, 13–15 декабря 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 202–205.

## ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ С МИКРОЧАСТИЦАМИ $Al_2O_3$ НА ПЛАСТИНЕ

**С.В. Андрейко, А.В. Павлов, П.Г. Бобылев**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ИЭ, ВШАИТЭ, группа 3251402/20102*

Научный руководитель: В. Ю. Митяков, д.т.н., профессор ВШАИТЭ ИЭ СПбПУ

Кипение в большом объеме применяется во многих отраслях техники, где необходимо интенсивное охлаждение. Например, контроль тепловыделений от силовых модулей электронных компонентов является актуальной задачей при создании современных электронных устройств. Отсутствие универсальной методики расчета двухфазных систем охлаждения ограничивает разработку, создание и применение силовых модулей с высокой плотностью энергии (более  $1 \text{ МВт/м}^2$ ). Особый интерес представляет использование наножидкостей. Кипение наножидкостей и их осаждение приводит к образованию пористой структуры на омываемой поверхности, которая увеличивает критический тепловой поток. В данной работе представлено экспериментальное исследование влияния наножидкости на тепловой поток и температуры ключевых точек системы.

Небольшое количество наночастиц в жидкости ведёт к заметному увеличению критического теплового потока (КТП), но эффект от их добавления в различных исследованиях, согласно работе [1], значительно различается.

Наночастицы, при добавлении к базовой жидкости, не изменяют теплофизические свойства жидкости, но при этом они осаждаются на охлаждаемую поверхность, образуя тонкий пористый слой. Именно этот слой увеличивает КТП, отодвигая момент перехода от пузырькового кипения к плёночному.

Исследования [2] показали, что эффект от применения наножидкостей сопоставим с эффектом от электрофоретического осаждения таких же частиц на поверхность. При этом сильное влияние на теплообмен оказывают свойства наночастиц (например, их смачиваемость и адгезия).

В предыдущих работах коллектива Научно-образовательного Центра «Теплофизика в энергетике» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого иссле-

довался теплообмен при кипении в большом объеме перегретых поверхностей в недогретой чистой воде и воде с добавлением микрочастиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) [3]. Установлено, что при добавлении полидисперсной взвеси микрочастиц размерами до 1 мкм, максимальная плотность теплового потока (ПТП) возрастает до 4-х раз.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении в большом объеме при моделировании работы двухфазной системы пассивного охлаждения «силового модуля» при добавлении к воде микрочастиц  $Al_2O_3$  размерами до 1 мкм и массовой концентрацией от 0,25 до 1,5 %.

### Методика эксперимента и экспериментальная установка

Основным методом исследования в данной работе является градиентная теплотметрия. Методика основана на использовании градиентных датчиков теплового потока (ГДТП), реализующих поперечный эффект Зеебека в средах с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициента термоЭДС. В анизотропной среде, через которую проходит тепловой поток, возникает поперечная термоЭДС, связанная с проходящей через датчик ПТП

$$q = \frac{E_{\perp}}{A \cdot S_0}, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где  $q$  – ПТП, Вт/м<sup>2</sup>;  $E_{\perp}$  – термоЭДС, мВ;  $A$  – площадь ГДТП в плане, м<sup>2</sup>;  $S_0$  – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт.

На основе композиции из металлических компонентов созданы гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГДТП), термостойкость которых превышает 1500 К [4]. Эта модификация использовалась в нашей работе.

Градуировка ГДТП проводилась на специально созданном стенде [5] и уточнялась по месту монтажа; относительная расширенная неопределенность градуировки не превышает 4 %.

В отличие от ГДТП на основе висмута, вольт-ваттная чувствительность ГДТП зависит от температуры. Поэтому при измерении теплового потока, в месте установки ГДТП, одновременно производится измерение температуры.

Экспериментальная установка моделирует систему пассивного охлаждения «силового модуля». Стенд включает емкость объемом 1 л в дне которой выполнено квадратное отверстие размерами 30 × 30 мм для ввода исследуемых поверхностей теплообмена. Исследуемая поверхность монтируется на цилиндр из алюминия диаметром 50 мм и длиной 120 мм, на который намотан нагреватель из нихрома с номинальным сопротивлением 45 Ом. Между проволокой и цилиндром проложен изолирующий слой слюды толщиной 0,05 мм. Снаружи нагреватель теплоизолирован слоем асбеста толщиной 3 мм. Чтобы снизить потери теплоты от нагревателя в окружающую среду, он помещался в цилиндрическую проходную печь, используемую в качестве охранного нагревателя. На верхнем торце нагреваемого цилиндра выполнена выборка размерами 5 × 5 × 0,4 мм, куда устанавливался ГДТП размерами 3 × 3 × 0,3 мм, а рядом с ним спай термопары (ТХА). ГДТП и термопара располагаются под исследуемой пластиной толщиной 9 мм. ГДТП фиксирует ПТП, проходящую от нагреваемого цилиндра к поверхности теплообмена, а термопара – температуру «силового модуля». Спаи еще двух термопар ТХА расположены в емкости с водой. Одна измеряет температуру поверхности, другая – температуру воды. Данные с ГДТП и термопар записываются с помощью ИВК NIPXI-1050 с частотой записи 5000 изм/с.

На рис. 1 представлена схема экспериментального участка с установленными ГДТП и термопарами.

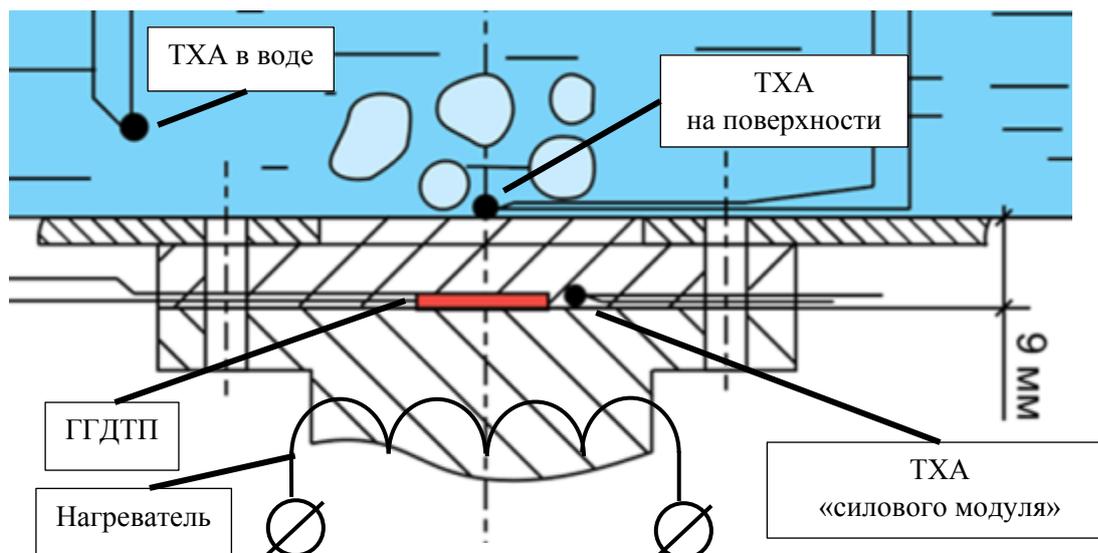


Рис. 1. Схема экспериментального участка

### Результаты экспериментов

В экспериментах исследовалась зависимость теплового потока при кипении от массовой концентрации микрочастиц  $Al_2O_3$  в чистой воде. Размеры частиц не превышали 1 мкм а массовая концентрация варьировалась от 0,25 до 1,5 %. На основании данных построена зависимость теплового потока от температурного напора, определяемого как разница температур поверхности и жидкости (рис. 2), а также зависимость теплового потока от температуры моделируемого «силового модуля» (рис. 3).

Исходя из рис. 2, при превышении некоторого значения температурного напора, тепловой поток превышает значение, соответствующее чистой воде.

На рис. 3 видно, что в стационарном режиме при увеличении теплового потока температура имитируемого «силового модуля» также растёт, причём её значение никак не связано с жидкостью, в которой происходит кипение. При этом влияния микрочастиц на температуру моделируемого «силового модуля» не обнаружено.

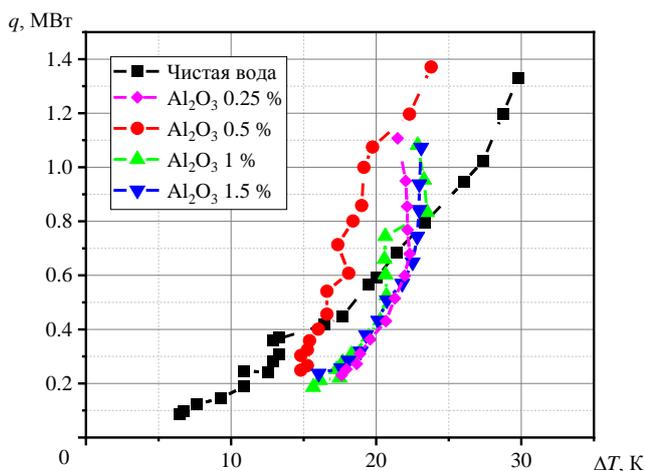


Рис. 2. Зависимость теплового потока от температурного напора

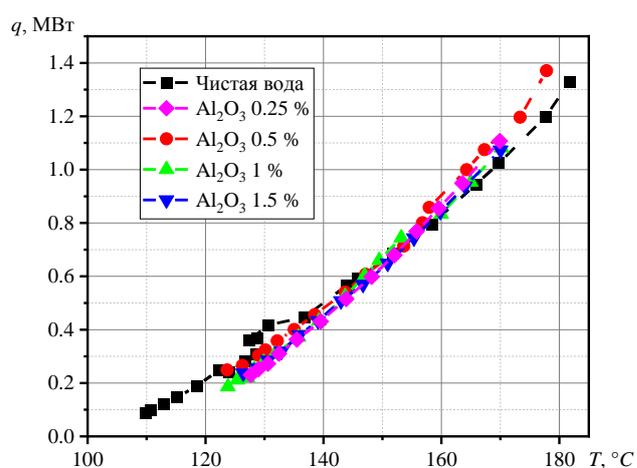


Рис. 3. Зависимость теплового потока от температуры «силового модуля»

## Вывод

В результате работы получена зависимость тепловыделений моделируемого «силового модуля» от концентрации микрочастиц  $Al_2O_3$ . Отмечается достаточно противоречивые результаты: после превышения некоторого значения температурного напора отводимый тепловой поток становится заметно выше при применении микрожидкостей. При этом из рис. 2 видно, что оптимальной концентрацией, при которой наблюдается наибольшая интенсификация теплообмена, является не наибольшая концентрация (1,5 %), а массовая концентрация частиц равная 0,5 %. В то же время, при одинаковом тепловом потоке температура моделируемого «силового модуля» не меняется и не зависит от концентрации микрочастиц  $Al_2O_3$  (рис. 3). Аналогичный результат зависимости температуры «силового модуля» и теплового потока получили авторы работы [6]. Можно отметить, что при использовании микрожидкостей возрастает интенсивность теплообмена на поверхности посредством пузырькового кипения, но при этом температура охлаждаемого «силового модуля» остаётся неизменной.

Добавление взвешенных микрочастиц  $Al_2O_3$  не целесообразно для охлаждения поверхностей в стационарном режиме, например, в микроэлектронике. В тоже время, использование микрочастиц  $Al_2O_3$  в качестве интенсификаторов теплообмена при кипении оправдано при рассмотрении нестационарных процессов охлаждения перегретых тел, например, в металлургии.

Пористая поверхность, создаваемая осаждающимися микрочастицами, повышает интенсивность теплообмена за счёт модификации поверхности, но при этом увеличивает внутреннее термическое сопротивление.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слободина Е.Н., Михайлов А.Г., Гасс Е.А. Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения наножидкости // Известия Транссиба. – 2023. – № 1 (53). – С. 103–109.
2. Stange G., Yeom H., Semergau B., Sridharan K., Corradini M. A Study of Nanoparticle Surface Modification Effects on Pool Boiling Critical Heat Flux // Nuclear technology. – 2013. – P. 286–301.
3. Павлов А.В., Бобылев П.Г., Сапожников С.З. Градиентная теплотметрия в исследовании теплообмена при кипении в большом объеме недогретой воды и жидкости с добавлением микрочастиц  $Al_2O_3$  // Теплоэнергетика. – 2023. – No. 3. – С. 40–48.
4. Sapozhnikov S.Z., Mityakov V. Yu., Mityakov A.V. Heatmetry: The Science and Practice of Heat Flux Measurement. – St.-Petersburg, Springer International Publishing, 2020. – 209 p.
5. Митяков В.Ю., Павлов А.В., Бобылев П.Г. Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь-никель // Неделя Науки СПбПУ 2019: 29-я Всерос. конф.: СПбПУ, 2019.
6. Sujith Kumar C.S., Suresh S., Aneesh C.R., Santhosh Kumar M.C., Praveen A.S., Raji K., Flow boiling heat transfer enhancement on copper surface using Fe doped  $Al_2O_3$ - $TiO_2$  composite coatings // Applied Surface Science. – 2015. – P. 102–109.

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ СРЕДЫ В ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ НАТРИЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**И.А. Бессонов<sup>1</sup>, П.А. Ревякина<sup>2</sup>, О.Л. Ташлыков<sup>3</sup>**

*Уральский федеральный университет, УралЭНИН, АСиВИЭ*

*<sup>1</sup> группа ЭНА-14007, <sup>2</sup> группа ЭН-410018, <sup>3</sup> д.т.н., профессор*

Научный руководитель: О.Л. Ташлыков, д.т.н., профессор АСиВИЭ УралЭНИН, УрФУ

Обеспечение безопасности эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) – одна из важнейших задач в современной инженерии. Во время проведения планово-предупредительного ремонта и аварийных ситуаций процессы в элементарном оборудовании зависят от перемен-

ных, характеризующих влияние множества различных факторов на оборудование. Таким образом, очевидна необходимость эффективного инструмента, позволяющего предсказывать изменение основных теплогидравлических параметров натриевого оборудования во время переходных процессов [1].

В качестве основного средства для анализа процессов, протекающих в тепломеханическом оборудовании АЭС, зачастую применяется моделирование: компьютерное, с использованием вычислительных пакетов, и математическое. Приведенные методы моделирования дополняют друг друга, позволяя проводить верификацию результата с помощью данных, полученных путем прямого измерения характеристик системы.

Аналитические трехмерные модели тепловых процессов в натриевом оборудовании позволяют прогнозировать время, отведенное на выполнение операций в ходе плановых работ на АЭС, а также повышать их безопасность. Компьютерное моделирование позволяет представить теплогидродинамические процессы в оборудовании АЭС, оценить их эффективность и сократить затраты на изготовлении макетов и образцов физических моделей, найти наиболее оптимальный вариант течения среды, что сократит время на проектирование оборудования АЭС. В настоящее время для моделирования процессов, протекающих в оборудовании атомных станций, активно используются программные пакеты, такие как COMSOL Multiphysics и SolidWorks Flow Simulation [2–4]. Использование расчетного пакета SolidWorks Flow Simulation позволяет вести моделирование теплогидравлических процессов, как для стационарных, так и нестационарных, протекающих в тепломеханическом оборудовании. Существенным недостатком использования данного пакета заключается в том, что в нем отсутствует возможность проведения моделирования фазового перехода. COMSOL Multiphysics решает приведенную проблему и позволяет произвести анализ всех этапов переходных процессов в оборудовании.

В работе было проведено сравнение результатов моделирования с данными, полученными экспериментальным путем.

В качестве первого объекта моделирования выбрана одна из систем, обеспечивающих эксплуатацию реакторной установки – система баков запаса натрия второго контура, предназначенная для приема натрия из всего объема второго контура на момент проведения ремонтных работ.

При остановке реактора электрообогрев отключается и происходит охлаждение бака с натрием за счет работы вентиляции. Время охлаждения бака в теплоизоляции от 250 до 40 °С составляет примерно 5 недель. При этом время на кристаллизацию примерно 1 неделя. Данные по изменению температуры (показания термопар) фиксируются. График изменения температуры на поверхности и внутри бака с натрием можно условно разделить на три зоны.

Баки второго контура расположены в индивидуальных боксах. Параметры бокса:

- длина – 18,6 м;
- ширина – 7,6 м;
- высота – 5 м.

Сложность циркуляции воздуха осложняется тем, что над баком находится несущие балки (двутавры), что приводит к уменьшению проходного сечения для воздуха.

Подвод охлаждаемого воздуха осуществляется с помощью вентиляционных окон, которые расположены в углу бокса с торцевой стороны бака. Приточное окно расположено на высоте 3 м над уровнем пола, вытяжное окно расположено на высоте 2,3 м.

На рис. 1 представлен результат моделирования охлаждения бака с натрием при стационарном режиме (температура натрия в баке всегда поддерживается на уровне 320 °С).

Проведение компьютерного моделирования фазового перехода в баке запаса натрия задача, требующая высоких вычислительных мощностей компьютерной техники. В связи с этим выбраны более мелкие системы Белоярской АС в качестве объектов моделирования: натриевые трубопроводы малого диаметра, в которых возможно протекание фазового перехода.

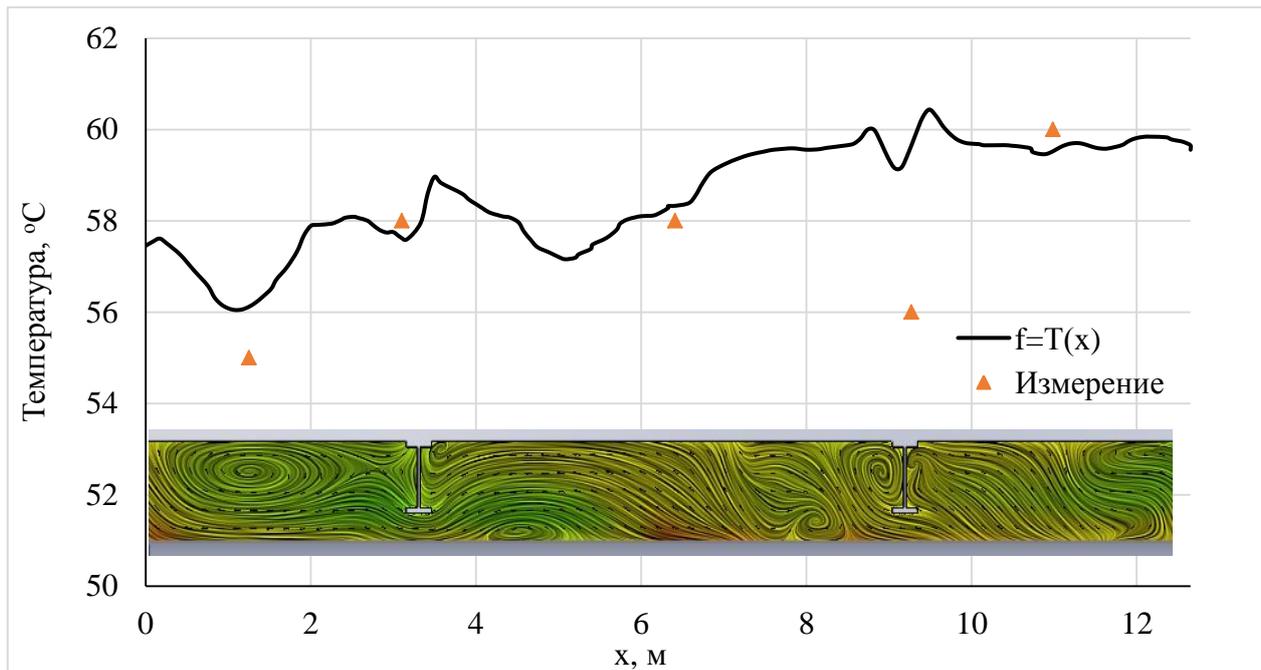


Рис. 1. Изменение температуры поверхности бака по длине с указанием линий тока воздушных масс над поверхностью бака

Для определения достоверности моделирования были использованы результаты измерения температур натриевого оборудования во время проведения ремонтной кампании на реакторной установке (РУ) БН-600 и во время эксплуатации на установленном уровне мощности. Рассмотрены линии отвода аргона парогенератора ПГН-200М. Для моделирования использовался пакет вычислительно гидродинамики SolidWorks Flow Simulation, позволяющий провести анализ протекания теплогидравлических процессов.

Предварительным этапом к моделированию стало определение основных геометрических и тепловых параметров исследуемых объектов [5]. Данные были получены двумя способами: первый подразумевает собой прямое измерение температур трубопроводов на поверхности металлопокрытия теплоизоляции при использовании пирометра; также для получения температуры натрия внутри объектов моделирования были задействованы электронные базы данных по РУ БН-600, полученные со стационарных термопар, установленных для контроля электрообогрева.

Так как исследуемая линия отвода аргона находится в реальных условиях окружающей среды, на нее влияет множество факторов: температура стен помещения, конвективные потоки от трубопроводов, пролегающие рядом с рассматриваемым участком, температура, поддерживаемая в помещении, потоки воздуха, создаваемые приточно-вытяжной вентиляцией. При моделировании участка трубопровода в качестве определяющего фактора была выбрана лишь температура окружающей среды, а влияние основных натриевых трубопроводов парогенератора было исключено с целью упрощения расчета. В связи с этим температура на поверхности изоляции, полученная опытным путем, и температура, полученная при моделировании в вычислительном пакете, имеют незначительное отличие.

С целью снижения температурного воздействия на обслуживающий персонал трубопроводы заключены в слой теплоизоляционного материала различных марок (табл. 1). Теплоизоляция заключена в металлическую облицовку, толщина которой не превышает 1 мм. Металлическая облицовка и стенка трубопровода не вносят ощутимого вклада в значение термического сопротивления стенок тепломеханического оборудования, поэтому вследствие малых толщин и высокого коэффициента теплопроводности элементы не оказывают суще-

ственного влияния на распределение температуры в радиальном сечении. Это подтверждается результатами моделирования изменения температуры дренажного трубопровода с наличием стенки трубы и металлопокрытия и без них.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов теплоизоляции.

Наименование	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м*К)	Удельный коэффициент теплоемкости, Дж/(кг*К)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Базальтовое волокно	0,039	860	50
МПБ-50/кт2	$0,035+0,17 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	845	70
Blanket 1050	$0,011+0,98 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	850	64
Blanket 1260	$0,012+0,91 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	845	96
Blanket 1430	$0,016+0,56 \cdot 10^{-3} t_{cp}$	855	160

В результате моделирования теплогидравлических процессов было получено распределение температур на поверхности металлопокрытия. Среднее отклонение результатов моделирования трубопровода линии отвода аргона от прямого измерения составляет 7,35 %. Разница обусловлена наличием сложной геометрии в боксе оборудования, конвективными потоками от нижерасположенного оборудования, не учтенного в модели и не точностью приборов измерения температуры.

В дальнейшей перспективе планируется моделирование фазового перехода в рассматриваемых системах для определения факторов влияющих на интенсивность протекающих процессов и нахождения пути влияния на эти факторы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пряхин В.Н. Использование математических моделей двухфазных потоков для анализа теплогидравлических процессов на АЭС // Теплоэнергетика. – 1994. – № 5. – С. 40–42. – EDN AIUPGP.
2. Ташлыков О.Л., Наумов А.А., Щеклеин С.Е. Моделирование процесса замораживания натрия в трубопроводах с целью оптимизации ремонта реакторных установок на быстрых нейтронах // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 21–26.
3. Tashlykov O.L., Bessonov I.A., Lezov A.D., Chalpanov S.V., Smykov M.S., Skvortsov G.I., Klimova V.A. Computational and experimental studies into the hydrodynamic operation conditions of container filters for ion-selective treatment // Nuclear Energy and Technology. – 2022. – V. 8(3). – P. 197–202. – URL: <https://doi.org/10.3897/nucet.8.94105>
4. Kurteev A.V., Klimova V.A., Sevastyanov M.M., Tashlykov O L. Numerical simulation of residual heat removal from the spent fuel assemblies storage pit // AIP Conference Proceedings. – December 2019. – 2174(1). – P 020170.

## ОЦЕНКА ЛЕСНОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А.О. Малинин

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа АЗ-13

Научный руководитель: Н.В. Барановский, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Своевременное предсказание возникновения очагов пожаров и прогнозирование динамики горения, непосредственно влияет на масштаб распространения пожаров, степень материального и экологического ущерба. Большое значение имеет возможность заблаговременного предсказания наличия очагов пожара, обеспечивая необходимое время для реализации противопожарных мероприятий и релокации соответствующей техники [1]. Целью физико-математических и прогностических моделей является: предсказание вероятности возникно-

вения пожаров, скорости и динамики их распространения в зависимости от различных экологических и техногенных факторов [2]. Искусственные нейронные сети могут применяться, например для детекции возгорания лесного массива, предсказания динамики его развития, площади потенциального пожара и точки его появления [3–13].

По данным ИСДМ Рослесхоз были построены векторные слои с локациями пожаров с 2011 по 2020 г. Каждый слой имеет соответствующую атрибутивную таблицу, содержащую для каждой пожарной точки: координаты, муниципальное образование, на территории которого произошел лесной пожар, наименование ближайшего населённого пункта, расстояние до него в км, площадь в га, год, дата и др. Метеоданные были получены из открытого архива метеостанции.

Исходный набор данных включал в себя 1398 точек очагов в период с 2000 по 2020 г.

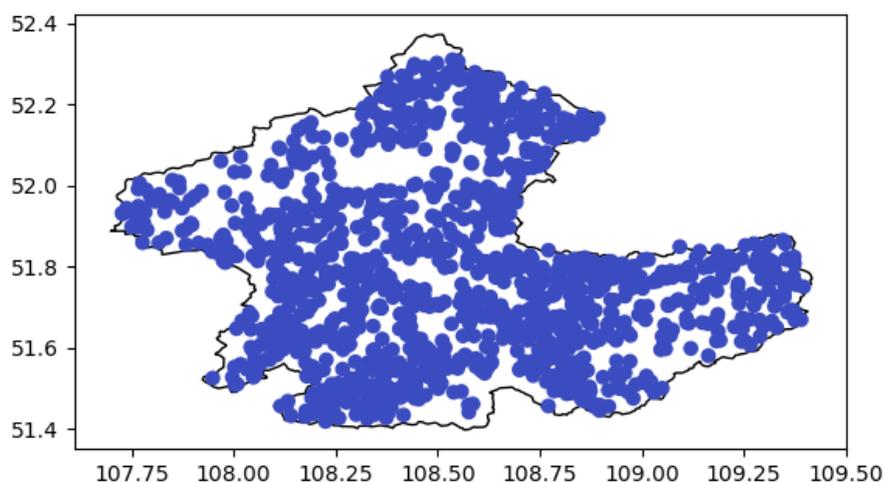


Рис. 1. Распределение очагов по местности

Для получения равномерно распределенных в границах района точек были построены сетки точек с шагом 1 км (6641 точек), 2 км (1657 точек) и 5 км (265 точек).

Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в соотношении 0,75 обучающая выборка, 0,25 тестовая выборка. В процессе обучения данные были распределены на пакеты по 200 точек, из которых 25 % забиралось для валидации модели.

Для ускорения обучения данные были нормализованы функцией MinMaxScaler библиотеки sklearn:

$$\hat{X}_i = \frac{X_i - X_{i_{min}}}{X_{i_{max}} - X_{i_{min}}}, \quad (1)$$

где  $X_{i_{min}}$  и  $X_{i_{max}}$  – минимальное и максимальное значение  $i$ -й входной величины;  $X_i$  – значение входной величины.

На внутренних слоях в качестве функции активации применялась функция ReLU («выпрямитель»):

$$f_t(x) = \max(0, x). \quad (2)$$

В качестве функции активации на выходном слое применялась функция сигмоида:

$$f_p(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}. \quad (3)$$

Была разработана нейронная сеть прямого распространения для определения вероятности возникновения очага в точке пространства с применением языка высокого уровня Python 3.8, библиотеки Keras с ядром TensorFlow.

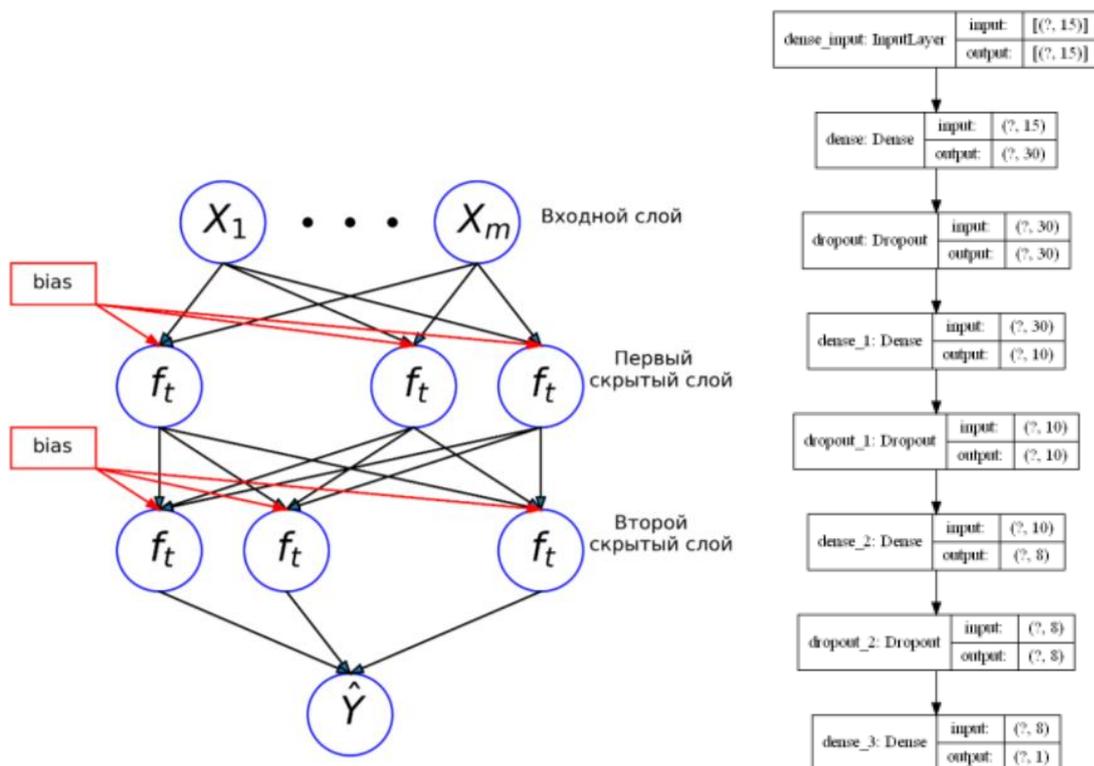


Рис. 2. Схема нейронной сети для прогнозирования пожарной опасности региона с совместным учетом метеоданных и геоданных. Трехслойная полносвязная нейросеть с 1 входным слоем, 2 скрытыми слоями и 1 выходным слоем

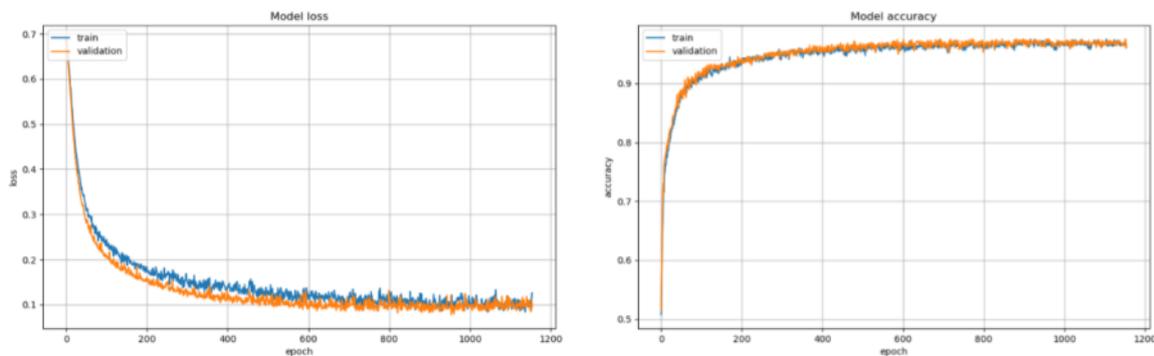


Рис. 3. График ошибки и точности обучения

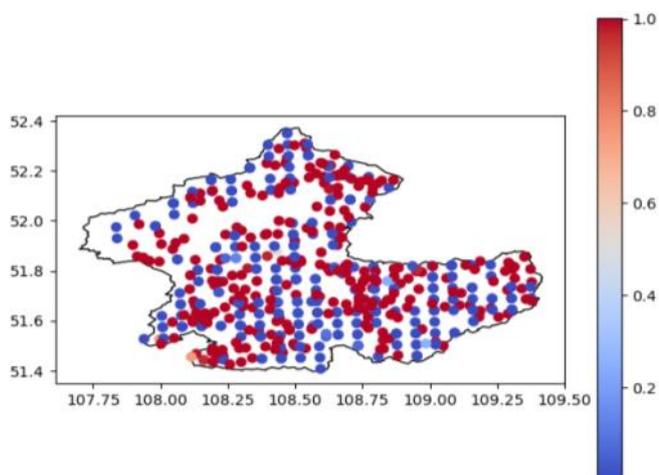


Рис. 4. Карта очагов, полученная в результате прогнозирования тестовой выборки

В данной работе была предпринята попытка применить нейросети и алгоритмы глубокого обучения для прогнозирования вероятности возникновения очага лесного пожара в Заиграевском районе.

В результате при совместном учете погодных условий в день очага и географического положения очага удалось добиться точности при обучении около 97 % на обучающей и 95 % на тестовой выборке.

Хотя в обучении модель с совместным учетом метео- и геоданных дает высокие значения точности, при прогнозировании на ранее не виданных данных не дает необходимого результата. Сеть переобучается на погодных данных и может дать хоть сколько-нибудь точный прогноз. Наиболее вероятная причина этого состоит в том, что расстояние между точками минимум 1 км. Наличие данных только с одной метеостанции не может достоверно отобразить локальные погодные условия в точке возникновения очага пламени. Значения температуры, влажности воздуха и давления окружающей среды и т. д. могут значительно колебаться на расстоянии даже в 1 км, это обусловлено характером растительности, дистанцией до водоема, локальным затенением от облаков и т. д. В связи с чем можно сделать вывод что такая задача реализуема районах с высокой плотностью размещения метеостанции, либо при значительном увеличении масштаба исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov G.V., Baranovskii N.V., Forecast of forest fires and their ecological consequences. – Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2009.
2. Ходаков В.Е., Жарикова М., Лесные пожары: методы и исследования. – Херсон: Гринь ДС, 2011.
3. Alanis Y., Arana-Daniel N., Lopez-Franco C. Artificial neural networks for engineering applications. – St. Louis, Missouri: Elsevier, 2019.
4. Singh K.R., Neethu K.P., Madhurekaa K., Harita A., Mohan P. A Comparison of Different Methodologies for Predicting Forest Fires // Cognitive Informatics and Soft Computing. – Т. 1317.
5. Mallick P.K., Bhoi A.K., Marques G., Hugo V., de Albuquerque C. Singapore: Springer Singapore, 2021, P. 157–166. doi: 10.1007/978-981-16-1056-1\_14.
6. Rao G.N., Rao P.J., Duvvuru R. A Drone Remote Sensing for Virtual Reality Simulation System for Forest Fires: Semantic Neural Network Approach // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2016. – V. 149. – P. 012011. doi: 10.1088/1757-899X/149/1/012011.
7. Safi Y., Bouroumi A., Bouroumi A. A neural network approach for predicting forest fires // 2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems, Ouarzazate, Morocco. – 2011. – P. 1–5. doi: 10.1109/ICMCS.2011.5945716.
8. Lall S., Mathibela B. The application of artificial neural networks for wildfire risk prediction // 2016 International Conference on Robotics and Automation for Humanitarian Applications (RAHA), Amritapuri, Kollam, Kerala, India. – 2016. – P. 1–6. doi: 10.1109/RAHA.2016.7931880.
9. Li Y., Feng Z., Chen S., Zhao Z., Wang F. Application of the Artificial Neural Network and Support Vector Machines in Forest Fire Prediction in the Guangxi Autonomous Region, China // Discrete Dyn. Nat. Soc. – 2020. – V. 2020. – P. 1–14. doi: 10.1155/2020/5612650.
10. Stankevich T.S. Development of an Intelligent System for Predicting the Forest Fire Development Based on Convolutional Neural Networks // Advances in Artificial Systems for Medicine and Education III. – V. 1126.
11. Hu Z., Petoukhov S., He M. // Cham: Springer International Publishing. – 2020. – P. 3–12. doi: 10.1007/978-3-030-39162-1\_1.
12. Khryashchev V., Pavlov V., Ostrovskaya A., Larionov R. Forest Areas Segmentation on Aerial Images by Deep Learning // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia. – 2019. – P. 1–5. doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884406.
13. Ghali R., Akhloufi M.A., Jmal M., Mseddi W.S., Attia R. Forest Fires Segmentation using Deep Convolutional Neural Networks // 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Melbourne, Australia. – 2021. – P. 2109–2114. doi: 10.1109/SMC52423.2021.9658905.
14. Luo Y. et al. Forest fire detection using spiking neural networks // Proceedings of the 15th ACM International Conference on Computing Frontiers, Ischia Italy. – 2018. – P. 371–375. doi: 10.1145/3203217.3203231.
15. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem // Geomat. Nat. Hazards Risk. – 2016. – V. 7, no. 5. – P. 1645–1658. doi: 10.1080/19475705.2015.1084541.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВПРЫСКА НА ПАРАМЕТРЫ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ

В.В. Елисеев

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,  
ИВТФ, СУ, группа 1-43М

Научный руководитель: Т. Е. Созинова, к.т.н., доцент ТОТ ТЭФ ИГЭУ

Впрыск воды в пароводяной сосуд (ПВС) является ключевым элементом безопасности в тепловых системах, обеспечивая быстрое охлаждение и снижение давления в случае аварийных ситуаций.

Настоящее исследование посвящено изучению качественного влияния впрыска на теплообмен и термодинамику в закрытом ПВС [1, 2]. Для этого использовано компьютерное моделирование в среде *SimInTech*, основанное на разработанной универсальной имитационной модели ПВС [3] (рис. 1).

Выбранная модель является научной и практичной, поскольку базируется на эмпирических свойствах воды и водяного пара [4] и предназначена для описания нестационарных процессов.

В рамках исследования особое внимание уделено детальному анализу изменения параметров пароводяной смеси после впрыска: давления ( $P$ ), уровня ( $h$ ), масс ( $M_{f_1}, M_{v_1}, M_{v_2}$ ), температур ( $T_{f_1}, T_{v_1}, T_{v_2}, T_{wall}^f, T_{wall}^v$ ), энтальпий ( $H_{f_s}, H_{v_s}, H_{v_2}$ ). Это позволит получить глубокое понимание процессов, происходящих в ПВС при впрыске, и разработать более эффективные стратегии обеспечения безопасности тепловых систем.

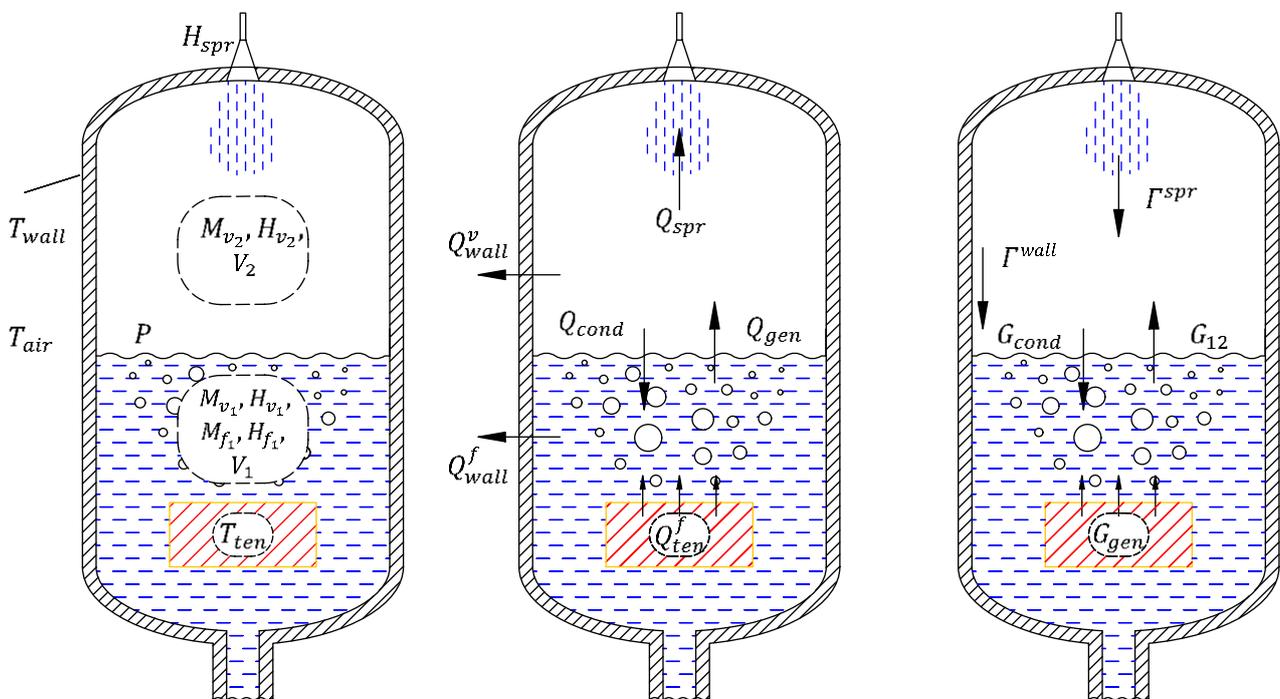


Рис. 1. Переменные состояния модели пароводяного сосуда

Для изучения реакции модели на впрыск проведён вычислительный эксперимент. Начальное состояние модели заданы параметрами, представленные в табл. 1. Для впрыска использованы следующие параметры: массовый расход  $G_{inj} = 20$  кг/с, температура  $T_{inj} = 250$  °С, и продолжительность 100 с. Выбранные параметры являются приближёнными к реальным параметрам не технологических установках.

Таблица 1. Начально состояние модели пароводяного сосуда

Давление, ат	Температура, °С		Масса, кг	
	воды/пара	воздуха	воды	пара
103,00	311,74	20	6867,32	1038,04

Для проведения эксперимента мощность нагревателя жидкости подобрана таким образом, чтобы компенсировать тепловые потери начального состояния во внешнюю среду, составляющие 155,45 КВт. Это позволило исключить влияние тепловых потерь и сосредоточиться на изучении влияния впрыска на параметры системы ПВС.

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 2–5.

1. Впрыск вызвал резкое снижение давления  $P$  в системе, уровень жидкости  $h$  линейно повысился (рис. 2). После прекращения впрыска давление и уровень частично восстановились в сторону исходных значений за 3000 с.

2. Впрыск привёл к линейному увеличению массы жидкости  $M_{fl}$  и одновременному снижению массы пара  $M_{v2}$  (рис. 3). Заметно кратковременное увеличение массы паровых пузырей  $M_{v1}$ , вызванное вскипанием воды в результате снижения давления.

3. Впрыск привёл к резкому понижению температуры воды и пара, что температуры соответствующих стенок на время стали выше (рис. 4). Поэтому стенки нагревали воду и пар до достижения теплового баланса, что объясняет повышение давления на рис. 2. Оставшееся тепло в стенках привело к повышению температуры воды и пара примерно на 10 °С.

4. Впрыск уменьшил сухость пара с 0,5 до 0,4 (рис. 5) – в паровой подушке повысилось содержание воды из-за уменьшения энергии системы.



Рис. 2. Динамика давления, уровня и расхода впрыска

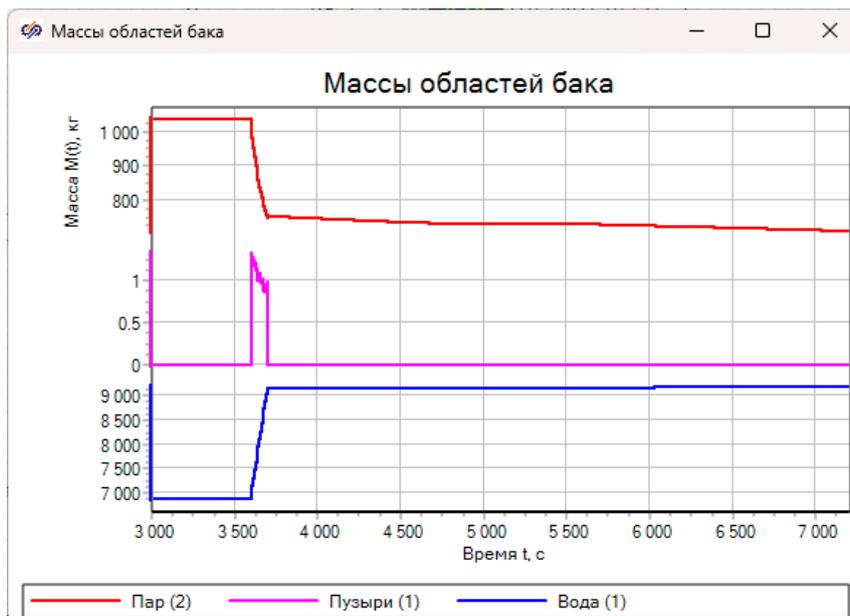


Рис. 3. Временная зависимость масс пара, пузырей и воды

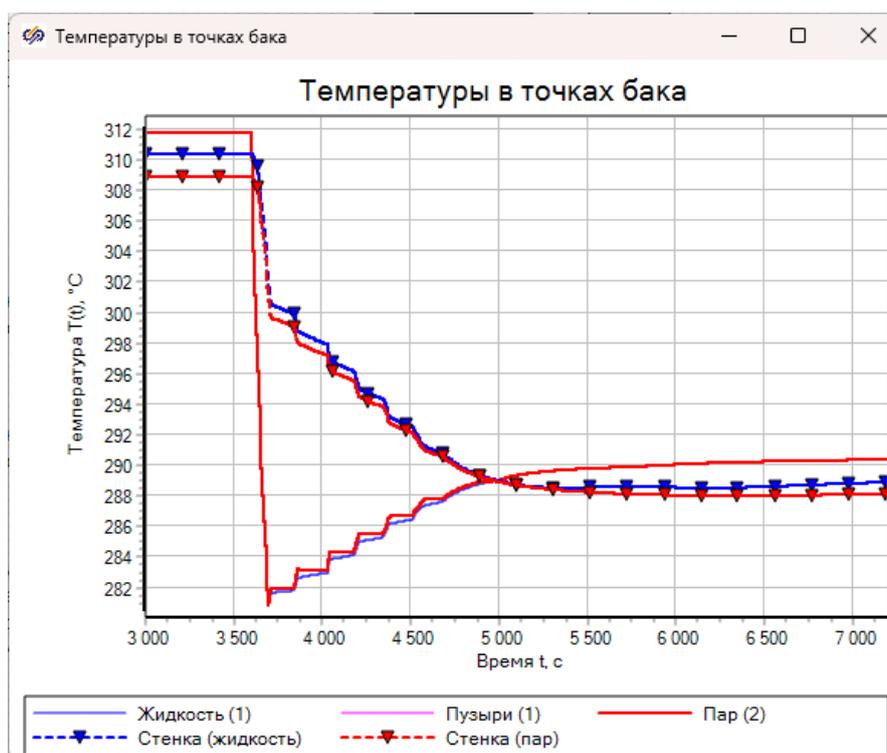


Рис. 4. Динамика температур в пароводяной системе

Вычислительный эксперимент подтверждает основные аспекты термодинамики [1, 2]. Результаты показали, что впрыск оказывает значительное влияние на параметры ПВС: вызывает резкое снижение давления и повышение уровня жидкости, а также изменение масс.

Наблюдалось увеличение массы паровых пузырей, вызванное вскипанием воды, и последующий нагрев системы за счёт тепла стенок сосуда. Изменение сухости пара подтверждает снижение энергетического потенциала системы.

Разработанная имитационная модель может быть основой для создания имитационных моделей сложных технологических тепловых систем.

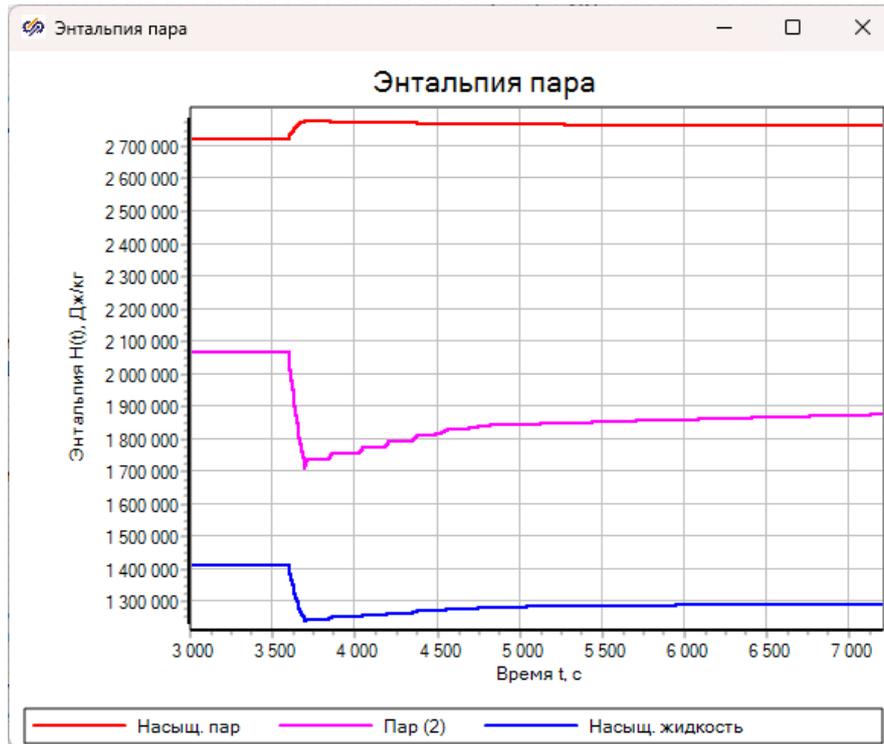


Рис. 5. Энтальпии пара между граничными энтальпиями насыщения

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики: учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд., испр. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2005. – 544 с. – ISBN 5-9221-0601-5.
2. Коновалов В.И. Техническая термодинамика. – Иваново: Иван. гос. энергет. ун-т, 1995. – 461 с.: ил.; 20 см.; ISBN 5-230-01688-4.
3. Елисеев В.В., Никоноров А.Н. Имитационная модель пароводяного компенсатора давления: Материалы междунар. науч.-техн. конф. // Энергия-2024. – 2024. – Том 5. – С. 12–12.
4. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – 2-е изд., стереот. – М.: Альянс, 2020. – 168 с.: ил. – ISBN 978-5-00106-482-4.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ПАССИВНОГО ОТВОДА ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ОБЛУЧЕННЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК

С.М. Глухов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
УралЭНИН, АСиВИЭ, группа ЭНА-230007

Научный руководитель: О.Л. Ташлыков, д.т.н., профессор кафедры АСиВИЭ, УралЭНИН, УрФУ

Ранее проведенные работы по направлению конструирования и создания системы пассивного отвода остаточного тепловыделения облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС), ее конструкции, принципа действия, применимости и др. представлены в работах [1–3].

Целью данной работы является разработка предложений по модернизации геометрических характеристик испарительной части системы пассивного отвода тепла с использовани-

ем кольцевого термосифона на основании результатов исследования режимов работы экспериментального стенда. Стенд включает в себя (рис. 1) имитирующий ОТВС нагреватель 1, размещенный в центральном отверстии кольцевого термосифона, бак с дистиллятом 2, в котором расположен испарительный модуль 3 системы, вентилятор 4, создающий поток воздуха в конденсационной части, подъемные и опускные трубопроводы, КИП.

Эксперимент проводился при начальных параметрах окружающей среды 24,0 °С, температура нагревателя 38 °С, начальном давлении в системе 20 кПа. На рис. 2 представлены результаты изменения температур в испарительном модуле по высоте (T1, T2, T3), температуре нагревателя (T4) и температуре дистиллята в баке (T5).



Рис. 1. Экспериментальная установка

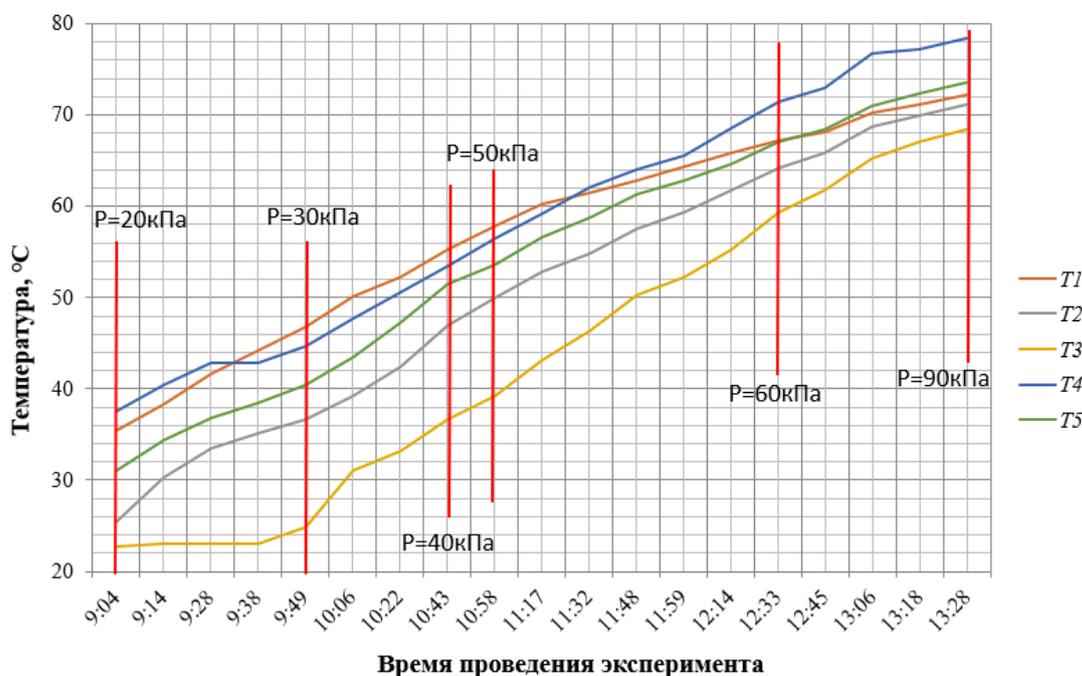


Рис. 2. Экспериментальные значения температур в системе

В ходе эксперимента замечено неравномерное распределение газообразной фазы теплоносителя системы по подъемным каналам. При достижении температуры теплоносителя в диапазоне от 50,3 до 62,9 °С в нижней и верхней точке испарительной части соответственно, наблюдалось начало обратного движения жидкой фазы теплоносителя в подъемном канале № 1, в то время как в опускном канале № 3 и в подъемном канале № 2 нет, что говорит о том, что:

- распределение потока теплоносителя в испарительной части происходит неравномерно и поток теплоносителя идет по меньшему сопротивлению в канал № 1.
- теплоноситель при данных температурах не успевает дойти до конденсационной части и конденсируется внутри подъемного канала № 1 и возвращается обратно.

В температурном диапазоне от 61,7 до 68,2 °С в нижней и верхней точке испарительной части соответственно наблюдается обратное движение жидкой фазы теплоносителя в опускном канале № 3, но при этом не прекратилось обратное движение теплоносителя в канале № 1.

На последнем этапе эксперимента (13:28) было замечено обратное движение теплоносителя во всех трех каналах №№ 1–3.

Максимальная температура теплоносителя в газообразном состоянии в подъемном канале № 1 составила 72 °С. В опускном канале № 3 температура теплоносителя составила 30,6 °С, что говорит об охлаждении теплоносителя на 42,6 °С, что доказывает работоспособность предлагаемой установки.

Дальнейшая работа была связана с проблемой (наблюдаемой при проведении эксперимента) неравномерного распределения потока теплоносителя, а соответственно и температурного градиента в испарительной части, возникшей за счет несимметричной конструкции испарительного модуля (опускного канала). Для подтверждения данного предположения было проведено моделирование существующей экспериментальной установки, а также предложены новые конструкции нижней части испарительного модуля для более равномерного поступления теплоносителя по опускному каналу № 3 в испарительный модуль (рис. 3).

С помощью SolidWorks Flow Simulation позволяющего моделировать эффекты потока жидкости, теплообмена и гидродинамических сил, смоделированы потоки теплоносителя внутри испарительной части, а также определены их направления, температуры и скорости.

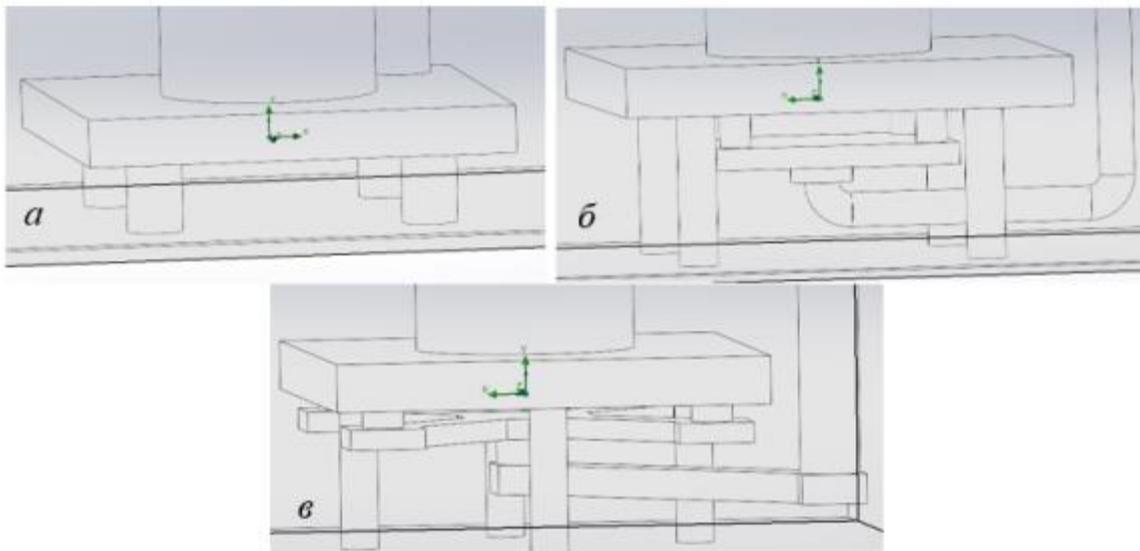


Рис. 3. Трехмерные модели нижней части испарительного модуля

На рис. 4 представлены картины в сечении распределения температур теплоносителя в испарительной части для предложенных ранее конструкций:

1. На рис. 3, а изображена конструкция нижней части испарительного модуля существующей экспериментальной модели.

2. На рис. 3, б представлена конструкция нижней части испарительного модуля с подачей теплоносителя снизу, что обеспечивает более равномерное распределение теплоносителя по объему, но при данной конструкции остаются застойные зоны по углам самого испарительного модуля, что говорит о том, что в системе имеется неиспользуемый объем.

3. На рис. 3, в изображена конструкция нижней части испарительного модуля с подачей теплоносителя снизу, но данная конструкция не выгибает недостатки конструкции представленной на рис. 3, б, исключая застойные зоны по углам конструкции.

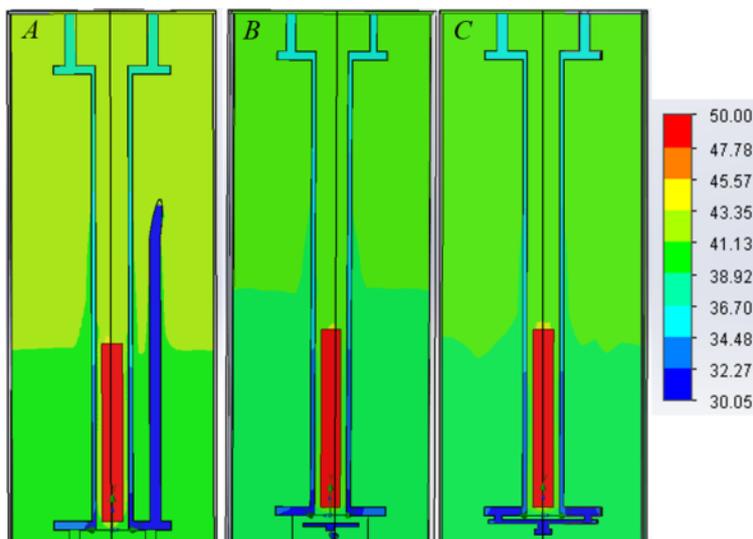


Рис. 4. Картина в сечении, распределение температур теплоносителя испарительной части и бака дистиллята

Более равномерное распределение температурного градиента по объему испарительного модуля показывает конструкция, изображенная на рис. 3, в и 4, с, что и является более эффективной для дальнейшей проработки разрабатываемой системы пассивного отвода тепла.

Из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что для более эффективного теплоотвода, стабилизации и выравнивания потока теплоносителя, необходимо рассмотреть замену (модернизацию) нижней части испарительного модуля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Experimental and theoretical justification of passive heat removal system for irradiated fuel assemblies of the nuclear research reactor in a spent fuel pool / Та. Van Thuong, O.L. Tashlykov, S.M. Glukhov [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – Vol. 55, No. 6. – P. 2088–2095. DOI 10.1016/j.net.2023.02.028.
2. Методика экспериментального исследования стенда-эмулятора пассивной системы охлаждения бассейна выдержки исследовательского ядерного реактора / С.В. Чалпанов, О.Л. Ташлыков, С.М. Глухов [и др.] // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 6(423). – С. 38–49. DOI 10.15518/isjaee.2024.06.038-049.
3. Патент на изобретение RU (11) 2 829 090(13) С1 Устройство пассивного отвода остаточных тепловыделений / Ташлыков О.Л., Шумков Д.Е., Чалпанов С.В., Глухов С.М., Ширманов И.А. Опубликовано: 23.10.2024, Бюл. № 30.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА АККУМУЛЯТОРНОГО МОДУЛЯ НА ПЛАТФОРМЕ REPEAT

Н.С. Иванов, И.А. Степин

ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

Научный руководитель: С.В. Букреев, генеральный директор ООО «ДЖЭТ ЛАБ»

Литий-ионные батареи широко используются для питания персональных электронных устройств благодаря высокой плотности энергии (~265 Вт·ч). Литий-ионные батареи имеют

в 4–5 раз большую плотность энергии, чем свинцово-кислотные, однако менее термически стабильны [1].

Мультифизическое моделирование работы аккумулятора с учетом электрического и теплового аспекта является важнейшим этапом при проектировании, так как математические модели позволяют провести оптимизацию системы и определить наиболее эффективные решения при разработке прототипа. При помощи моделей можно исследовать широкий диапазон рабочих режимов объекта: от номинального до критического.

Одним из ключевых условий номинальной работы аккумулятора является соблюдение температурного режима батареи. Вне допустимого температурного диапазона снижается производительность литий-ионной батареи и значительно ускоряется процесс деградации [2].

Основной целью данного доклада является поэтапный разбор процесса разработки модели нагрева аккумуляторного модуля с воздушным охлаждением на российской платформе REPEAT. Модель демонстрационная. Это значит, что значения исходных данных приближенные и не относятся к конкретному объекту. Ознакомиться с верификационными материалами можете на главном сайте программного обеспечения REPEAT [3].

Аккумуляторная ячейка (далее, как ячейка) является наименьшей фундаментальной единицей аккумуляторной системы. Батареинный модуль – это сборка, которая состоит из n-го количества ячеек аккумуляторов. Модуль последовательной конфигурации с воздушным охлаждением концептуально представлен на рис. 1.

Переходя к разработке модели, сначала строится электрическая цепь аккумуляторного модуля, состоящего из шести Li-ion ячеек и управляемого источника тока, к которому подключается алгоритм по моделированию разряда/заряда модуля. Данные свойств ячеек представлены на рис. 2. Период цикла разряда/заряда составляет 1080 с, амплитуда 90 А, скважность импульса 0.5. Затем для моделирования нагрева ячейки создается датчик и снимается параметр «Полная мощность тепловых потерь».

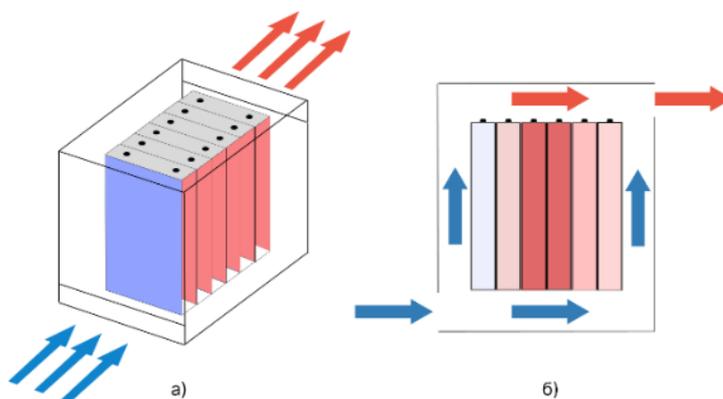


Рис. 3. Трехмерный рисунок модуля с воздушным охлаждением (а), вид сбоку (б)

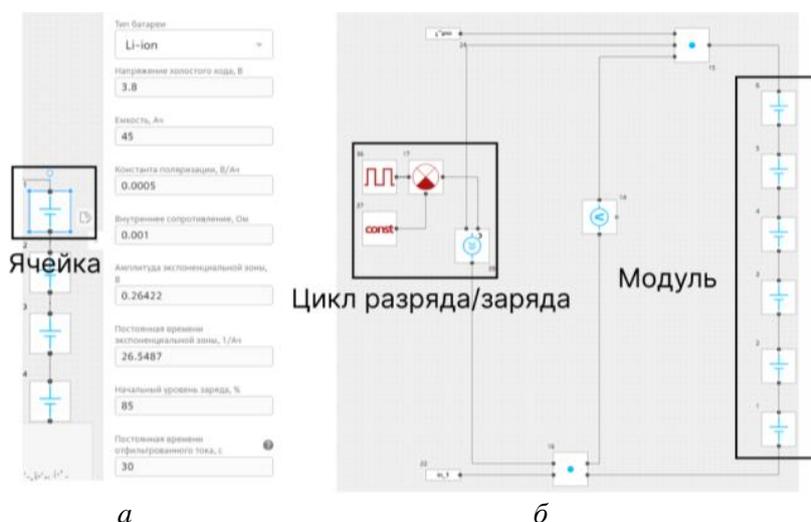


Рис. 4. Аккумуляторный модуль с циклом разряда/заряда (б) и литий ионная ячейка (а)

Все используемые блоки теплового раздела представлены в табл. 1.

Таблица 1. Таблица блоков тепловой модели аккумуляторного модуля с воздушным охлаждением

Название блока	Назначение блока
Источник температуры	Передача заданного значения температуры
Источник теплового потока	Передача заданного значения теплового потока
Тепловой разветвитель температуры/тепла	Разветвление источника температуры/суммирование входящих тепловых потоков
Тепловая масса	Расчет температуры ячейки относительно входного теплового потока и тепловых свойств объекта
Теплопроводность	Перенос тепла между ячейками по заданному материалу
Теплопроводность при тепловом контакте	Перенос тепла при тепловом контакте тел
Конвективная теплопередача с расчётом коэффициента теплоотдачи	Теплообмен между потоком воздуха и тела с расчетом коэффициента теплоотдачи

Теплота, создаваемая ячейкой, рассеивается при помощи блоков теплопередачи, в свойствах которых указываются геометрические размеры канала охлаждения, а на вход передаются значения температуры и скорости расхода охлаждающего воздуха. Геометрические размеры ячейки и скорости потока воздуха в нижнем, боковом и верхнем канале представлены в табл. 2.

Таблица 2. Габариты ячейки и скорости воздушных потоков в модуле

Свойство	Длина ячейки, м	Ширина ячейки, м	Высота ячейки, м	Скорость потока воздуха в боковом канале, м/с	Скорость потока воздуха в нижнем канале, м/с	Скорость потока воздуха в верхнем канале, м/с
Значение	0.009	0.02	0.025	20	12	2

Шесть ячеек находятся в кожухе модуля, нагнетаемый воздух проходит снизу-вверх через боковые каналы и охлаждает ячейки (рис. 1). Одна ячейка представлена одной тепловой массой, к которому подключаются источники теплоты. Теплота, создаваемая ячейкой, рассеивается при помощи теплопередачи (рис. 3). Результирующий тепловой поток затем передается тепловой массе ячейки, значения свойств тепловой массы:  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m = 0,93 \text{ кг}$ ,  $c = 1200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

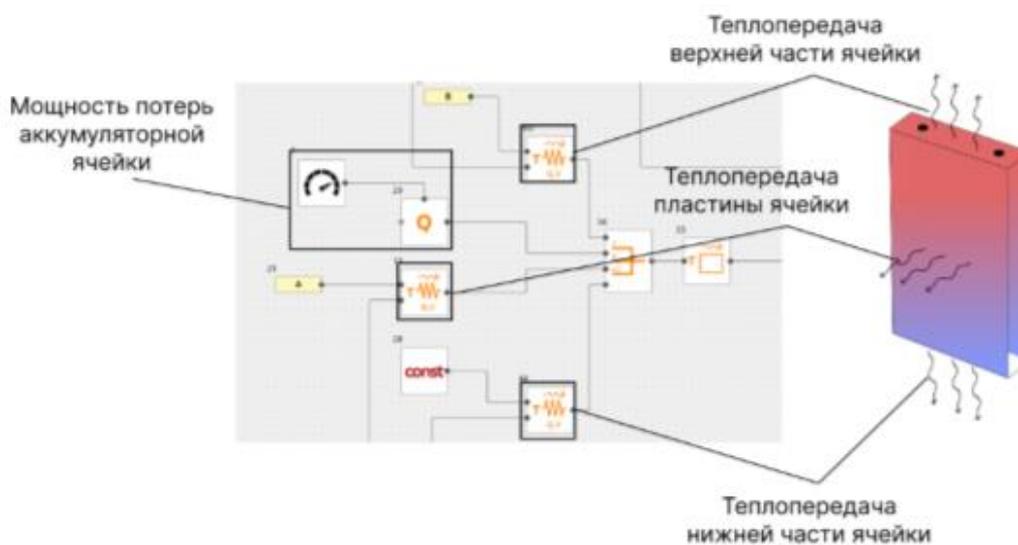


Рис. 5. Пояснения к схеме тепловой массы ячейки

Ячейки находятся в соприкосновении друг с другом, а также соединены между собой медным коннектором, рис. 4, б. Поэтому тепловые массы соединяются между собой при помощи блоков «Теплопроводность» и «Тепловой контакт». Площадь теплопроводности составляет  $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ , теплопроводность стандартная для меди при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплопроводность моделирует изолирующий материал между ячейками, значение теплопроводности  $1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ , контактное сопротивление равно  $0,02 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ . Далее создаются аналогичные тепловые массы с теплообменными связями для других ячеек.

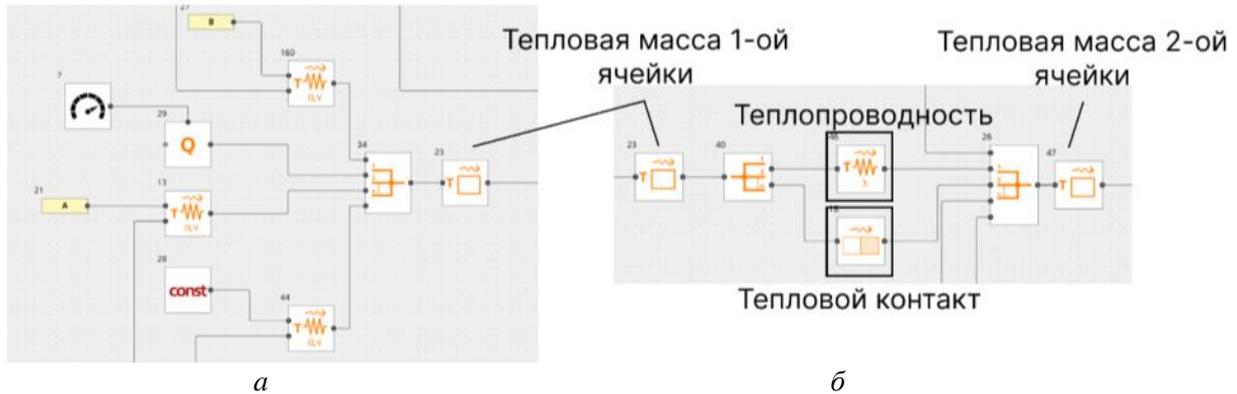


Рис. 6. Общий вид тепловой массы одной ячейки (а) и тепловая связь между массами ячеек (б)

Теперь лишь остается учесть нагрев верхнего потока воздуха по формуле (1), в котором  $Q_m$  – массовый расход воздуха ( $0,015 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ),  $dQ$  – тепловой поток блока теплопередачи, связывающего ячейку и верхний канал кожуха (значение снимается с датчика),  $T_0$  – начальная температура.

$$T_1 = \frac{dQ}{c \cdot Q_m} + T_0 \cdot \#(1)$$

Схема тепловой модели нагрева аккумуляторного модуля представлена на рис. 5.

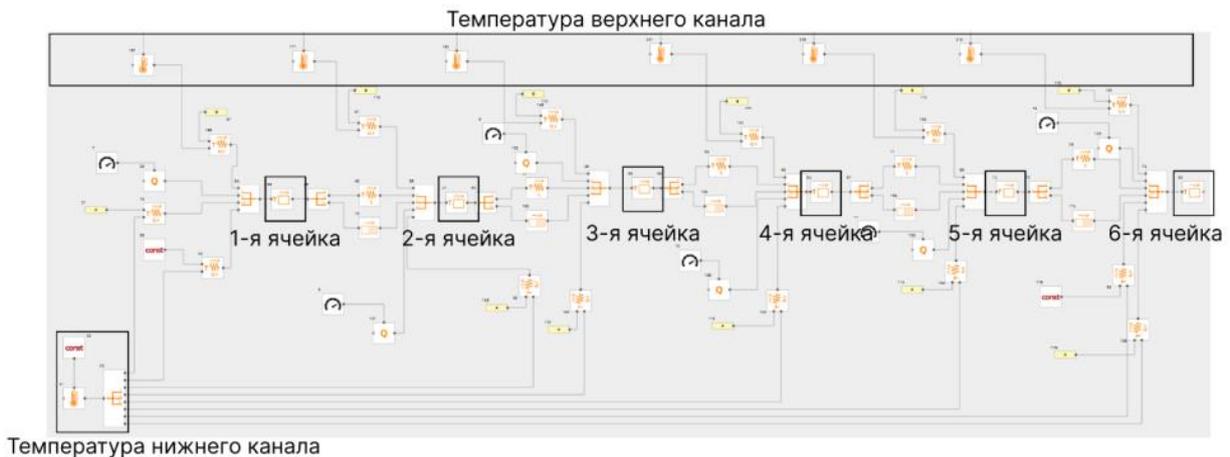


Рис. 7. Схема тепловой модели нагрева аккумуляторного модуля на платформе REPEAT

После расчета модели выгружаются данные температур тепловых масс и температур нагрева верхнего потока воздуха и импортируются в встроенный инструмент JupyterLite (рис. 6) для работы с данными на языке Python.

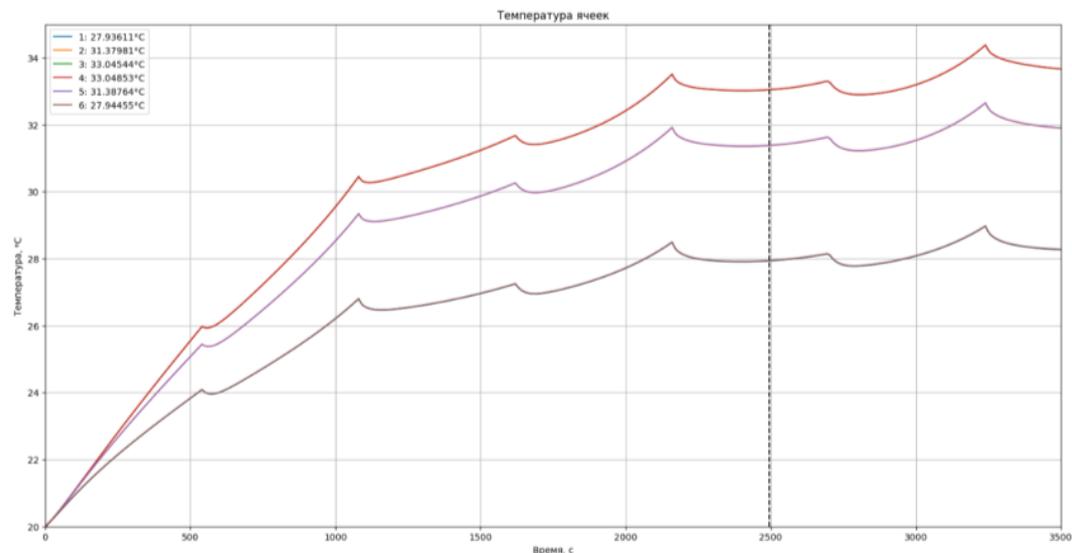


Рис. 8. График нагрева ячеек аккумуляторного модуля

Согласно полученным кривым видно, что поток воздуха охлаждает ячейки модуля неравномерно, т. к. площадь конвективной теплопередачи у центральных ячеек значительно меньше, чем у крайних. Температуры ячеек модуля почти что симметричны. Разница температур 3 и 4 ячейки не превышает одной сотой.

При проектировании систем, тепловые модели помогают удостовериться, что разрабатываемый объект работает в допустимом температурном диапазоне. У литий ионных аккумуляторов при превышении максимальной температуры снижается выдаваемая мощность, а также ускоряется процесс деградации. Математические модели позволяют избежать таких сценариев.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775399001780> (дата обращения 18.11.2024)
2. URL: [https://www.researchgate.net/publication/327966044\\_Review\\_Of\\_Comparative\\_Battery\\_Energy\\_Storage\\_Systems\\_Bess\\_For\\_Energy\\_Storage\\_Applications\\_In\\_Tropical\\_Enviroments](https://www.researchgate.net/publication/327966044_Review_Of_Comparative_Battery_Energy_Storage_Systems_Bess_For_Energy_Storage_Applications_In_Tropical_Enviroments) (дата обращения 18.11.2024)
3. URL: <https://repeatlab.ru/> (дата обращения 12.11.2024)

## НЕДОСТАТКИ КАМЕР СГОРАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ГТД

**Р.С. Казаков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А4-31*

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются одним из ключевых элементов в технологических процессах энергетических отраслей. Компактная конструкция, высокая удельная мощность, энергоэффективность и оперативность обуславливают широкое применение ГТД в роли основного энергопривода для энергетики, авиации, транспортировки углеводородов и других областей. В настоящее время процесс совершенствования ГТД лимитирует камера сгорания, определяя его важнейшие характеристики: экономические, экологические и ресурсные [1].

Камеры сгорания представляют собой сложные технические устройства, требующие детального проектирования, изготовления и обслуживания. Несмотря на свою важность и широкое применение, камеры сгорания имеют ряд недостатков, которые необходимо учитывать при их разработке, эксплуатации и техническом обслуживании [2]. В данной обзорной статье рассмотрены основные недостатки камер сгорания ГТД и методики борьбы с ними.

К недостаткам камер сгорания стационарных ГТД можно отнести:

1. *Выбросы вредных веществ.* Процесс горения топлива приводит к образованию больших концентраций оксидов азота в продуктах сгорания, что негативно сказывается на экологии.

2. *Высокие температуры.* Сжигание топлива в зоне горения сопровождается высокими температурами, которые могут привести к термической усталости материалов и снижению их прочности.

3. *Сложность конструкции.* Камеры сгорания имеют сложную геометрию и состоят из множества деталей, что усложняет их изготовление и обслуживание. Сложности к проектированию и изготовлению добавляет необходимость разработки многофункциональных систем охлаждения теплонапряженных элементов жаровой трубы, которые должны эффективно отводить тепло, предотвращая перегрев критически важных элементов и обеспечивая максимальный ресурс двигателя. Сложная геометрия камеры сгорания ведет к неравномерному протеканию процесса горения, что ведет к образованию горячих и холодных зон, которые негативно влияют на эффективность сгорания [3].

4. *Ограниченность применения.* Конструктивные особенности, термодинамические процессы, протекающие внутри камеры сгорания и материалы обуславливают ограничения по максимальной мощности. Расширение диапазона мощности требует дополнительных систем охлаждения и фильтрации, что усложняет конструкции установки и увеличивает ее стоимость. Это ограничивает привлекательность газотурбинных систем для некоторых промышленных приложений, где важна не только мощность, но и экономичность и простота обслуживания.

5. *Необходимость в использовании АСУ.* Важнейшей задачей является поддержание стабильности процесса горения и обеспечение безопасности работы, для чего требуется сложная система управления и контроля.

Несмотря на ряд своих недостатков, камеры сгорания ГТД остаются востребованными в различных областях благодаря своей высокой термодинамической эффективности и сравнительной надежности. Для устранения вышеупомянутых недостатков проводятся исследования и разработки новых технологий и материалов.

Современные тенденции в энергетике направлены на широкое применение численного моделирования рабочего процесса в камерах сгорания, который позволяет инженерам глубоко и полно изучить влияние конструктивных и режимных изменений на основные характеристики КС.

Одним из основных подходов является применение инновационных материалов. Камеры сгорания являются жесткой эксплуатационной средой, поэтому критически важным является разработка новых материалов, устойчивых к высоким температурам и давлению, что позволяет значительно продлить срок службы камер сгорания. Новые композитные материалы на основе керамики и металлических сплавов имеют высокую устойчивость к коррозии и способны уменьшить механический износ, обеспечивая надежность и стабильность работы оборудования. Термоизоляционные покрытия позволяют снизить оксидацию и термическую усталость [4].

Главной задачей на этапе экологической модернизации камер сгорания является снижение выбросов оксидов азота в продуктах сгорания. Уменьшение выбросов оксидов азота можно добиться с помощью следующих методов: сжигание обедненной, предварительно перемешанной топливной смеси; впрыск воды (пара) в зону горения; каталитическое сжигание топ-

тивно-воздушной смеси [5]. Однако каждый из этих методов имеет значимый недостаток. Технология впрыска воды требует использования дополнительного оборудования для подачи воды или водяного пара в камеру сгорания, что приводит к увеличению массы установки; также впрыск воды приводит к снижению полноты сгорания топлива. Сжигание обедненной предварительно перемешанной топливной смеси вызывает проблему сужения диапазона устойчивого горения. Высокая стоимость катализатора и необходимость в его периодической замене встают на пути широкого применения каталитических камер сгорания.

Совершенствование камер сгорания неразрывно связано с инновациями в области технологий и материалов, а также с поиском новых оптимальных конструкций, обеспечивающих высокую полноту сгорания топлива, низкую эмиссию вредных веществ и устойчивое протекание процессов в широком диапазоне нагрузок.

На основании проведенного анализа возможных негативных факторов эксплуатации камер сгорания ГТД можно констатировать, что современные тенденции снижения выбросов  $\text{NO}_x$  могут приводить к недожогу топлива, к существенному усложнению конструкции камер сгорания, что так же отражается на их надежности и стабильности несения нагрузки. При этом повышение КПД ГТУ непосредственно связано с увеличением температуры газовоздушной смеси за камерой сгорания, но это приводит к увеличению эмиссии  $\text{NO}_x$ . Поэтому с целью обеспечения надежной, экологичной и эффективной работы ГТУ имеет большое значение развитие технологий и подходов применения численного моделирования. Численные методы позволяют снизить временные и материальные затраты по отношению к натурным исследованиям, в особенности при проведении большого числа вариативных экспериментов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые подходы к созданию низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ / В.С. Арутюнов, В.М. Шмелев, А.Н. Рахметов и др. // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 6-2(128). – С. 105–120.
2. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: учебное пособие второе издание переработанное: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 217 с.
3. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. унта, 2006. – 220 с.
4. Харлина Е.В. Малоэмиссионные камеры сгорания и способы охлаждения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 29–40.
5. Комаров Е.М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2018. – № 05. – С. 9–29.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И УСЛОВИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОГО УГЛЯ СОВМЕСТНО С ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССОЙ

**А.А. Омаров, Ж.А. Косторева, С.В. Сыродой**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А3-11*

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Решение значительного сокращения выбросов антропогенных оксидов в атмосферу при сжигании угля является использование водоугольных суспензий, которые как правило называют водоугольным топливом [1–6]. Установлено, что при сжигании таких топлив существенно снижаются выбросы антропогенных оксидов на единицу массы угля [7]. Так же положительный эффект на секвестирование антропогенных оксидов, образующиеся в результате сжигания угля, оказывает – добавление биомассы, чаще всего древесной.

Целью данного исследования это, провести эксперимент с зажиганием частиц увлажненного угля совместно с древесной биомассой, для секвестирования антропогенных выбросов

на энергетических объектах такие как ТЭЦ и ТЭС. Также обоснование по результатам эксперимента использование умеренного увлажнённого угля в комбинации с древесной биомассой.

Эти подходы направлены на оптимизацию процессов сжигания и снижение вредных выбросов в атмосферу. В экспериментах исследовались 7 составов топлив (табл. 1) при температурах окружающей среды 873, 973, 1073, 1173 и 1273 К. На первом этапе процедуры подготовки эксперимента использовались сухие и увлажненные частицы длиннопламенного угля (Д) и древесины (сосны). Длиннопламенный уголь относится к энергетическим и наиболее часто применяется на тепловых электростанциях многих стран в качестве основного топлива.

Таблица 1. Составы исследуемых топлив

Номер состава	Состав
№ 1	Сухой уголь + сухой уголь
№ 2	Сухой уголь + влажный уголь
№ 3	Влажный уголь + влажный уголь
№ 4	Сухой уголь + сухая древесина
№ 5	Сухой уголь + влажная древесина
№ 6	Влажный уголь + влажная древесина
№ 7	Сухая древесина + влажная древесина

В качестве второго компонента смеси использовалась сосна, которая является типичными представителями «энергетической биомассы» и широко распространена в Западной Сибири (Тайге). Древесина вырезалась из монолитного сухого фрагмента сосны больших размеров, влажность которого составляла 6–8 %. С помощью лазерного станка с ЧПУ MC Laser 1390 (систематическая погрешность которого не превышала 0,01 мм) проводилась процедура резки древесных частиц кубической формы с характерным размером  $\delta = 3$  мм.

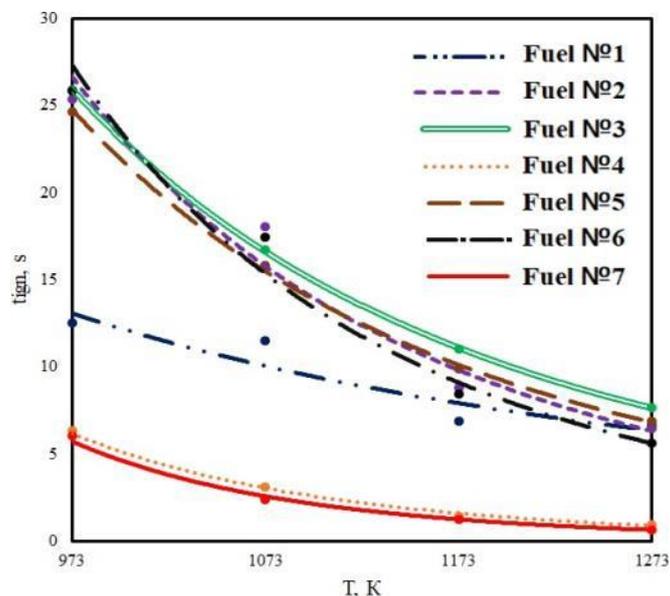


Рис. 1. Зависимости времен задержки ( $t_{ign}$ ) частиц смеси от температуры окислителя ( $T$ ) для разных составов топлива

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 23-79-01067.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ignition of water-coal fuel droplets during radiative-convective- conductive heating in relation to boilers operating on the technology of circulating fluidized bed / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, D. Yu. Malyshev, M.V. Purin // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – V. 33. – P. 101363.
1. Ignition and combustion characteristics of coal – water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // Combustion and Flame. – 2022. – V. 246. – P. 112430.
2. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste / D.V.Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A. Zh Kaltaev // Energy. – 2022. – V. 257. – P. 124813.
3. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Sci Total Environ. – 2019. – V. 671. – P. 568–577.
4. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state / K. Vershinina, G. Nyashina, V. Dorokhov, N. Shlegel // Appl Therm Eng. – 2019. – V. 156. – P. 51–62.
5. Combustion of coal-water suspensions / A. Kijo-Kleczkowska // Fuel. – 2011. – V. 90. – P. 865–877.
6. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal- water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions / S.V. Alekseenko, A.A. Dekterev, L.I. Maltsev, V.A. Kuznetsov // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – V. 169. – P. 313–327.

## МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

К.Д. Куликов, Д.Е. Фирсова

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5011/5012

Научный руководитель: Ю. Я. Раков, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В текущей статье рассмотрена созданная математическая модель трехмерной задачи для определения коэффициента теплопроводности, а также результаты анализа ее применения.

**Ключевые слова:** моделирование, коэффициент теплопроводности, погрешность.

### Введение

В ходе практической деятельности может возникнуть необходимость определения коэффициента теплопроводности какого-либо нового или неизвестного материала. Существуют множество методов определения коэффициента теплопроводности, например, метод пластины, цилиндра, шара, Кольрауша и др. [1].

Здесь будет представлено описание метода, преимуществом которого является отсутствие какого-либо контактного измерения начальных данных. Таким образом, нет необходимости вносить, возможно, трудновыполнимые изменения в структуру материала.

### Математическая постановка задачи

Рассмотрим объект в форме прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $a$ ,  $b$  и  $c$  вдоль, соответственно, осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (рис. 1). Будем нагревать его с одной из сторон тепловым потоком, характеризующимся постоянной плотностью теплового потока  $q_F$ . В таком случае, вследствие наличия теплового излучения, с каждой из граней рассматриваемого параллелепипеда будет уходить тепловой поток  $Q_{изл\ i}$ .

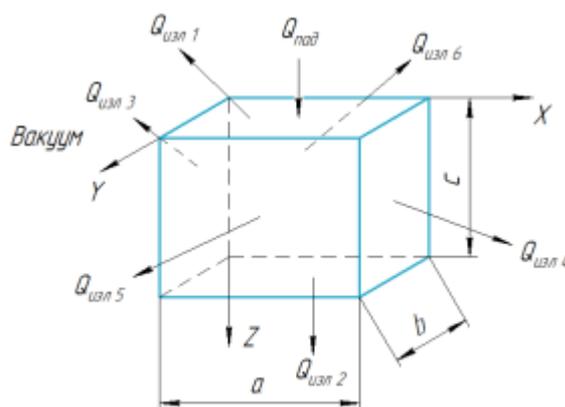


Рис. 1. К математической постановке задачи

Образец помещен внутрь вакуумной камеры, ее стенки зачернены и имеют температуру поверхности, равную температуре окружающей среды  $T_{oc}$ . Постоянными принимаем интегральную степень черноты  $\varepsilon$  и коэффициент поглощения поверхности тела  $A$ .

При небольших перепадах температур по сечению рассматриваемого образца постоянным также можно принять и коэффициент теплопроводности  $\lambda$ . Таким образом, математическая постановка задачи для нахождения коэффициента теплопроводности будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = 0, \quad (1)$$

$$q_F \cdot A = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{Z=0} + \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Z=0}^4 - T_{oc}^4), \quad (2)$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{Z=c} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Z=c}^4 - T_{oc}^4), \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{X=0} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{X=0}^4 - T_{oc}^4), \quad (4)$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{X=a} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{X=a}^4 - T_{oc}^4), \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{Y=0} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Y=0}^4 - T_{oc}^4), \quad (6)$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{Y=b} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Y=b}^4 - T_{oc}^4), \quad (7)$$

$$|Q_{изл 2} - \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot \int_F (T_{Z=c}^4 - T_{oc}^4) \cdot \partial F| \rightarrow \min \quad (8)$$

Здесь  $\sigma_0$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Подытоживая вышесказанное, для нахождения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  необходимо знать, т. е. экспериментально определить: плотность падающего теплового потока  $q_F$ , суммарный тепловой поток, теряемый с нижней грани  $Q_{изл 2}$ , температуру окружающей среды  $T_{oc}$ , интегральную степень черноты  $\varepsilon$ , коэффициент поглощения поверхности тела  $A$  и геометрические размеры образца  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Если же поставлена задача определить суммарный тепловой поток, теряемый с нижней грани  $Q_{изл 2}$ , то набор исходных данных остается прежним, но теперь необходимо знать коэффициент теплопроводности  $\lambda$ . Такую задачу будем называть прямой, а случай выше – обратной.

Как прямая, так и обратная задачи не имеют точного аналитического решения, поэтому для нахождения результатов применяют численные методы решения дифференциальных уравнений. Основой для решения послужил метод конечных разностей, согласно которому частные производные были заменены разностными отношениями для узловых точек сеточной области, границами которой являются границы самого образца. Полученная совокупность конечно-разностных уравнений решалась с помощью составленных программ.

### Суть работы моделирующих программ

Для более ясного понимания алгоритма расчетов приведем схемы решения прямой и обратной задач.

Как можно видеть из рис. 2, алгоритм решения прямой задачи следующий: вводятся исходные данные, которые перечислены ранее; затем обозначаются все необходимые константы, состоящие из различных комбинаций начальных данных; присваивается начальное распределение температур (например, принимается, что температура во всех узлах равна температуре окружающей среды); исходя из конечно-разностных уравнений находится распределение температур во всем теле; проверяется сходится ли температурной поле или нет (нахо-

дится разность температур в каждом узле двух массивов), если расхождение больше заданного  $\Delta T$ , то расчет температур повторяется; находятся интегральные тепловые потоки, уходящие с граней прямоугольного параллелепипеда; проверяется сходимость тепловых потоков (находится разница между тепловым потоком, поступившем в тело и уходящим из него), если расхождение больше заданного  $\Delta Q$ , то возвращаемся к расчету температурного поля; выводим необходимые нам значения, это могут быть как интегральные тепловые потоки, уходящие с каждой из граней, так и температурное поле.

Из рис. 3 видно, что решение обратной задачи сопровождается многократным решением прямой задачи, алгоритм которой представлен выше.

Поясним решение обратной задачи: вводятся исходные данные, перечисленные ранее; задаются предполагаемые границы определяемого  $\lambda$ ; находится среднее значение  $\lambda$  в этом интервале; рассчитывается прямая задача при  $\lambda$  чуть менее среднего; вычисляется разница между рассчитанным  $Q_{\text{изл } 2}$  и определенным экспериментально (или с помощью решения прямой задачи при заданном  $\lambda$ ); рассчитывается прямая задача при  $\lambda$  чуть больше среднего; также рассчитывается разница; сужается диапазон  $\lambda$ ; находится новое среднее; рассчитывается прямая задача при новом среднем  $\lambda$ ; вычисляется разница между рассчитанным  $Q_{\text{изл } 2}$  и определенным экспериментально, если это разница больше заданного значения  $\Delta Q$ , то возвращаемся к шагу, стоящему после исходных данных; выводится искомый  $\lambda$ .

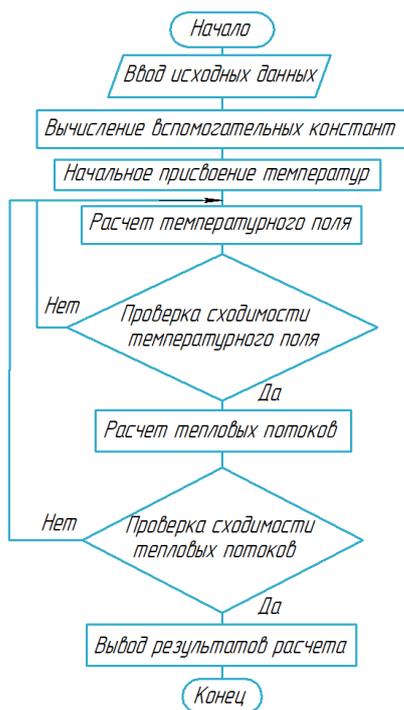


Рис. 2. Схема решения прямой задачи

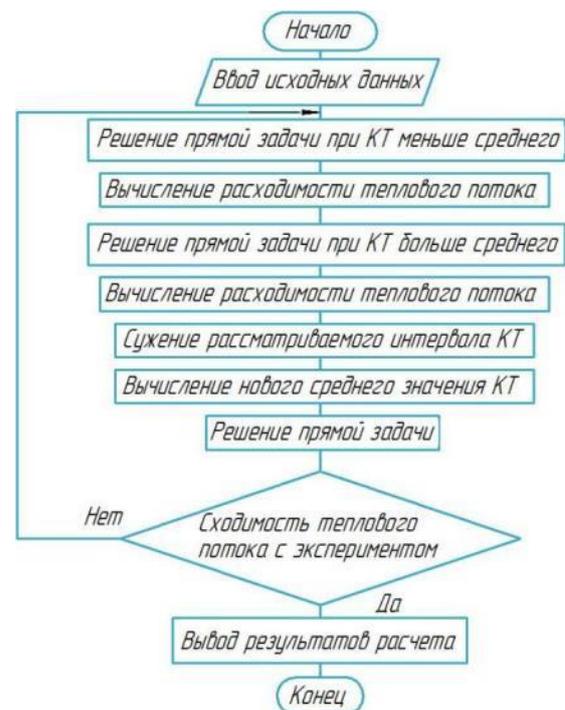


Рис. 3. Схема решения обратной задачи

### Результаты работы программы

Покажем погрешность определения коэффициента теплопроводности при последовательном решении сначала прямой задачи и определения  $Q_{\text{изл } 2}$ , а затем обратной задачи и нахождения  $\lambda$ . После этого проверим насколько будет различно значение  $\lambda$ , определив относительную погрешность. Расчет будем производить при следующем наборе исходных данных:  $a = b = c = 5 \text{ мм}$ ;  $q_F = 100000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ;  $T_{\text{ос}} = 300 \text{ К}$ ;  $\varepsilon = 0,8$ ;  $A = 0,8$ ;  $\Delta T = 0,001 \%$ ;  $\Delta Q = 0,01 \%$ . Узловая сетка –  $17 \times 17 \times 17$ .

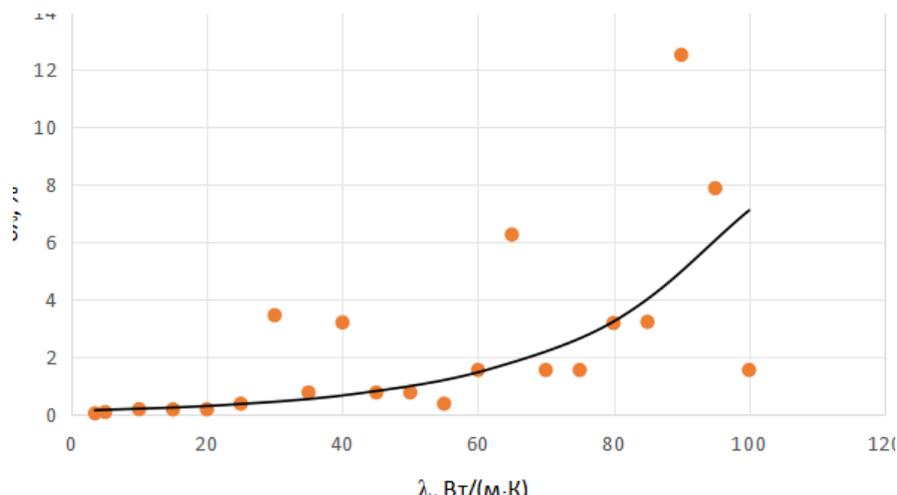


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности определения  $\lambda$  при различных значениях  $\lambda$

Как можно видеть из рис. 4, погрешность определения  $\lambda$  растет с ростом самого значения  $\lambda$ . Если мы хотим уменьшить погрешность, то необходимо или увеличивать число узлов в сетке или уменьшать  $\Delta T$  и  $\Delta Q$ , но и то и другое приведет к увеличению числа итераций и, следовательно, времени расчета программой.

### Заключение

В качестве вывода хотелось бы отметить практическую ценность разработанных программ: с их помощью возможно смоделировать ход потенциального эксперимента для интересующего диапазона коэффициентов теплопроводности и других начальных данных и понять какие будут наблюдаться температуры и тепловые потоки, что поможет подобрать наиболее подходящие приборы для создания экспериментальной установки.

Также важно заметить, что при математической постановке задачи было принято, что коэффициент теплопроводности не зависит от температуры и сказано, что это справедливо при небольших перепадах температур по сечению образца. Такое допущение справедливо, например, для набора исходных данных представленных выше, при  $\lambda > 3.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ , в иных же случаях необходимо учитывать зависимость  $\lambda = f(T)$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заворин А.С., Кузьмин А.В., Раков Ю.Я. Методы определения теплопроводности конденсированных сред. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 184 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ КОРПУСОМ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.Г. Гарбуз

Томский политехнический университет, ИШЭ, группа 5Б13

Научный руководитель Е.В. Кравченко, к.т.н., доцент, ИШЭ ТПУ

В данной статье рассматривается влияние воздушных зазоров между базовыми элементами и корпусом аккумуляторной батареи на тепловое состояние рабочих элементов. Актуаль-

ность данной темы обусловлена необходимостью повышения надежности и безопасности аккумуляторных систем хранения энергии (СХЭ), которые широко используются в различных отраслях, включая электроэнергетику. Такие системы применяются для обеспечения резерва мощности в централизованных энергосетях и поддержки стабильной работы при высоких нагрузках. Однако нагрев базовых элементов батарей, вызванный тепловым сопротивлением между элементами и корпусом, создаёт риски теплового разгона и возгорания.

Цель исследования – теоретически оценить, как воздушный зазор между корпусом батареи и базовыми элементами влияет на процесс теплообмена и характерные температуры (максимальная, средняя и температура внешней поверхности корпуса батареи). В работе рассмотрены численные модели, описывающие теплоперенос в батареях, и представлены выводы о том, как воздушные зазоры могут влиять на безопасность эксплуатации СХЭ.

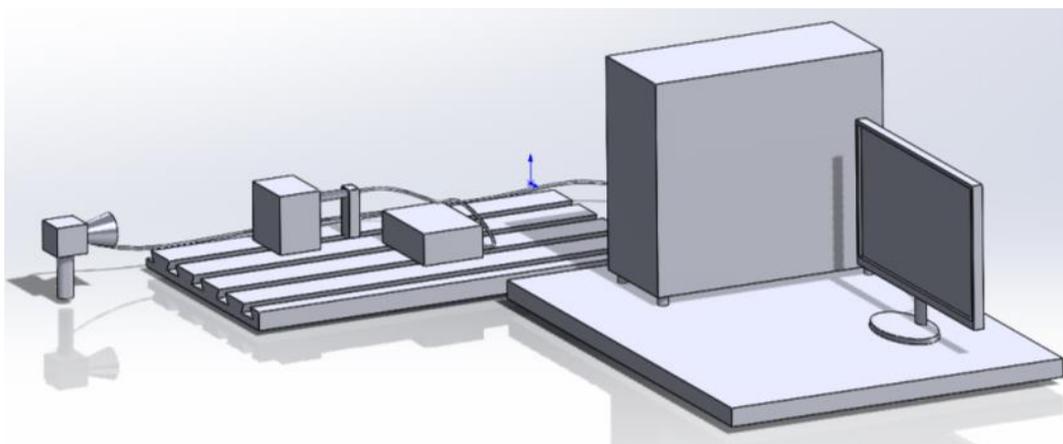


Рис. 1. Вид лабораторной установки

Основные результаты исследования и выводы: для анализа теплового режима аккумуляторных сборок были проведены два вычислительных эксперимента, результаты которых представлены на четырёх графиках. Эксперименты были направлены на исследование влияния воздушного зазора между корпусом аккумулятора и базовым элементом на теплоперенос и температурные характеристики (рис. 2–5). В частности, анализировалась максимальная температура элементов батареи, так как этот параметр влияет на надёжность и безопасность эксплуатации системы хранения энергии.

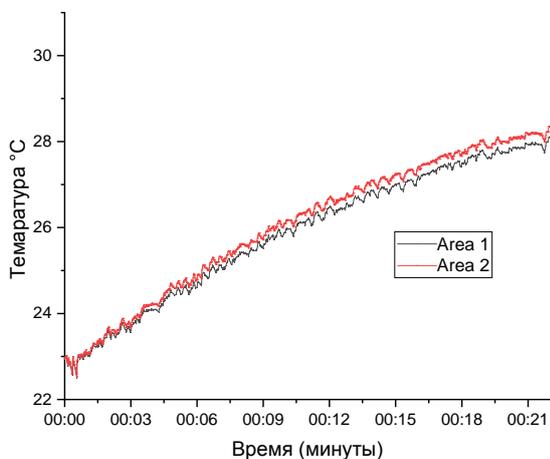


Рис. 2. График температуры в зависимости от времени

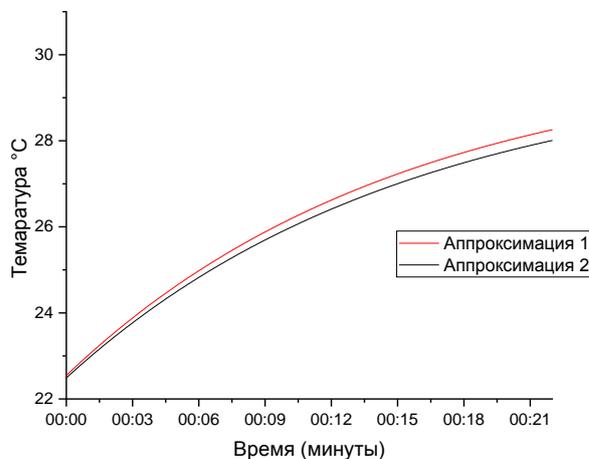


Рис. 3. Аппроксимированный график температуры в зависимости от времени

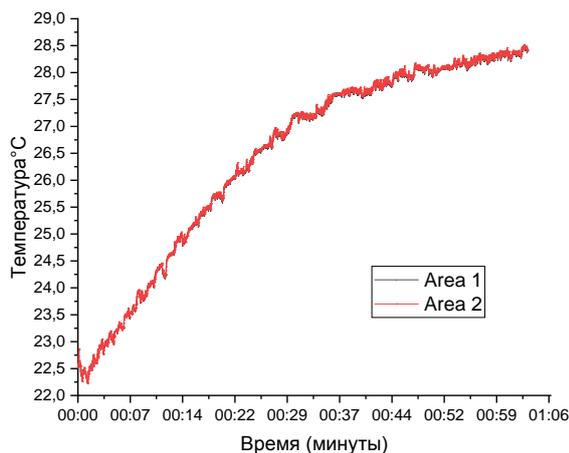


Рис. 4. График температуры в зависимости от времени

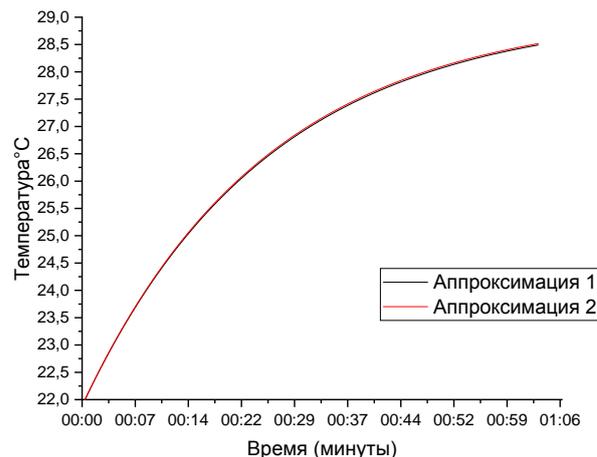


Рис. 5. Аппроксимированный график температуры в зависимости от времени

На графиках представлена разница температур для сборок с воздушным зазором (Area 2) и без него (Area 1). Графики наглядно показывают, что воздушный зазор приводит к увеличению температуры базовых элементов, что может быть потенциально опасно для эксплуатации батарей в условиях высоких нагрузок.

1. Влияние воздушного зазора на температуру Исследование показало, что наличие воздушного зазора между корпусом батареи и базовыми элементами снижает эффективность теплоотвода, что приводит к повышению температуры базовых элементов. При наличии воздушного зазора температура внутри батареи повышается в среднем на 2–8 °С. Этот эффект особенно заметен при интенсивных режимах работы, таких как повышенный ток заряда. Следовательно, воздушные зазоры могут способствовать перегреву батарей и снижению срока их эксплуатации.
2. Интенсификация режима работы: При увеличении зарядного тока до значений выше номинальных, характерные температуры батареи могут возрастать на 10–20 °С, что существенно превышает допустимые нормы эксплуатации. Чрезмерный рост температуры вызывает ускорение химических реакций внутри батареи, что в дальнейшем может привести к тепловому разгону, неконтролируемому нагреву и даже возгоранию. Это подтверждает необходимость тщательного мониторинга теплового состояния батарей, особенно при работе в условиях высокой нагрузки.
3. Недостаточность мониторинга температуры корпуса: Результаты анализа показали, что температурные показания внешней поверхности корпуса не дают точного представления о внутренней температуре рабочих элементов, особенно при наличии воздушного зазора. Температура корпуса может оставаться в пределах нормы, в то время как температура электродов и электролита превышает критические значения. Следовательно, для обеспечения безопасной эксплуатации необходимо учитывать не только температуру корпуса, но и температуру внутренних элементов.

### Заключение

Воздушные зазоры между базовыми элементами и корпусом аккумуляторной батареи играют важную роль в процессе теплообмена, повышая риск перегрева и теплового разгона батареи. Данное исследование подчеркивает необходимость разработки новых методов управления тепловыми режимами в аккумуляторных батареях, чтобы повысить их надёжность и продлить срок эксплуатации. Будущие исследования должны быть направлены на создание более эффективных систем охлаждения и прогнозирования теплового режима аккумуляторных батарей, чтобы предотвратить перегрев и обеспечить их безопасное использование.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov G.V., Kravchenko E.V. Influence of the air gap between two cells of the storage battery on the thermal conditions of its operation: Numerical analysis and reliability assessment // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2023. – Vol. 945. – P. 117688. DOI 10.1016/j.jelechem.2023.117688. – EDN WKKPZA.
2. Kuznetsov G.V., Kravchenko E.V. Estimation of the representative temperatures of a typical electrochemical battery cell when cooling under natural convection conditions // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 73. – P. 109168. DOI 10.1016/j.est.2023.109168. – EDN NGYIGZ.

## ПРЕДСКАЗАНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Е.В. Гузеев**

*Томский политехнический университет, evg39@tpu.ru*

Научный руководитель: Н.В. Барановский, к.ф.-м.н., доцент, ТПУ

Лесные пожары – одна из наиболее разрушительных и труднопрогнозируемых катастроф, оказывающая существенное воздействие на экосистему, экономику и безопасность человека. Проблема прогнозирования лесных пожаров является чрезвычайно актуальной, поскольку своевременное обнаружение и эффективное реагирование могут значительно снизить масштабы и последствия пожаров. Традиционные методы прогнозирования, основанные на статистических моделях и эмпирических данных, часто оказываются недостаточно точными и оперативными для принятия своевременных мер.

В последние годы методы машинного обучения продемонстрировали высокую эффективность в решении задач анализа данных, классификации и прогнозирования. Применение машинного обучения в области прогнозирования лесных пожаров открывает новые возможности для повышения точности и оперативности прогнозов, что, в свою очередь, позволит оптимизировать деятельность пожарных служб и снизить риски для населения и окружающей среды.

В данной статье рассматривается актуальность проблемы прогнозирования лесных пожаров и предлагается использование методов машинного обучения в качестве эффективного инструмента для решения данной задачи. В работе анализируются существующие подходы к прогнозированию лесных пожаров, рассматриваются преимущества и недостатки различных методов МО, а также обсуждаются возможные направления дальнейших исследований в данной области.

Целью исследования является сравнение моделей для прогнозирования пожаров для заиграевского района республики Бурятия.

### Обзор

Во Gao и др. [1] проводили исследование по сравнению моделей прогнозирования лесных пожаров в провинции Цзилинь, Китай: логистической регрессии (LR), географически взвешенной логистической регрессии (GWLR), лассо-регрессии (Lasso), случайного леса (RF) и метод опорных векторов (SVM). Случайный лес показал наивысшую точность (88.7 %), за ним следует SVM (87.7 %). GWLR и Lasso достигли точности 86.0 и 85.0 % соответственно, в то время как LR показала самую низкую точность (84.6 %). Основными факторами, влияющими на вероятность возникновения пожаров, являются климатические переменные (среднее атмосферное давление, температура, давление водяного пара, минимальная относитель-

ная влажность), а также топографические факторы (высота над уровнем моря). Социально-экономические факторы (плотность населения, ВВП) влияют в меньшей степени. Пространственный анализ показал, что наибольшая вероятность пожаров наблюдается в юго-восточной части провинции, где преобладают леса и горы, в то время как в равнинных районах запада вероятность ниже. Исследование подтверждает эффективность алгоритмов машинного обучения, таких как RF и SVM, для прогнозирования лесных пожаров, однако для практического применения могут быть более подходящими модели, сочетающие высокую точность с относительной простотой реализации, такие как GWLR.

Для создания эффективных моделей прогнозирования лесных пожаров, как показано в исследованиях [1] и [2], крайне важно получение качественных и репрезентативных данных. В частности, данные о точках отсутствия пожара играют ключевую роль в обучении моделей, поскольку они позволяют модели учиться различать области, где пожары маловероятны, от тех, где они могут возникнуть.

В статье [2] был предложен метод сбора данных о точках отсутствия пожара на основе географического сходства. Этот метод позволяет создавать более репрезентативные наборы данных, что, в свою очередь, повышает точность моделей машинного обучения. Исследование показало, что модели, обученные на данных, собранных с использованием предложенного метода, демонстрируют значительно более высокую точность моделирования и прогнозирования по сравнению с традиционными методами.

В последние годы значительное внимание уделяется применению глубокого обучения для прогнозирования лесных пожаров. Например, Фан и др. [3] разработали легковесную модель обнаружения лесных пожаров на основе глубокого обучения. Сатхишкumar и др. [4] использовали глубокое обучение для обнаружения дыма от пожаров. Канг и др. [5] применили глубокое обучение с использованием геостационарных спутниковых данных для обнаружения пожаров с сокращенным временем задержки.

Однако, несмотря на успехи в области машинного и глубокого обучения, существует ряд проблем, связанных с прогнозированием лесных пожаров. В частности, сложность заключается в учете пространственно-временных закономерностей и периодичности факторов, влияющих на возникновение пожаров. В статье [6] предлагается использовать модель LSTNet для прогнозирования лесных пожаров, которая способна эффективно учитывать как краткосрочные, так и долгосрочные зависимости между факторами, влияющими на пожары.

### **Результаты исследования**

Предсказание пожаров проводилось для взятых тестовых данных, которые состояли из пожаров и смещенных точек не пожаров.

#### *Данные:*

Были собраны данные о погодных условиях, рельефа, осадках, населении и исторических данных о пожарах с 2003.

Данные были очищены от пропусков и аномалий, а также преобразованы в подходящий для моделирования формат.

#### *Разбиение данных:*

Для обучения моделей данные были разбиты на обучающую и валидационную выборку (30 % валидационной выборки, 70 % обучающей).

Применялась стратифицированная выборка для сохранения баланса классов (наличие/отсутствие пожара).

#### *Используемые алгоритмы:*

Для предсказания использовались алгоритмы градиентного бустинга: CatBoost, XGBoost, LightGBM.

Также были протестированы алгоритмы случайного леса (RandomForest), метода опорных векторов (SVM) и логистической регрессии (Logistic Regression).

*Ключевая метрика:*

В качестве ключевой метрики использовалась метрика accuracy, так как данные сбалансированы.

## Результаты

Результаты сравнения качества работы алгоритмов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сравнения качества работы алгоритмов

Алгоритм	Метрика accuracy
CatBoost	0,97239
LightGBM	0,98303
XGBoost	0,945
RandomForest	0,91796
SVM	0,793
Логистическая регрессия	0,669

## Заключение

В результате проведенного исследования было установлено, что наиболее успешно с задачей предсказания пожаров справились алгоритмы градиентного бустинга, а именно LightGBM и CatBoost, которые продемонстрировали высокую точность (accuracy) – 0,98303 и 0,97239 соответственно. Эти результаты значительно превосходят показатели других протестированных алгоритмов, таких как RandomForest, SVM и логистическая регрессия. Рекомендуется использовать модель LightGBM для практического применения в системе раннего предупреждения о возможности возникновения пожаров. Для дальнейшего повышения точности предсказаний можно рассмотреть возможность построения ансамбля моделей, увеличения объема данных и включения дополнительных признаков, таких как данные с метеорологических спутников и информация о деятельности человека в лесу. Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность использования алгоритмов градиентного бустинга для решения задачи предсказания пожаров, что открывает перспективы для создания системы раннего предупреждения и снижения рисков, связанных с лесными пожарами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bo Gao, Yanlong Shan, Xiangyu Liu, Sainan Yin, Bo Yu, Chenxi Cui & Lili Cao. Prediction and driving factors of forest fire occurrence in Jilin Province. – China, 2023.
2. Xu Q., Li W., Liu J., Wang X. A geographical similarity-based sampling method of non-fire point data for spatial prediction of forest fires // Forest Ecosystems. – 2023. – V. 10(1). – P. 100104.
3. Fan R., Pei M. Lightweight Forest Fire Detection Based on Deep Learning // In Proceedings of the 2021 IEEE 31st International/ Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), Gold Coast, QLD, Australia, 25–28 October 2021; pp. 1–6.
4. Sathishkumar V.E., Cho J., Subramanian M., Naren O.S. Forest fire and smoke detection using deep learning-based learning without forgetting // Fire Ecol. – 2023. – V. 19. – P. 9.
5. Kang Y., Jang E., Im, J., Kwon C.G. A deep learning model using geostationary satellite data for forest fire detection with reduced detection latency // GISci. Remote Sens. – 2022. – V. 59. – P. 2019–2035.
6. Lin X., Li Z., Chen W., Sun X., Gao D. Forest Fire Prediction Based on Long- and Short-Term Time-Series Network. Forests. – 2023. – 14(4). – P. 778. <https://doi.org/10.3390/f14040778>

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ПО РАБОТЕ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «САПФИР»

К.В. Шехин

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А4-46

Научный руководитель: А.С. Зайцев, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова

Насосное оборудование широко применяется в энергетике, промышленности, строительстве и коммунальном хозяйстве. При групповой установке насосов применяются два способа их соединения для совместной работы: параллельное и последовательное. Возможно их комбинированное соединение. Нормальная работа тепловых и атомных электростанций невозможна без перемещения большого количества жидкости с различными свойствами и параметрами. Перемещение жидкостей осуществляется в основном центробежными и осевыми лопастными насосами. Насосы, используемые на электростанциях, имеют более двадцати назначений [1].

Инженеру-энергетику важно знать основные принципы работы насосов для обеспечения эффективной работы энергетических систем. Например, параллельное соединение насосов позволяет равномерно распределять нагрузку, снижая износ и повышая надежность системы, в то время как последовательное соединение эффективно для преодоления больших высот или длин трубопроводов.

Для повышения эффективности системы подготовки студентов вузов в целом целесообразно использовать специализированные программные комплексы, позволяющие создавать В данной статье рассматриваются возможности программного комплекса САПФИР в части моделирования гидравлики насосного оборудования.

САПФИР – графическая среда сквозного проектирования крупных расчетных комплексов. Объединяет в себе инструменты, позволяющие вести разработку не только математических моделей промышленных объектов, но и интегрировать их с необходимым оборудованием: исполнительными механизмами, системами АСУТП, включая щиты управления, шкафы [3].

Для моделирования параллельной и последовательной работы насосного оборудования в программном комплексе САПФИР была реализована имитационная модель для стенда, представленного на рис. 1 математические модели элементов различных технологических систем [2].

Принципиальная схема включает в себя открытый бак с необходимым объемом воды для нормального режима работы насоса, три одинаковых поверхностных вихревых насоса QВ 70, отсечные шаровые краны и регулирующие вентили, а также датчики давления, расхода, температуры и мощности.

Для сравнения показателей на лабораторном стенде и математической модели реализована расходно-напорная характеристика одного рабочего насоса, которая представлена на рис. 2.

Приближение к необходимым экспериментальным значениям, в заданных точках измерения, достигается путем изменения коэффициента проводимости или работой органов управления. Отклонение показателей имитационной модели составило не более 2 % для режима с одним работающим насосом при 100 % частоте вращения.



Рис. 1. Лабораторный стенд

Данные эксперимента на лабораторном стенде и математической модели оказались практически идентичными, что свидетельствует о высокой степени согласованности между теоретическими положениями и фактическими измерениями.

Это не только подтверждает корректность данной математической модели, но и свидетельствует о её применимости в дальнейших исследованиях по работе насосного оборудования в различных режимах. Благодаря высокой точности модели можно будет эффективно анализировать и оптимизировать эксплуатацию насосов как в стандартных, так и в аварийных режимах работы. В связи с этим реализована имитационная модель для параллельной и последовательной работы насосов в ПО «САПФИР». Схема модели представлена на рис. 3.

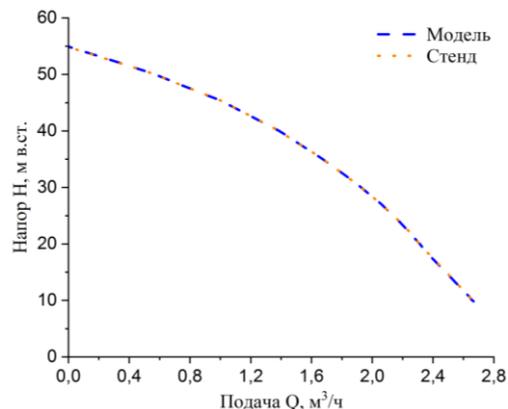


Рис. 2. Расходно-напорная характеристика насоса

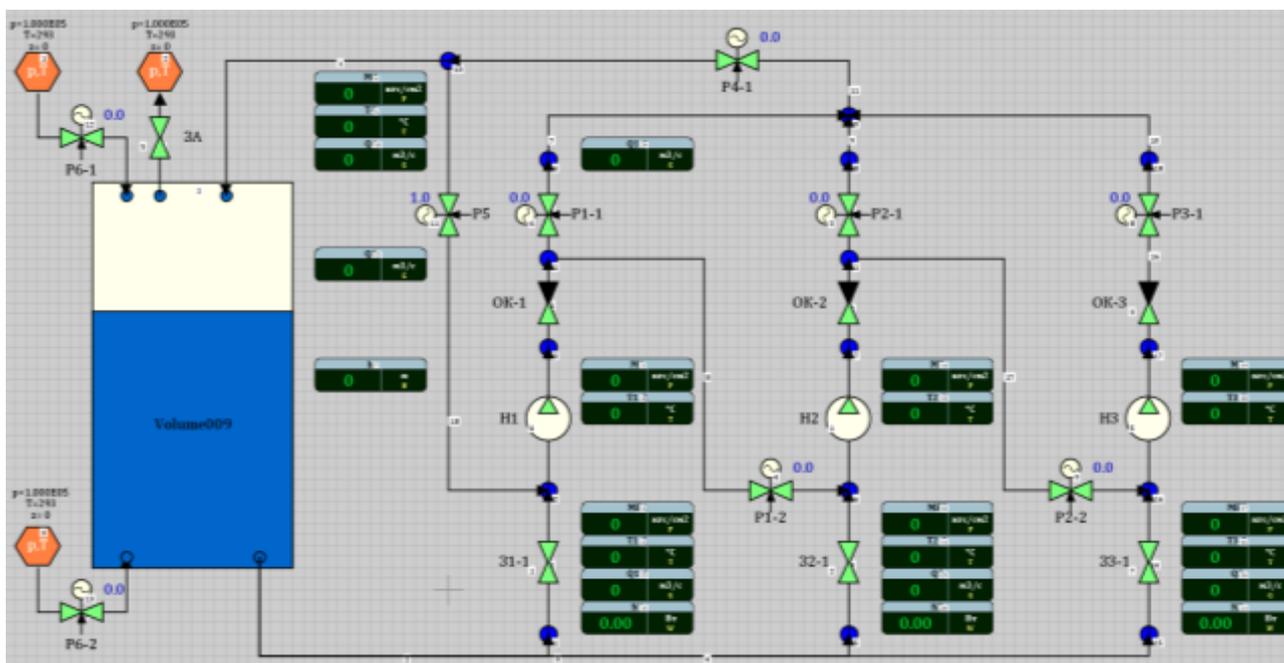


Рис. 3. Схема для исследования параллельной и последовательной работы насосов в ПО «САПФИР»

При параллельном соединении насосов полная подача группы представляется суммой подач отдельных насосов и выполняется так, чтобы имелась возможность выключения из работы любого насоса. При последовательном соединении выходное отверстие первого по ходу жидкости насоса соединяется трубопроводом с входом последующего насоса. В таком случае массовые подачи насосов, если нет утечек и отборов, одинаковы [1].

На рис. 4 представлены схемы положения арматуры для работы насосов в последовательном и параллельном режиме, а на рис. 5 представлены графики сравнения основных технических параметров при последовательном и параллельном режиме работы насосов.

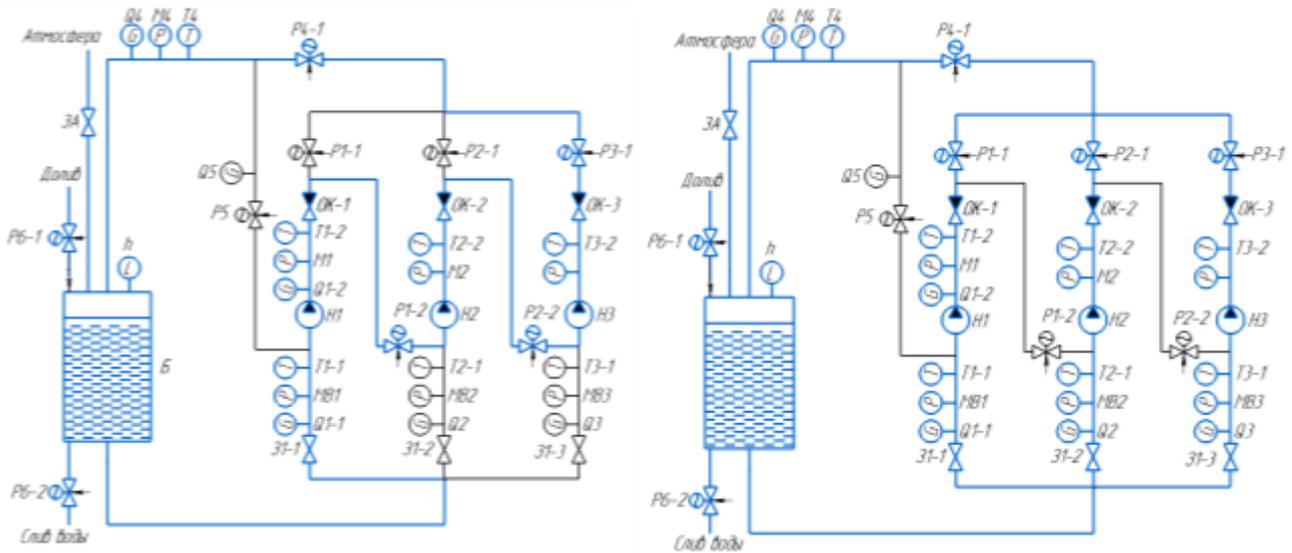


Рис. 4. Последовательное и параллельное соединение насосов

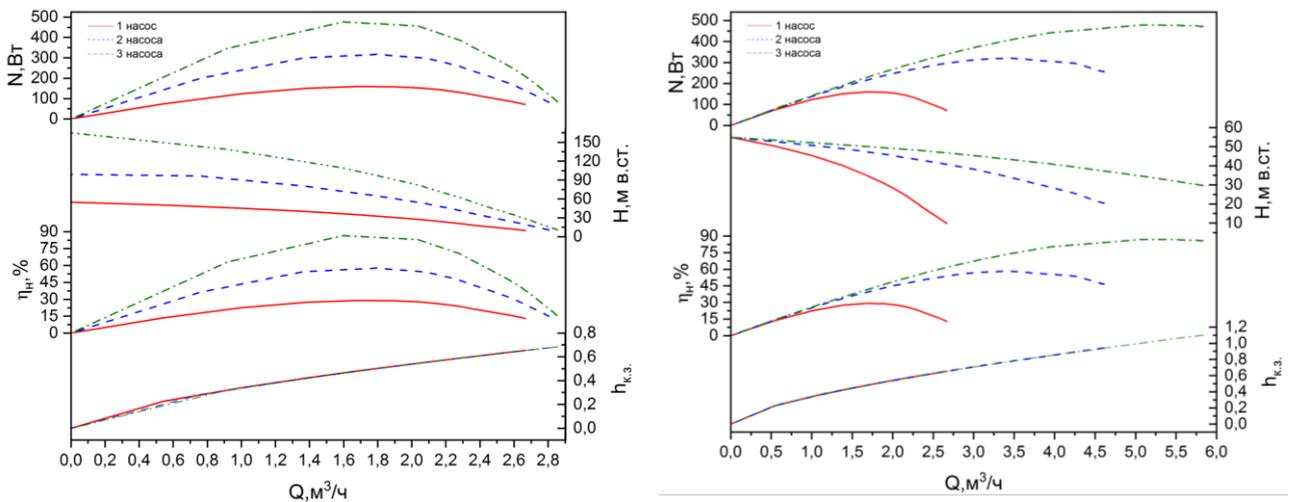


Рис. 5. Расходно-напорная характеристика насосов при последовательном и параллельном соединении насосов

Исходя из рис. 4 можно сделать вывод о том, что при последовательном режиме работы увеличение расхода воды приводит к увеличению кавитационного запаса, уменьшению напора, а мощность насосного оборудования, как и КПД, увеличивается и достигает экстремума, после чего снижается. Из рис. 5 видно, что при параллельном режиме работы насосов, как и при последовательном, увеличение подачи воды приводит к повышению показателя кавитационного запаса и уменьшению напора, а мощность и КПД имеют менее выраженный экстремум и впоследствии не приводит к настолько же значительному снижению данных показателей. Чем больше включённых в работу насосов, тем выше значения напора, мощности и КПД, а также увеличивается кавитационный запас при высоких показателях расхода воды.

Таким образом, выбор режима работы насосов (последовательный или параллельный) существенно влияет на их характеристики и эффективность. Анализ зависимости факторов помогает оптимизировать работу насосного оборудования и минимизировать риски, связанные с кавитацией и энергоэффективностью. Результаты исследования подчеркивают важность интеграции теоретических и эмпирических подходов, что способствует более глубокому пониманию исследуемых физических явлений.

Программный комплекс САПФИР позволяет моделировать различные сценарии работы насосного оборудования (регулирование задвижкой (дросселирование), регулирование с помощью байпаса, регулирование изменением частоты вращения насоса, а также реализация различных схем подключения), снимать расходно-напорную характеристику насосов и оптимизировать параметры подключения насосов. Важно также отметить, что САПФИР является отечественной разработкой. При этом программа обладает широким набором функций, инструментов и удобным графическим пользовательским интерфейсом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галашов Н.Н. Тепломеханическое и вспомогательное оборудование электростанций: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2023. – 247 с.: ил.
2. Школа моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://get-sim.ru/>, свободный – (10.11.2024)
3. Программный комплекс САПФИР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://get-lab.ru/>, свободный – (10.11.2024)

## РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ИРТ-Т

**Д.В. Пасько**

*Томский политехнический университет, ИЯТШ, ОЯТЦ, группа ОАМЗ1*

Научный руководитель: А.Г. Наймушин, к.ф.-м.н., доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ

Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т – это реактор бассейнового типа с использованием в качестве замедлителя, теплоносителя и верхней защиты деминерализованной воды [1].

В бассейне реактора на глубине 6 м расположена активная зона ИРТ-Т, набранная из двадцати тепловыделяющих сборок (ТВС) типа ИРТ-3М. Конфигурация (компоновка) активной зоны выбирается так, чтобы обеспечивалась достаточная длительность кампании и может изменяться в соответствии с конкретной задачей на кампанию. Основная рабочая загрузка состоит из 11-ти восьмитрубных и 9-ти шеститрубных ТВС.

Металлический бериллий используется в качестве отражателя нейтронов, что позволяет обеспечить широкий (в пространстве) максимум плотности потока тепловых нейтронов и высокий уровень нейтронного потока в экспериментальных каналах.

Обоснование безопасности реакторной установки основывается на моделировании и исследований нейтронно-физических и гидравлических процессов с помощью прецизионных программных средств. Важно отметить, что модель должна обладать высокой точностью выходных данных, чтобы на её основе проводилась оценка условий эксплуатации оборудования и технологических систем реакторной установки.

Процессы гидродинамики описываются фундаментальной системой уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla \rho + \nabla \tau + \rho \mathbf{g} + \mathbf{Q}_m \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) = \nabla \cdot \mathbf{q} + \mathbf{Q}_\mu + \mathbf{Q}_e \end{cases} \quad (1)$$

Численное решение уравнений затрудняется из-за нелинейности уравнений движения. Как правило, для решения системы применяются различные методы или алгоритмы. Наибольшее распространение получил полунявный метод SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), который позволяет получать результаты с достаточной степенью соответствия экспериментальным данным.

Метод SIMPLE стал основой для многих современных численных методов и программного обеспечения. Одной из таких программ для проведения высокоточных расчетов с реализацией данного метода является Логос Аэро-Гидро, который предназначен для решения трехмерных задач гидродинамики и теплообмена [2]. Для проведения численного моделирования гидравлических характеристик в среде Логос изначально разработаны необходимые геометрические модели.

Активная зона реактора ИРТ-Т, включающая в себя: восьмитрубные и шеститрубные ТВС, опорную решетку, бериллиевые блоки, бункер и корпус построены на основе конструкторской документации (рис. 1).

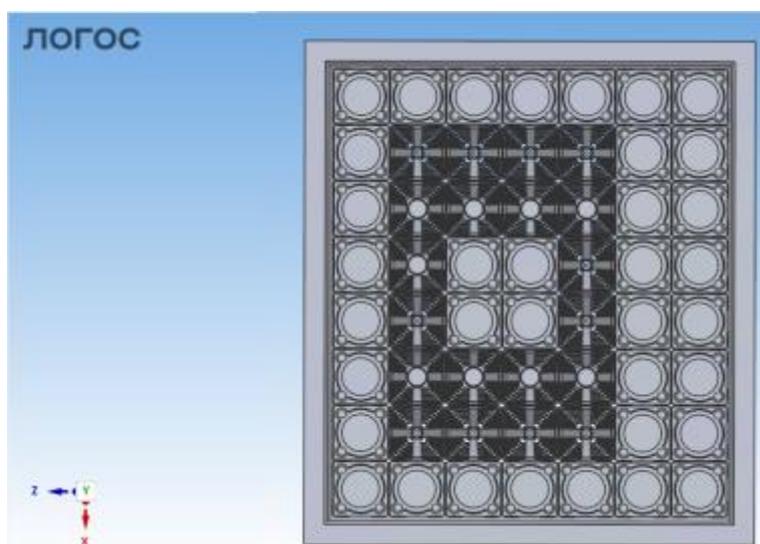


Рис. 1. Активная зона реактора ИРТ-Т в программе Логос Аэро-Гидро

Корректность разработанных моделей элементов активной зоны требует подтверждения. Для этого предлагается провести сравнение результатов моделирования, полученных в ПП Логос, с эксплуатационными параметрами первого контура реактора ИРТ-Т.

Эксплуатационные параметры первого контура фиксируются независимыми каналами модуля безопасности (МБ) Мираж. Основные гидравлические параметры, фиксируемые МБ Мираж и их значения в режиме нормальной эксплуатации:

- расход теплоносителя первого контура составляет 700 м<sup>3</sup>/ч;
- перепад давления на активной зоне составляет 35 кПа;
- давление в первом контуре составляет 0,13–0,14 МПа.

В качестве начальных условий моделирования выбраны:

- расход теплоносителя первого контура охлаждения активной зоны реактора ИРТ-Т;
- полное давление на входе в активную зону, равное 161325 и определяемое как сумма атмосферного и гидростатического давлений:

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{воды}} \quad (2)$$

В этом случае, корректность модели активной зоны определяется по параметру перепада давления, который характеризует гидравлическое сопротивление.

Моделирование показало, что расчетное значение перепада давления на активной зоне 35,12 кПа, отклонение от эксплуатационного значения составило 0,12 кПа. Это свидетельствует о корректности разработанной геометрии, что позволяет проводить дальнейшие исследования гидравлических характеристик активной зоны.

Ввиду того, что ТВС и бериллиевые блоки имеют разные проходные сечения для теплоносителя, необходимо учитывать распределение теплоносителя в гетерогенной структуре активной зоны.

Расчетное распределение расхода теплоносителя по топливным ячейкам активной зоны реактора ИРТ-Т представлено в табл. 1.

Таблица 1. Расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/ч

Через межтвэльные зазоры ТВС					Через ½ зазора между ТВС				
Ячейка	6	5	4	3	6	5	4	3	Ячейка
7	27,35	29,05	26,47	30,25	2,68	2,63	2,69	2,69	7
6	26,78	28,04	27,02	29,56	2,63	2,59	2,62	2,72	6
5	26,01	Be	Be	28,79	2,50	Be	Be	2,63	5
4	26,45	Be	Be	28,91	2,52	Be	Be	2,65	4
3	25,02	26,73	25,35	28,13	2,66	2,64	2,62	2,69	3
2	27,20	28,53	26,54	30,67	2,72	2,68	2,70	2,66	2

Таким образом, разработана трехмерная модель активной зоны реактора ИРТ-Т. Проведено численное моделирование гидродинамических процессов с целью верификации разработанной модели в Логос Аэро-Гидро. Моделирование показало, что гидравлическое сопротивление на активной зоне соответствует эксплуатационному значению.

В результате дальнейшего моделирования получены следующие характеристики:

- средний расход теплоносителя через ТВС составил 30,28 м<sup>3</sup>/ч;
- средний расход теплоносителя через межтвэльные зазоры – 2,64 м<sup>3</sup>/ч;
- средний расход теплоносителя через зазоры бериллиевых блоков – 2,38 м<sup>3</sup>/ч.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глухов Г.Г., Диденко А.Н. Ядерный реактор ИРТ-Т НИИЯФ ТПИ в научных и прикладных исследованиях // Атомная энергия. – 1988. – Т. 64. – № 5. – С. 366–370.
2. ЛОГОС Аэро-Гидро. Решатель задач аэро-, гидро-, газодинамики и акустики. – URL: <https://logos-support.ru/logos/aero-hydro/> (дата обращения: 05.11.2024).

## ОСАЖДЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ В ЖИДКОСТИ МИКРОЧАСТИЦ В ПОЛЕ СИЛ КОНВЕКТИВНОГО ТЕЧЕНИЯ

Д.В. Лисовская, А.С. Зайцев

Томский политехнический университет, ИШФВП

Научный руководитель: Р.И. Егоров, д.ф.-м.н., проф. ИШФВП ТПУ

Взвеси различных микрочастиц являются очень часто встречающимся фактором, оказывающим влияние на протекание различных процессов в промышленности и в быту. Осаждение таких микрочастиц под действием силы тяжести приводит к образованию осадка на дне емкостей с неподвижным слоем жидкости. При протекании взвесей по каналам микроканальных теплообменников может наблюдаться осаждение микрочастиц на боковые стенки

вследствие влияния сил адгезии. Все это приводит к загрязнению микроканалов и снижению эффективности теплообменника или к загрязнению поверхностей емкостей. И, если при работе с большими объемами жидкостей, технологии их очистки уже достаточно отработаны, то в случае малых объемов общепринятого метода решения данной проблемы пока нет. Даже без учета осаждения, присутствие взвесей сторонних микрочастиц является абсолютно нежелательным явлением в микробиологии и прочих отраслях, где требуется высокая чистота реагентов. Таким образом, разработка методики очистки малых объемов жидкостей является актуальной проблемой в настоящее время. Применение самых простых подходов, вроде отстаивания, зачастую неприменимо в силу длительности этого процесса, а также из-за непредсказуемости распределения осадка по дну емкости.

Применение детерминированного поля сил в объеме взвеси позволяет упорядочить процесс осаждения и локализовать область накопления осадка. Конвекция при локальном (точечном) нагреве [1–3] позволяет получить максимально высокую скорость массопереноса при минимально возможном росте средней температуры жидкости. На рис. 1 показана схема проведения эксперимента: лазерный луч освещает пятно поглощающего свет покрытия на дне ячейки, в результате чего происходит локальный нагрев слоя жидкости, и инициируется конвекция. Течение отслеживается по движению взвешенных микрочастиц с помощью видеокамеры, наблюдающей сбоку плоскость в слое, подсвеченную астигматическим лазерным пучком малой мощности. Анализ поля скорости проводился методом PIV.

Движение жидкости в плоскости слоя отслеживалось второй камерой, наблюдавшей слой сверху. Таким образом, можно составить карты течения жидкости для различных толщин слоя, а также оценить динамику осаждения микрочастиц и плотность их распределения на подложке.

На рис. 2 показаны примеры поля скорости конвекции воды в диаметральной вертикальной плоскости слоя и в главной горизонтальной плоскости слоя при его толщине  $h \sim 3$  мм. Красная линия на рис. 2, б показывает ориентацию сечения диаметральной плоскости относительно главной горизонтальной плоскости.

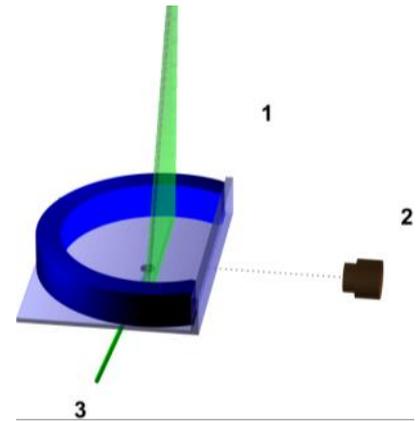


Рис. 1. Схема поведения эксперимента по осаждению микрочастиц в поле сил конвективного течения. На схеме показана ячейка со взвесью (1), видеокамера для наблюдения осаждения (2) и лазерный луч, осуществляющий локальный нагрев жидкости (3)

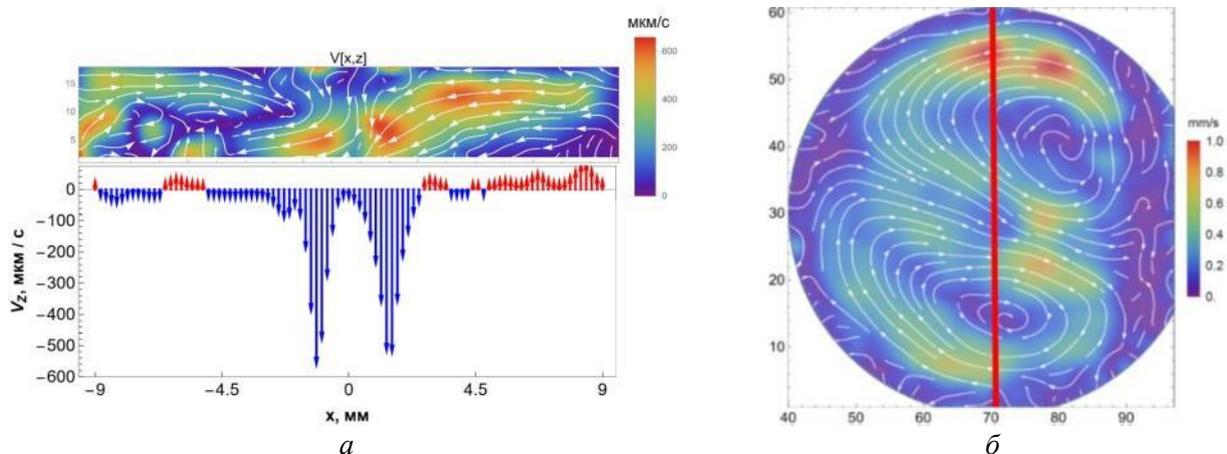


Рис. 2. Мгновенное поле скорости конвекции воды при точечном нагреве мощностью 0,5 Вт. Вид в диаметральной плоскости (а) и распределение скорости прижимающего потока вдоль дна ячейки, вид в главной плоскости слоя (б)

Видно, что вблизи центра ячейки существует область, в которой течение сильно прижимает переносимые микрочастицы ко дну (синие стрелки), что и обуславливает локализацию осаждения вдоль линии составляющей с диаметральной плоскостью угол близкий к прямому.

На рис. 3 показаны области осаждения твердой части суспензии на подложке ячейки, обусловленные полем сил конвекции [3–4]. Видно, что для водной суспензии можно получать различные конфигурации пятна осаждения в зависимости от толщины слоя жидкости. В тонком слое могут быть получены линейные области осаждения с максимальной протяженностью в случае, когда соотношение толщины слоя и его радиуса достигает  $h/R \sim 0.3$ . При больших толщинах слоя (рис. 3, б) конвективное течение становится хаотичным, когда число Марангони становится сопоставимым с числом Рэлея, и пятно осаждения локализуется вблизи точки нагрева.

В случае водо-спиртовых суспензий, зависимость режима осаждения микрочастиц от условий становится значительно более сложной. В случае, когда доля спирта относительно невелика ( $\sim 20$  вес. %), возможно образование локальных областей осаждения подобно тому, как это происходит в воде при больших толщинах слоя. В случае большой концентрации спирта ( $\sim 40$  мас. % и более) может происходить коагуляция микрочастиц с образованием хлопьев на свободной поверхности жидкости (рис. 4, з).

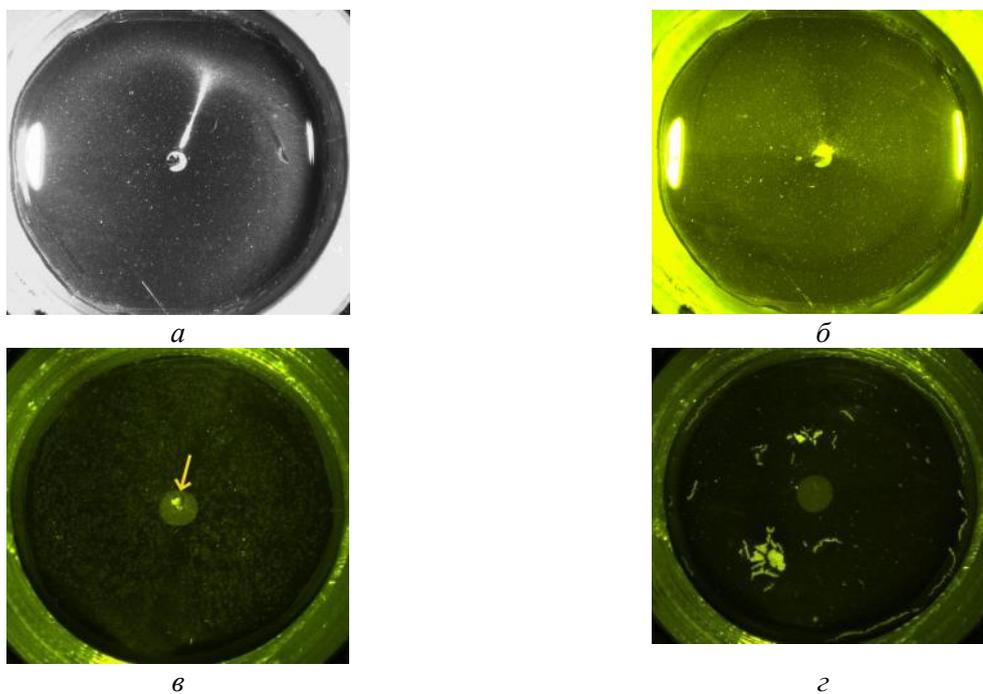


Рис. 3. Картины осаждения водной взвеси микрочастиц диоксида титана в слое толщиной 3 мм (а), 5 мм (б), а также взвеси частиц диоксида титана в 3 мм слое водо-спиртовой (20 вес. % алк.) смеси (в) и водо-спиртовой (40 вес. % алк.) смеси (г).

Обобщая полученные результаты [4–5], можно заключить, что конвективные течения при локальном нагреве являются удобным инструментом для управления режимом осаждения взвесей. Они позволяют стимулировать локальное осаждение при минимальном росте средней температуры жидкости (порядка 10–15 градусов в течение получаса при нагреве 1,5 мл воды мощностью 0,5 Вт).

Конвективные емкости для очистки жидкостей могут быть строены в микрофлюидные чипы, резервуары микроканальных систем теплообмена и другие популярные системы, работающие с течением жидкостей в сильно ограниченных объемах. Предложенный подход позволяет многократно стимулировать осаждение жидкости и, таким образом, производить ее не инвазивную очистку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Y., Askounis A., Koutsos V., Valluri P., Takata Y., Wilson S.K., Sefiane K. On the effect of substrate viscoelasticity on the evaporation kinetics and deposition patterns of nanosuspension drops // *Langmuir*. – 2020. – V.36. – P. 204–213.
2. Wang F., Wu M., Man X., Yuan Q. Formation of deposition patterns induced by the evaporation of the restricted liquid // *Langmuir*. – 2020. – V.36. – P. 8520–8526.
3. Misyura S.Y., Egorov R.I., Morozov V.S., Zaitsev A.S. Intensifying the particle deposition from a colloidal solution for the purpose of liquid purification: Comparison of deposition mechanisms and rates // *Powder Technology*. – 2024. – V. 434. – № 119346.
4. Misyura S.Y., Egorov R.I., Morozov V.S., Zaitsev A.S. Evaporation of a water layer under local non-isothermal heating // *Appl. Thermal Eng.* – 2023. – V.219, № 119383.
5. Misyura S.Y., Egorov R.I., Morozov V.S., Zaitsev A.S. The velocity field behavior and the nature of deposition of microparticles in a thin layer of colloidal solution at wall heating from one and two laser beams // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2023. – v. 678. – № 132508.

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТКИ НА СКОРОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБОГРЕВА РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ГАЗОВЫМ ИНФРАКРАСНЫМ ОБОГРЕВАТЕЛЕМ

А.В. Вяткин

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А1-44

Научный руководитель: Б.В. Борисов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Газовые инфракрасные излучатели используются для создания комфортных условий труда на рабочих местах в промышленных помещениях [1–5]. Для оценки формирования комфортных условий в рабочих зонах привлекаются как экспериментальные [6], так и сложные численные исследования [7–9]. Проведение сложных численных исследований связано со значительными временными затратами и требованиям к мощности вычислительной техники. Наиболее точные математические вычисления достигаются в трехмерной постановке [10]. Целью данной работы является исследование влияния размера вычислительной сетки на точность вычисления параметров процесса обогрева рабочей зоны газовым инфракрасным обогревателем.

Математическое моделирование проводилось в условиях, описанных в работе [10]. Рассмотрено помещение известных размеров  $L_x = 10L_y = 5L_z = 4,4$  м. Толщина ограждающих конструкций (стен, пола и потолка) данного помещения принята как  $L_{wall} = 0,1$  м. В рассматриваемом помещении выделена локальная рабочая зона, в которой находится горизонтальная панель (размеры  $L_{x_{tb}} = 0,6$  м,  $L_{y_{tb}} = 1,2$  м,  $L_{z_{tb}} = 0,05$  м), имитирующая оборудование. Поверхность горизонтальной панели располагалась на оси симметрии ГИИ на высоте 760 мм от пола. Выделенная локальная рабочая зона обогревателем газовым инфракрасным излучателем (размеры  $L_{x_{GIE}} = 0,164$  м,

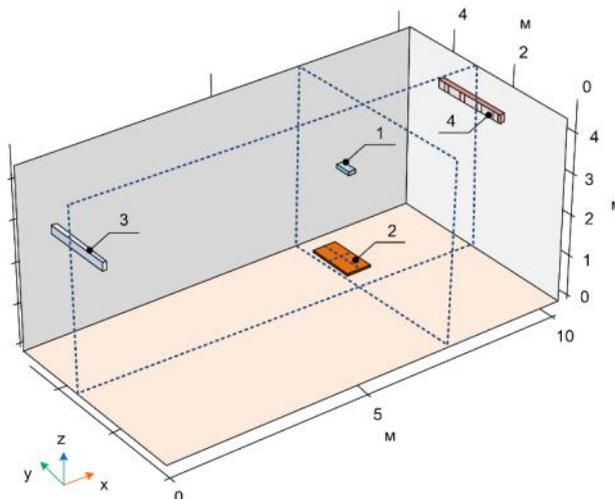


Рис. 1. Схема области решения:  
1 – ГИИ, 2 – горизонтальная панель, 3 – зона притока воздуха, 4 – зона оттока воздуха.  
Пунктирными линиями выделены рассматриваемые сечения [10]

$L_{yGIE} = 0,4$  м,  $L_{zGIE} = 0,1$  м), расположенным на высоте на высоте 2,975 м. В помещении также расположена система воздухообмена. Месторасположение элементов рассматриваемой области соответствует наиболее типичному варианту их размещения в реальном производственном помещении, схема которого представлена на рис. 1.

В табл. 1 приведены рассмотренные варианты математической модели с указанием размеров вычислительной сетки в рассматриваемой области.

Таблица 1. Варианты размеров вычислительной сетки

№	Минимальный размер грани элемента, м	Максимальный размер грани элемента, м	Средний размер грани элемента, м
1	0,342	1,610	1,952
2	0,245	0,978	1,223
3	0,147	0,489	0,636
4	0,0978	0,328	0,4258
5	0,0489	0,259	0,3079
6	0,0196	0,181	0,2006

Для проведения расчетов использовался персональный компьютер с процессором Intel® Core™ i7-8700K CPU @ 3.70GHz × 12 и оперативной памятью 32 Гб. На рис. 2 приведен график зависимости времени расчета от среднего размера грани элемента расчетной сетки.

Для определения приблизительного времени расчета ( $\tau_p$ ) от среднего размера сетки ( $a_{cp}$ ) представленный график можно представить в форме степенной функции вида:

$$\tau_p = 409 \cdot a_{cp}^{-1,3}$$

На рис. 3 представлено сравнение результатов расчетов математической модели при различных размерах вычислительной сетки с экспериментальными данными в области под ГИИ, что характеризует типичную рабочую зону.

Результаты математических вычислений показывают, что разница между значениями температур между собой и с экспериментальными данными не превышает 1,5 °С.

Таким образом, по результатам проведенного исследования, можно сделать вывод о том, что для проведения предварительных расчетов при проектировании систем отопления на основе газовых инфракрасных излучателей возможно при максимальных размерах вычислительной сетки.

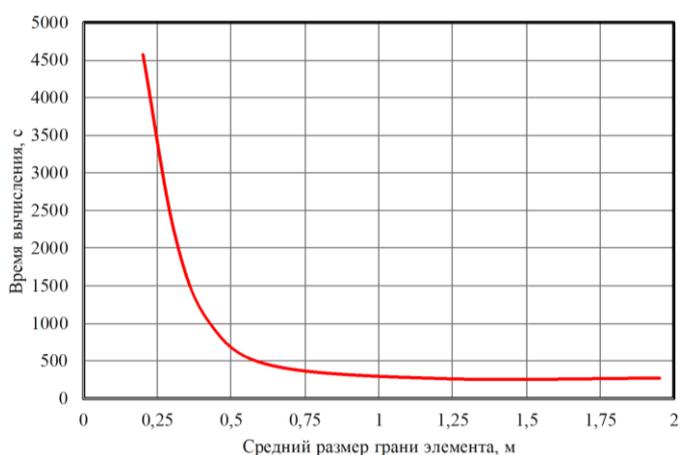


Рис. 2. График зависимости времени расчета от среднего размера грани элемента расчетной сетки

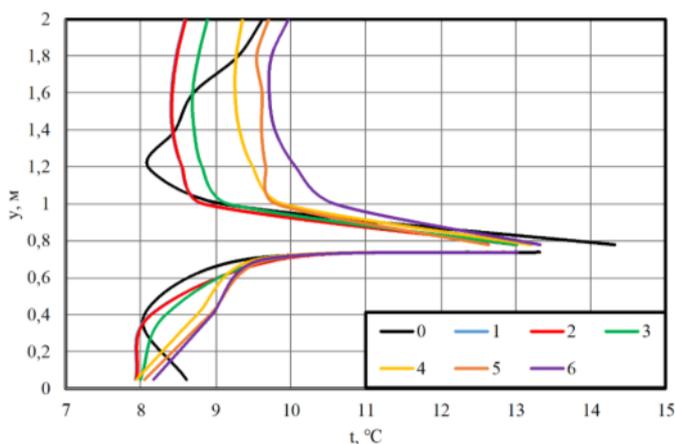


Рис. 3. Графики изменения температуры воздуха на оси симметрии ГИИ для типичных экспериментальных данных (0) и различных вариантов расчетной вычислительной сетки (1–6)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоботов Е.А. Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем отопления промышленного предприятия // Дни науки студентов Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. – 2019. – С. 856–860.
2. Артемичева А.Н., Семикова Е.Н. Модернизация системы отопления склада готовой продукции в Нижнем Новгороде. Сравнительный анализ эффективности конвективной и лучистой систем отопления // Международный студенческий научный вестник. – 2016. – № 2. – С. 138–138.
3. Трифонов А.П., Тарасова Е.В., Савенков Ф.И. Отопление промышленных помещений. Котельное оборудование и его экологичность // Молодежь и системная модернизация страны. – 2020. – С. 379–382.
4. Voznyak O. et al. Enhancing energetic and economic efficiency of heating coal mines by infrared heaters // Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk. – 2021. – № 2. – P. 104–109.
5. Dudkiewicz E., Szałański P. Overview of exhaust gas heat recovery technologies for radiant heating systems in large halls // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – V. 18. – P. 100522.
6. Максимов В.И. и др. Анализ преимуществ систем обеспечения теплового режима локальных рабочих зон на основе газовых инфракрасных излучателей по сравнению с традиционными конвективными системами отопления // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 128–141.
7. Борисов Б. и др. Численный анализ влияния конфигурации системы воздухообмена на температурный режим локальных рабочих зон в помещении с газовым инфракрасным излучателем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 3. – С. 7–16.
8. Борисов Б.В. и др. Математическое моделирование теплопереноса в помещении с газовым инфракрасным излучателем, системой воздухообмена и локальным ограждением рабочей зоны // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 20–32.
9. Borisov B.V. et al. Analysis of the influence of the gas infrared heater and equipment element relative positions on industrial premises thermal conditions // Energies. – 2022. – V. 15. – № 22. – P. 8749.
10. Borisov B.V. et al. Comparative analysis of two-dimensional and three-dimensional modeling of heat transfer during operation of a gas infrared heater indoor // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2024. – V. 335. – № 3. – P. 61–69.

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ НА МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ЕГО СУШКИ

А.С. Познахарев

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А4-44*

Научный руководитель: С.В. Сыродой, д.т.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Согласно последним исследованиям в сфере альтернативной энергетики [1], древесная биомасса представляет собой один из наиболее многообещающих и сравнительно недорогих возобновляемых источников энергии, доступных практически в каждом уголке мира. Стоит обратить внимание на результаты экспериментальных исследований по итогам, которых [2] установлено, что в результате горения древесной биомассы практически не образуется оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и серы ( $\text{SO}_x$ ).

Исследования показывают, что котельные установки, работающие на древесине, демонстрируют более низкую энергоэффективность по сравнению с угольными котлами [4]. Для повышения эффективности использования биомассы в энергетике необходимо разработать инновационные технологии подготовки и сжигания древесной биомассы, а также рассмотреть возможность ее пиролиза для получения ценных продуктов [5].

Цель данной работы – установление по результатам экспериментов степени влияния толщины слоя древесной биомассы на характеристики протекания процессов сушки.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого представлена на рис. 1. В состав стенда входит сушильная камера СНОЛ-3.5-М2У42, обеспечивающая нагрев образцов до температуры  $T_{\text{max}} = 423 \text{ K}$  со скоростью  $10 \text{ K/s}$ .

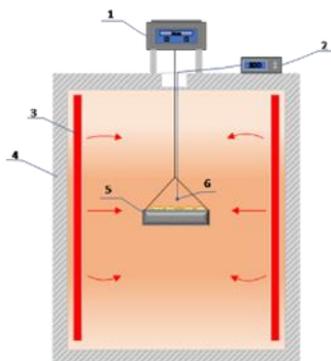


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

- 1 – лабораторные весы ACZET (CITIZEN) CY-1003;  
2 – терморегулятор ТРМ 500; 3 – электрический нагреватель;  
4 – сушильная камера СНОЛ-3.5-М2У42;  
5 – поддон с древесной биомассой, высота которого варьировалась в процессе эксперимента;  
6 – термоэлектрический преобразователь

Для измерения температуры использовалась хромель-алюмелевая термопара (ТХА) с погрешностью  $T_g = \pm 0,1$  °С. Также в работе применялись высокоточные лабораторные весы ACZET (CITIZEN) CY-1003 с пределом допускаемой погрешности 0,001 г.

Древесная биомасса крепилась к электронным весам посредством специального соединения (рис. 1). Контейнер с древесными опилками располагался в центральной части сушильной камеры. Для регистрации температуры в центре контейнера была установлена хромель-алюмелевая термопара с диаметром проволоки 0,1 мм и диаметром спая 0,25 мм. Время задержки измерений составляло  $\tau_{del} = 0,3$  с, а погрешность измерения температуры – 1,5 К.

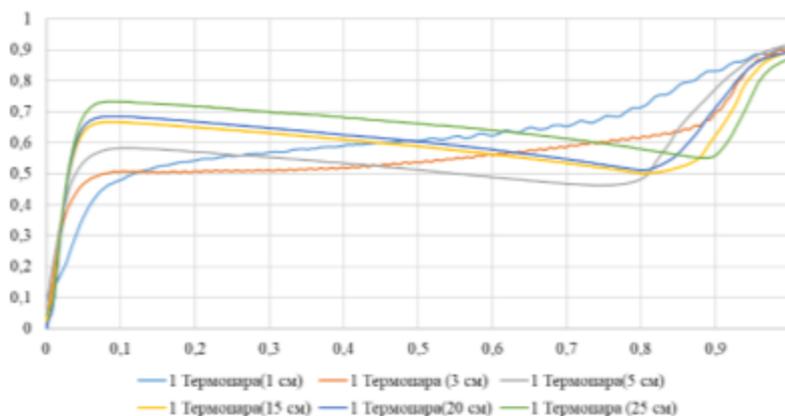


Рис. 2. Зависимость температуры в середине толщины древесной биомассы от времени при разных толщинах слоя древесной биомассы в безразмерном виде при температурном режиме 373 К

По рис. 2 можно сказать, что увеличение толщины диспергированной древесины приводит к деформации температурного поля и соответственно к изменению механизма тепло- и массопереноса внутри этого слоя.

*Исследование выполнено за счет грантов РНФ (проект № 23-79-10092).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chitawo M.L., Chimphango A.F.A., Peterson S. Modelling sustainability of primary forest residues-based bioenergy system, Stellenbosch, South Africa // Biomass and Bioenergy. – 2018. – V. 108. – P. 90–100.
2. Fogarasi S., Cormos C.–C. Technico-economic assessment of coal and sawdust co – firing power generation with CO<sub>2</sub> capture, Napoca, Romania // Journal of Cleaner Production. – 2015. – V. 103. – P. 140–148.
3. Mirkowski Z., Jelonek I. Petrographic composition of coals and products of coal combustion from the selected combined heat and power plants (CHP) and heating plants in Upper Silesia, Poland // International Journal of Coal Geology – 2019 – V. 201. – P. 102–108.
4. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers, Kuala Lumpur, Malaysia // Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2011. – V. 15. – P. 2262–2289.
5. Jie L., Guancun S., Yifei S. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Critical role of zeolite catalysts, Beijing, China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – V. 139. – P. 110707.

## THERMAL-HYDRAULIC OPTIMIZATION OF MULTI-PASS HEAT EXCHANGERS IN SOLIDWORKS

E.K. Ketter

*Tomsk polytechnic university, Group A1-43И*

Supervisor: A.G. Korotkikh

### Introduction

Heat can be transferred between two or more process fluids using a heat exchanger. Their main function is to either heat or cool elements [1–5]. Their efficiency directly impacts operational costs and energy consumption [6]. However, optimizing their performance, particularly in multi-pass configurations, remains a significant challenge. Despite advances in heat exchanger technology, there is a lack of comprehensive studies on the optimization of thermal hydraulic performance in vertical shell and tube heat exchangers with multiple passes [7]. Inefficient designs lead to substantial energy losses and increased operational costs [8, 9].

The purpose of this research is to investigate and enhance the thermal hydraulic performance of vertical shell and tube heat exchangers with multiple passes. Specifically, the primary objective is to evaluate and optimize the thermal hydraulic performance of the IRT-T vertical shell and tube heat exchanger by incorporating twisted tapes using solid work software.

### SolidWorks thermal hydraulic analysis

SolidWorks thermal hydraulic analysis provides a detailed examination of the thermal and hydraulic characteristics of a system using SolidWorks software. Table 1 below outlines the boundary conditions used in the SolidWorks thermal hydraulic analysis of the vertical shell and tube heat exchanger. These parameters are crucial for determining the heat exchanger's overall thermal performance, as they directly impact the heat transfer rate and the fluid's physical properties and flow characteristics.

*Table 1. Boundary conditions*

	Cold Inlet	Cold Outlet	Hot Inlet	Hot outlet
Mass flow rate	136.3640	–	49.5250	–
Fully developed flow	Yes	–	Yes	–
Temperature	35 degrees	–	35 degrees	–
Environment pressure		400000Pa		400000Pa
Turbulence intensity and length Intensity:		2 %		2 %

### Results and Discussion

Table 2 presents the key analysis results from the SolidWorks thermal hydraulic simulation of the heat exchanger. These results are provided for two configurations: smooth tubes and tubes with twisted tape inserts. The comparison highlights the impact of twisted tape on thermal performance, with a slightly higher LMTD and thermal power observed for the twisted tape configuration.

The heat transfer performance analysis yields significant findings regarding the system's efficiency. The heat exchanger equipped with twisted tape inserts demonstrates superior performance, achieving a thermal power output of 0.8801 MW, compared to 0.8014 MW for the smooth tube configuration. This improved performance is attributed to the enhanced turbulence and mixing effects created by the twisted tape inserts. The Log Mean Temperature Difference (LMTD) also shows a slight improvement in the twisted tape configuration (7.36°C) compared to smooth

tubes (7.31°C). This higher LMTD indicates greater heat transfer potential, contributing to the overall improved thermal performance of the twisted tape system. The analysis conclusively demonstrates that the incorporation of twisted tape inserts leads to measurable improvements in heat transfer efficiency. The above can be illustrated using fig. 1, *a*, *b*.

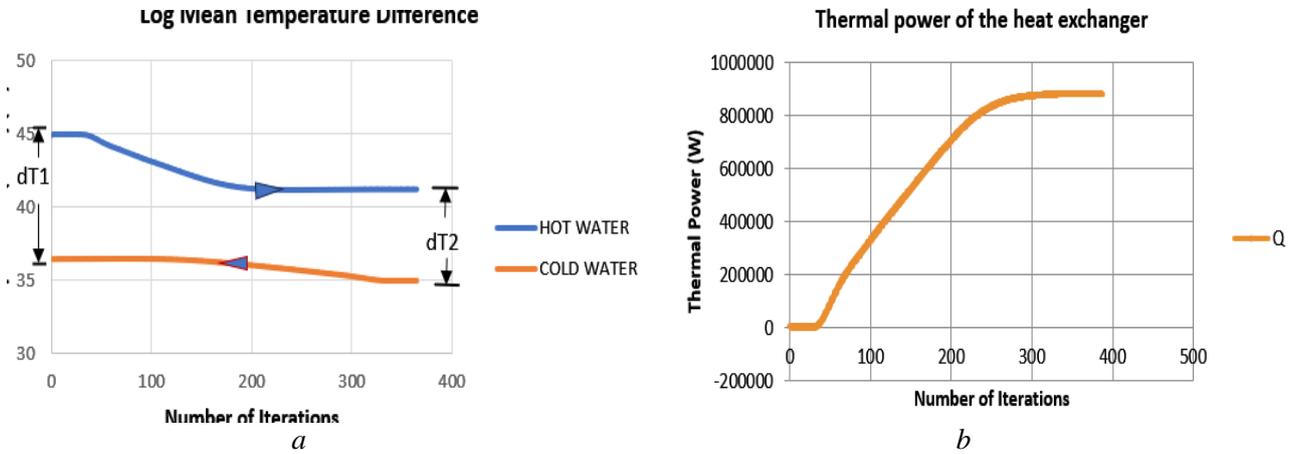


Fig. 1. Temperature distribution of hot and cold fluids along the heat exchanger (*a*); overall heat transfer rate, indicating thermal exchange efficiency (*b*)

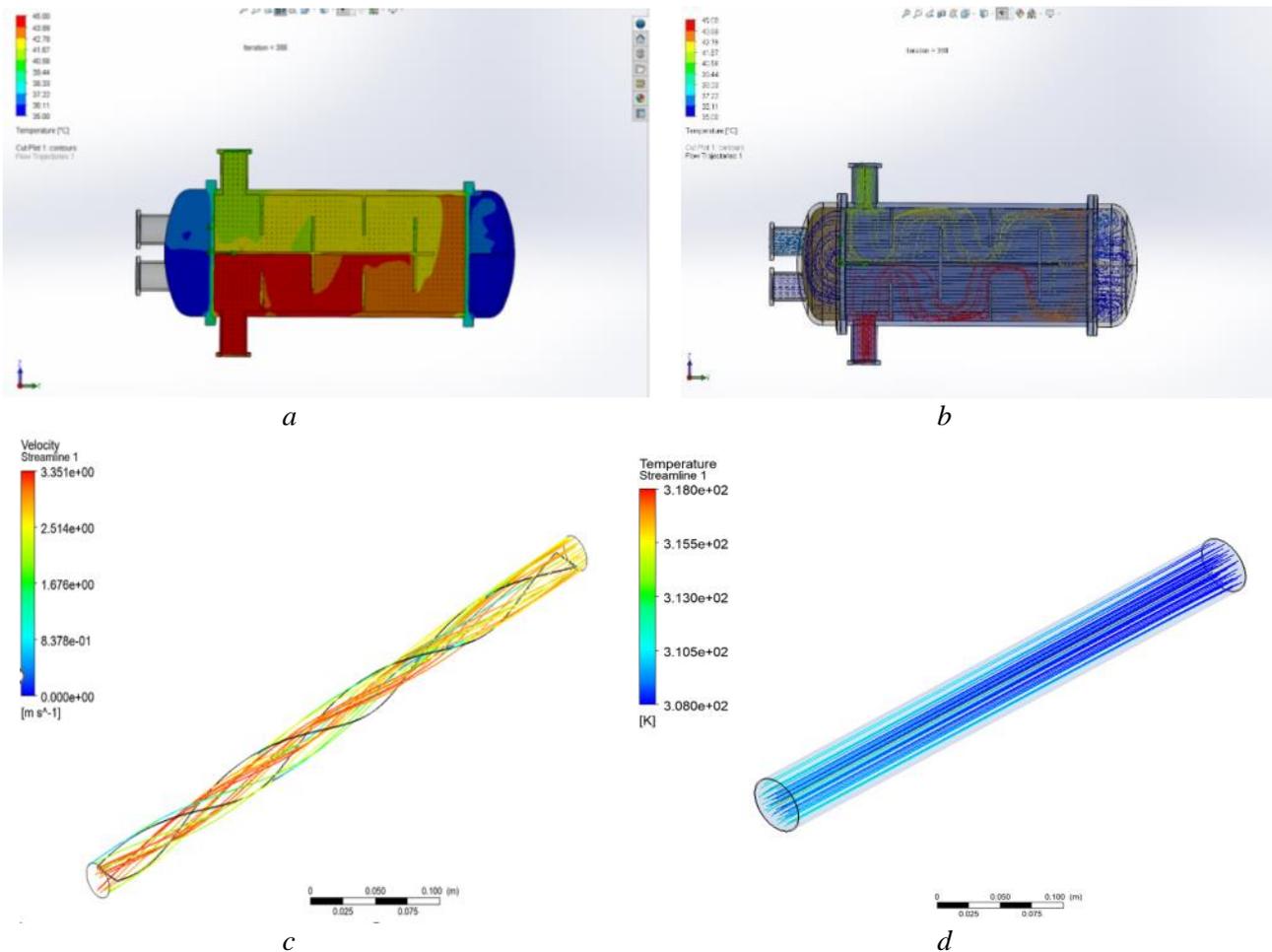
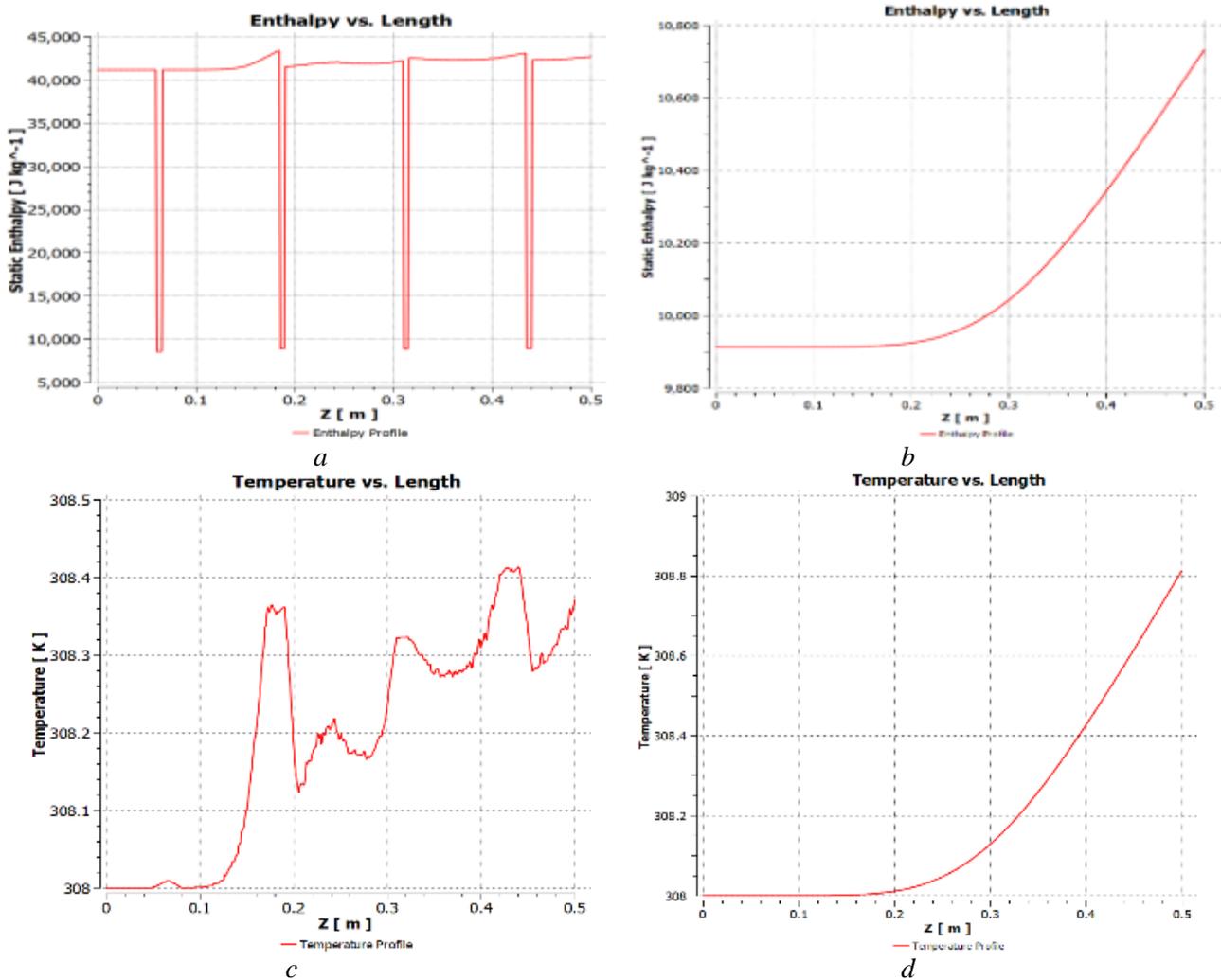


Fig. 2. Fluid flow patterns in twisted ribbon pipes to smooth pipes: *a* – Cut Plot Contours; *b* – Flow Trajectories; *c* – Fluid flow along tube with twisted tape; *d* – Fluid flow along smooth tube

Table 2. Analysis results

Parameters	Smooth tubes of 2.132 m		Tubes with twisted tapes and reduced length of 2.07 m	
	Unit	Value	Unit	Value
Cold Inlet Total Pressure	Pa	509543.99	Pa	509507.38
Cold Inlet Velocity	m/s	4.380	m/s	4.380
Cold Outlet Temperature	°C	36.41	°C	36.37
Cold Outlet Velocity	m/s	4.414	m/s	4.414
Hot Inlet Velocity	m/s	1.769	m/s	1.769
Hot Inlet Total Pressure	Pa	417240.41	Pa	417192.90
Hot Outlet Temperature	°C	41.17	°C	41.23
Hot Outlet Velocity	m/s	1.777	m/s	1.779
dTb	°C	6.17	°C	6.23
dTa	°C	8.59	°C	8.63
Q	W	801360.02	W	880056.92
LMTD	°C	7.31	°C	7.36



*Fig. 3. Enthalpy and temperature distributions, respectively, along the tube length:  
a – Enthalpy along tube with twisted tape; b – Enthalpy along smooth tube;  
c – Temperature along tube with twisted tape; d – Temperature along smooth tube*

Figure 2 compares fluid flow patterns in tubes with twisted tape to smooth tubes, showing how twisted tape induces a more turbulent and complex flow. The twisted tape creates secondary flows and increased mixing, enhancing heat transfer by disrupting the boundary layer more effectively

than in smooth tubes, where flow remains more laminar. Figures 3 illustrate enthalpy and temperature distributions, respectively, along the tube length. In tubes with twisted tape, the enthalpy fluctuates due to the enhanced turbulence and varied flow patterns introduced by the tape's geometry, resulting in regions of higher and lower heat transfer efficiency. In contrast, enthalpy increases more steadily in smooth tubes, with less boundary layer disruption. The temperature profile in twisted-tape tubes also fluctuates more, reflecting the alternating regions of heat transfer efficiency, whereas smooth tubes display a gradual temperature rise as heat transfer reaches a steady state. Overall, twisted tape significantly improves thermal performance compared to smooth tubes by enhancing turbulence and fluid mixing.

### Conclusion

In conclusion, incorporating twisted tape in tubes significantly enhances thermal performance compared to smooth tubes. The twisted tape's design induces secondary flows and turbulence, which disrupt the boundary layer, increase mixing, and lead to higher heat transfer coefficients. This results in fluctuating enthalpy and temperature profiles, indicating regions of enhanced heat transfer. Smooth tubes, by contrast, show a more uniform flow and gradual heat transfer. Overall, twisted tape is an effective technique for optimizing heat transfer efficiency in heat exchangers.

### REFERENCES

1. Hou T.K., Kazi S., Mahat A.B., Teng C.B., Al-Shamma'a A., Shaw A. Industrial heat exchanger: Operation and maintenance to minimize fouling and corrosion // Heat Exchangers-Advanced Features and Applications. – 2017. – V. 1(9). – P. 193–207.
2. The theory behind heat transfer Plate heat exchangers. (n.d.). – URL: <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/local/united-states/hvac/the-theory-behind-heat-transfer.pdf>
3. Heat Transfer equipment – (Chpt. 22) Heat Exchangers Open-Closed-Heaters. (n.d.). <https://www.ou.edu/class/che-design/Design&Safety-2018/Chapter-22-MoHeat-HEX.pdf>
4. Nelli, G., Klein S. Heat transfer. – Cambridge university press, 2008.
5. Gundra R.L. Heat Transfer Analysis on the Applications to Heat Exchangers. – 2021
6. Li M.J., Tao W.Q. Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry // Applied Energy. – 2017. – V. 187. – P. 203–215.
7. Xu K., Qin K., Wu H., Smith R. (). A new computer-aided optimization-based method for the design of single multi-pass plate heat exchangers // Processes. – 2022. – V. 10(4). – P. 767.
8. Klemeš J J., Wang Q.W., Varbanov P.S., Zeng M., Chin H.H., Lal N.S., ... Walmsley T.G.). Heat transfer enhancement, intensification and optimisation in heat exchanger network retrofit and operation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – V. 120. – P. 109644.
9. Wildi-Tremblay P., Gosselin L. Minimizing shell-and-tube heat exchanger cost with genetic algorithms and considering maintenance // International journal of energy research. – 2007. – V. 31(9). – P. 867–885.

## ДРОБЛЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

**Р.Р. Замалтдинов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ Бутакова, группа АЗ-11*

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова

Возможность внедрения в энергетику водоугольного топлива обоснована многими работами, например [1]. Результаты работы [2] по сжиганию ВУТ позволяют утверждать, что при сжигании такого вида топлива, дымовые газы содержат значительно меньше оксидов серы и азота. В работе [3] показано, что, при сжигании ВУТ, эффективность теплопередачи от продуктов сгорания такого топлива к теплоносителю значительно выше, чем при применении угля.

Несмотря на обозначенные преимущества ВУТ, повсеместного распространения такой вид топлива не получил. Одним из самых существенных факторов является требование к уменьшению размеров капель впрыскиваемого в топку ВУТ, что подтверждается работой [3]. В работе [4] установлены, помимо физики дробления капли ВУТ в газификаторе, размеры вторичных (дочерних) капель составляют порядка 1–3 мм. Времена задержки капель ВУТ подобного размера по данным работы [3] составляют от 1 до 5 с (при температуре топочного пространства  $T_g \approx 1273$  К). Соответственно обозначенной проблеме, ищутся способы впрыска водоугольного топлива в топочное пространство, позволяющее формировать поток мелкодисперсных капель. Самые распространенные системы распыления жидких топлив базируются на форсуночных устройствах. Однако надежность таких систем остается на низком уровне из-за значительного эрозионного износа форсунок.

Следует отметить, что характеристики и условия фрагментации капель водоугольного топлива на основе углей с существенно различной степенью метаморфизма (например, бурых, битуминозных и антрацитов) до сих пор не изучены полностью. Заслуживает внимания работа [5], в которой представлены экспериментальные результаты процессов диспергирования капель органо-водно-угольного топлива.

Цель данной работы – установление критических значений числа Вебера в потоке воздуха при движении капель ВУТ в одном направлении с потоком воздуха при варьировании состава топлива.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, приведенного в работе [6], схема которого приведен на рис. 1. Основной частью экспериментального стенда было плоское специально спроектированное сопло. Сечение последнего на входном участке составляло  $350 \times 40$  мм, в выходном участке  $40 \times 40$  мм. Длина соплового канала:  $L=180$  мм. Противоположные стенки сопла были выполнены из прочного стекла, с одной стороны которого устанавливался источник монохроматической плоской световой волны. С обратной стороны была установлена высокоскоростная видеокамера (Evercam 1000 – 32М с объективом Sigma AF 105mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro). Сопловой канал через карман Рихтера подключался к центробежному вентилятору ВЦ5. Последний приводился в движение с помощью электродвигателя АДМ80И2У3, мощностью 2,2 кВт [6].

На рис. 2 показана зависимость критического числа Вебера ( $We$ ) от концентрации угольного компонента в топливе при дроблении капель ВУТ, изготовленных на основе углей с существенно различной степенью метаморфизма. Можно выделить два характерных режима разрушения капель водоугольной суспензии: ньютоновский и вязкопластический с условной границей раздела, основанной на концентрации твердого компонента  $\varphi \approx 45\text{--}50$  % (в зависимости от типа угля). Данный вид зависимости показывает, что при переходе через значения  $\varphi \approx 50$  % характеристики дробления капель ВУТ резко меняются. Последнее связано с тем, что при высоких концентрациях частицы угля в суспензии начинают играть роль связующего материала, что приводит к значительному увеличению вязких сил и сил поверхностного натяжения и соответствующему изменению условий фрагментации капель.

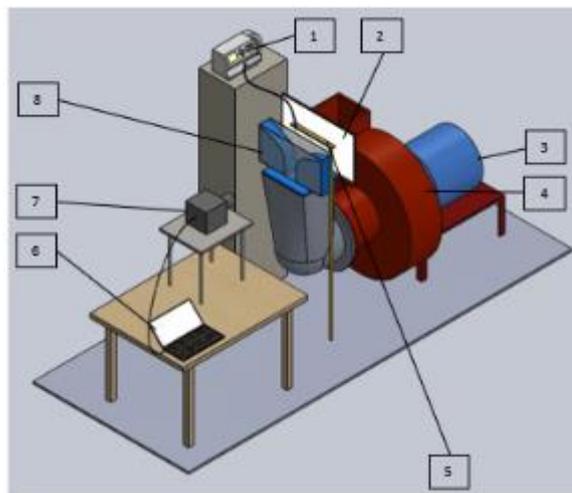


Рис. 1. Экспериментальный стенд:  
1 – инфузионный шприцевой насос;  
2 – источник света; 3 – электродвигатель;  
4 – центробежный вентилятор;  
5 – держатель со шприцом;  
6 – персональный компьютер;  
7 – высокоскоростная камера; 8 – сопло

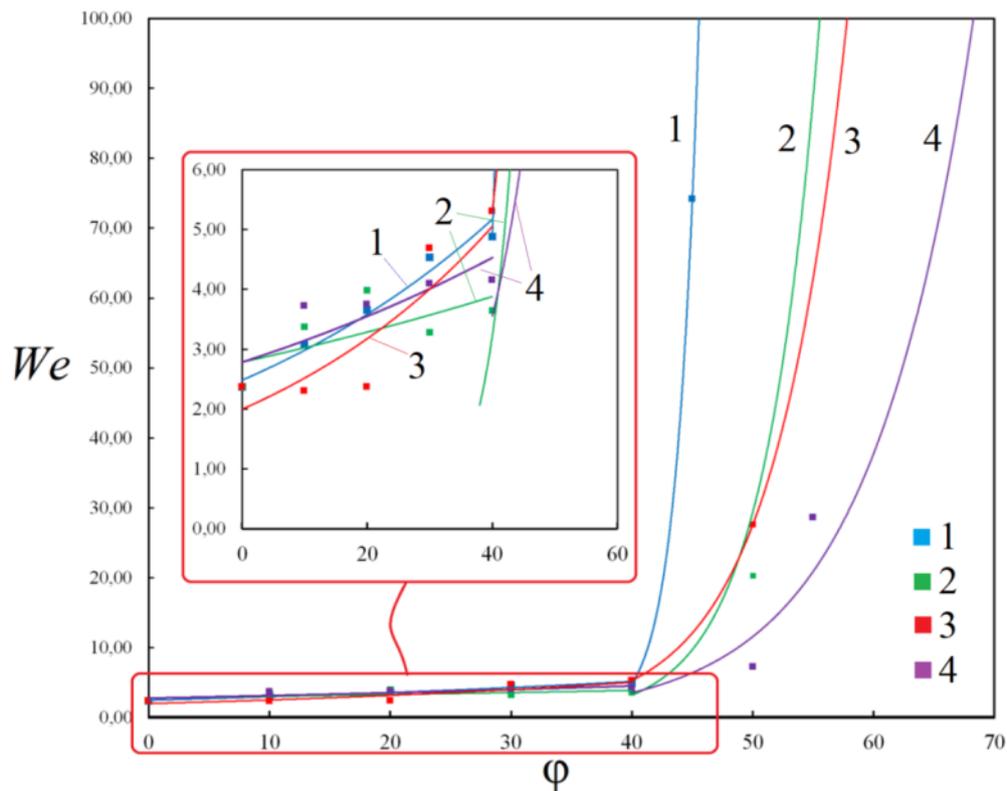


Рис. 2. Зависимость критического числа Вебера от концентрации угольного компонента в водо-угольной суспензии. При  $\varphi = 0$  определено критическое значение числа Вебера для капли воды: 1 – капля ВУТ на основе бурого угля; 2 – капля ВУТ на основе длиннопламенного угля; 3 – капля ВУТ на основе тощего угля; 4 – капля ВУТ на основе антрацита

Можно отметить, что пороговые значения  $\varphi$  для разных углей заметно различаются. Например, экспоненциальный рост величины ( $We$ ) для водоугольного топлива на основе бурого угля начинается раньше (при  $\varphi \approx 45\%$ ) по сравнению с длиннопламенным углем ( $\varphi \approx 50\%$ ). Критическое (в условиях значительного снижения вероятности фрагментации капель ВУТ) число Вебера для капель топлива на основе тощего угля достигается при  $\varphi \approx 50\%$ , а для антрацитового угля – при  $\varphi \approx 60\%$ .

Работа поддержана Российским Научным Фондом грант № 23-79-10092.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зола и шлак при сжигании водоугольных суспензий / Бутылькова Т.Н., Делягин Г.Н. // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1969. – С.58-64.
2. Валиуллин Т.Р., Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Стрижак П.А. Зажигание капли композиционного жидкого топлива в вихревой камере сгорания // Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы Международн. конф., – Москва, 9–11 окт. 2017. – Москва. 2017. – С.105–106.
3. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Salomatov V.V., Malyshev D.Y., Kostoreva Z.A., Purin M.V., Yankovsky S.A. Ignition and combustion characteristics of coal – water fuels based on coal & semi-coke // Combustion and Flame. – 2022. – V. 246. – P. 112430.
4. Zhicun Xue, Yan Gong, Qing-hua Guo, Fuchen Wang, Guangsuo Yu. Visualization study on breakup modes of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier // Fuel. – 2019. – V. 244. – P. 40–47.
5. Antonov, D.V., Kuznetsov, G.V. and Strizhak, P.A. Fragmentation of heated droplets of coal-water slurries containing petrochemicals // Applied Thermal Engineering. – 2021. – V. 195. – P. 117190.
6. Сыродой С.В., Замалтдинов Р.Р., Познахарев А.С., Акимов В.С. Дробление капель водоугольного топлива в потоке воздуха.

## РАСЧЕТ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ УГЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**В.В. Безруких**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ВШАиТЭ, группа 6020405/20004*

Научный руководитель: И.Д. Аникина, к.т.н., доцент ВШАиТЭ

### Введение

На территории России существует множество областей, на которых генерация энергии децентрализована, что в основном вызвано труднодоступностью таких частей страны. Невозможность использования газового топлива приводит к необходимости транспортировки других видов топлива (жидких и твердых), что увеличивает стоимость генерации за единицу энергии.

### Актуальность

Использование твердого топлива в энергетике удаленных территорий позволит снизить затраты на топливную составляющую при производстве электроэнергии, а использование принципа газификации угля позволит перевести работающие на природном газе агрегаты на генераторный газ из угля при условии их модификации.

### Методы исследования

Расчеты исследования были выполнены на основе известных механизмов протекания химических реакций в программном продукте Mathcad.

### Цель исследования

Получить и оценить значение стехиометрически необходимого расхода воздуха в камере сгорания ГТУ, работающей на генераторном газе различных углей. Объект исследования – камера сгорания ГТУ. Предмет исследования – стехиометрически необходимое количество воздуха для сжигания генераторного газа. Задачи исследования:

- подбор основных уравнений для описания процесса горения генераторного газа;
- определение стехиометрически необходимого количества воздуха для сжигания генераторного газа;
- сравнение характеристик сжигания природного и генераторного газа.

В качестве генераторного газа для расчета стехиометрически необходимого расхода воздуха был выбран газ, полученный с помощью горнового газогенератора ВТИ с жидким шлакоудалением. Он работает по принципу газификации в плотном слое с обращенным дутьем. В качестве дутья используется воздух [1].

Исходные характеристики углей представлены в табл. 1 [3].

Таблица 1. Характеристики угля [3]

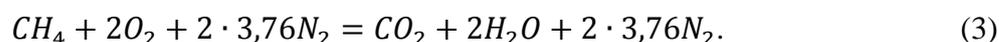
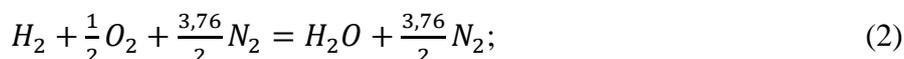
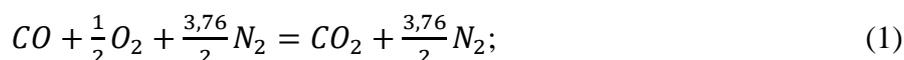
Уголь	Характеристика, %						
	W <sup>r</sup>	A <sup>r</sup>	C <sup>r</sup>	H <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>	S <sup>r</sup>	O <sup>r</sup>
Березовский	20	5,61	52,78	3,7	0,48	0,24	17,19
Приозерный	25	17,23	40,66	2,93	0,59	0,70	12,89
Бородинский	33	7,40	42,60	3,00	0,60	0,20	13,20

После газификации углей получаются газы с характеристиками, приведенными в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики генераторного газа [3]

Компонент	Содержание компонента, %		
	Березовский	Приозерный	Бородинский
CO	26,2	24,5	23,7
CO <sub>2</sub>	5,4	5,4	4,9
CH <sub>4</sub>	4,3	4,1	3,9
H <sub>2</sub>	16,9	19,2	18,0
H <sub>2</sub> O	12,3	17,6	21,7
N <sub>2</sub>	34,9	29,2	27,8

Для расчетов воспользуемся реакциями окисления, которые происходят в камере сгорания ГТУ для всех горючих компонентов газа с учетом закона Гесса.



Исходя из выбранных уравнений рассчитаем количество молей кислорода, азота и воздуха на 1 кмоль топлива, полученные значения приведены в таблице 3:

$$O_2 = 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4; \quad (4)$$

$$N_{2\text{возд}} = \frac{3,76}{2} \cdot CO + \frac{3,76}{2} \cdot H_2 + 2 \cdot 3,76 \cdot CH_4; \quad (5)$$

$$N_{2\text{возд}} + O_2. \quad (6)$$

Молярная масса газов:

$$\mu_{г.г.} = \frac{CO \cdot 28 + CO_2 \cdot 44 + H_2 \cdot 2 + CH_4 \cdot 16 + H_2O \cdot 18 + N_2 \cdot 28}{100}, \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}. \quad (7)$$

Тогда стехиометрический коэффициент (расчетные значения приведены в табл. 3):

$$L_0 = \left( N_{2\text{возд}} + O_2 \right) \frac{\mu_{в.}, \frac{\text{кг возд}}{\text{кмоль}}}{\mu_{г.г.}, \frac{\text{кг топл}}{\text{кмоль}}}, \quad (8)$$

Таблица 3. Стехиометрически необходимое количество воздуха

Уголь	O <sub>2</sub> , кмоль	N <sub>2</sub> возд, кмоль	N <sub>2</sub> возд + O <sub>2</sub> , кмоль	μ <sub>г.г.</sub> , $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	L <sub>0</sub> , $\frac{\text{кг возд}}{\text{кг топл}}$
Березовский	0,302	1,134	1,436	22,72	1,823
Приозерный	0,301	1,130	1,431	21,62	1,909
Бородинский	0,287	1,077	1,364	21,47	1,833

## Выводы

За счет большого количества азота в газе концентрация горючих элементов снижена относительно природного газа, вследствие чего на сжигание 1 кг генераторного газа требуетсякратно меньше воздуха, чем для природного газа (для природного газа стехиометрический коэффициент составляет  $17,31 \frac{\text{кг возд}}{\text{кг топл}}$  [2]). Для различных углей необходимое количество воздуха разнится, это в первую очередь вызвано количеством влаги и углерода в исходном топливе, так как именно эти показатели влияют на процесс газификации и как следствие на конечный состав генераторного газа.

Содержание метана в генераторном газе всех образцов углей не высоко, что говорит о слабом влиянии компонента на стехиометрию, хотя он и требует в 4 раза больше кислорода для реакции горения, при увеличении доли этого компонента значительно увеличится требуемый объем воздуха. Основное влияние на стехиометрический коэффициент оказывают окись углерода и водород, чем больше их доля в составе газа, тем большее количество кислорода необходимо для их полного окисления.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сучков С.И. Разработка отечественной технологии газификации твердого топлива для парогазовых установок. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 120с.: ил. [Библиотека электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 7 (175)].
2. Ромахова Г.А. Газотурбинные установки электростанций: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 163 с.
3. Безруких В.В. Сжигание генераторного газа горновой газификации в камере сгорания ГТУ // Бутаковские чтения : Сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции, Томск, 13–15 декабря 2022 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 495-497.

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ИСПАРЕНИЯ ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ ВОДЫ С ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКИ**

**М.С. Тамашевич**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. А3-11*

Научный руководитель: Г.В. Кузнецов, д.т.н., профессор НОЦ Бутакова

### **Введение**

Развитие современных высокопроизводительных электронных устройств выявило, что мощность и производительность процессоров ЭВМ увеличиваются по экспоненциальному закону. В то же время архитектура процессоров в этих системах ориентирована на компактность, что, в свою очередь, приводит к росту удельной теплоемкости компонентов электронных устройств [1]. Так, например, рабочая температура транзисторов не должна превышать 80 °С. При температурах выше 85 °С возрастает риск разрушения паяного соединения. Также стоит отметить, что срок службы литий-ионного аккумулятора сократится более чем на 60 %, если он будет работать при температурах выше 50 °С [2].

Всё это создает объективные предпосылки для создания современных систем терморегулирования, способных эффективно отводить значительный тепловой поток от высокопроизводительных электронных устройств. Одним из многообещающих подходов для решения ключевых задач, связанных с отводом значительного теплового потока от высокопроизводительных электронных устройств, является технология капельного охлаждения, то есть распылительное охлаждение [3]. Важным аспектом этого процесса является взаимодействие капля с нагретыми твердыми поверхностями. Однако на данный момент отсутствует универсальная теория, которая могла бы описать и предсказать поведение капли после ее столкновения с текстурированной поверхностью.

### **Методика проведения эксперимента**

Для определения времени испарения капель жидкостей, падающих на текстурированную металлическую подложку, использовался экспериментальный стенд (рис. 1). Капли дистиллированной воды сбрасывались на поверхность подложки с помощью инфузионного шприца

цевого насоса. Капля выдавливалась через тонкую иглу (диаметр иглы 0,3 мм). Расстояние между концом иглы шприца и поверхностью подложки варьировалось от 10 до 40 мм. Металлическая подложка крепилась на нагревательную плитку. Температура подложки варьировалась от 60 до 100 °С.

### Результаты

Анализ зависимостей (рис. 2) показывает, что при капельном охлаждении нагретых до относительно высоких температур подложек температура в последней уменьшается на 1–2 К, а температура в самой капле повышается на 25 К при температуре нагревателя 363 К. Для интенсификации теплонагруженных поверхностей ЭВМ необходимо помимо капельного охлаждения применять дополнительные мероприятия т. к. эффективность капельного охлаждения невысокая.

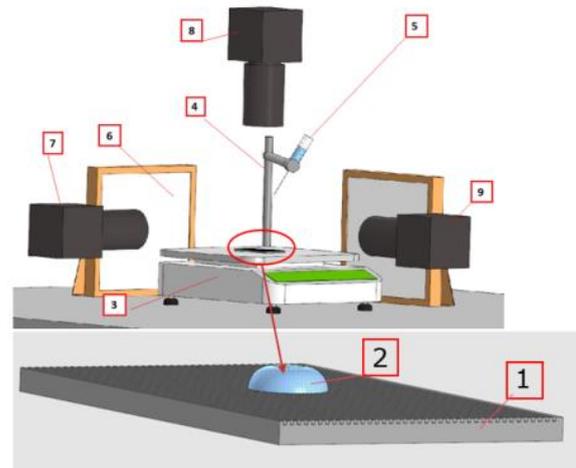


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – металлическая текстурированная подложка; 2 – капля воды; 3 – нагревательная плита; 4 – штатив; 5 – шприц с водой; 6 – прожектор; 7 – камера EverCam с видом поперек канавок; 8 – камера EverCam с видом сверху; 9 – камера EverCam с видом вдоль канавок

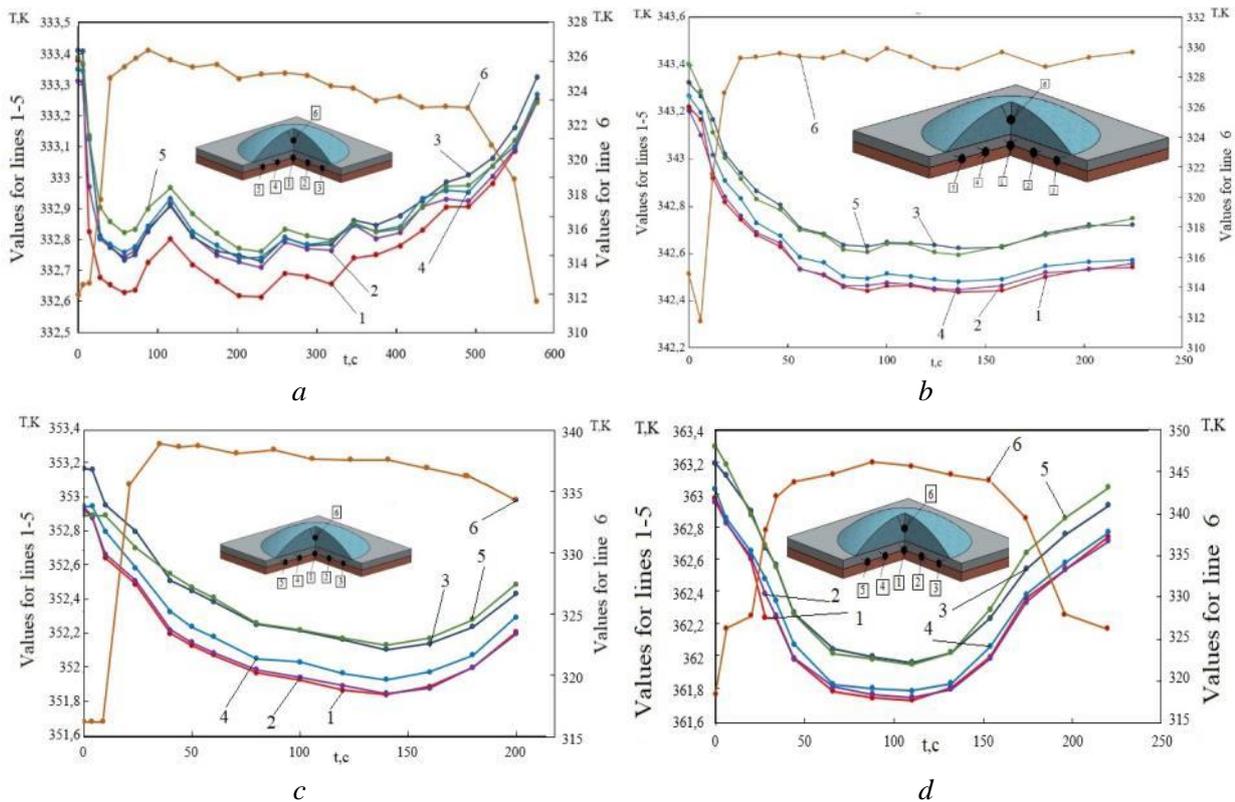


Рис. 2. Тренды температур в период испарения капли с металлической текстурированной подложки. Слева указаны значения температур для 1–5 термопар, а справа для 6 термопары. При температуре нагревателя: а) 333 К, б) 343 К, в) 353 К, д) 363 К.

Исследование выполнено за счет грантов РФФИ (проект № 23-79-10092).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J.-X., Li Y.-Z., Zhong M.-L., Zhang H.-S. Investigation on a gas-atomized spray cooling upon flat and micro-structured surfaces // Int. J. Therm. Sci. – 2021. – V. 161. – Article 106751.
2. Aaron Robison R. Moore's Law: Predictor and Driver of the Silicon Era, Department of Neurologic Surgery. – Los Angeles, California, USA University of Southern California, 2012.
4. Morozov V.S., Orlova E.G., Andryushchenko V.A. Wetting, droplet evaporation and corrosion behavior of various composite and textured materials Ceramics International, Part A // June 2024. – V. 50, Iss. 11. – P. 19269–19282.
5. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Зыков И.Ю., Батищева К.А. Влияние скорости образования капли при растекании по микроструктурированной поверхности на краевой угол // Теплофизика и аэромеханика. – 2018. – V. 25, № 2.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЖИГА ГЛИНОЗОЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Е.Н. Широбокова<sup>1</sup>, А.А. Сергиенкова<sup>2</sup>

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

<sup>1</sup> ИФФ, ЭТГ, группа 1-72Мт; <sup>2</sup> ИФФ, ЭТГ, соискатель

Научный руководитель: Е.В. Гусев, к.т.н., доцент ЭТГ ИФФ ИГЭУ

В производстве керамических материалов наибольшее значение имеет процесс высокотемпературного обжига, при котором после стадии сушки окончательно формируются фазовый состав, микро- и макроструктура керамического тела (черепка) при существенных энергозатратах. Повышение энергетической эффективности процесса обжига определяется химико-минералогическим составом керамической массы, способами подготовки сырьевых материалов и формования изделий-сырцов и рациональной организации тепловой обработки [1].

Применение топливосодержащего сырья в составе керамических масс способствует на нагревательной стадии обжига выделению дополнительного внутреннего тепла за счет беспламенного сгорания остаточного твердого топлива, снижению градиентов температур и повышению скорости нагрева.

При обжиге глинозольных материалов протекают фазовые и физико-химические превращения, сопровождающиеся тепловыми эффектами различной природы и массообменом, характер которых существенно отличаются от подобных преобразований в традиционных керамических материалах, что обусловлено схожестью химико-минералогического и гранулометрического составов золы с глинистым сырьем и содержанием тонкодисперсного остаточного твердого топлива [2–3].

В качестве основных сырьевых материалов использовались тонкодисперсная отвальная зола Ивановской ТЭЦ-2 и глинистое сырье Норского месторождения (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав (%) компонентов глинозольной шихты

Компонент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	П.П.П.
Зола	54,16	13,1	9,88	3,23	1,14	–	2,76	–	–	0,18	14,65
Глина	50,64	13,02	5,71	8,39	0,79	4,15	2,46	0,09	0,12		11,8

Разработка режимных параметров процесса обжига требует изучения фазовых и физико-химических преобразований, протекающих в процессе нагрева глинозольного материала. Экспериментальные исследования кинетики процесса термического нагрева глинозольного материала различного состава проведены на установке синхронного термического анализа фирмы NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Испытания проведены в окислительной среде в интервале температур 20–950 °С со скоростью нагрева теплообменной среды 10 °С/мин.

Результаты термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии ДСК глинистого вещества и глинозольного материала различного состава представлены на рис. 1 и табл. 2.

Приведенные экспериментальные данные по термическому нагреву глинозольного материала показывают, что в зоне дегидратации в интервале температур 250–720 °С интенсивность выделения теплоты за счет беспламенного горения углерода природной органики в глинистом веществе и несгоревшего твердого топлива в золе с ростом их содержания возрастает в 4–6 раз с одновременным ростом потерь массы в 1,7–2,1 раза (табл.2).

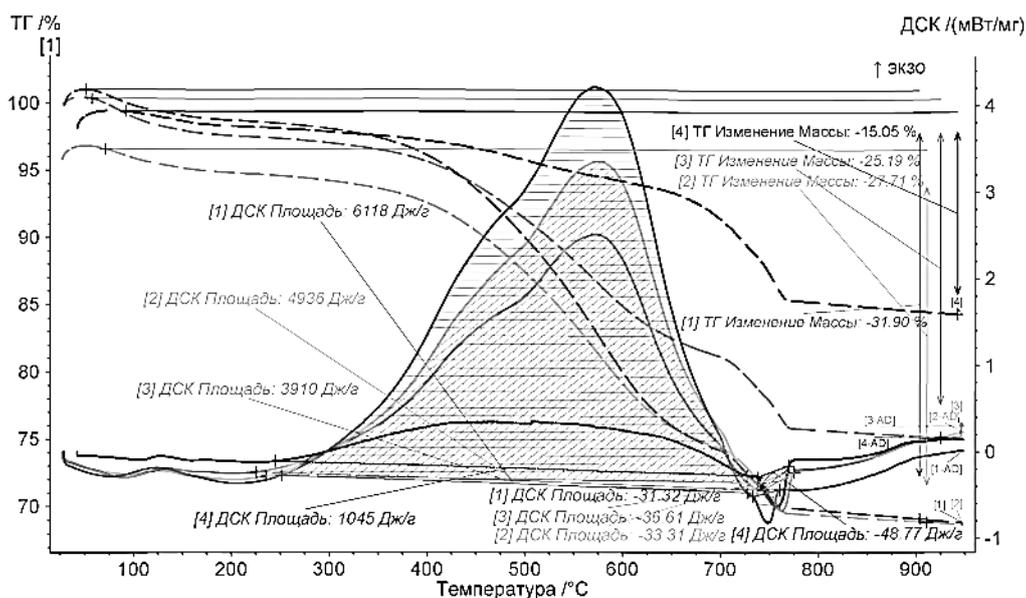


Рис. 1. Термограмма и дериватограмма глинозольного материала различного состава:  
1 – Г:З=50:50; 2 – Г:З=60:40; 3 – Г:З=70:30; 4 – Г:З=100:0

Таблица 2. Экспериментально-расчетные данные термического анализа

Состав материала, %	Потери массы, %	Эндотермическая теплота, кДж/кг	Экзотермическая теплота, кДж/кг	Экзотермическая теплота в пересчете на условное топливо, %
Г:З=100:0	15,05	48,8	1045	3,5
Г:З=70:30	25,19	36,6	3910	13,3
Г:З=60:40	27,71	33,3	4936	16,8
Г:З=50:50	31,90	31,3	6118	20,9

В процессе нагрева в интервале температур 700–950 °С усиливается действие карбонатных и железистых включений, как от глины, так и от золы, что способствует появлению окислительно-восстановительной среды в обжигаемом изделии и дополнительному расплаву с повышением прочностных свойств обожженных изделий.

Появление внутреннего теплового источника при обжиге глинозольного материала способствует снижению перепада температур между его внутренними и поверхностными слоями, неравномерности проявления деформационных изменений по объему, что приводит к повышению темпа нагрева, экономии энергетических ресурсов и качественных характеристик керамической продукции.

В результате термического анализа исследуемого глинозольного материала выявлено повышение теплоэнергоэффективности при обжиге в пересчете на условное топливо составляет от 3,5 до 20,9 % с ростом содержания золы от 0 до 50 % (табл. 2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Кулбеков М. Золы ТЭС в производстве строительной керамики. – Алма-Ата: Казахстан, 1986. – 260 с.
2. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов Б.Н. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 255 с.
3. Теплоизоляционные керамические материалы с нанопористой структурой, изготовленные с использованием золосодержащих отходов ТЭЦ / Т.В., Вакалова, Т.А., Хабас, И.Б. Ревва, И.А. Павлова // Сырьевые материалы. – 2014. – No. 2. – С. 6–11.

## ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Т.А. Заворохин, Э.Р. Зайнуллина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
ИЭ ВШАиТЭ, группа 3231301/10101

Научный руководитель: Э. Р. Зайнуллина, к.т.н., доцент ВШАиТЭ СПбПУ

Повышение энергоэффективности и экологичности оборудования ТЭС и АЭС является одной из приоритетных задач для развития энергетики. В частности, совершенствование конструкций и интенсификация теплообмена в теплоотводящем оборудовании позволит снизить расход топлива, негативное влияние на окружающую среду, стоимость вырабатываемой энергии и т.п. Результаты исследований по изучению поверхностной конденсации пара [1–3] позволят разрабатывать и создавать новые конструкции теплообменников, обладающих меньшими массогабаритными показателями. Для действующих аппаратов применяются современные методы диагностики их состояния [4–5], определяющие наличие коррозионного износа, протечек или загрязнения теплообменной поверхности.

Настоящее исследование посвящено измерению местной плотности теплового потока (ПТП) при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе с помощью градиентной теплотметрии и термометрии. Эксперименты выполнены на стенде (рис. 1), измерительный участок которого включает трубы из нержавеющей стали наружным диаметром 20 мм, толщиной стенки 2 мм, расположенные рядом с относительным шагом  $s/d = 1,67$ . Трубы зафиксированы резиновыми заглушками в стеклянном кожухе с внутренним диаметром 110 мм. Длина теплообменной поверхности составляет 450 мм. Насыщенный водяной пар с расходом 2,8 г/с подавался в межтрубное пространство по двум паропроводам, представляющим собой перфорированные алюминиевые трубы, что обеспечило равномерность распределения насыщенного водяного пара внутри измерительного участка.

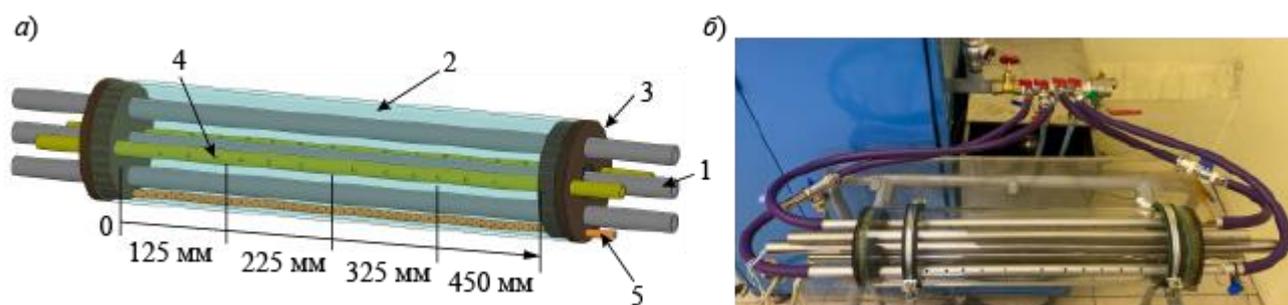


Рис. 1. Экспериментальная установка:

а) измерительный участок и б) фото: 1 – охлаждаемая труба; 2 – стеклянный кожух;  
3 – резиновая заглушка; 4 – паропровод; 5 – конденсатоотвод

В первой серии опытов охлаждающая вода с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и расходом, варьируемым в диапазоне  $80\text{--}200\text{ г/с}$ , подводилась только в центральную трубу, активное образование конденсата происходило исключительно на ней. Установка трех труб обусловлена желанием коллектива в последствии применить предлагаемую методику к изучению эффекта натекания конденсата с вышерасположенных труб и теплообмена при конденсации в пучке. Конденсат отводился через конденсатоотвод, представляющий собой перфорированную медную трубку, расположенную на нижней образующей внутренней поверхности измерительного участка.

Прямое измерение местной ПТП выполнено градиентными датчиками теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута (размерами  $2,9 \times 6 \times 0,3\text{ мм}$ ), установленными заподлицо с наружной поверхностью трубы (рис. 2, а). Значение местной ПТП также рассчитано по уравнению стационарной теплопроводности через цилиндрическую стенку. Для этого на внутренней и наружной поверхности трубы монтированы горячие спаи термопар типа L (рис. 2, б). Для минимизации искажений, вызванных отводом проводов от первичных преобразователей, ГДТП и термопары установлены диаметрально противоположно друг другу в трех сечениях по длине трубы.

При конденсации пара на горизонтальной трубе распределение местной ПТП меняется по окружности. Поэтому стенд предусматривает возможность поворота центральной трубы вокруг оси в диапазоне полярного угла  $\varphi = 0..180^{\circ}$  с шагом в  $15^{\circ}$ , что обеспечивает измерение распределения местной ПТП минимальным числом первичных преобразователей (рис. 2, в).

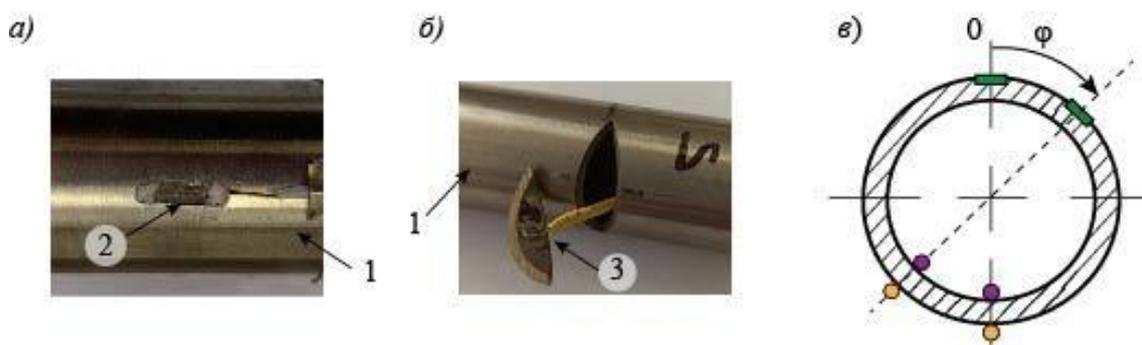


Рис. 2. Установка первичных преобразователей:

а) ГДТП; б) термопара; в) расположение первичных преобразователей в сечении:

1 – охлаждаемая труба; 2 – ГДТП; 3 – горячий спай термопары на внутренней поверхности трубы

Результаты измерений подтвердили высокую информативность ГДТП, связанную с их низкой постоянной времени (около  $10\text{ нс}$ ), что позволило оценить изменение ПТП во времени – временная теплограмма. В качестве примера на рис. 2, а приведена временная теплограмма, полученная при расположении ГДТП на нижней образующей трубы при  $\varphi = 180^{\circ}$  во втором сечении (на расстоянии  $225\text{ мм}$  от входа в измерительный участок) при расходе охлаждающей воды около  $200\text{ г/с}$ . Пульсации местной ПТП обусловлены отрывом конденсата, скопившегося на нижней части трубы под действием сил тяжести. Прозрачная стенка кожуха позволила наблюдать за конденсацией на поверхности трубы, совмещение визуализации и показаний ГДТП подтвердило, что частота отрыва конденсата от поверхности при указанных режимных параметрах составляет около  $0,8\text{ Гц}$ .

По показаниям ГДТП и термопар построены распределения местной ПТП по окружности трубы при расходе охлаждающей воды около  $200\text{ г/с}$  – угловые теплограммы (рис. 2, б). Расчетной местной ПТП по показаниям термопар, выполненный по уравнению стационарной теплопроводности, указывает на практически равномерное распределение ПТП по окружности трубы (рис. 2, б, черная кривая). Угловая теплограмма, построенная по показаниям

ГДТП, указывает на снижение местной ПТП в диапазоне полярного угла  $\varphi = 135 \dots 180^\circ$ , связанное с образованием поддонной зоны. Следовательно, для повышения среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации поверхностные интенсификаторы следует устанавливать в указанной области.

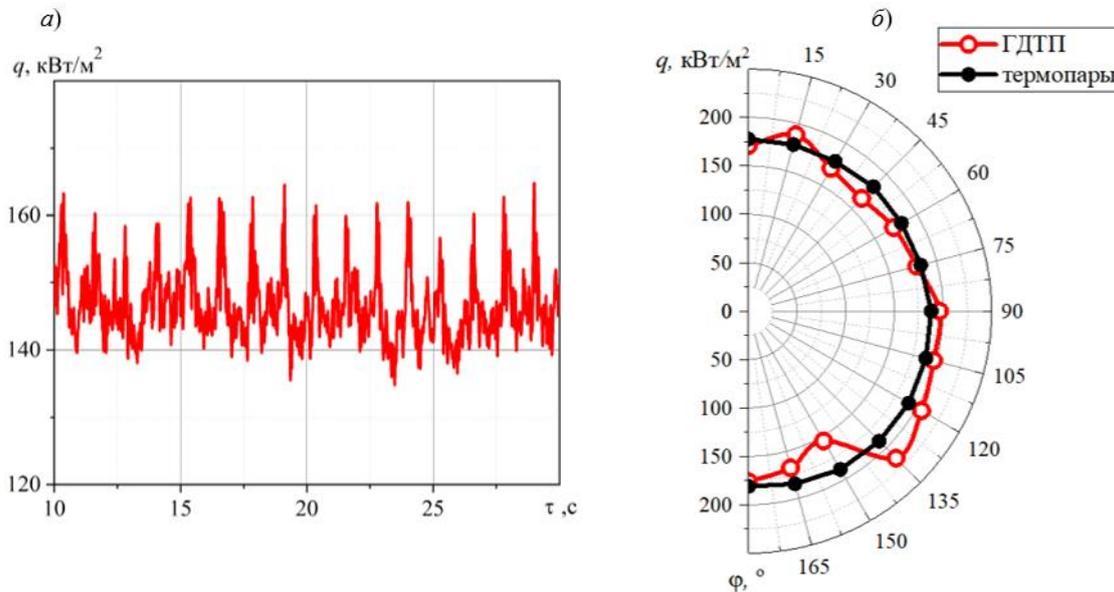


Рис. 2. Результаты эксперимента: а) временная теплограмма при конденсации на нижней образующей трубы; б) угловые теплограммы (красная кривая – теплометрия; черная кривая – расчет по показаниям термопар)

Относительная стандартная неопределенность измерения местной ПТП с помощью ГДТП составляет 8 %, относительная неопределенность расчета по показаниям термопар – около 15 %.

Изучен теплообмен при поверхностной конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе с применением градиентной теплометрии и термометрии. Подтверждена высокая информативность, точность и применимость ГДТП в качестве первичного преобразователя для систем мониторинга состояния теплообменного оборудования ТЭС и АЭС. Результаты исследования позволили выявить область снижения местной ПТП, вызванную скоплением конденсата, без применения визуализации, что позволяет определить эффективные и экономичные методы интенсификации теплообмена при конденсации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка величины коррозии в паро-конденсатных теплообменниках / В.Н. Шарифуллин, А.В. Шарифуллин, А.Я. Латыпова // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 1–2.
2. Разработка и апробация элементов системы мониторинга состояния и диагностики конденсатора паровой турбины / С.И. Хаев, К.Э. Аронсон, Ю.М. Бродов, А.Г. Шемпелев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 67–69.
3. Алгоритмы диагностики неполадок теплообменных аппаратов паротурбинных установок / В.Н. Шарифуллин, А.В. Шарифуллин, И.Ф. Гатауллин // Вестник КГЭУ. – 2012. – № 1 (12).
4. Исследование пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием / Ю.А. Кузма-Кичта, А.В. Лавриков, Н.С. Иванов, Д.В. Горбачев // Тепловые процессы в технике. – 2023. – Т. 15, № 9. – С. 402–409.
5. Gradient heatmetry advances / S.Z. Sapozhnikov, V.Y. Mityakov, A.V. Mityakov et al. // Energies. – 2020. – Vol. 13, No. 23. – P. 6194.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА И ГИДРОДИНАМИКИ ПРИ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ ТЕЧЕНИИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ**

**Ю.Ф. Сабирова**

*Казанский государственный энергетический университет,  
ИТЭ, ЭОС, группа ЭОСм-1-23*

Знания о процессах переноса энергии через пористый материал представляют большой интерес в различных областях, начиная от гидрологии грунтовых вод, моделирования нефтяных пластов и заканчивая химическими каталитическими реакторами с насадочным слоем и испарительным охлаждением. Известно, что влияние сил инерции и твердых стенок на процессы переноса вблизи границы и в средах с высокой пористостью более интенсивно.

Металлические пористые среды с открытыми порами – это относительно новый класс пористых сред, которые широко распространены в природе и используются во многих инженерных приложениях, таких как геотермальные системы, хранение энергии и т. д. Понимание процессов тепло- и массопереноса в пористых средах является ключевым для оптимизации работы таких систем. Особый интерес представляют исследования теплообмена и гидродинамики при осциллирующем течении в пористых структурах.

Для отвода значительного количества тепла при высоких потоках с помощью компактных и высоконадежных устройств необходим инновационный метод охлаждения. Процесс теплообмена через пористый материал является одним из эффективных методов охлаждения. Благодаря большой площади соприкосновения между твердой матрицей и теплоносителем, достигается интенсивное перемешивание потока.

Существуют важные различия между стационарным и колеблющимся потоком. По сравнению со стационарным потоком, колеблющийся поток может значительно улучшить диффузию. Эти улучшения обусловлены взаимодействием объемного потока жидкости и пограничного слоя [1–3].

В работе [4] проведено комбинированное экспериментальное исследование для изучения характеристик течения колеблющегося потока, включающего пористые среды. Также с помощью корреляционных уравнений предложен количественный метод для логического описания этих характеристик потока.

Результаты исследования показали, что скорость цикла уменьшается с увеличением перепада давления в пористой среде. Безразмерное смещение жидкости изменено в зависимости от скорости прохождения жидкости через пористую среду. Для пористой среды измененное безразмерное смещение жидкости уменьшается с увеличением кинетического числа Рейнольдса. На основе модифицированных параметров подобия получено общее корреляционное уравнение усредненного по циклу коэффициента трения для пористых сред. Обнаружена значительная разница фаз между движениями газа и поршня, которая повышается с увеличением частоты и размера ячейки. Также получено уравнение корреляции для безразмерной разности фаз. Пористая среда может влиять на поток внутри теплообменников расположенных между цилиндром и пористой средой. Массовые скорости потока вблизи поршней выше, чем вблизи пористой среды, и эта разница увеличивается с увеличением перепада давления пористой среды.

Авторы работы [5] экспериментально исследовали усиление теплопередачи колеблющегося потока через канал, заполненный алюминиевой пористой средой. Измерялись скорость потока, перепад давления по сечению и температура поверхности. Также проанализированы

характеристики колеблющегося потока в пористом канале, влияние смещения и частоты на теплопередачу в колеблющемся потоке через пористый канал.

Максимальный перепад давления колеблющегося потока в пористом канале увеличивается с увеличением кинетического числа Рейнольдса и безразмерной амплитуды перемещения потока. Усредненные по циклу локальные температуры поверхности в пористом канале, подверженном колебательному течению, намного ниже, чем в пустом канале. Усредненное по длине локальное число Нуссельта для колеблющегося потока в пористом канале может быть в несколько раз больше, чем в пустом канале. При увеличении безразмерной амплитуды перемещения потока и частоты колебаний в подходящем диапазоне, увеличивается усиление теплопередачи колеблющегося потока через пористый канал. Увеличение усредненно-го по циклу локального числа Нуссельта будет уменьшаться, если кинетическое число Рейнольдса очень велико. Таким образом, усиление теплопередачи в большей степени зависит от перемещения потока, чем от частоты колебаний.

Аналогичные выводы наблюдаются и в работе [6], где исследованы характеристики колеблющегося потока через канал, заполненный металлической пеной с открытыми порами. Профили перепада давления и скорости колеблющегося потока в металлической пене с открытыми порами увеличиваются с увеличением кинетического числа Рейнольдса и безразмерной амплитуды потока. Высокий перепад давления соответствует высокой скорости потока, что показывает, что разность фаз между скоростью и перепадом давления очень мала для колеблющегося потока в металлической пористой среде с открытой ячеистой структурой.

Влияние кинетического числа Рейнольдса на перепад давления более существенно, чем для другой безразмерной амплитуды потока. Это указывает на то, что перепад давления колеблющегося потока в канале из алюминиевого пористого материала относительно не зависит от безразмерной амплитуды потока. Максимальный перепад давления в канале, заполненном металлической пеной с открытыми порами, намного ниже, чем в канале, заполненном проволоочной сеткой.

Для исследования теплогидравлических характеристик регенераторов с колебательным потоком, работающих с жидкими теплоносителями, авторами исследования [7] была создана экспериментальная установка. Измерения температуры в нескольких точках вдоль слоя регенератора и изменения давления между двумя концами регенератора выполнены для трех регенеративных матриц в виде упакованных сфер: сфер из нержавеющей стали диаметром 1 мм, свинцовых сфер диаметром 0,5 мм и гадолиниевых сфер диаметром 0,5 мм. Тепловые и гидравлические параметры, такие как перекачка жидкости рассчитаны, и сравнены мощность, эффективность на холодном и горячем режимах, а также дисбаланс эффективности для аналогичных диапазонов рабочей частоты и использования.

Основные выводы, данного исследования, заключаются в следующем:

Матрица регенератора из нержавеющей стали показала похожие значения эффективности в горячем и холодном режимах, которые снижаются с увеличением частоты и коэффициента использования. Хотя в регенераторе из нержавеющей стали не было обнаружено осевых потерь теплопроводности, значения эффективности были самыми низкими из трех матриц из-за большего диаметра частиц, что приводит к малой площади поверхности на единицу объема и меньшей теплопередаче между слоями. Для матрицы из нержавеющей стали наблюдается небольшой дисбаланс эффективности из-за зависимости удельной теплоемкости твердого вещества от температуры.

Свинцовая матрица продемонстрировала наивысшую эффективность из всех благодаря сочетанию большой площади поверхности на единицу объема (малый диаметр частиц) и низкого массового расхода. Однако низкие массовые расходы (необходимые для поддержания аналогичного диапазона использования между матрицами) ухудшили тепловые характе-

ристики свинцовой матрицы двумя способами: во-первых за счет уменьшения объема перекачиваемой жидкости до величины, сопоставимой с мертвым объемом регенератора, и, во-вторых, за счет увеличения потерь из-за осевой теплопроводности.

Что касается мощности перекачки жидкости, то свинцовая матрица из-за малых скоростей потока наблюдается наименьшая потеря вязкости. С другой стороны, гадолиниевая матрица обладает наибольшей мощностью перекачки благодаря малому диаметру частиц (большой площади поверхности) в сочетании с большими объемами вытесняемой жидкости.

Таким образом, перепад давления для колеблющегося потока в металлической пористой среде с открытыми порами намного меньше, чем для колеблющегося потока в проволочных сетках. Разница между коэффициентами трения колеблющегося потока для металлического пористого материала и проволочных сеток уменьшается с уменьшением амплитуды колебаний потока.

Проведенные эксперименты показали, что режим осциллирующего течения существенно влияет на характеристики теплообмена и гидродинамики в пористой среде по сравнению со стационарным потоком.

Установлено, что с увеличением частоты колебаний теплообменные характеристики пористого образца улучшаются. Так, коэффициент теплоотдачи возрастает на 20–30 % по сравнению со стационарным течением. Этот эффект объясняется интенсификацией перемешивания теплоносителя в порах за счет периодических изменений направления потока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khodadadi J.M. Oscillatory fluid flow through a porous medium channel bounded by two impermeable parallel plates. – 1991.
2. Bağcı Ö., Dukhan N., Özdemir M. Characteristics of oscillating liquid flow in foam-like highly-porous media: An experimental study // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2015. – Vol. 60. – P. 96–105.
3. Binark A.M., Özdemir M. An experimental study on heat transfer of pulsating air flow in metal foam subjected to constant heat flux // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2023. – Vol. 184. – P. 107915.
4. Ni M. et al. A quantitative method to describe the flow characteristics of an oscillating flow including porous media // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 119. – P. 860–866.
5. Leong K.C., Jin L.W. An experimental study of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminum foam // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48, № 2. – P. 243–253.
6. Leong K.C., Jin L.W. Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2006. – Vol. 27, № 1. – P. 144–153.
7. Trevisoli P. et al. Experimental assessment of the thermal-hydraulic performance of packed-sphere oscillating-flow regenerators using water // *Experimental thermal and fluid science*. – 2014. – T. 57. – C. 324–334.

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

**Ю.Ф. Сабирова**

*Казанский государственный энергетический университет, ИТЭ, ЭОС, группа ЭОСм-1-23*

В настоящее время пульсирующие потоки в пористых средах плохо изучены. Важной областью применения таких потоков являются криоохладители Стирлинга и импульсные трубки. В этих системах микропористые структуры образуют холодные и теплые теплообменники и, что более важно, регенераторы, которые периодически пропускают газ, обычно гелий. Взаимодействие жидкости и твердого тела в этих микропористых структурах, в частности, регенератор важен с точки зрения производительности системы криоохладителя. Потери на трение, отрицательно влияют на общую производительность системы. Учитывая срок службы и надежность криоохладителя, криоохладитель с импульсной трубкой является приори-

тетным из-за отсутствия движущихся частей на холоде, а криоохладители типа Старлинг, относятся к регенеративным холодильникам, в которых рабочая жидкость имеет колебательный режим течения. Для повышения эффективности охлаждения наполнители регенератора должны иметь большую площадь теплопередачи, большую теплоемкость, малую осевую теплопроводность, небольшой перепад давления и небольшой пустой объем.

Пористая среда – это материал, содержащий матрицу со связанными между собой пустотами, через которые может протекать жидкость. Благодаря своей сложной структуре жидкость, протекающая через пористую среду, хаотично перемешивается, что значительно улучшает теплообмен между жидкостью и твердой фазой, из которой состоит среда. Это преимущество делает пористые среды предпочтительными во многих областях теплопередачи, таких как криоохладители, Двигатели Стирлинга, твердомаатричные теплообменники, системы охлаждения электронных устройств и регенераторы [1–5].

Сейме и др. [6] определили такое условие течения, при котором жидкость совершает возвратно-поступательное движение в трубе с нулевой полезной массой, подаваемой вдоль осевой линии. Периодически изменяющееся направление потока приводит к нулевой средней скорости, но к зависящей от времени переходной скорости, в результате чего развитие пограничного слоя и характеристики теплопередачи колеблющегося потока отличаются от характеристик однонаправленного стационарного потока.

В работе [7] разработана двумерная модель для моделирования характеристик и теплопередачи колеблющегося потока в сетчатом генераторе. Модель демонстрирует хорошее соответствие с эмпирическими соотношениями в стационарных условиях. В колебательном режиме с упрощенным синусоидальным массовым расходом и волнами давления обнаружено, что изменения перепада давления, усредненной по массе температуры жидкости и теплового потока с течением времени аналогичны синусоидальным функциям. Влияние критических рабочих параметров, включая частоту колебаний и амплитуду скорости, на теплопередачу оценивается с использованием чисел Рейнольдса и Валентности. Результаты показывают, что усредненное по циклу число Нуссельта каждой элементарной ячейки увеличивается с увеличением частоты и числа Рейнольдса и уменьшается с удалением от входного отверстия. Предложена корреляция для прогнозирования усредненного по циклу числа Нуссельта как функции числа Рейнольдса и числа Валентности, и отклонения между результатами моделирования и прогнозами находятся в пределах 7 %. Выводы и результативность этой работы являются важными руководящими принципами для проектирования и оптимизации криогенных регенераторов.

В численном исследовании [8] изучено усиление теплопередачи колеблющегося потока через канал, заполненный пеноалюминием. При численном анализе поля колебательного течения и теплообмена в канале использованы уравнения Дарси Бринкмана Форхгеймера и классические уравнения Навье–Стокса, а также соответствующие уравнения энергии. Для решения управляющих уравнений использован метод конечных элементов. Модель была тщательно проверена на основе опубликованных результатов экспериментов для канала, заполненного алюминиевой пористой средой, с использованием колебательного входного потока. Проанализировано влияние числа Рейнольдса воздушного потока, пористости металлической пены, амплитуды и частоты колебаний воздушного потока, а также теплопроводности твердого тела на распределение температуры поверхности и локальное число Нуссельта пористого канала. Согласно результатам настоящего исследования, коэффициенты усиления теплопередачи, число Нуссельта для канала с вставками из вспененного металла, выше, чем для каналов без вставок из вспененного металла. Показано, что теплопередающая способность канала, заполненного пористым материалом, увеличивается либо с уменьшением пористости, либо с увеличением плотности пор. Кроме того, обнаружено, что усиление теплопередачи колеблющегося потока через канал, заполненный пористым материалом, увеличивает

ется с увеличением амплитуды и частоты колеблющегося потока в подходящем диапазоне. Кроме того, число Рейнольдса и теплопроводность твердого тела являются важными параметрами, влияющими на теплопередачу из канала, заполненного вспененным алюминием.

В исследовании [9] предложена типичная модель тепловой решетки Больцмана с двойной функцией распределения для моделирования теплового колебательного потока как в плоских плоскостях, так и в пористых средах. С момента появления решетчатая модель Больцмана применяется в большем числе областей научных и инженерных исследований. Типичный пример – текучесть пористых сред. Поскольку в исследовании нет возможности получить реальное поле течения пористой среды традиционным методом Навье–Стокса, решетчатая модель Больцмана – один из лучших вариантов. Внедрение решетчатой модели Больцмана для исследования регенеративных криоохладителей – это совершенно новое испытание. Результаты моделирования показывают, что с помощью решетчатой модели Больцмана можно получить микроскопические характеристики в пористых средах. Авторы исследования представили зависимость поля течения и поля температуры при различных числах Уомерсли. Можно отметить, что на профили скорости и температуры в основном влияет число Уомерсли. Кольцевой эффект скорости возникает, когда число Уомерсли больше 1. В канале давление вдоль одного и того же вертикального профиля всегда остается почти постоянным. Результаты хорошо согласуются с результатами предыдущих экспериментальных исследований. Течение в пористых средах вблизи поверхности твердофазных пористых сред в определенный момент времени возникают небольшие завихрения. Рабочий газ периодически поглощает или отдает тепло твердофазным пористым средам. Коэффициент теплопроводности между твердым телом и жидкостью также оказывает большое влияние на теплопередачу. Успешное внедрение решетчатой модели Больцмана показывает, что этот метод полезен для моделирования колебательного потока и теплопередачи в системах регенеративного криоохладителя и может быть в дальнейшем развит как мощный инструмент для исследования и совершенствования конструкции криоохладителей с импульсной трубкой.

С помощью численного моделирования авторы работы [10] исследовали параметры передачи импульса, связанные с пульсирующим ламинарным потоком через обычные пористые среды, состоящие из периодических квадратных цилиндров с прямоугольным шагом, для частот пульсации потока 20–64 Гц и пористостью в диапазоне 0,64–0,84. Подробные численные данные, представляющие осциллирующие двумерные изменения скорости и давления, были получены путем решения задачи Навье–Стокса с использованием вычислительной гидродинамики. Затем полученные числовые данные используются для расчета различных усредненных по объему показателей, свойства, которых будут использоваться в стандартном уравнении импульса, расширенном Дарси–Форхгеймером. Также отображены мгновенные и среднецикловые параметры. Результаты показали, что применение расширенного уравнения импульса Дарси–Форхгеймера с коэффициентами, представляющими устойчивый поток, к условиям пульсирующего потока является адекватным только при очень низком расходе и низкочастотных условиях и в противном случае некорректно. В пределах диапазона параметров, изученных в этом исследовании, средние по циклу пульсации потока были немного больше, чем проницаемость для стационарных потоков. Однако средние по циклу коэффициенты Форхгеймера для пульсирующих потоков зависят от частоты и значительно превышают коэффициенты Форхгеймера для стационарных потоков. Результаты также показали, что фазовые сдвиги скорости и давления чувствительны к среднему числу Рейнольдса при расходе. Фазовые сдвиги скорости и давления для потоков с низким средним числом Рейнольдса  $Re_m$ ,  $L = 0,11$ , были значительно больше, чем для потоков с высоким числом Рейнольдса  $Re_m$ ,  $L = 560$ . Однако фазовые сдвиги между скоростью и давлением для  $Re_m$ ,  $L = 560$  были в несколько раз больше, чем для случая  $Re_m$ ,  $L = 0,11$ .

Таким образом, полученные в ходе численных исследований данные вносят вклад в понимание физических механизмов, лежащих в основе нестационарных течений в пористых средах. Этот опыт может быть использован при проектировании и оптимизации широкого круга энергетических, технологических и других систем, включающих пористые материалы и структуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ju Y.L., Wang C., Zhou Y. Numerical simulation and experimental verification of the oscillating flow in pulse tube refrigerator // *Cryogenics*. – 1998. – Т. 38. – № 2. – С. 169–176.
2. Nam K., Jeong S. Experimental study on the regenerator under actual operating conditions // *AIP Conference Proceedings*. – American Institute of Physics, 2002. – Т. 613. – № 1. – С. 977–984.
3. Cha J.S. et al. Multi-dimensional flow effects in pulse tube refrigerators // *Cryogenics*. – 2006. – Т. 46. – № 9. – С. 658–665.
4. Wang W. et al. Influence of the water-cooled heat exchanger on the performance of a pulse tube refrigerator // *Applied Sciences*. – 2017. – Т. 7. – № 3. – С. 229.
5. Richardson R. N., Evans B. E. A review of pulse tube refrigeration // *International journal of refrigeration*. – 1997. – Т. 20. – № 5. – С. 367–373.
6. Seume J., Friedmann G., Simon T.W. Fluid mechanics experiments in oscillatory flow. Report. vol. 1, Final Report Minnesota Univ. Minneapolis. Dept. of Mechanical Engineering; 1992.
7. Chen S. et al. Numerical study on the heat transfer characteristics of oscillating flow in cryogenic regenerators // *Cryogenics*. – 2018. – Т. 96. – С. 99–107.
8. Ghafarian M., Mohebbi-Kalhari D., Sadegi J. Analysis of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with metal foam using computational fluid dynamics // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2013. – Vol. 66. – P. 42–50.
9. Dai Q., Yang L. LBM numerical study on oscillating flow and heat transfer in porous media // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 54, № 1. – P. 16–25.
10. Kim S.-M., Ghiaasiaan S.M. Numerical Modeling of Laminar Pulsating Flow in Porous Media // *Journal of Fluids Engineering*. – 2009. – Vol. 131, № 4. – P. 041203.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ К БАЗОВОМУ ТОПЛИВУ НА МЕХАНИЗМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНОГО РАСПАДА КОМПОЗИЦИОННЫХ КАПЕЛЬ

Д.И. Волокитин

Томский политехнический университет, ИШЭ, группа А4-13

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ

Добавление в жидкие топлива высокоэнергетических добавок применяют для повышения эффективности сжигания топливной композиции [1–3]. Наличие высокоэнергетических добавок повышает температуру горения и общее тепловыделение процесса. Добавки с высокой плотностью энергии часто используют в композициях с керосином, дизельным топливом, спиртами. Значения объемной и массовой плотностей энергии, выделяющейся при сгорании борсодержащей добавки, в сравнении с керосином представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения плотности энергии компонентов топлива

	Керосин	Бор
$Q_m$ , Дж/г	27	58
$Q_v$ , Дж/см <sup>3</sup>	34	136

Использование композиционных капель, содержащих несмешивающиеся водяное ядро и топливную оболочку, потенциально может положительно влиять на полноту использования энергии твердых добавок как за счет микро-взрыва, так и за счет использования образовавшегося водяного пара в роли катализатора реакции окисления [4].

Целью данной работы является исследование влияния борсодержащей добавки на механизмы и характеристики вторичного распада композиционных капель.

Экспериментальные исследования проводились на стенде, общая схема которого представлена на рис. 1.

Для создания высокотемпературной среды применялась система с известной по размерам и температурному распределению пламенной зоной над горелкой с жидким топливом (этиловый спирт, максимальная температура пламени около 1200 К). Неоднородные капли подвешивались на нихромовой проволоке сечением 0,2 мм (рис. 2).

При проведении экспериментов варьировалась высота размещения держателя с неоднородной каплей относительно нижней части горелки (металлического диска спиртовой горелки). В предварительных экспериментах на основе термодатных измерений получены значения температуры газовой смеси (пламени и продуктов сгорания) на разном удалении от основания горелки. Экспериментальные исследования проводились при температурах  $T_g \approx 650, 750, 900, 1050$  К. Измерение температуры газовой смеси в экспериментах обеспечивалось комплексом сбора данных

(погрешность измерений  $\pm 1$  К, частота регистрации 10 Hz) в комплекте с термопарой типа К (диапазон измерения температуры от 73 К до 1623 К, инерционность 0,1 с). Выбор размеров и положения области регистрации осуществлялись для наиболее полного захвата области протекания процесса микро-взрывной фрагментации каплей. Область регистрации дополнительно освещалась светодиодным прожектором (мощность 100 Вт, напряжение 220–240 В). Особенности и характеристики микро-взрывной фрагментации неоднородных капель регистрировались при помощи высокоскоростной видеокамеры (устанавливались параметры съемки: разрешение 512×512 пикс; частота съемки – 1000 кадров/с; время экспозиции – 1 мкс) совместно с объективом 200 мм.

В качестве основного топливного компонента композиционных капель использовался керосин марки ТС-1. Предварительно подготавливались двухкомпонентные топливные смеси, массовая доля высокоэнергетической добавки в которых составляла 0,5, 1, 5 %. Формирование неоднородных капель осуществлялось в два этапа. На первом этапе формировалась капля воды (водяное ядро) и подвешивалась на держатель. Затем формировалась внешняя топливная оболочка неоднородной капли, состоящая из предварительно подготовленной топливной смеси. Использовались дозаторы с диаметром сопла 0,3 мм. При формировании неоднородных капель обеспечивалось формирование внутренней границы раздела воды и топлива. После формирования неоднородной капли держатель перемещался в пламенную высокотемпературную зону с помощью автоматизированного координатного механизма.

Исследованные борсодержащие топливные композиции фрагментировали в режиме паффинга. При этом процесс паффинга характеризовался большим количеством последовательных стадий (не менее 10) отрыва вторичных фрагментов от родительской капли. В качестве основных отличительных (в сравнении с водотопливной композицией без борсодержащей добавки) особенностей фрагментации можно выделить следующие. При нагреве композици-

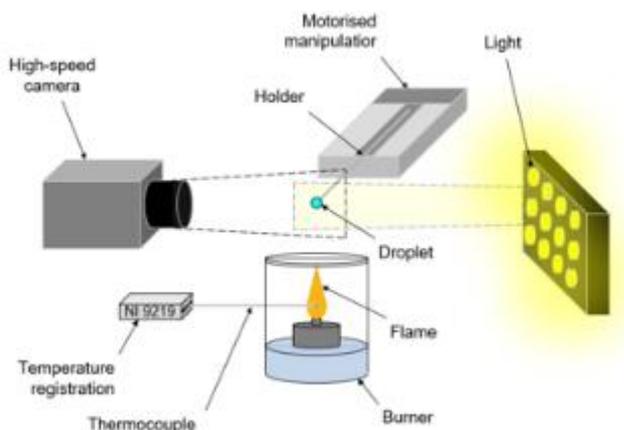


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

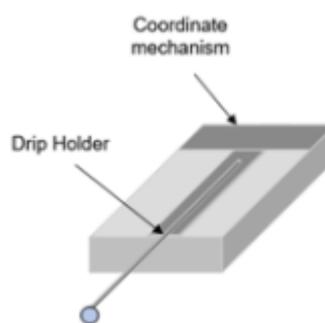


Рис. 2. Схема закрепления капли на держателе

онных капель с добавлением бора, в отличие от состава «Керосин 90 %+вода 10 %» не зарегистрировано формирование паровых пузырей. Отделение вторичных фрагментов от родительской капли происходило во всей окрестности ее внешней границы, в то время как капли без добавления бора фрагментировали в режиме паффинга с выбросом вторичных капель в виде цепочек или струй только в окрестности разрыва парового пузыря.

Число стадий фрагментации в режиме паффинга борсодержащих капель превышало аналогичную характеристику при фрагментации капель, не содержащих бор. При этом на последних этапах существования композиционные капли с борсодержащей добавкой фрагментировали в режиме паффинга практически непрерывно, и разделить последовательные стадии фрагментации не представлялось возможным. Вследствие непрерывного выброса вторичных фрагментов родительские капли начинали вращаться вокруг своей оси, что дополнительно усиливало эффект формирования равномерного облака вторичных фрагментов вокруг родительской капли.

Зажигание композиционных капель, содержащих бор, сопровождалось формированием более обширной относительно керосина без примесей зоны пламени. При этом цвет пламени также отличался от горения керосина за счет желто-зеленого свечения.

На рис. 3 приведены значения времени задержки распада композиционных капель исследованных составов. В качестве основных характеристик вторичной фрагментации регистрировались времена задержки распада  $\tau_{p/m}$  (время от начала нагрева до момента отделения от родительской капли первого вторичного фрагмента), времена существования капель  $\tau_h$  (время от начала нагрева до полного исчезновения капли).

Фрагментация борсодержащих капель во всем экспериментальном диапазоне температуры нагрева  $T_g$  начиналась быстрее относительно композиционных капель на базе керосина без добавок. Это связано с наличием и распределением по всему объему топливной оболочки композиционных борсодержащих капель твердых частиц и их агломератов, которые являлись центрами парообразования и интенсифицировали вторичную фрагментацию. Кроме того, твердые частицы за счет поглощения теплового излучения интенсивно прогревались, создавая дополнительные зоны локального перегрева во всей топливной оболочке. Этим объясняется формирование вторичных фрагментов во всей области вокруг поверхности родительской капли, в отличие от капель состава «Керосин/вода», фрагментация которых происходила только за счет испарения воды в центральной части капли и выброса фрагментов в области разрыва парового пузыря.

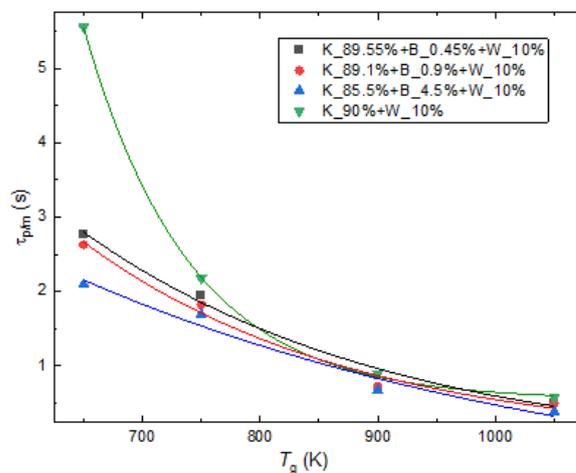


Рис. 3. Значения времени задержки вторичного распада композиционных капель при начальных размерах родительских капель  $D_{d0} \approx 1,6$  мм и разных температурах нагрева  $T_g$ .

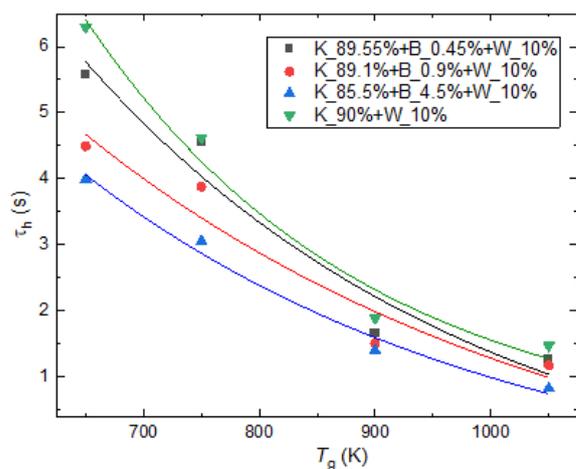


Рис. 4. Значения времени существования композиционных капель при начальных размерах родительских капель  $D_{d0} \approx 1,6$  мм и разных температурах нагрева  $T_g$ .

Рис. 4 иллюстрирует зависимости времен существования композиционных капель от температуры нагрева. Времена жизни борсодержащих композиционных капель также характеризовались пониженными значениями. При фрагментации борсодержащих капель регистрировалось большее число стадий и большее количество вторичных фрагментов, что сокращало время жизни родительских капель.

По результатам выполненных экспериментов можно сформулировать вывод, что наилучшие показатели вторичного распада среди исследованных составов соответствуют максимальной доле борсодержащей добавки (4,5 %). Составы с меньшими концентрациями борсодержащей добавки также характеризовались лучшими показателями эффективности вторичной фрагментации относительно состава без добавления борсодержащего вещества. Полученный результат позволяет сформулировать вывод о целесообразности использования борсодержащих жидких топлив в режиме вторичного теплового доизмельчения. Применение технологии микро-взрывного распада борсодержащих топливных составов с использованием воды в качестве низкокипящего компонента композиционных капель может повысить полноту использования энергии топлива за счет наличия в зоне окисления водяного пара и присутствующих в нем атомов кислорода.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 23-69-10006).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solomon Y., Grinstein D., Natan B. Dispersion of Boron Particles from a Burning Gel Droplet. – 2018. – V. 34. – P. 1586–1596. <https://doi.org/10.2514/1.B36872>.
2. Chen B., Shan S., Du L., Liu J., Yang Q. Introducing metal oxide as solid oxygen carrier for energy release enhancement of boron suspension fuel // Fuel. – 2023. – V. 351. – P. 128919. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.128919>.
3. Wang X., Shi E., Qi C., Yan X., Zhang Z., Yu J. Experimental study on aerosol explosion characteristics and flame propagation behavior of aluminum/ethanol nanofluid fuel // Fuel. – 2023. – V. 352. – P. 129022. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.129022>.
4. POjha.K., Karmakar S. Boron for liquid fuel Engines-A review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel, and combustion aspects // Prog. Aerosp. Sci. – 2018. – V. 100. – P. 18–45. <https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2018.05.003>.

# Секция 3

## Производство тепловой и электрической энергии

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗАМКНУТОЙ АТОМНОЙ ГТУ С ВОДОРОДНЫМ КОМПЛЕКСОМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Н.В. Стецов

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5091

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Увеличение интереса к высокотемпературным газовым реакторам (ВТГР) связано с их потенциальными возможностями в обеспечении высоких температур теплоносителя, что открывает новые горизонты для применения в энергетике, металлургии, нефтехимии и других энергоемких отраслях. В качестве одной из перспективных технологий при этом выделяется интеграция высокотемпературного газового реактора с системами высокотемпературного электролиза воды для производства водорода. Это особенно актуально для стран глобального юга, где появляются потребности в капиталоемких энергетических решениях.

В рамках проектирования маломощных станций (до 300 МВт), создание модульных установок выглядит оптимальным вариантом, так как они требуют меньших вложений, обладают высокой безопасностью и могут гибко интегрироваться в существующие производственные цепочки. Использование регенеративных циклов в газотурбинных установках позволяет значительно повысить их эффективность за счет возврата части теплоты отработавших газов к сжатому воздуху перед входом в реактор. Этот подход не только улучшает коэффициент полезного действия (КПД), но и снижает расход топлива, что имеет важное значение для снижения операционных затрат.

Повышение спроса на водород как альтернативный источник энергии к 2050 г. до 500 млн т в год подчеркивает необходимость разработки технологий, улучшающих процессы его производства с минимальным воздействием на окружающую среду. Реализация проектов, связанных с производством водорода с использованием атомной энергии, может стать значительным шагом в этом направлении [1].

При оценке эффективности работы газотурбинных установок одним из критических факторов является степень регенерации цикла [2, 3]. Однако увеличение регенерации может привести к возрастанию гидравлического сопротивления и, как следствие, снижению общей эффективности системы.

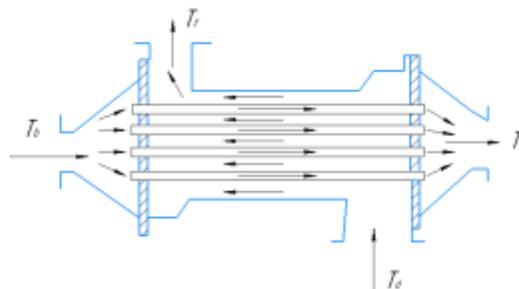


Рис. 1. Схема гелий-гелиевого регенератора

Таким образом, проведение вариантных расчетов для определения оптимальных параметров теплообменных аппаратов становится насущной задачей. Выбор трубной конструкции регенератора с кольцевым оребрением, направленный на интенсификацию теплообмена, может сыграть важную роль в повышении эффективности.

В работе [3] было показано, что сопротивление меняется от степени регенерации согласно формуле.

$$\xi_p = \frac{\beta_p \cdot \sigma}{1 - \sigma} \quad (1)$$

Для получения реальных величин было проведено 4 вариантных расчёта регенератора на основе соотношения уравнений тепловых балансов, вычисления коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи. Расчёт сопротивлений был произведён по методике [5, 6]. Характеристики оребрения трубного пучка представлены на рис. 2. Результаты вариантных проектных расчётов представлены в табл. 1.

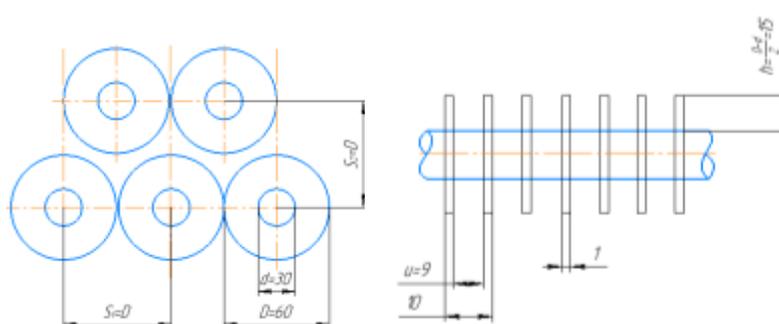


Рис. 2. Характеристики и компоновка трубного пучка

Таблица 1. Характеристики регенератора и физических величин для стороны высокого давления (в трубном пространстве)

№	$\sigma$	$Q_{\text{рег}}$ , МВт	$\Delta T$ , К	$G$ , кг/с	$w_1$ , м/с	$\Delta p$ , МПа	$l$ , м	$D$ , м	$\varepsilon$
1	0,70	120	490	79	10	0,017	7,9	2,9	2,7
2	0,80	150	449	86	5	0,107	10,5	4,4	2,4
3	0,85	167	427	90	5	0,387	14,4	4,6	3,2
4	0,90	185	407	95	3	0,714	23,1	6,1	3,8

Для значений степени регенерации 0,7–0,9 имеем возрастание потерь давления до значения 0,714 МПа. Это связано с увеличением гидравлического сопротивления, в частности, потерями на трение в следствие увеличения поверхности нагрева и существенного увеличения длины теплообменных трубок. Для степени регенерации 0,85 получили отношение длины трубок к диаметру трубной доски в 3,2, что говорит о компактности агрегата.

Далее необходимо сравнить теоретически-принятые сопротивления и реальные. На графике (рис. 3) представлены зависимости реального и теоретического сопротивления, носящие гиперболических характер в соответствии с формулой (1). Зависимости приведены в абсолютных величинах потерь давления, МПа.

Стоит отметить, что принятые потери в теоретическом расчёте работы [2], превысили реальные, что положительно скажется на коэффициенте полезного действия установки и коэффициенте использования теплоты топлива. Также стоит отметить, что значение оптимальной степени регенерации может быть уточнено в диапазоне от 0,8 до 0,85 с целью более точного определения габаритов и сопротивлений по трактам низкого и высокого давлений.

Для получения реальных значений КПД и КИГТ значения сопротивлений давлений были встроены в расчёт ГТУ. Результаты представлены в табл. 2.

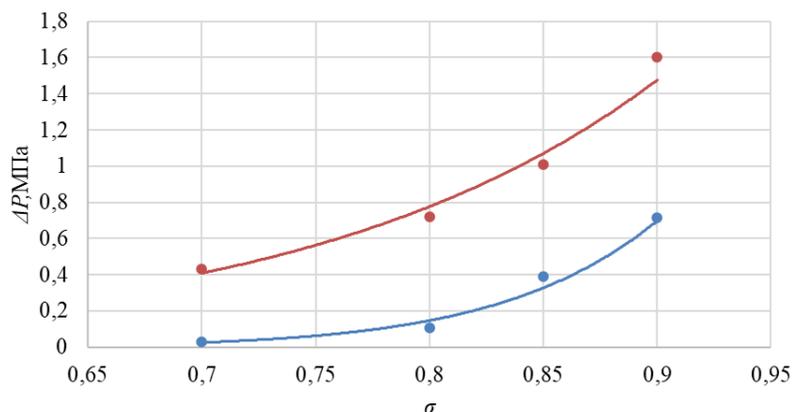


Рис. 3. График зависимости суммарных потерь давления от степени регенерации по двум трактам (красный – теоретические потери, синий – реальные)

Таблица 2. Характеристики реальной ГТУ

$\sigma$	$\Delta p$ , МПа	$H$	$G_{\text{тепл}}$	$N_z$	$G_{\text{пара}}$	$\eta_{\text{ГТУ}}$	КИТТ
0,7	0,017	601	78,6	47,3	10,6	0,297	0,445
0,8	0,107	601	85,9	51,7	11,6	0,333	0,485
0,85	0,387	601	90,2	54,2	12,2	0,354	0,509
0,9	0,714	601	94,8	57,1	12,9	0,378	0,531

Согласно [7] коэффициент полезного действия ГТУ может достигать 50 % по выработке электроэнергии и отпуску тепла на электролизную установку. Значение КИТТ в 0,509 для оптимальной степени регенерации говорит о том, что получено реальное значение показателя.

Таким образом в данной части работы рассмотрена реальная конструкция регенератора и исследована зависимость реального сопротивления от степени регенерации цикла. КИТТ энергоблока по отпуску теплоты на электролизную установку и выработку электроэнергии получился равным 0,509, что говорит о высокой эффективности работы цикла.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атомный водород. – [Электронный ресурс] – URL: <https://atomvestnik.ru/2022/12/26/atomnyj-vodorod/?ysclid> (дата обращения: 15.11.2024)
2. Антонова А.М., Воробьев А.В., Стецов Н.В. Анализ влияния управляемых параметров на эффективность замкнутой ГТУ с водородным комплексом // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Оренбург, 25–27 октября 2022 г. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2022. – С. 51–57. – EDN RVVXJH.
3. Стецов Н.В. Влияние изменения сопротивления регенератора на характеристики замкнутой атомной ГТУ с водородным комплексом // Бутаковские чтения : сборник статей III Всероссийской с международным участием молодежной конференции, 12–14 декабря 2023 г., Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2023. – С. 249–252.
4. Гельфенбейн Л.Г. Регенераторы газотурбинных установок. – Москва : Машгиз, 1963. – 179 с. : ил.; 22 см.
5. Руководящий документ по стандартизации методические указания тепловой и гидравлический расчёт теплообменного оборудования АЭС ОКСТУ 3103 Дата введения 1990-07-01 Информационные данные 1. Утвержден и введен в действие указанием Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения СССР от 27.09.89 N ВА-002-1/8374.
6. Петровский Ю.В., Фастовский В.Г. Современные эффективные теплообменники. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – 256 с. : ил.; 21 см.
7. Горюнова И.Ю., Ларионов И.Д. Г71 Регенераторы ГТУ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 80 с. ISBN 978-5-7996-2259-6

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМПЕРЕГРЕВА НА ПАРОГАЗОВЫХ ТЭС

Д.С. Чешуин, О.Ю. Ромашова

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова

Цель работы – анализ эффективности промежуточного перегрева пара на парогазовых ТЭС для выявления факторов, влияющих на эффективность его использования и технологических решений, позволяющих увеличить полезный эффект от применения промперегрева при различных режимах работы теплофикационных установок.

В работе решались следующие задачи:

- анализ влияния параметров ГТУ на необходимость использования промежуточного перегрева пара в паровом цикле ПГУ;
- оптимизация разделительного давления промперегрева в схемах одноконтурных ПГУ;
- выбор температуры промперегрева пара в теплофикационной ПГУ.

*Задача 1.* Оптимизация начального давления паросилового цикла одноконтурных ПГУ при различных температурах газов, поступающих в котел-утилизатор. Расчет процесса расширения пара в турбине с учетом влажности. Схема установки изображена на рис. 1. Исходные данные: температура газов за ГТУ  $t_{\Gamma} = 350, 400, 500, 600$  °С; расход газов из ГТУ  $G_{\Gamma} = 100$  кг/с; давление в деаэраторе  $p_{\text{д}} = 0,12$  МПа; давление в конденсаторе  $p_{\text{к}} = 3$  кПа.

Дополнительные исходные данные, принятые для расчета КУ: температурный напор пароперегревателя (ПЕ)  $\Delta t_{\text{пе}} = 20$  °С; температурный напор испарителя (И)  $\Delta t_{\text{и}} = 10$  °С; теплоемкость продуктов сгорания ГТУ  $c_p^{\Gamma} = 1,1$  кДж/кг; внутренний относительный КПД паровой турбины  $\eta_{oi} = 0,85$ ; Нагрев воды в деаэраторе  $\Delta t_{\text{д}} = 15$  °С; КПД механический и КПД генератора  $\eta_{\text{м}} = \eta_{\text{г}} = 0,98$  [1].

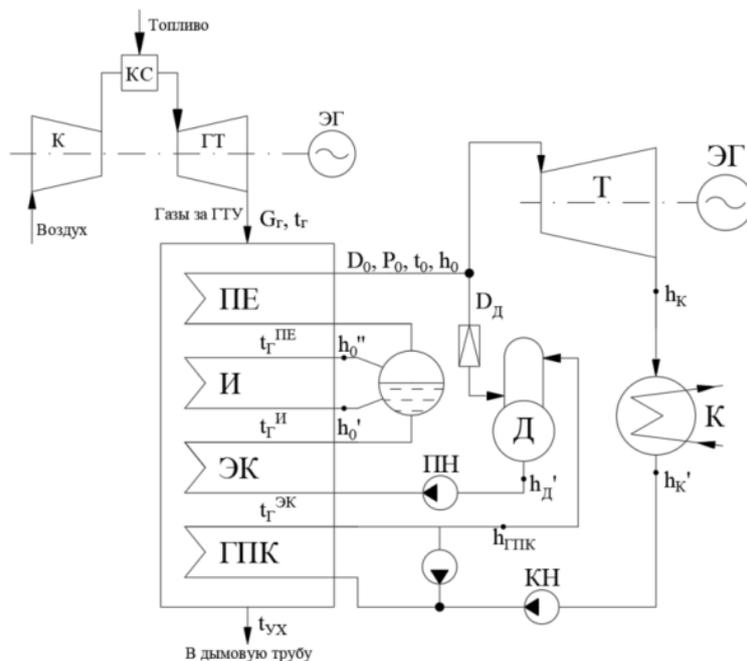


Рис. 1. Схема одноконтурной ПГУ

За критерий взята электрическая мощность, вырабатываемая генератором ПТУ  $N_{\text{э}}$ . Результаты расчетов приведены в виде графических зависимостей на рис. 2.

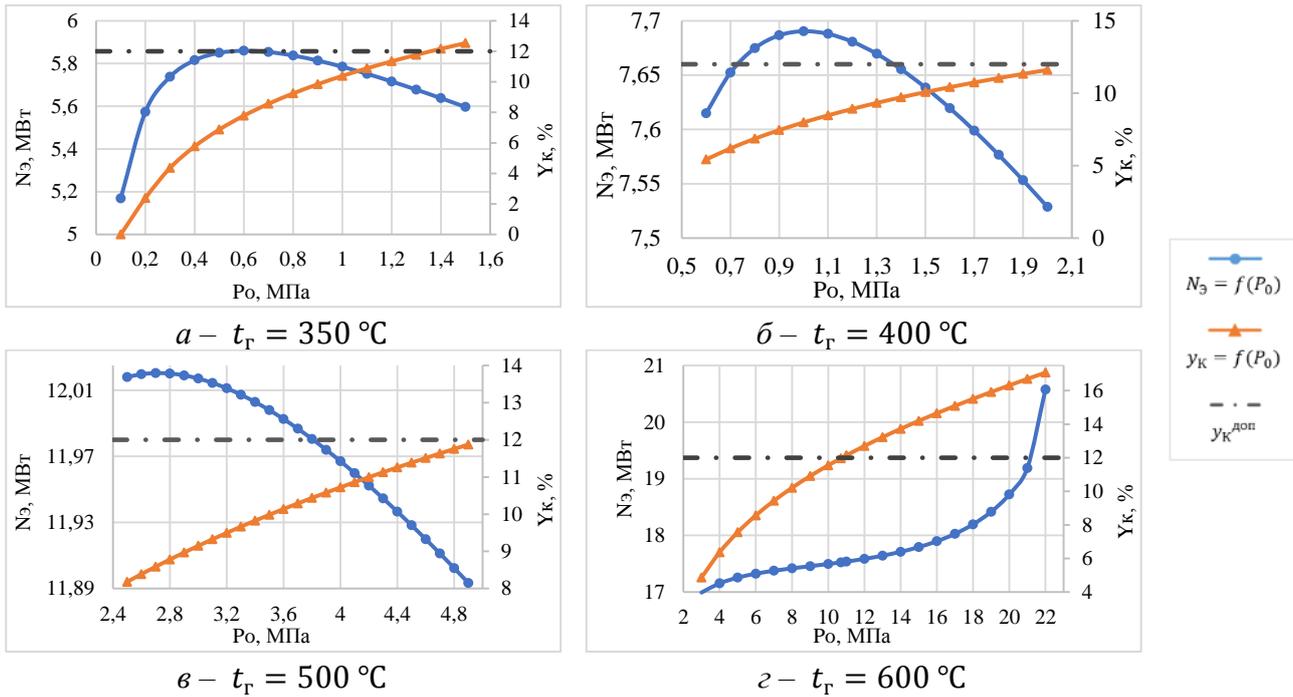


Рис. 2. Графики зависимости электрической мощности и конечной влажности от начального давления паросилового цикла ПГУ при различных температурах газов ( $P_к = 3$  кПа)

По графикам видно, что при температурах газов ГТУ 350–500 °C имеется точка экстремума функции  $N_э = f(P_0)$ , соответствующая оптимальному значению начального давления. При температуре газов 600 °C оптимальное начальное давление ограничивается допустимой влажностью в последних ступенях турбины. Таким образом следует вывод, что при температурах газов 600 °C и выше для повышения начального давления появляется необходимость применения промежуточного перегрева пара.

**Задача 2.** Оптимизация начального и разделительного давлений паросилового цикла одноконтурной ПГУ с промежуточным перегревом (ПП). В схемах рассматривается два способа установки ПП: параллельно первичному пароперегревателю (ПЕ) и параллельно экономайзеру, рис. 3 [2].

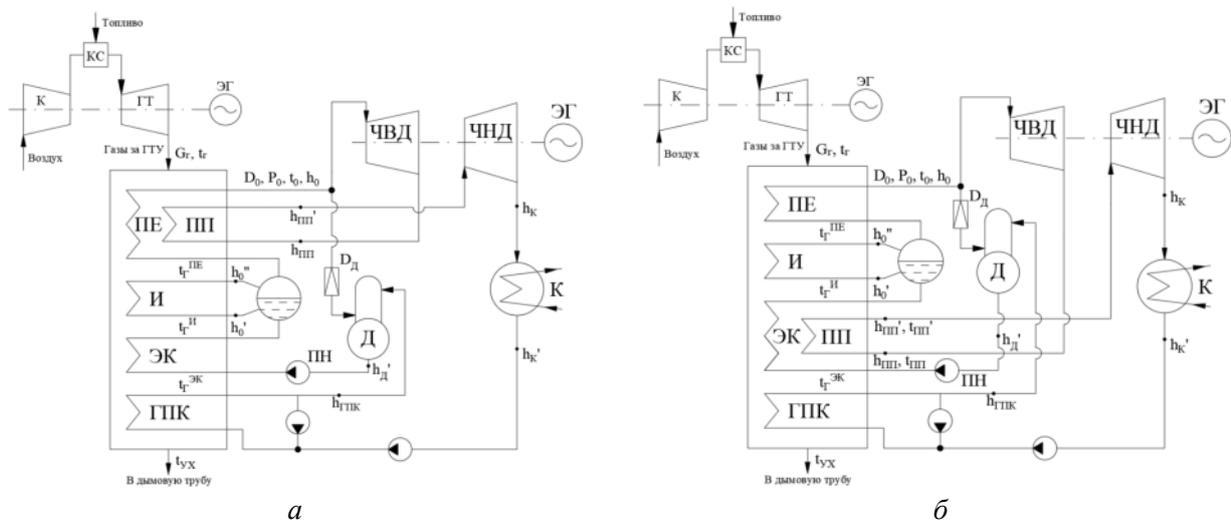


Рис. 3. Схемы одноконтурных ПГУ с промперегревом:  
а – параллельно первичному пароперегревателю, б – параллельно экономайзеру

Исходные данные: температура газов за ГТУ  $t_r = 600$  °С; расход газов из ГТУ  $G_r = 100$  кг/с; давление в деаэраторе  $p_d = 0,12$  МПа; давление в конденсаторе  $p_k = 3$  кПа; температурный напор пароперегревателей (ПЕ и ПП)  $\Delta t_{пе} = \Delta t_{пп} = 20$  °С; Остальное как в задаче 1.

Данная задача решалась с применением метода координатного спуска, пошаговое решение схемы с ПП параллельным ПЕ приведено в табл. 1.

Таблица 1. Пошаговое решение задачи по оптимизации начального и разделительного давлений в цикле ПТУ для схемы с ПП, включенным параллельно ПЕ

№ шага	Фиксируемая величина	Варьируемая величина	Результат итерации
Этап 1			
1.1	$p_{п.п}^{\text{фикс}} = 1$ МПа	$p_0^{\text{вар}} = 3 - 20$ МПа	$p_0^{\text{опт}} = 4,1$ МПа
1.2	$p_0^{\text{фикс}} = 4,1$ МПа	$p_{п.п}^{\text{вар}} = 0,1 - 4$ МПа	$p_{п.п}^{\text{опт}} = 0,8$ МПа
Этап 2			
2.1	$p_{п.п}^{\text{фикс}} = 0,8$ МПа	$p_0^{\text{вар}} = 3 - 5$ МПа	$p_0^{\text{опт}} = 3,8$ МПа
2.2	$p_0^{\text{фикс}} = 3,8$ МПа	$p_{п.п}^{\text{вар}} = 0,4 - 1$ МПа	$p_{п.п}^{\text{опт}} = 0,7$ МПа
Этап 3			
3.1	$p_{п.п}^{\text{фикс}} = 0,7$ МПа	$p_0^{\text{вар}} = 3 - 5$ МПа	$p_0^{\text{опт}} = 3,6$ МПа
3.2	$p_0^{\text{фикс}} = 3,6$ МПа	$p_{п.п}^{\text{вар}} = 0,4 - 1$ МПа	$p_{п.п}^{\text{опт}} = 0,7$ МПа

Аналогично была рассчитана схема с промперегревом, расположенным параллельно экономайзеру. Результаты оптимизации и показатели обеих схем приведены в таблице 2. Здесь же приведены параметры аналогичной схемы без промперегрева.

Таблица 2. Результаты оптимизации  $P_0$  и  $P_{п.п}$  одноконтурной ПГУ с ПП

Параметр/показатель	Ед. измерения	Без ПП	с ПП    ПЕ	с ПП    ЭК
$P_0^{\text{опт}}$	МПа	10,7	3,6	20
$P_{п.п}^{\text{опт}}$	МПа	–	0,7	0,2
$D_0$	кг/с	14,1	12,5	14,9
$N_э$	МВт	17,5	17,73	20,9
$t_r^{yx}$	°С	291	153	94

По полученным результатам видно, что наиболее эффективным расположением промежуточного пароперегревателя является его установка параллельно экономайзеру.

**Задача 3.** Рассматривалась парогазовая ТЭЦ с промперегревом в режиме работы по тепловому графику. Исследовалось влияние температуры промперегрева на экономичность при следующих исходных данных: температура газов за ГТУ  $t_r = 600$  °С; расход газов из ГТУ  $G_r = 1010$  кг/с; давление теплофикационного отбора  $p_T = 0,12$  МПа; давление в деаэраторе  $p_d = 0,12$  МПа; давление в конденсаторе  $p_k = 4,5$  кПа. Дополнительные данные как в задаче 2.

Температура ПП менялась от 278 до 120 °С путем байпасирования газов помимо промежуточного пароперегревателя. Схема установки изображена на рис. 4, в ней параллельно ЭК и ПП включен газовый сетевой подогреватель.

В результате оптимизации начального и разделительного давлений было получено: начальное давление  $p_0 = 20$  МПа; разделительное давление  $p_{п.п} = 0,2$  МПа. Оптимизация значений  $p_0$  и  $p_{п.п}$  проводилась для конденсационного режима работы ПГУ.

Для оценки вентиляционного пропуска ЧНД использовались экспериментальные зависимости  $G_k^{min} = f(h_{ЧНД}^{вх})$  турбины К-200-130 ЛМЗ, переведенной для работы с регулируемым отбором пара на теплофикацию.

Для теплофикационных турбоустановок с промежуточным перегревом характерна более высокая температура пара, поступающего в ЧНД, по сравнению с установками без ПП. В результате чего требуется увеличивать вентиляционный пропуск для охлаждения последних ступеней турбины в режиме работы по тепловому графику, что ведет к снижению расхода пара в отбор и увеличению потерь теплоты в конденсаторе [3].

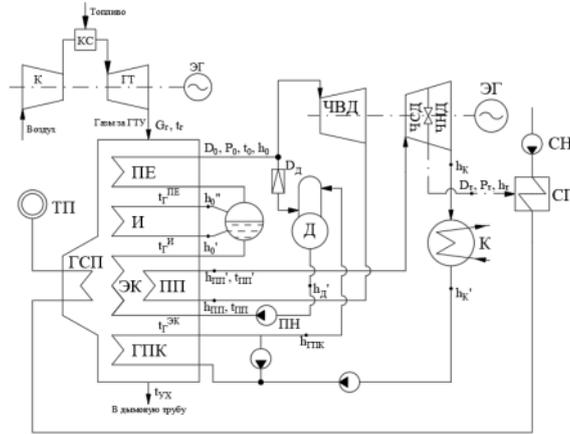


Рис. 4. Схема одноконтурной ПГУ-ТЭЦ с ПП и ГСП, включенными параллельно экономайзеру

В результате исследования влияния температуры промпрегрева на показатели теплофикационной ПГУ в режиме работы по тепловому графику были получены зависимости, представленные на рис. 5–8.

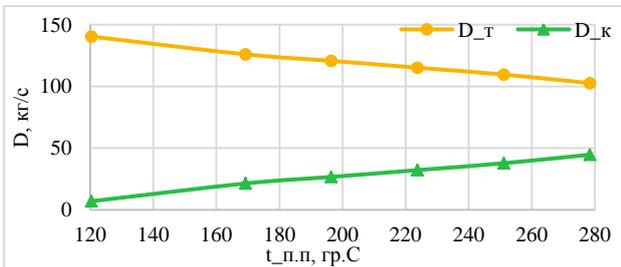


Рис. 5. График зависимостей  $D_K$  и  $D_T$  от  $t_{п.п.}$

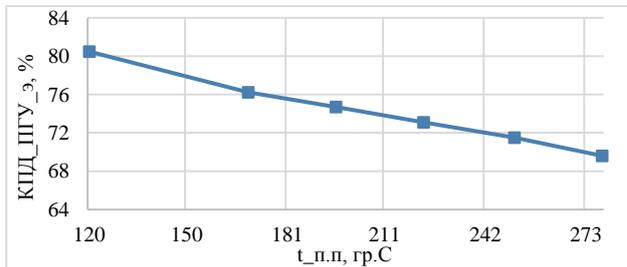


Рис. 6. График зависимости КПД ПГУ по производству ЭЭ от  $t_{п.п.}$

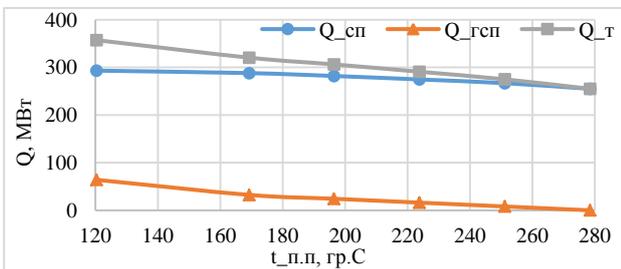


Рис. 7. График зависимостей отпуска тепловой энергии от  $t_{п.п.}$

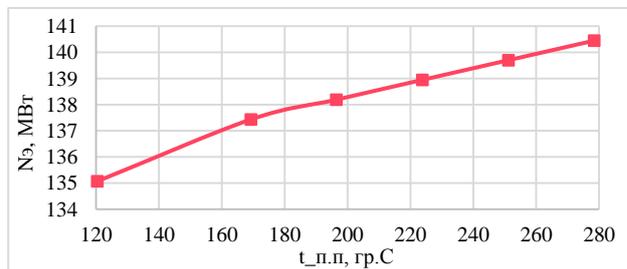


Рис. 8. График зависимости электрической мощности ПТУ от  $t_{п.п.}$

При подключении теплофикации промежуточный перегрев снижает эффективность парогазовой установки из-за увеличения вентиляционного пропуска в конденсатор, поэтому следует регулировать температуру промежуточного перегрева в сторону ее уменьшения вплоть до полного отключения ПП и перенаправлении газов в ГСП, такая схема показывает наибольшую экономичность, так как отпускается максимум тепловой энергии потребителю.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 646 с.: ил.
2. Гринчук А.С. Повышение эффективности утилизационных ПГУ за счет применения промежуточного перегрева пара // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2008. – № 5.
3. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.: ил.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОЖИГАНИЯ В КОТЛАХ-УТИЛИЗАТОРАХ ПГУ-ТЭЦ

**А.А. Бенедиктов, О.Ю. Ромашова**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ31*

Использование комбинации парового и газового циклов позволяет достигать одного из самых высоких КПД по выработке электроэнергии. Также известно, что теплофикационный режим работы турбины позволяет повысить эффективность установки относительно конденсационного режима [1]. Дожигание, в свою очередь, не всегда имеет однозначно положительный эффект для тепловой экономичности установки и используется для разных целей.

Исследование направлено на поиск оптимального решения в теплофикационных ПГУ.

Согласно литературным источникам, использование дожигания оправдано в следующих случаях [2, с. 46]:

- повышение температуры выхлопных газов у ГТУ с низкотемпературными уходящими газами для уменьшения эрозийного износа последних ступеней ПТ;
- поддержание параметров острого пара из-за сезонного снижения параметров за ГТУ;
- в целях дополнительного нагрева сетевой воды или получения пара для производственных нужд;
- в целях получения прибыли от ценовой разницы на электроэнергию в течение суток.

В зависимости от схемы отпуска теплоты ПГУ-ТЭЦ можно разделить на два типа. В первом случае отпуск базовой тепловой нагрузки осуществляется в сетевой установке, питаемой паром из отборов теплофикационной турбины. Пик потребления может быть обеспечен пиковыми сетевыми подогревателями, запитанными паром КУ или пиковыми водогрейными котлами.

Во втором случае используются одноконтурные КУ с газовыми подогревателями сетевой воды (ГПСВ). Пар, как и в первом типе, направляется из КУ в теплофикационную паровую турбину. Но в отличие от первого типа ГПСВ нагревает воду параллельно теплофикационной установке паровой турбины. В данном случае пик потребления тепловой нагрузки обеспечивается дожиганием топлива КУ или также пиковыми водогрейными котлами.

В рамках исследования эффективности дожигания необходимо решать следующие задачи:

- анализ вариантов установки дожигания в одноконтурной ПГУ на номинальном режиме;
- анализ варианта установки дожигания в двухконтурной ПГУ на номинальном режиме;
- оптимизация параметров ПГУ;
- выбор оптимального коэффициента теплофикации;
- расчёт ПГУ на переменный режим с целью определения годовых показателей.

В рамках данной работы выполнены исследования по выбору места установки дожигающего устройства для одно- и двухконтурной ПГУ.

Исходные данные. За прототип ПГУ с одноконтурным КУ выбрана схема ПГУ, схема КУ которой представлена на рис. 1, где роль паровой турбины выполняет Т-22/28-2,8 (рис. 2). Данная турбина предназначена для работы в составе одноконтурной ПГУ-75. В качестве газовой турбины принята ГТЭ-65 производства «Силовые машины». Мощность базовая – 61,5 МВт, мощность пиковая – 65 МВт, температура газов перед турбиной 1280 °С, температура газов на срезе выхлопного патрубка – 555 °С, расход газа на выходе из ГТУ – 184 кг/с, КПД на клеммах генератора – 35,2 %, степень повышения давления – 15. В качестве топлива используем стандартное углеводородное топливо (85 % углерода и 15 % водорода). Коэффициент избытка воздуха принимаем равным 2,5. Параметры воздуха и продуктов сгорания приняты согласно [3, табл. 12.5].

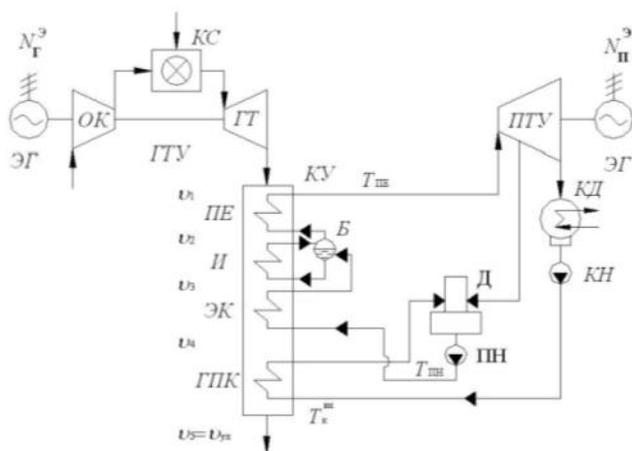


Рис. 9. Схема ПГУ-75

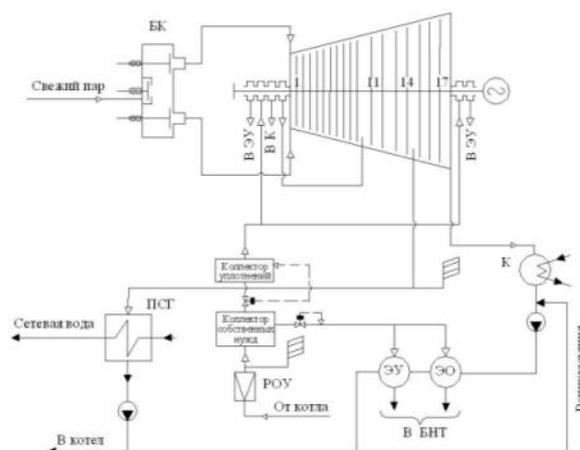


Рис. 10. Схема Т-22/28-2,8

За прототип ПГУ с двухконтурным КУ взята ПГУ-230, схема которой представлена на рис. 3. В качестве ГТУ здесь выбрана ГТЭ-160 производства «Силовые машины». Мощность на клеммах генератора – 157 МВт, температура газов перед турбиной 1070 °С, температура газов на срезе выхлопного патрубка – 537 °С, расход газа на выходе из ГТУ – 504 кг/с, КПД на клеммах генератора – 34,4 %, степень повышения давления – 11,1. При проведении расчета принимаем температурный напор в пароперегревателях  $\Delta t_{\text{пр}} = 30$  °С; температурный перепад в испарителях  $\Delta t_{\text{исп}} = 10$  °С; недогрев воды экономайзера до температуры насыщения 10 °С.

Выбор наилучшего места установки дожигающего устройства выполняется при изменении температуры газов за счет дожигания. Для схемы с дожиганием перед ПЕ выполняются варианты расчеты при увеличении температуры до 750 °С [4, с. 32] с шагом 25 °С, значения теплоты дожигания  $Q_{\text{дож}}$  фиксируются и затем используются при расчете показателей в других вариантах установки дожигающих устройств. Для всех мест оставляем только вариант с наибольшим КПД ПГУ (соответствует определенному значению  $Q_{\text{дож}}$ ), учитывая, что температура уходящих газов не должна опускаться ниже 100 °С, чтобы избежать конденсации в рамках дымовой трубы.

Таблица 5. Сравнение мест установки дожигания в одноконтурном КУ

Место дожигания	$D_0, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$N_{\text{эпгу}}, \text{МВт}$	$Q_{\text{т}}, \text{МВт}$	$\eta_{\text{эпгу}}$	$\eta_{\text{эпгу}}$	$\theta_{\text{ух}}, \text{°С}$	$Q_{\text{дож}}, \text{МВт}$
Нет	29,3	17,3	68	0,1959	0,4477	127	0
Перед ПЕ	33	18,3	72	0,1854	0,4446	120	5,3
Перед И	36	21,2	83,5	0,1961	0,4538	100,7	14,9
Перед ЭК	31,7	18,7	68	0,1959	0,4416	154,9	5,3
Перед ГПК	29,3	17,3	68	0,2358	0,4477	204,3	14,9

Из табл. 1 видно, что наибольший эффект по тепловой экономичности дает установка дожигающего устройства перед испарителем, так как в этом случае в первую очередь растёт количество пара, работающего в турбине. В местах перед ПЕ и перед ЭК установка дожига не является целесообразной, так как КПД возрастают при уменьшении дожига, достигая максимума в точке с его отсутствием.

В результате расчёта двухконтурного КУ были получены результаты для работы установки как в теплофикационном режиме, так и в конденсационном (табл. 2 и 3).

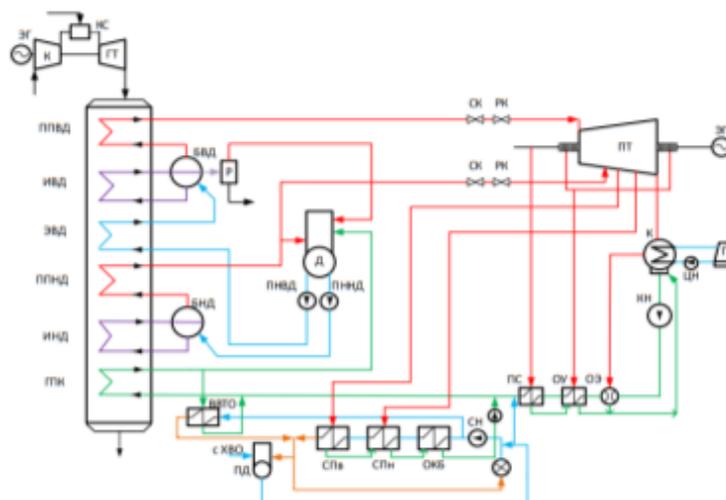


Рис. 11. Схема ПГУ-230

Таблица 6. Параметры двухконтурного КУ не зависящие от режима

Место дожига	$D_{вд}, \frac{кг}{с}$	$D_{нд}, \frac{кг}{с}$	$Q_T, МВт$	$\theta_{ух}, ^\circ C$
Нет	60,3	15,1	162,8	119,9
Перед ППВД	70,63	12,48	180,2	114,4
Перед ИВД	74,94	11,35	187,4	112,2
Перед ЭКВД	60,28	27,9	191,3	110,8
Перед ППНД	60,28	27,9	191,3	110,8
Перед ИНД	60,28	29,53	194,9	109,7

Таблица 7. Сравнение мест установки дожига в двухконтурном КУ

Место дожига	Т режим				К режим			
	$N_{ПТУ}, МВт$	$N_{ПТУ}, МВт$	$\eta_{ПТУ}$	$\eta_{ПГУ}$	$N_{ПТУ}, МВт$	$N_{ПТУ}, МВт$	$\eta_{ПТУ}$	$\eta_{ПГУ}$
Нет	60,2	214,6	0,7872	0,7311	82,7	237,1	0,3544	0,5194
Перед ППВД	77,6	232	0,8135	0,8398	100,2	254,6	0,3725	0,5207
Перед ИВД	75,6	230	0,8447	0,8551	98,3	252,7	0,3642	0,5168
Перед ЭКВД	58,1	212,6	0,6726	0,8017	89,8	244,2	0,3317	0,4994
Перед ППНД	58,1	212,6	0,733	0,8017	89,8	244,2	0,3317	0,4994
Перед ИНД	59,4	213,8	0,7101	0,8176	91,9	246,4	0,3391	0,5039

## Выводы

Для ПГУ с одноконтурным КУ наиболее оправданным является установка дожига перед испарителем. Также при замене ГПК на ГПСВ дожигание после ЭК будет оправданным.

Для ПГУ с двухконтурным КУ в режиме работы по тепловому графику наибольший прирост КПД будет давать установка дожига перед испарителем высокого давления, при работе в конденсационном режиме наибольший прирост КПД даст установка перед пароперегревателем высокого давления. Окончательный выбор места установки дожигающего устройства на ПГУ-ТЭЦ может быть выполнен на основе исследования годовых показателей работы установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березинец П.А. Обоснование целесообразности реконструкции котельных и ТЭЦ с использованием газотурбинных установок // Новости теплоснабжения. – 2006. – № 6.

2. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки «Энергетическое машиностроение» и «Теплоэнергетика и теплотехника». – Москва : Издательский дом МЭИ, 2013. – 646 с. : ил., цв. ил., табл.; ISBN 978-5-383-00721-1
3. Расчет показателей тепловых схем и элементов парогазовых и газотурбинных установок электростанций: учебное пособие / С.В. Цанев, В.Д. Буров, С.Н. Дорофеев и др.; под ред. В.В. Чиждова. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 72 с.
4. Култышев А.Ю., Голошумова В.Н., Алешина А.С. Парогазовые установки и особенности паровых турбин для ПГУ. – СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – 163 с. – ISBN 978-5-7422-7740-8. – EDN CZGUGM.

## **ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ БЕЛОЯРСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ**

**В.С. Салюков, Н.М. Космынина**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, группа 5А11*

Научный руководитель: Н.М. Космынина, к.т.н., доцент

История Белоярской атомной электростанции (АЭС) на Урале, начавшаяся в середине 1950-х гг., отражает масштабный путь развития ядерной энергетики в СССР и России. Построенная по инициативе И.В. Курчатова и под руководством Минсредмаша СССР станция стала местом для апробации новейших технологических решений и создания реакторов различных типов, в том числе уникальных быстрых реакторов с натриевым теплоносителем.

Первоначально предполагалось использование реакторов АМБ (Атом Мирный Большой) мощностью до 200 МВт. Выдача первого тока энергоблоком № 1 с реактором АМБ-100 в 1964 г. и опыт эксплуатации показал ряд проблем. Кроме того, разгерметизация топливных элементов и конструкционные сложности со временем потребовали досрочного закрытия этих реакторов.

Ключевым этапом в развитии станции стало строительство в 1968 году энергоблока № 3 с реактором на быстрых нейтронах БН-600, который, будучи первым в мире блоком такого масштаба, на практике подтвердил возможность эффективного использования быстрых реакторов в энергетике. БН-600, запущенный в 1980 г., применил трехконтурную систему охлаждения и пассивные системы безопасности, что обеспечило его долгую и безопасную эксплуатацию.

В начале 1990-х гг. в условиях новых требований безопасности и экономических трудностей разрабатывался проект энергоблока № 4 с реактором БН-800, завершённый в 2015 г. БН-800 стал крупнейшим промышленным реактором на быстрых нейтронах, а его конструкция включает дополнительные пассивные системы безопасности, позволяющие реактору автоматически снижать реактивность при аварийных ситуациях.

### **Описание процессов**

Натрий первого контура, нагретый в реакторе до 547 °С, распределяется на три потока и подаётся в промежуточные теплообменники, где передаёт тепло натрию второго контура, охлаждаясь при этом до 354 °С. Затем охлаждённый натрий первого контура поступает во всасывающие полости насосов ГЦН-1, откуда снова подаётся в активную зону реактора.

Холодный натрий второго контура забирается насосами ГЦН-2 из буферных баков натрия (ББН) и подаётся в промежуточные теплообменники, где нагревается до 505 °С. Затем горячий натрий второго контура поступает в парогенераторы, сначала в пароперегревательные модули, а затем через переливные патрубки (ПП) – в испарительные модули. Охладившись в парогенераторе до 309 °С, натрий второго контура возвращается в ББН.

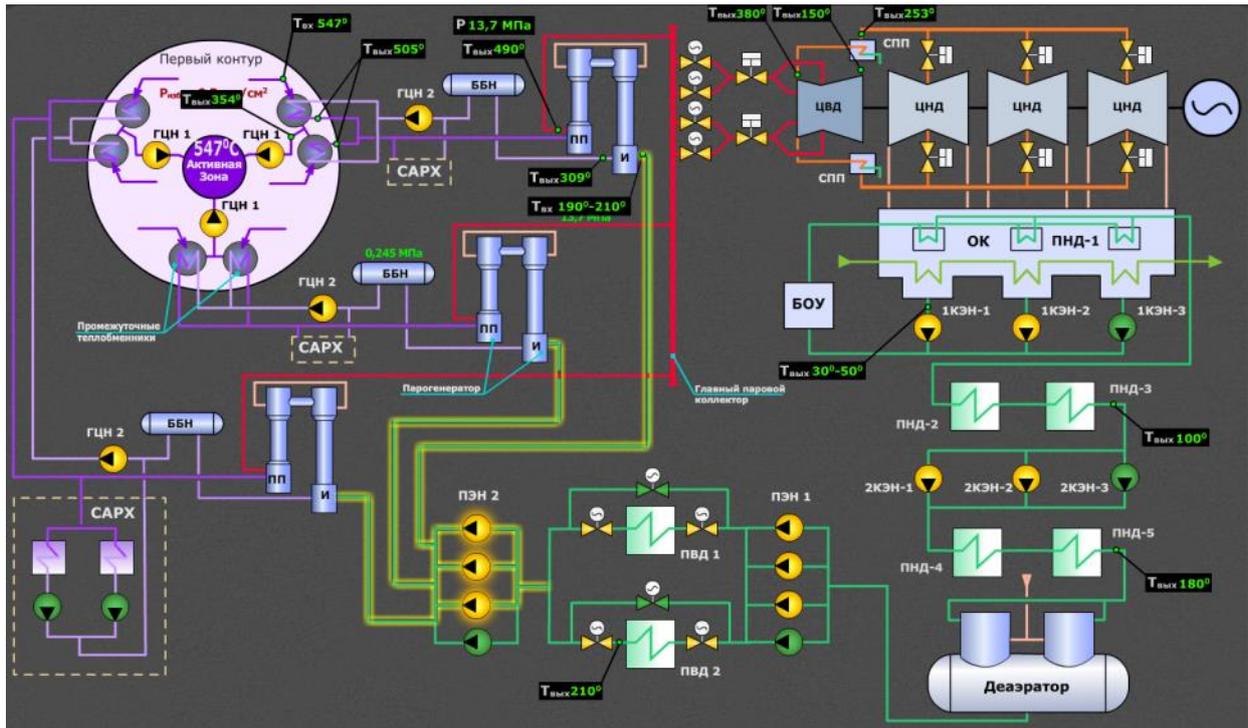


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема энергоблока с реактором типа БН-800

В каждой петле второго контура параллельно парогенераторам подключена система аварийного расхолаживания (САРХ), которая предназначена для отвода тепла в воздушную среду при невозможности использования парогенераторов или полном обесточивании энергоблока. Система регенерации высокого давления включает две ветви, каждая из которых снабжена байпасной линией. Это позволяет в аварийных ситуациях отключить одну или обе ветви подогревателей высокого давления (ПВД), обеспечивая гибкость и безопасность работы системы.

После прохода через подогреватели высокого давления питательная вода подаётся основными питательными насосами (ПЭН-2) непосредственно в парогенераторы. Расход питательной воды на каждый парогенератор регулируется в зависимости от мощности энергоблока, чтобы поддерживать оптимальные условия теплопередачи. Этот процесс контролируется узлами питания с регуляторами, которые настраивают подачу питательной воды в зависимости от температуры натрия второго контура на входе в парогенератор, поддерживая необходимую производительность энергоблока.

Для предотвращения перегрева системы, в случае аварийной ситуации или необходимости временного уменьшения нагрузки, в схему введены системы быстрого перепуска пара (БРОУ-К) и паросбросные устройства. Они позволяют оперативно перенаправить пар в основной конденсатор, исключая его попадание в турбину. Это решение снижает риск термического перенапряжения оборудования и обеспечивает надежность работы всего энергоблока.

В результате такой многоступенчатой системы регенерации, теплообмен и охлаждение в контурах обеспечивают эффективное и экономичное функционирование энергоблока, поддерживая стабильную подачу тепловой и электрической энергии.

### Перспективы

Перспективы Белоярской атомной электростанции (АЭС) в свете глобальных тенденций к увеличению доли ядерной энергетики в энергетических системах стран для снижения углеродных выбросов и повышения устойчивости энергетических сетей. Также следует отметить следующее.

Развитие технологий быстрых реакторов: Белоярская АЭС является одной из немногих станций в мире, имеющих опыт эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах. Это создает возможности для дальнейших исследований и внедрения новых технологий, таких как реакторы на быстрых нейтронах нового поколения, которые могут повысить эффективность использования ядерного топлива и снизить количество ядерных отходов.

Проекты по замкнутому топливному циклу: Белоярская АЭС активно занимается разработкой реакторов для замкнутого топливного цикла, что позволяет повторно использовать отработанное ядерное топливо и значительно сокращать объем радиоактивных отходов. Это делает ядерную энергетику более устойчивой и экологически чистой.

Совершенствование систем безопасности: Существующие и новые блоки АЭС продолжают оснащаться передовыми системами безопасности, которые соответствуют актуальным международным стандартам. Это может повысить доверие общественности к ядерной энергетике и улучшить её имидж.

Исследования и инновации: В рамках Белоярской АЭС ведутся исследования в области новых материалов, технологий переработки и управления отходами, что может привести к созданию более эффективных и безопасных ядерных реакторов.

Увеличение доли ядерной энергетики в стране и за рубежом: В условиях сокращения углеродных выбросов на фоне климатических изменений ядерная энергия приобретает особую значимость. Белоярская АЭС может сыграть ключевую роль в стратегиях по электроэнергетическому обеспечению как в России, так и в странах, рассматривающих возможность развития ядерной энергетики.

Международное сотрудничество: Белоярская АЭС может стать площадкой для международных проектов и научных исследований, что даст возможность обмена опытом и технологическими решениями с другими странами.

В общем, Белоярская АЭС имеет потенциал для продолжения своего развития как ключевого элемента ядерной энергетики России и международного сообщества. С учетом динамики технологий и меняющихся условий в энергетическом рынке, ее вклад в будущее энергетики будет продолжать оставаться значительным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Белоярской АЭС. – URL: [https://www.rosenergoatom.ru/stations\\_projects/sayt-beloyarskoy-aes/](https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-beloyarskoy-aes/)
2. Сайт института атомной энергии им. И.В. Курчатова. – URL: <http://nrcki.ru>

## VALIDATION OF SAFETY PARAMETERS OF VVER-1200 USING PCTTRAN SIMULATOR

C.J. Odi

*Tomsk Polytechnic University, School of Nuclear Science and Engineering, Group A2-43i*

Scientific Supervisor: A.G. Korotkikh, Professor at Butakov Research Center, TPU

The VVER-1200 is a pressurized light water reactor that operates at a nominal capacity of 3200 MW<sub>th</sub> (1200 MWe). The core is made up of 163 fuel assemblies in a triangular array with an assembly lattice pitch of 23.5 cm. Each fuel assembly of a typical VVER-1200 reactor consists of 331 rods of which 312 are fuel rods, 18 are control rod guide tubes and 1 central rod, all packed in triangular lattice with a rod to rod pitch of 12.75 mm. The fuel rods contain ceramic fuel of Uranium Oxide (UO<sub>2</sub>) pellets, with a cladding material of 98.97 % Zr, 1 % Nb, 0.03 % Hf and an

annular central hole. Some of the important thermal and geometrical specifications of the core are given in [1–4].

According to Micro-Simulation Technology [5], developers of the PCTran simulator, the Russian VVER-1200 (AES-2006) is the variant currently available for export. It is a development of the VVER-1000, with a higher power output of around 1200 MWe (gross) and improved passive safety features. The preliminary safety analysis report (PSAR) for model 392M, which was under development at Novovoronezh NPP-II as at then, was used to create and benchmark the PCTran simulator. Some of the completed cases that have been conducted for benchmark using the PSAR are; the false closing of turbine stop valve, the fast actuation shutoff valve (FASV) false closing of steam generator (SG) 2, the four main coolant pumps (MCPs) loss of power, the steam generator tube rupture and total loss of feed-water, amongst others. The graphical user interface of the VVER-1200 PCTran simulator is shown in Fig. 1.

For pellets with central cavity ( $\delta_0 \neq 0$ ), the centerline temperature is given as;

$$T_{cen}(R_0, z) = T_{fuel, surf}(R_0, z) + \frac{0,94 \cdot q'_l(R_0, z)}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{pel}} \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot \delta_0^2}{d_{pel}^2 - \delta_0^2} \cdot \ln \frac{d_{pel}}{\delta_0} \right) \quad (1)$$

Where is  $\delta_0$  is diameter of the hole in the fuel pellet, m;  $d_{pel}$  is fuel pellet outer diameter, m;  $\lambda_{pel}$  is thermal conductivity of the fuel pellets material, W/(m·K).

Based on the wide range of parameters for the EPRI CHF correlation as seen in [2, 6–8], we will employ it to evaluate the DNB and MDNBR for this calculation. The mass flux, local heat flux and equilibrium quality used for the CHF prediction were evaluated based on the geometrical and thermal configuration of VVER-1200.

$$q''_{CHF}(x_{eq}(z), x_{eq, in}, G, p, q''(z)) = \frac{A f_a - x_{eq, in}}{B f_b f_{grid} f_{NU} + \left( \frac{x_{eq}(z) - x_{eq, in}}{q''(z)} \right)} \quad (2)$$

$$A = 0.5328 \left( \frac{p}{p_{crit}} \right)^{0.1212} \cdot G \left( -0.3040 - 0.3285 \left( \frac{p}{p_{crit}} \right) \right)$$

$$B = 1.6151 \left( \frac{p}{p_{crit}} \right)^{1.4066} \cdot G \left( 0.4843 - 2.0749 \left( \frac{p}{p_{crit}} \right) \right)$$

$$f_a = G^{0.1}; f_b = 1.183G^{0.1}; f_{grid} = 1.3 - 0.3K_{grid}$$

$$f_{NU} = 1 + \frac{1 - \Psi}{1 + G}; \Psi = \frac{1}{H_0} \int_0^{H_0} \frac{q''(z)}{q''} dz$$

Where  $\Psi$  is the heat flux non-uniform factor  $f_a$  and  $f_b$  are factors due to cold wall effect,  $f_{grad}$  is the factor due to grid spacers effect,  $f_{NU}$  is the factor due to non-uniform axial heat flux profile,  $x_{eq}$  is equilibrium quality,  $p$  is coolant pressure and  $p_{crit}$  is critical pressure of coolant.

In this calculation, we equate the factors to 1 by assuming that the cold wall, grid spacers and heat flux non-uniform effects are negligible;

$$f_a = 1; f_b = 1; f_{grid} = 1; f_{NU} = 1$$

The correlation unit is as shown  $q''_{CHF} \left( \frac{BTU}{ft^2 hr} \right); G \left( \frac{lbm}{ft^2 hr} \right)$ , the necessary conversion was done to change the units to S.I units.

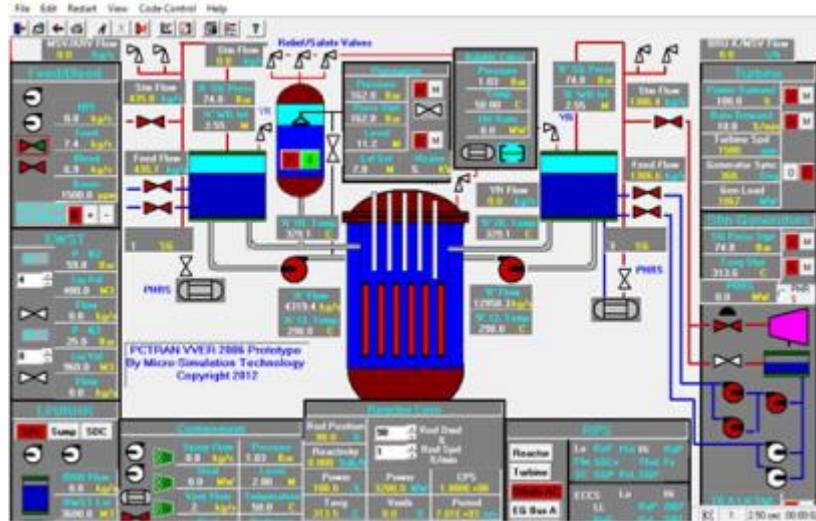


Fig. 1. VVER-1200 PCTran graphical user interface

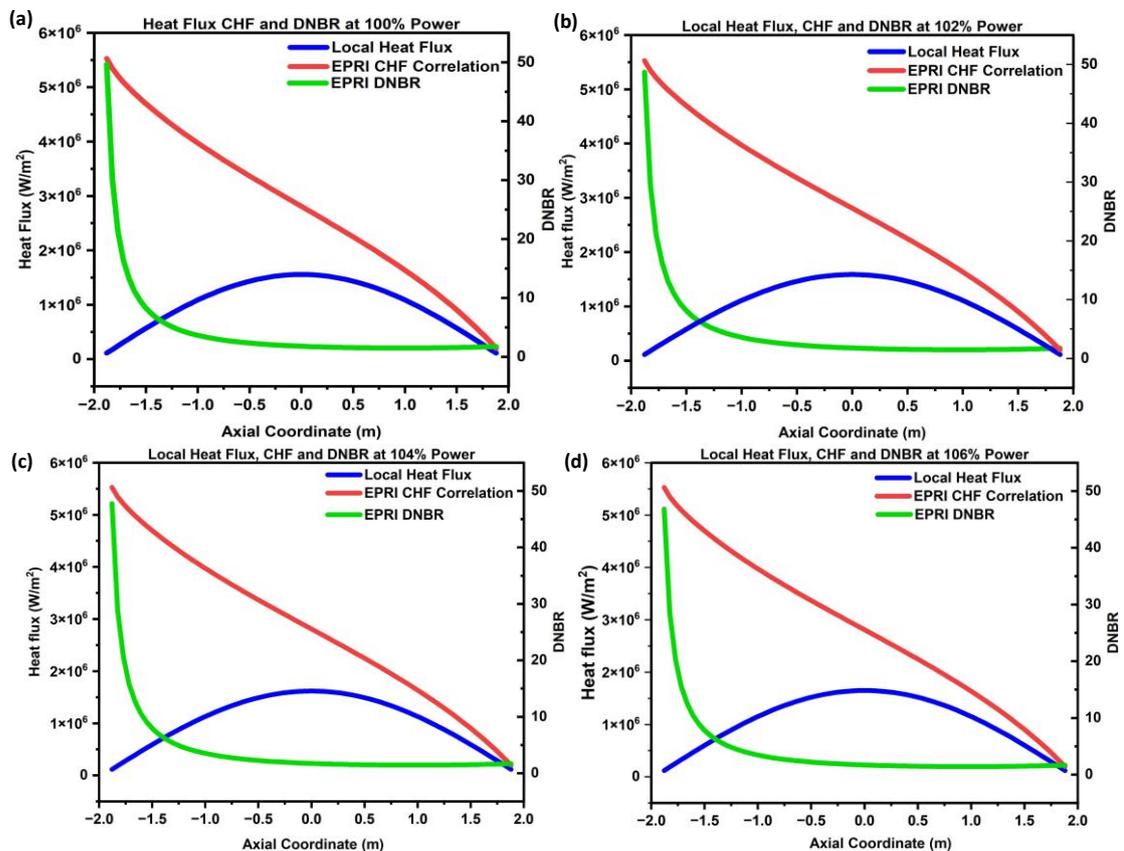


Fig. 2. Local heat flux, CHF and MDNBR distribution on axial coordinate at (a) rated power, (b) 102 % power, (c) 104 % power and (d) 106 %

Table 1. Results of simulated and analytical MDNBR and peak fuel temperature at % power

Power (%)	Peak Fuel Temperature (°C)		Peak Temp. Error (%)	MDNBR		MDNBR Error (%)
	Simulation	Analytical		Simulation	Analytical	
100	1800.00	1804.00	0.222	1.500	1.504	0.266
102	1828.00	1834.47	0.354	1.471	1.475	0.272
104	1859.00	1864.56	0.299	1.440	1.446	0.417
106	1890.00	1894.65	0.246	1.415	1.419	0.283

The correlation predicted the MDNBR to be 1.504 at rated operational parameters as seen in Fig. 2, *a*. As we increased the power to 102 % in our analytical calculation, without any change to inlet temperature or any other parameter, the local heat flux increased but the CHF remained constant, the corresponding MDNBR was 1.475, as seen in Fig. 2, *b*. The decrease in the MDNBR was due to an increase in the local heat flux. At 104 % power, the MDNBR was 1.446, as seen in Fig. 2, *c* and at 106 % power, the MDNBR was 1.419 as seen in Fig. 2, *d*.

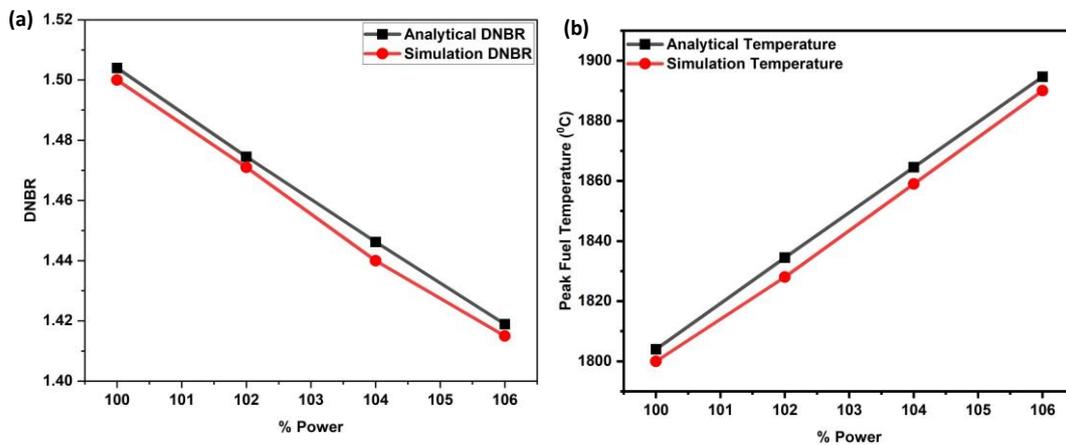


Fig. 3. Comparison of analytical and simulated result at % power increase; (a) DNBR, (b) peak fuel temperature

The comparison of both the analytical and simulation MDNBR shows good agreement at all the power increase analyzed as seen in Fig. 3, *a*, while comparison between the simulated and analytical peak fuel temperature at 100, 102, 104 and 106 % power were also in good agreement as seen in Fig. 3, *b*. The results of the analytical and simulated DNBR and peak fuel temperature is shown in Table 1.

### Conclusion

1. The use of EPRI CHF correlation to predict the CHF and DNBR of VVER-1200 at rated operating parameters and increased power of 102, 104 and 106 % produced a good result and removed high conservatism in the MDNBR. As the reactor power increased from 100 to 102 %, the peak fuel temperature increased from 1804 to 1834.47 °C, at 104 and 106 % power, the peak fuel temperature was recorded as 1864.56 and 1894.65 °C respectively. This trend was validated with the PCTran simulator.
2. The comparison of the both the peak fuel temperature from the heat transfer analysis and MDNBR from the EPRI correlation at rated, 102, 104 and 106 % power, with the corresponding peak fuel temperature and MDNBR from VVER-1200 PCTran simulator, showed a good agreement with a maximum error of 0.354 % for the peak fuel temperature and 0.417 % for the MDNBR as shown in Table 1.

## REFERENCES

1. Zhu G., Xie H. Subchannel analysis of critical heat flux in radially Non-uniform heated rod assembly at low flow rate // *Annals of Nuclear Energy*. – 2023. – Т. 180. – P. 109446.
2. El-Morshedy SED, Awad MM, El-Fetouh MA Thermal-Hydraulic modeling and analysis of VVER-1200 reactor core // *Annals of Nuclear Energy*. – 2023. – Т. 194. – P. 110125.
3. Louis HK Neutronic Analysis of the VVER-1200 under Normal Operating Conditions // *Journal of Nuclear and Particle Physics*. – 2021. – Т. 11. – No. 3. – С. 53–66.
4. Assar Mahmoud Khalid Reyad Ali. Design of steam turbine installation of VVER 1200 nuclear power unit with a single-stage intermediate reheating of steam. «Graduation Thesis, Tomsk Polytechnic University», 2020.
5. VVER-1200 PCTran Simulator by Micro-Simulator Technology. <http://microsimtech.com/>
6. Pei BS et al. Evaluations and modifications of the EPRI-1 correlation on PWR critical heat flux predictions under normal and abnormal fuel conditions // *Nuclear Technology*. – 1986. – Т. 75. – No. 2. – С. 134–147.
7. Corradini M., Wu Q. Critical Heat Flux Phenomena at High Pressure & Low Mass Fluxes: NEUP Final Report Part I: Experiments (No. 11-3080). «Battelle Energy Alliance, LLC, Idaho Falls, ID (United States)», 2015.
8. Arshi S.S., Mirvakili S.M., Faghihi F. Modified COBRA-EN code to investigate thermal-hydraulic analysis of the Iranian VVER-1000 core // *Progress in Nuclear Energy*. – 2010. – Т. 52. – No. 6. – С. 589–595.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ГИБРИДНОГО ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

**Я.Д. Северина**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
аспирант 1 курса, 2.4.5 Энергетические системы и комплексы*

Научный руководитель: В.А. Шакиров, к.т.н., с.н.с., ИСЭМ СО РАН

Гибридные энергетические комплексы (ГЭК) являются эффективным решением проблемы энергоснабжения изолированных и труднодоступных территорий в условиях высоких цен на топливо. Кроме того, ГЭК эффективны для энергоснабжения потребителей в районах с уязвимой экологией или с перспективой развития экотуризма. Применение таких комплексов возможно и для потребителей, электроснабжение которых осуществляется по протяженным распределительным сетям, с целью повышения качества электроэнергии и надежности.

Использование моделирования при решении задач создания и развития ГЭК предоставляет возможность учесть влияние различных факторов на их структуру и функционирование. Для повышения эффективности поиска и получения наилучшего решения применяются оптимизационные методы и модели, такие как [1-4]: метод смешанного целочисленного линейного программирования; эвристические методы оптимизации, в основе большинства у которых имитируется поведение живых систем: генетический алгоритм, рой частиц, стая салпы и другие.

Преимуществом классических методов оптимизации является обеспечение оптимального решения, а недостатком является сложность формализации многих взаимосвязей и ограничений функционирования элементов ГЭК. Эвристические методы оптимизации напротив обеспечивают быстрый поиск решения и не требовательны к формальной постановке задачи, однако направлены на поиск только близких к оптимальному решений. Указанный недостаток не является критическим для предпроектных исследований, в рамках которых многие исходные данные характеризуются высокой неопределенностью и не позволяют с высокой точностью получить окончательные решения.

В данной статье предлагается двухуровневый подход к оптимизации состава оборудования ГЭК на основе генетического алгоритма (рис. 1).

В рамках двухуровневого подхода на верхнем уровне проводится формирование конфигураций и их последовательное улучшение в соответствии с целевой функцией генетическим алгоритмом, а на нижнем уровне проводится имитационное моделирование функционирования каждой конфигурации для возможности получения значений целевой функции.

На первом этапе (рис. 1) задаются исходные данные для моделирования, такие как часовые значения скорости ветра, солнечной радиации и нагрузки потребителей исследуемой территории за годовой период. Кроме того, вводятся данные о технико-экономических характеристиках основного оборудования и технологических ограничениях функционирования.

На втором этапе проводится формирование конфигураций генетическим алгоритмом. В основе генетического алгоритма лежит процесс естественного отбора и эволюции. Данный алгоритм путем подбора, комбинирования и селекции искомых величин формирует наилучшее решение. Для создания такого алгоритма необходимо задать гены, которые представляют собой искомые параметры и формируют популяцию или множество решений путем скрещивания и мутаций. Также необходимо определить целевую функцию – это функция, которая подлежит оптимизации генетическим алгоритмом.

В данном исследовании в качестве целевой функции была задана нормированная стоимость электроэнергии LCOE (Levelized Cost of Energy), которая находится по формуле:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (1)$$

где  $I_t$  – инвестиционные затраты в  $t$ -й год;  $M_t$  – эксплуатационные затраты в  $t$ -й год,  $F_t$  – затраты на топливо в  $t$ -й год,  $E_t$  – производство электроэнергии в  $t$ -й год,  $r$  – ставка дисконтирования,  $n$  – жизненный цикл ГЭК, принятый 25 лет.

Имитационная модель была разработана для изолированного энергорайона «Новиково», который расположен в юго-западной части о. Сахалин на территории Тонино-Анивского полуострова. Данная территория располагает высоким ветроэнергетическим и гелиоэнергетическим потенциалом, поэтому в качестве источников возобновляемой энергии были заданы ветровая (ВЭС) и солнечная (СЭС) электростанции. Также в состав модели вошли дизель-генераторная установка (ДГУ) и блок аккумуляторных батарей (АКБ) для обеспечения бесперебойного электроснабжения. На данной территории расположены потребители с разным характером нагрузки с годовым потреблением 1,49 млн кВт·ч и максимумом нагрузки 0,37 МВт [5,6]. Моделирование осуществляется для каждой из конфигураций ГЭК с расчетным периодом 8760 часов. На рис. 2 представлена имитационная модель ГЭК, где SOC (State of Charge) – уровень заряда АКБ.



Рис. 1. Двухуровневая модель оптимизации конфигурации ГЭК

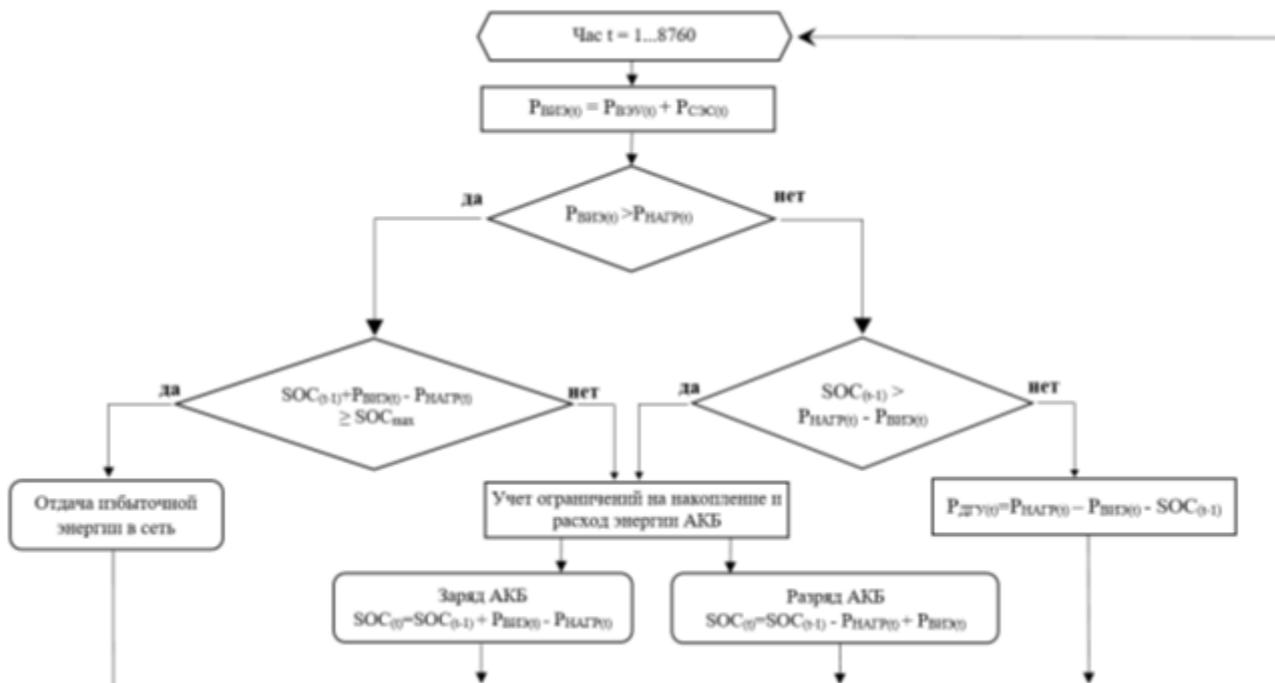


Рис. 2. Имитационная модель ГЭК

Имитационная модель позволяет получить сведения о выработке электроэнергии каждым источником ГЭК для покрытия заданной нагрузки с учетом его установленной мощности. Эти данные позволяют провести расчет LCOE и оценить целевую функцию, а значит и эффективность конфигурации ГЭК.

Предложенный подход был реализован в среде Python с привлечением библиотеки PyGAD [7]. Разработанная программа позволяет провести оптимизацию конфигурации ГЭК и определить рекомендуемые значения установленных мощностей СЭС, ВЭУ, ДГУ и АКБ, при которых значение LCOE будет минимальным.

На рис. 3 представлен график покрытия нагрузки энергорайона «Новиково» одним из вариантов ГЭК в течение периода моделирования, равного 100 ч.

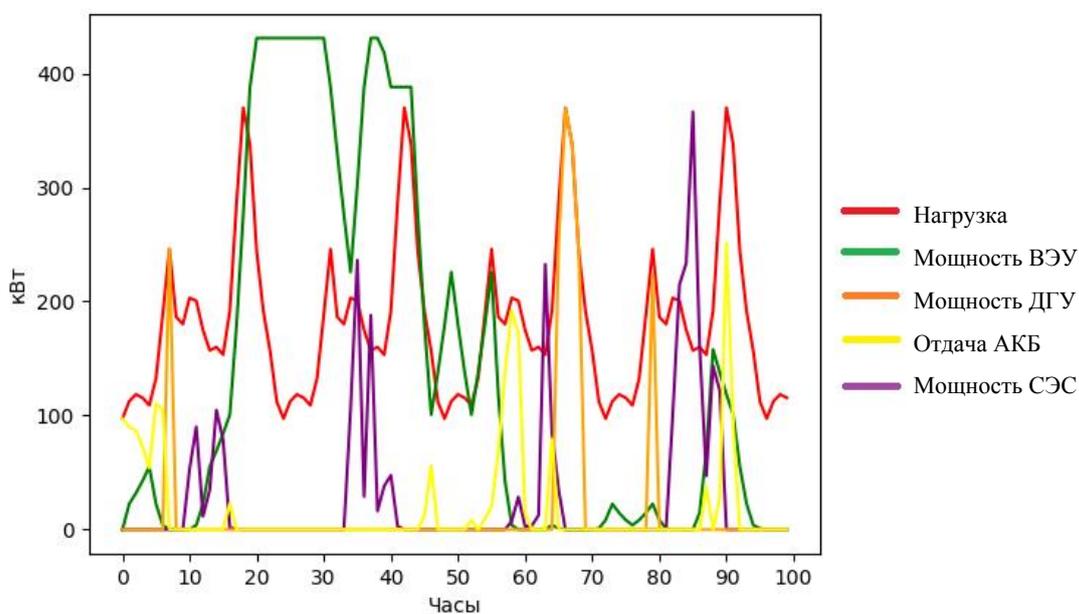


Рис. 3. График покрытия нагрузки энергорайона «Новиково»

Как видно из графика, основными источниками энергии являются ВЭУ и СЭС, так как рассматриваемая территория обладает высоким ветроэнергетическим и гелиоэнергетическим потенциалом. В часы отсутствия или низкого уровня солнечной радиации и скорости ветра нагрузка покрывается за счет энергии АКБ, накопленной в часы максимальной выработки ВИЭ. Если для покрытия нагрузки не хватает электроэнергии, накопленной АКБ и выработанной ВИЭ, то нагрузка покрывается ДГУ. Конфигурации, получаемые с использованием предлагаемого подхода, обеспечивают LCOE в пределах от 0,3 до 0,4 долл/кВт·ч.

В результате предложен двухуровневый подход на основе генетического алгоритма и имитационной модели для выбора конфигурации ГЭК. Генетический алгоритм обеспечивает минимизацию целевой функции, а имитационная модель обеспечивает получение необходимых данных для ее расчета. Генетический алгоритм позволяет находить лишь близкие к оптимальным решения и требует многократных повторов запуска оптимизации для получения достоверно эффективных решений. Этот недостаток компенсируется простотой формализации задачи и вычислительной эффективностью. Получение решений близких к оптимальным на стадии предпроектных решений можно считать допустимым, так как многие исходные данные в задаче выбора конфигурации ГЭК, такие как графики нагрузки и потенциала ВИЭ, технико-экономические показатели оборудования и цены на топливо характеризуются высокой неопределенностью.

*Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0004) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimal sizing of an HRES with probabilistic modeling of uncertainties – a framework for techno-economic analysis / Hasan Sakib, Taiyeb, Ashik Ahmed, Md. Arif Hossain, Quazi Nafees-Ul-Islam. // Energy Conversion and Management. – 2024. – V. 318.
2. Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms / Mahmoud, Fayza S., Ahmed A. Zaki Diab, Ziad M. Ali, Abou-Hashema M. El-Sayed, T. Alquthami, M. Ahmed, H.A. Ramadan // Energy Reports. – 2022. – V.8 – 4935–4956.
3. Multi-objective optimization and decision making for integrated energy system using STA and fuzzy TOPSIS / Zhou, Xiaojun, Wan Tan, Yan Sun, Tingwen Huang, и Chunhua Yang // Expert Systems with Applications. – 2024. – V. 240.
4. Techno-economic and environmental analyses of hybrid renewable energy systems for a remote location employing machine learning models / Roy, Dibyendu, Shunmin Zhu, Ruiqi Wang, Pradip Mondal, Janie Ling-Chin, и Anthony Paul Roskilly // Energy. – 2024. – V. 361.
5. УКАЗ от 29 апреля 2021 года N 24 «Об утверждении Схемы и Программы развития электроэнергетики Сахалинской области на 2021 – 2025 годы».
6. Постановление Правительства Сахалинской области от 24.12.2019 N 618 (ред. от 18.03.2020) «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2035 года».
7. PyGAD: An Intuitive Genetic Algorithm Python Library / Ahmed Fawzy Gad // arXiv. – 2021.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК И ИХ ПРОБЛЕМНЫЕ АСПЕКТЫ

**Л.Е. Дьяченко, О.В. Боруш**

*Новосибирский Государственный Технический Университет, ФЭН, ТЭС, группа ТЭМ-41*

Научный руководитель: О.В. Боруш, д.т.н., профессор ТЭС ФЭН НГТУ

Энергетическое производство тесно связано с потреблением водных ресурсов. По оценке Мирового Энергетического совета объем водопотребления для производства энергии состав-

ляет 583 млрд м<sup>3</sup>, что составляет приблизительно 15 % от мирового водопотребления [1]. Самое большое водопотребление среди источников генерации приходится на тепловые электрические станции (ТЭС). Для производства электроэнергии в 1 кВт·ч необходимо около 130 кг охлаждающей воды в традиционной схеме водоснабжения [2].

К традиционным схемам технического водоснабжения относят прямоточную и оборотную системы. В прямоточной системе холодная вода из водоема проходит через конденсатор паровой турбины, а далее сбрасывается обратно в водоем. В оборотной системе используется ограниченный источник водоснабжения, как например пруд-охладитель или искусственный водоем для использования градирни. К недостаткам использования водных ресурсов для охлаждения на ТЭС стоит отнести ухудшение качества воды, связанное с попаданием охлаждаемых веществ в охлаждающую воду и сброс тепла в водные объекты [3].

Один из способов решения этой проблемы – отказ использования водных ресурсов при охлаждении отработавшего пара. Использование воздушно-конденсационных установок (ВКУ) – перспективное направление, как с точки зрения экологии, так и ресурсосбережения. Выбор ВКУ, взамен традиционных систем охлаждения обоснован также ростом цен на водопотребление и свободой в выборе места расположения станции [4].

Продолжительное время в энергетике ВКУ использовались исключительно для турбин малой мощности (1–15 МВт). Для более мощной турбины (160 МВт) технология с ВКУ была применена в 1970 г. на ТЭС Утрилас. В процессе проектирования, сооружения и эксплуатации были разработаны технические решения, которые позволили применять ВКУ для турбин большей мощности, а также использования установки в суровых климатических условиях [5]. На рис. 1 представлена динамика ввода установок с ВКУ и сухими вентиляторными градирнями (СВГ) с 2007 по 2017 г. По оси ординат указана суммарная мощность вводимых за год таких установок.

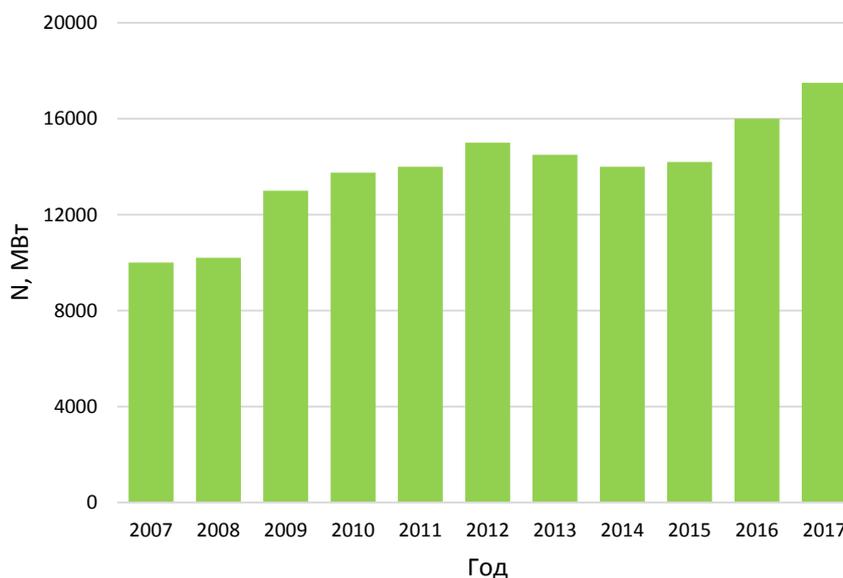


Рис. 1. Годовой ввод энергоустановок с ВКУ и СВГ

На практике реализуется три схемы воздушно-конденсационных установок. Первая схема (рис. 2, а) – с конденсацией отработавшего пара внутри труб с наружным оребрением, охлаждаемых окружающим воздухом. Вторая схема (рис. 2, б) – с использованием поверхностных конденсаторов, для которых охлаждающая вода подается из теплообменника, охлаждаемого воздухом. Третья схема (рис. 2, в) – с использованием смесительных конденсаторов и охлаждением воды, окружающим воздухом в оребренной поверхности теплообменника.

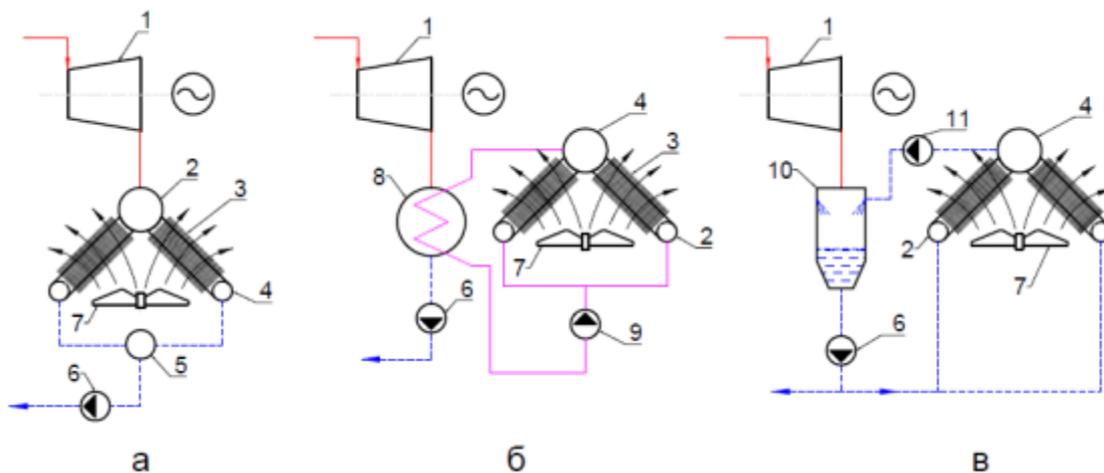


Рис. 2. Схемы воздушных конденсационных установок

Воздушные конденсационные установки, работающие на низкокипящих рабочих телах (НРТ) имеют высокую актуальность в современной энергетике. Использование таких рабочих тел в работе энергоблока способствует не только повышению эффективности, но и позволяет улучшить маневренность станции. Несмотря на более высокие затраты на приобретение НРТ, их применение позволяет компенсировать эти расходы за счет повышения эффективности. Особенно перспективным становится использование НРТ на геотермальных электростанциях. Тем не менее, эксплуатация подобных систем сопряжена с определенными трудностями, включая повышенные требования к материалам и уплотнениям турбины.

Конденсаторы с воздушным охлаждением имеют высокие капиталовложения по сравнению с конденсаторами водяного охлаждения. Это связано с плохой теплопередачей воздуха в сравнении с водой, что приводит к необходимости установки более крупных и сложных теплообменных поверхностей. При повышении температуры окружающего воздуха с  $+15$  до  $+25$  °С, увеличивается размер системы воздушного охлаждения на 40 % [6]. Теплоемкость воды в 4 раза больше, чем теплоемкость воздуха ( $1,007$  кДж/(кг·К) – воздух при  $+27$  °С,  $4,181$  кДж/(кг·К) – вода при  $27$  °С), что ведет к увеличению расхода воздуха, направляемого на охлаждение. Однако использование ВКУ может быть и более экономичной альтернативой системе с водяным охлаждением, в регионах с высокими ценами на водопользование или со штрафами на тепловые выбросы (на текущий момент такие штрафы в России не установлены). При детальном расчете ТЭС с ВКУ необходимо учитывать снижение мощности станции при увеличении температуры конденсации. Рассчитано, что при увеличении температуры конденсации на  $3$  °С, выработка электроэнергии снижается на  $1,1$  % [7].

Уменьшение эффективности воздушных систем охлаждения в условиях увеличения температуры окружающего воздуха является актуально и сложной задачей. Существует несколько основных подходов для решения: изменение теплообменных плоскостей (увеличение площади теплообменной поверхности, совершенствование оребрения труб [8–10]), регулирования потоков воздуха (увеличение расхода воздуха, контроль циркуляции воздуха между секциями ВКУ), увеличение отвода тепла за счет рабочего тела (распыление воды на поверхность теплообмена [8, 10], предварительное охлаждение воздуха [11]). Также возможно использование комбинированной системы охлаждения (водяной конденсатор и воздушный конденсатор). Компания Holtec international активно использует такую систему, которая позволяет сохранить производительность при высокой температуре окружающей среды [12].

Из-за низкого коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха возникает необходимость развивать площадь поверхности теплообмена с помощью оребренных труб, что позволяет уменьшить площадь, занимаемую установкой. В ВКУ принципиально используются 3 вида

труб: круглые, эллиптические и плоскоовальные. Круглые и эллиптические в свою очередь разделяются на монолитные и биметаллические. Монолитные трубы более надежные, эффективные и долговечные по сравнению с составными, однако из-за дорогостоящего производства такие трубы используются реже остальных. Наибольшее распространение получили биметаллические трубы со спиральным оребрением, изготовленные по методу токов высокой частоты (ТВЧ) рис. 3 [13]. При использовании плоскоовального профиля в ВКУ применяется неполное оребрение (рис. 4), однако из-за возможной деформации плоских стенок предельное давление в таких трубах достигает 3–4 бар [14]. Авторами [15] рассчитано, что тепловая мощность, отводимая овальными трубами с овальным оребрением в 2,3 раза меньше, а у круглых труб со спиральным оребрением в 1,4 раза меньше, чем у плоскоовальных труб с неполным оребрением.

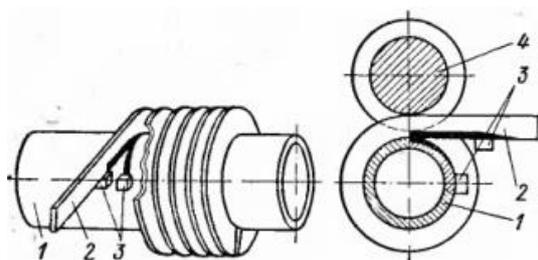


Рис. 3. Схема изготовления труб со спиральным ребром по методу ТВЧ: 1 – несущая труба, 2 – лента, 3 – скользящие контакты, 4 – ролик

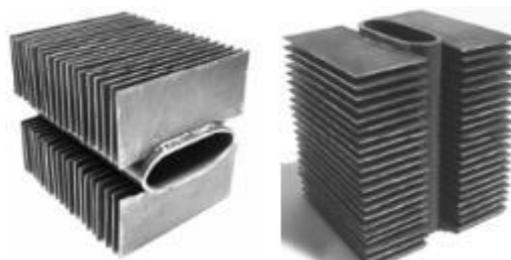


Рис. 4. Плоскоовальные трубы с неполным оребрением

Также уменьшение эффективности ВКУ наблюдается при поперечных ветрах в местах их установки. Это связано с неконтролируемой рециркуляцией отработанного воздуха и неправильным распределением воздуха по пучкам труб. Установлено, что встречный ветер в основном приводит к уменьшению объемного расхода воздуха, а продольный ветер приводит к рециркуляции шлейфа [8]. Уменьшить неблагоприятное воздействие ветра возможно благодаря установке различных перегородок, стен или установке жалюзийных блоков, а также изменение положений секций конденсатора [16–20].

Эксплуатация воздушно-конденсационных установок сложнее, чем традиционных водяных систем охлаждения. Это связано с большей чувствительностью установки к изменениям условий использования. Наиболее распространенные проблемами в эксплуатации ВКУ: переходные режимы (пуск-останов), загрязнение поверхностей теплообмена, обмерзание подвижных деталей и регулирование воздушного потока.

Особое внимание необходимо уделять переходным режимам в условиях низкой температуры наружного воздуха. Наличие зон с пониженной эффективностью процесса конденсации может привести к возникновению ледяных пробок [10] и как следствие будет нарушена целостность системы, что приведет к необходимости в остановке блока с последующим дорогостоящим ремонтом. Способы решения: предварительный прогрев поверхностей теплообмена, организация движения пара, определение критических точек, дренирование мест с возможным застоем конденсата [21].

Загрязнение теплообменных поверхностей воздушных конденсаторов (ВКУ) сильно зависит от географического расположения установки. Часто встречаемые источники загрязнений включают в себя цветочную пыльцу, насекомых, пыль и наледь. Загрязнение ухудшает теплообмен и снижает эффективность всей системы. Методы защиты можно условно разделить на барьерные, такие как противомоскитные сетки и защитные экраны, и струйные, использующие воду, воздух или специализированные моющие растворы. На практике часто комбинируются разные подходы для обеспечения эффективной очистки.

Эксплуатация ВКУ при низких температурах сопровождается рисками обледенения элементов оборудования, в частности вентиляторов, что может приводить к их повреждению. Среди решений этой проблемы выделяют предварительный подогрев воздуха, механическую очистку от наледи и установку вентиляторов сверху V-образной конструкции для создания разрежения [10].

Погодные условия требуют регулировки воздушных потоков в системе. В холодное время необходимо обеспечивать рециркуляцию тёплого воздуха, а в тёплое – избегать её. При сильном ветре скорость воздушного потока уменьшается, однако при грамотном управлении воздушными потоками можно добиться увеличения на 7 % по сравнению с безветренной погодой [14].

### Заключение

Использование систем воздушного охлаждения – является перспективным направлением развития энергетики и природоохраны. На данный момент не существует универсального решения всех рассмотренных проблем, при использовании воздушно-конденсационных установок. Каждая вновь вводимая станция с системой воздушного охлаждения является частным случаем и требует индивидуального подхода с рассмотрением всех существующих технологий на момент проектировки. Данная ситуация связана с различием температурного диапазона, розы ветров, скорости ветра и влажностью для каждого региона. При эксплуатации систем воздушного охлаждения необходимо обеспечить должную квалификацию оперативного персонала для обеспечения устойчивой работы станции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев Д.А. Водные ресурсы и производство энергии // Экология. – 2017.
2. Калимуллина Д.Д., Гафуров А.М. Потребности в водоснабжении и водоотведении на тепловых электрических станциях // Инновационная наука. – 2016. – № 3–3(15). – С. 98–99.
3. Алферова Т.В., Попова О.М. Экология энергетики. – 2008.
4. Мильман О.О., Ананьев П.А. Сухие градирни и воздушно-конденсационные установки (обзор) // Теплоэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 3–14.
5. Абрамов В.В. и др. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2007.
6. Zhai H., Rubin E.S. Performance and cost of wet and dry cooling systems for pulverized coal power plants with and without carbon capture and storage // Energy Policy. – 2010. – Т. 38. – № 10. – С. 5653–5660.
7. Bustamante J.G., Rattner A.S., Garimella S. Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 105. – С. 362–371.
8. Duvenhage K., Kröger D.G. The influence of wind on the performance of forced draught air-cooled heat exchangers // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1996. – Т. 62. – № 2–3. – С. 259–277.
9. Щербин С.А., Коряченко А.О. Повышение эффективности теплоотдачи в аппаратах воздушного охлаждения // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2021. – № 8 – С. 105–106.
10. Мильман О.О., Федоров В.А. Воздушно-конденсационные установки. – Москва: Изд-во МЭИ, 2002. – 207 с.
11. Melhegue N.B., Sellam S.H., Labeed A. Technical solution for malfunction of air coolers and condensers in hot climates: thermal design of a Geothermal Air-Cooler. – 2020.
12. Holtec International. Air Cooled Condensers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hol.com/pr-and-services/heat-tr-equipment/air-cooled-condensers> (дата обращения 01.10.2024)
13. Афанасьева И.В. Существующие технологии обребрения труб //Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1 (52). – С. 194.
14. Мильман О.О., Ананьев П.А. Сухие градирни и воздушно-конденсационные установки (обзор) // Теплоэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 3–14.
15. Письменный Е.Н. Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго- и ресурсосбережения // Промышленная теплотехника. – 2007.
16. Wang Q.W. et al. CFD simulation on a thermal power plant with air-cooled heat exchanger system in north China // Engineering Computations. – 2008. – Т. 25. – № 4. – С. 342–365.
17. Meyer C.J. Numerical investigation of the effect of inlet flow distortions on forced draught air-cooled heat exchanger performance // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Т. 25. – № 11–12. – С. 1634–1649.
18. Bredell J.R., Kröger D.G., Thiert G.D. Numerical investigation of fan performance in a forced draft air-cooled steam condenser // Applied Thermal Engineering. – 2006. – Т. 26. – № 8–9. – С. 846–852.
19. Yang L.J., Du X.Z., Yang Y.P. Influences of wind-break wall configurations upon flow and heat transfer characteristics of air-cooled condensers in a power plant // International Journal of Thermal Sciences. – 2011. – Т. 50. – № 10. – С. 2050–2061.
20. Yang L.J., Du X.Z., Yang Y.P. Measures against the adverse impact of natural wind on air-cooled condensers in power plant // Science China Technological Sciences. – 2010. – Т. 53. – С. 1320–1327.
21. Подолянич В.П. Сухие градирни и воздушно-конденсационные установки. – 2017.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ РЕГУЛЯТОРОМ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА

**В.В. Беляев**

*Томский политехнический институт, ИШЭ, АТП, группа 5БМ43*

Научный руководитель: Е.Н. Кравченко, к.т.н. доцент АТП ИШЭ ТПУ

Для автоматического поддержания стационарного состояния и мощности реакторной установки (РУ) (по определенным алгоритмам) на АЭС используют автоматический регулятор мощности реактора (АРМР). АРМР входит в состав комплекса электрооборудования системы управления и защиты (КЭ СУЗ). Данный регулятор обеспечивает работу энергоблока АЭС в режиме поддержания электрической нагрузки энергоблока минимально воздействуя на органы регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) путем выдачи управляющих сигналов на перемещение регулирующей группы системы управления и защиты из состава групп, предназначенных для работы с АРМР.

Данный регулятор осуществляет работу в следующих режимах:

- режим поддержания нейтронной мощности (Н) – регулятор поддерживает мощность на уровне  $N_{зад} \pm 1 \% N_{ном}$  (в диапазоне мощности от 3 до 100 %  $N_{ном}$ ), т. е. при отклонении нейтронной мощности РУ на величину более 1 %  $N_{ном}$  от заданного, регулятором выдается сигнал на движение регулирующей группы вверх/вниз для возвращения значения нейтронной мощности в регулируемый диапазон;
- режим поддержания давления (Т) – регулятор поддерживает давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК)  $P_{зад} \pm 0,05$  МПа (в диапазоне мощности от 20 до 100 %  $N_{ном}$ ) т. е. при отклонении давления пара в ГПК на величину более 0,05 МПа от заданного, регулятором выдается сигнал на движение регулирующей группы вверх/вниз для возвращения значения давления пара в ГПК в регулируемый диапазон, за счет изменения нейтронной мощности;
- стерегущий режим (С) – регулятор выдает команду на погружение регулирующей группы вниз при увеличении давления пара в ГПК свыше номинального на 0,19 МПа.

АРМР представляет собой отдельный шкаф, который состоит из трех независимых друг от друга каналов, каждый из которых формирует выходные управляющие сигналы «больше» (группу ОР СУЗ вверх) и «меньше» (группу ОР СУЗ вниз) по мажоритарному принципу «два из трех», т. е. для выдачи управляющего сигнала на ОР СУЗ необходимо, что данный сигнал сформировался как минимум двумя каналами АРМР из трех. Сам шкаф выполнен в блочно-модульном исполнении с расположением комплектующих элементов.

Каждый канал АРМР состоит:

- из процессора управляющий;
- устройства сопряжения аналоговых сигналов ввода-вывода (АВВ);
- устройства сопряжения цифровых сигналов ввода-вывода (ЦВВ) (3 шт.);
- устройства сопряжения кроссовое (2 шт.);
- модульного источника питания.

Каналы являются равноправными и работают синхронно. Структурная схема канала АРМР представлена на рис. 1.

Целью работы является модернизации системы управления автоматическим регулятором мощности для чего будет разработана математическая модель (цифровой двойник системы).

Для решения поставленной цели будут проработаны следующие задачи в среде моделирования Simintech:

- будут смоделированы тепловые процессы происходящие в объекте регулирования;
- будет построена модель системы автоматического управления;

- будет разработана модель логического управления и защиты;
- описание технология энергогенерации;
- составление перечня технических средств автоматизации.

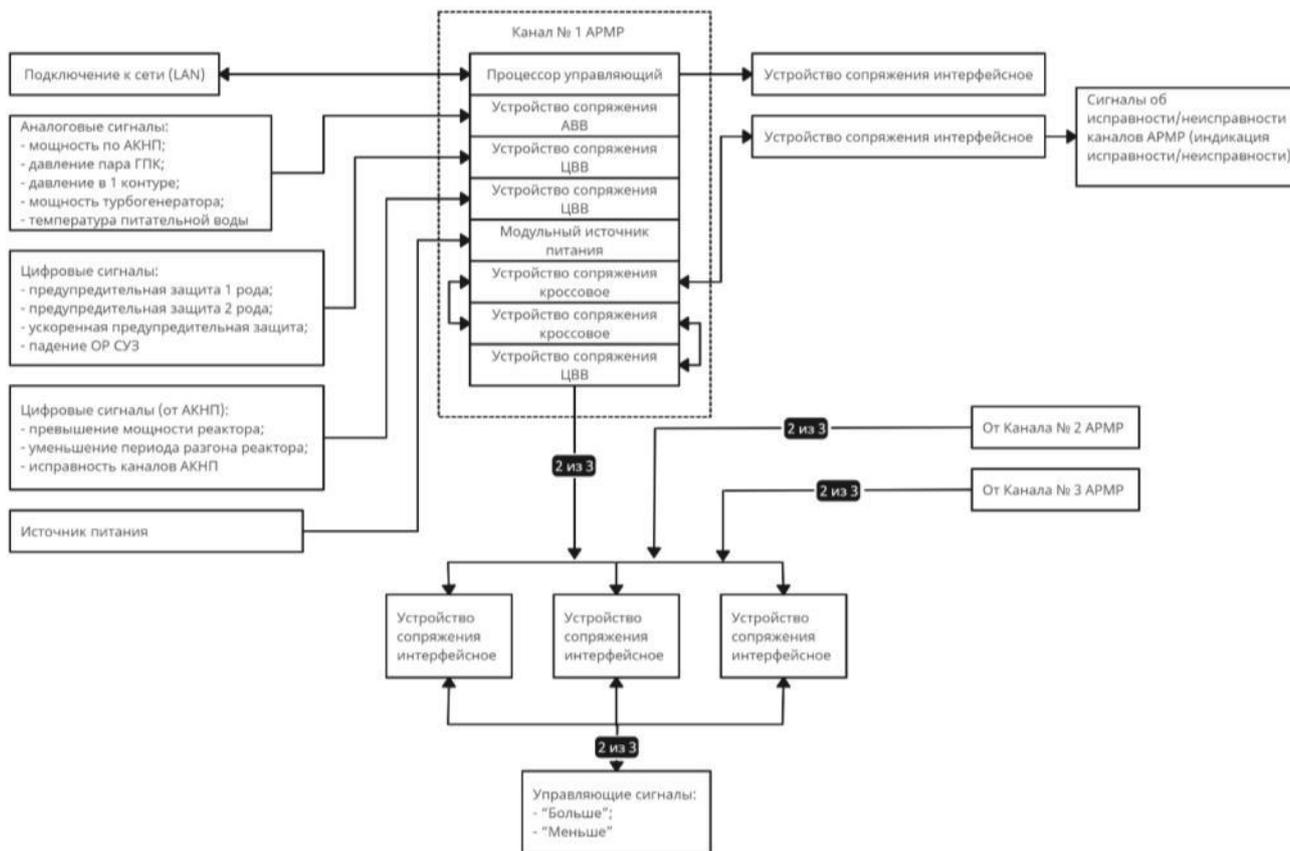


Рис. 1. Структурная схема канала АРМР

Планируемые результаты:

- разработана тепловая схема объекта (схема теплогидравлическая simintech);
- разработана автоматическая система регулирования объекта (схема trp);
- разработана система логического управления и защиты (модуль анализа надежности);
- разработана общая схема модели объекта (схема модели общего вида);
- составлен перечень технических средств автоматизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сацук С.М., Брынза Д.В. Автоматический регулятор мощности АРМ7 // 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019. – С. 210.
2. Будревич Н.В., Пташиц К.П., Чебаевская А.М.: Модификация системы автоматического регулирования нейтронной мощности ядерного реактора // 72-я научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Актуальные проблемы энергетики. – Минск: Белорусский научно-технический университет, 2016. – С. 468–471.
3. Майков М.С., Дюдяев А.М., Кимяев С.А., Пискорский И.М., Цветков В.М., Юнин Д.А. Алгоритм работы автоматического регулятора мощности реактора ИКАР-М // Вопросы атомной науки и техники. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2023. – С. 4–19. ISSN 0205-4671.
4. Каранчук В.И. Системы автоматического выравнивания нейтронного потока в ядерных реакторах. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 221 с.
5. Горбаненко О.А. Разработка и исследование системы автоматического регулирования импульсного ядерного реактора: Применительно к реакторному комплексу ИГР: дис. ... к. т. н. – Томск, 2005. – 175 с.: ил. РГБ ОД, 61 06-5/689.
6. Создание системы автоматического регулирования мощности реактора ИГР для реаклизации динамических режимов испытаний, Электроника и автоматика физических установок / О.А. Горбаненко, Ю.М. Казьмин, В.В. Дзабло // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2002. – С. 376–383.

## АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ШЛАКОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПАРОВЫХ КОТЛОВ

В.П. Лойко

Сибирский федеральный университет, ПИ, ТЭС, группа ФЭ24-06М

Научный руководитель: Е.А. Бойко, д.т.н., профессор

Одним из основных трендов развития мировой энергетики является переход к ресурсам, которые обеспечивают минимальные выбросы вредных веществ в окружающую среду. Однако даже учитывая этот факт можно заметить то, что уголь до сих пор остается основным источником энергии в мире, на него долю приходится порядка 56,4 % всего мирового производства электроэнергии. Помимо этого, важно отметить то, что темпы добычи и потребления угля в мире и в РФ продолжают расти в течение последних десяти лет. РФ находится на 6 месте в мире по потреблению угля, учитывая то, что основным топливом для производства электрической энергии является природный газ, его доля составляет 44,8 %, а доля угля – 17,9 %. (рис.1) [1]

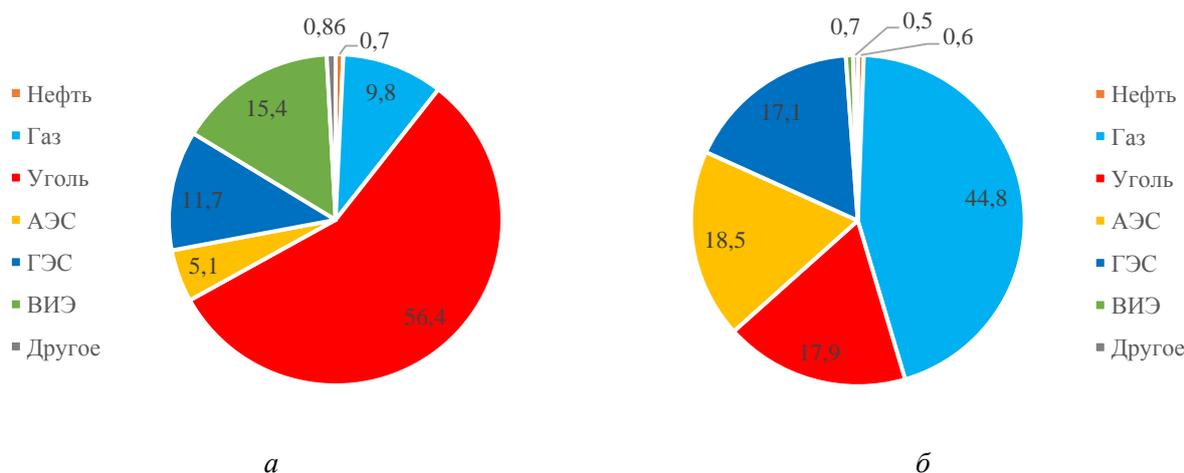


Рис. 1. Распределение первичных энергоносителей в общей выработке электроэнергии:  
а) в мире; б) в РФ

Но если рассмотреть потребление угля по ценовым зонам, то будет видно, что в первой ценовой зоне доля в общей выработке составляет 9 %, а во второй ценовой зоне доля составляет уже весомые 47 %. Этот факт подтверждает высокую значимость развития угольной энергетики в РФ, особенно для регионов Сибири и Дальнего Востока.

Также необходимо подчеркнуть что уголь обладает рядом важных преимуществ перед другими энергоресурсами, таких как: высокая стабильность и надежность энергоресурса; большие мировые запасы; относительно низкая стоимость.

Учитывая все факты, перечисленные выше можно констатировать что развитие угольной энергетики и по сей день является актуальной задачей не только для РФ, но и для всего мира.

Помимо задачи развития угольной энергетики в настоящее время одной из важнейших задач энергетики является обеспечение стабильности и надежности работы энергетической системы и электрических станций. Этот факт связан с необходимостью постоянного обеспечения энергией внушительного количества бытовых и промышленных потребителей, потому

как нарушение энергообеспечения в таких больших системах может привести к тяжелому материальному и даже социальному ущербу.

Существует множество факторов, влияющих на стабильность работы электростанции в целом. Одним из таких факторов является надежность работы основного оборудования, она определяется частотой аварий и отказов. При исследовании степени надежности электростанции важным является поиск причин аварий и отказов, и выявление оборудования с высокой вероятностью отказов.

К типовым причинам нарушения работы оборудования, приводящим к авариям, выделяют: износ оборудования; недостатки конструкции, узлов и деталей оборудования; дефекты при монтаже и пуско-наладке; дефекты ремонтных работ; ошибки эксплуатации.

Наиболее уязвимым на электростанции является котельное оборудование, на него приходится порядка 57,2 % отказов, из них 72,9 % приходится на отказ поверхностей нагрева (рис. 2).

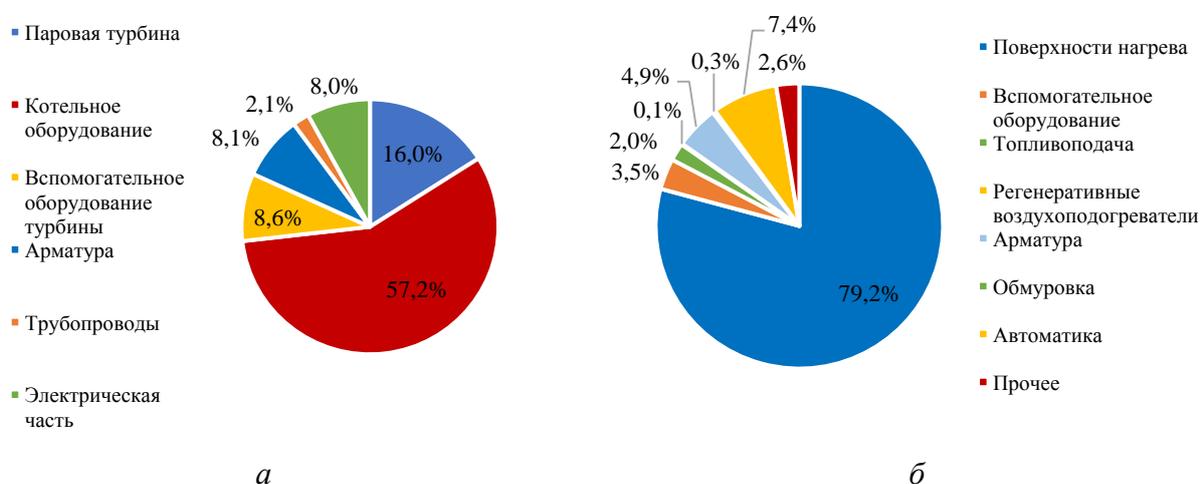


Рис. 2. Распределение отказов по а) ТЭС; б) котельному оборудованию

Опираясь на статистику, рассмотрим распределение причин отказов по поверхностям нагрева. Наиболее частой причиной отказа является перегрев, в среднем по всем поверхностям нагрева котла составляет 57 % случаев [2].

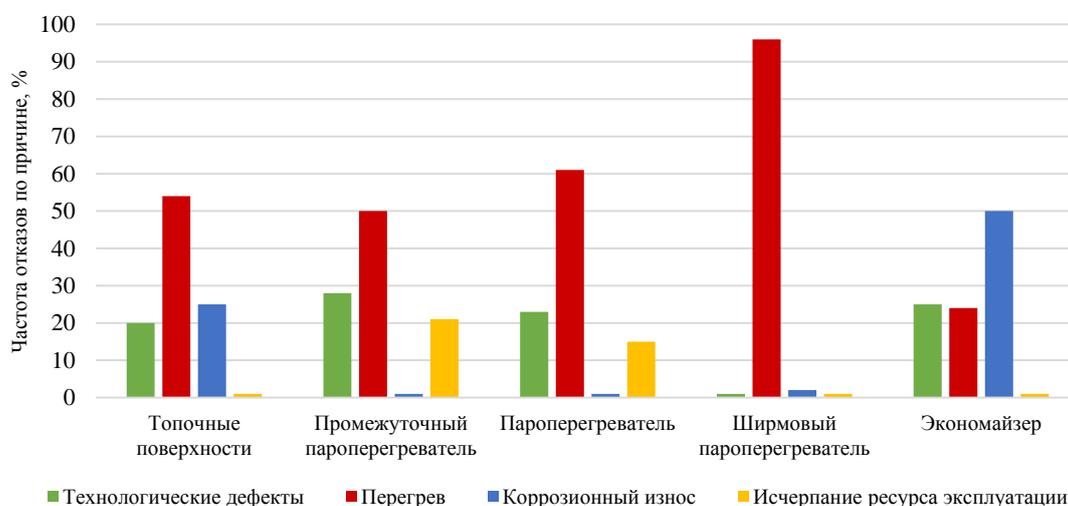


Рис. 3. Распределение отказов и причин по поверхностям нагрева

Основными причинами, которые приводят к перегреву являются: использование непродуктивного топлива; неудовлетворительный топочный режим; нарушение гидравлического режима; загрязнение и шлакование поверхностей нагрева.

Особенно остро проблема перегрева встает на котлах, использующих уголь и другое ископаемое твердое топливо. Зола и шлак, образующиеся в процессе горения налипают на поверхности нагрева создавая дополнительное термическое сопротивление, в связи с этим ухудшается теплопередача и температура металла труб возрастает сверх допустимых значений, что в свою очередь может привести к разрушению и порыву трубы. Такие условия эксплуатации приносят ряд дополнительных ощутимых экономических затрат, таких как:

- сильная зашлакованность топки может привести к неплановому останову и необходимости очистки поверхностей нагрева. Например, для котла П-49 Назаровской ГРЭС потребовался 1 млн рублей на одну процедуру расшлаковки;
- интенсивное загрязнение полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева может привести к выходу из строя всего пароперегревателя, с необходимостью последующей его замены. Например, цена конвективного пароперегревателя 1 ступени котла Е-810-140 составляет порядка 100 млн рублей;
- ограничение паропроизводительности котла возникающее в связи со шлакованием поверхностей нагрева. Например, на Красноярской ТЭЦ-2 ограничение на 40 тонн пара в час у котла БКЗ-420-140Ж, снижает максимальную выработку электрической энергии на 10 МВт, что несет за собой экономические убытки порядка 170 млн рублей в год;
- незапланированные простои оборудования по условиям шлакования также приводят к недовыработке и серьезным экономическим убыткам.

В настоящее время существует множество средств борьбы со шлакованием, их принято подразделять на два вида: пассивные и активные.

Пассивные средства направлены на удаление уже сформировавшихся отложений. Чаще всего под такими средствами понимают системы очистки поверхностей нагрева. В качестве таких средств выделяют: паровую и водяную обдувку, газо- и пневмоимпульсную очистку, дробеочистку и виброочистку.

Активные средства направлены на снижение интенсивности образования натрубных отложений и их механической прочности. К таким средствам относят: добавление присадок в топливо; изменение тонины помола; регулирование коэффициента избытка воздуха и контроль положения факела; изменение компоновки поверхностей нагрева; использование системы диагностики процессов шлакования

Наиболее эффективным способом снижения интенсивности шлакования поверхностей нагрева паровых котлов является совмещение активных и пассивных средств с системами диагностики. Такие системы при длительной эксплуатации оборудования позволяют в реальном времени оценивать степень загрязнения поверхностей нагрева, что дает возможность заранее определить проблемные места, совершить своевременную и эффективную очистку, и продлить срок безаварийной работы котла. На данный момент на международном рынке присутствуют следующие продукты: Smart Furnace HFX от Clyde Bergemann (Германия), Titanium ISB System от Babcock & Wilcox (США), и Fouling Control System от AMS (Израиль).

Все эти системы используют разные методы оценки степени загрязнения поверхностей нагрева, например с помощью датчиков теплового потока Clyde Bergemann, или же с помощью специальных лазеров как у AMS. Не смотря на различие методов оценки системы обладают рядом схожих преимуществ таких как: гибкость работы с топливом разного качества, меньшее влияние на процессы горения в связи с оптимизацией очистки; общее снижение затрат на собственные нужды системы очистки; увеличение срока службы поверхностей нагрева.

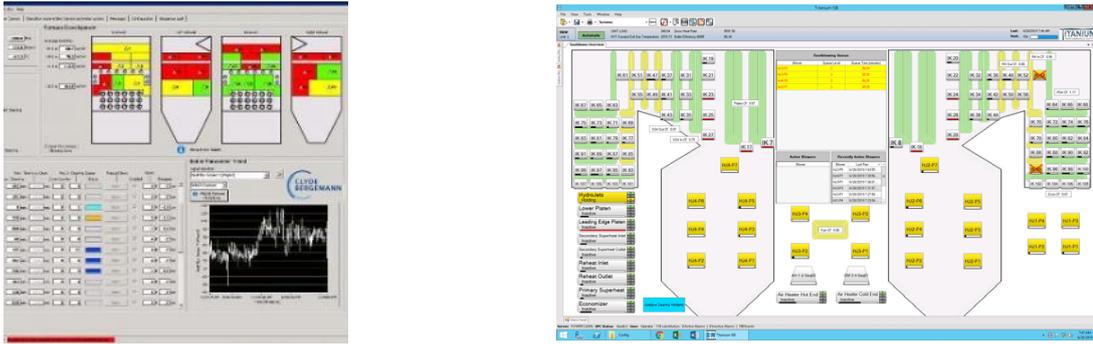


Рис. 4. Интерфейсы программ систем диагностики топочных процессов

Все вышеупомянутые системы предлагают современное технологичное решение для угольных котлов и позволяют заметно снизить влияние шлакования и загрязнения поверхностей нагрева. Однако эти системы не учитывают ряд важных факторов, обладают высокой стоимостью и в связи с нынешней экономической обстановкой, установка именно этих систем в РФ слишком трудоемка или нецелесообразна.

Учитывая эти факторы, необходимо создание альтернативной недорогой системы диагностики шлакования поверхностей нагрева в реальном времени, которая, с помощью специального программного обеспечения вычисляет степень загрязнения поверхностей нагрева используя данные приборов АСУ ТП котла, а также основывается на зависимостях открытых машинным обучением через анализ баз данных работы оборудования за большой срок [3]. Система диагностики должна содержать рекомендации по месту, времени и параметрам очистки, а также иметь возможность с помощью расчетных данных прогнозировать интенсивность шлакования и давать рекомендации по установке обдувочных аппаратов.

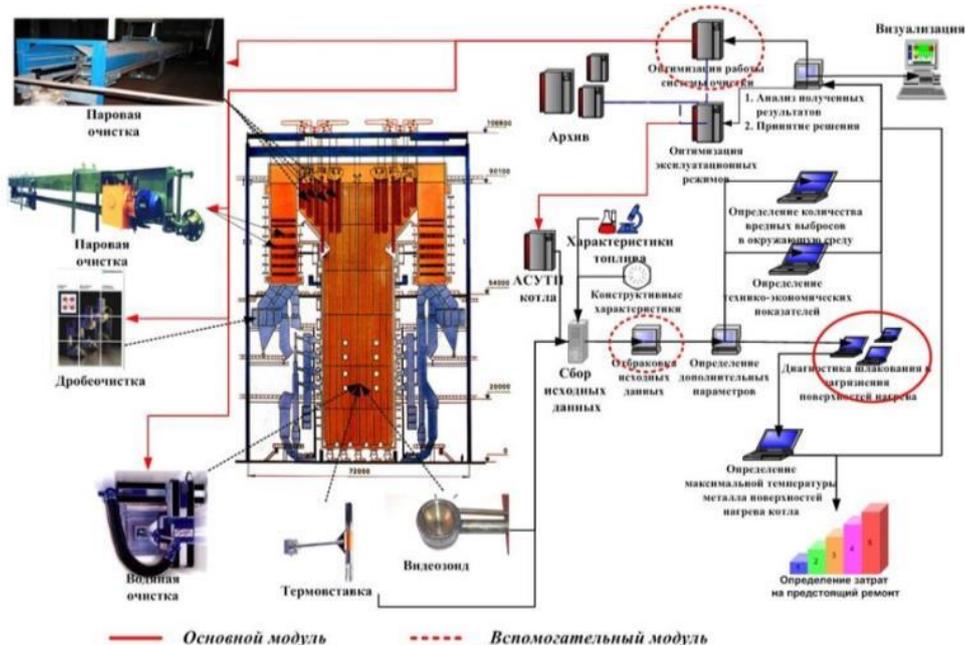


Рис. 5. Принципиальная схема работы системы диагностики шлакования

Такая система обладает относительно низкой стоимостью, позволит оптимизировать систему очистки поверхностей нагрева, увеличить эффективность работы котла, снизить затраты на простой оборудования, ремонты, расшлаковку оборудования. Именно за такими современными интеллектуальными системами экономичное и надежное будущее энергетики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Statistical review of world energy // Energy institute. 2024. – URL: <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата обращения 15.11.2024)
2. Бойко Е.А., Бобров А.В., Пачковский С.В. и др. Риск-ориентированное управление техническим состоянием технологического оборудования тепловых электростанций. – Красноярск: СФУ, 2021. – С. 19–2.
3. Бойко Е.А., Лебедев К.В. Система диагностики и управления техническим состоянием объектов теплоэнергетики на основе цифровых двойников // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024. – № 3. – С. 74–85.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ВЫГОРАНИЯ

С.А. Пузырёв

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5ВМ31*

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова, ИШЭ, ТПУ

Оксиды азота при сжигании топлива образуются из азота, входящего в состав топлива, и из азота воздуха [1]. Наибольшее влияние на образование оксидов оказывает максимальная температура горения. По длине факела концентрация оксидов возрастает от начала зоны горения до области с максимальными температурами, затем остаётся практически неизменной.

Эмиссия оксидов азота существенно зависит от условий смесеобразования. Факел вихревой горелки характеризуется быстрым воспламенением и высокой интенсивностью сгорания благодаря эффективному смешиванию топлива с воздухом, а также высоким температурам, что приводит к образованию значительного количества оксидов азота на начальном участке факела. В таком факеле выделяются как топливные, так и термические  $\text{NO}_x$ , причём доля термических увеличивается с повышением температуры [2].

Прямоточная горелка, в отличие от вихревой, обладает большей длиной факела, меньшими максимальными температурами и более равномерным распределением температур вдоль факела. В таких системах воспламенение происходит снаружи пылевоздушной струи, что ведёт к сгоранию большинства летучих веществ в среде, обеднённой кислородом.

Расчёт выгорания пылеугольного факела и объём топочной камеры по условиям горения может быть выполнен как для одномерного факела, по методике ЦКТИ. В таком случае принимается, что в полидисперсном пылеугольном факеле частицы равномерно распределены в потоке и равномерно распределена температура, скорость и концентрации пыли в сечении факела [2].

Численные исследования позволяют более детально рассмотреть физико-химические процессы при анализе различных фракционных составов топлива путём решения системы дифференциальных уравнений и определить наиболее оптимальный вариант фракционного состава топлива.

Поскольку, при подготовке исходного топлива к пылеугольному сжиганию в факеле горят частицы, размеры которых отличаются друг от друга, то в топочной камере сжигается полифракционная пыль [3].

Для осуществления анализа влияния изменения фракционного состава топлива на характеристики горения угля в топке энергетического котла при его изменении в диапазоне  $R_{90}$  от 8 до 28 % с шагом в 2 % определялось зерновое распределение с применением уравнения Розина–Раммлера [4]. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчётная зерновая характеристика топлив

$R_{90}, \%$	$R_{200}, \%$	$n$	$R_{500}, \%$	$R_{100}, \%$	$R_{50}, \%$	$R_{25}, \%$	$R_5, \%$
8	0,8	0,81	0,004	6,39	20,78	40,75	78,29
10	1,42	0,77	0,02	8,24	23	42,14	77,7
12	2,04	0,76	0,04	10,6	25,7	44,76	78,84
14	2,66	0,76	0,06	11,87	28,5	47,72	80,53
28	7	0,92	0,21	24,6	47,6	67,52	91,4

При помощи программного комплекса FIRE 3D, на основе геометрических данных топки с прямоточными горелками, построена сетка для 3D-модели топочной камеры парового котла. Далее, выполнены расчёты пространственной аэродинамики горения угля в топке энергетического котла при изменении фракционного состава топлива в диапазоне  $R_{90}$  от 8 до 28 % с шагом в 2 %. Полученные результаты расчётов визуализированы.

Изменение гранулометрического состава отражается различным образом в зависимости от компоновки и типа горелочных устройств. Для котла с прямоточными горелками, где  $R_{90}$  равен 8 и 10 %, во фракционном составе топлива преобладает тонкоизмельчённая пыль. В таком случае, факел обладает большой протяжённостью и достаточно равномерным распределением температур, рис. 1 и 2.

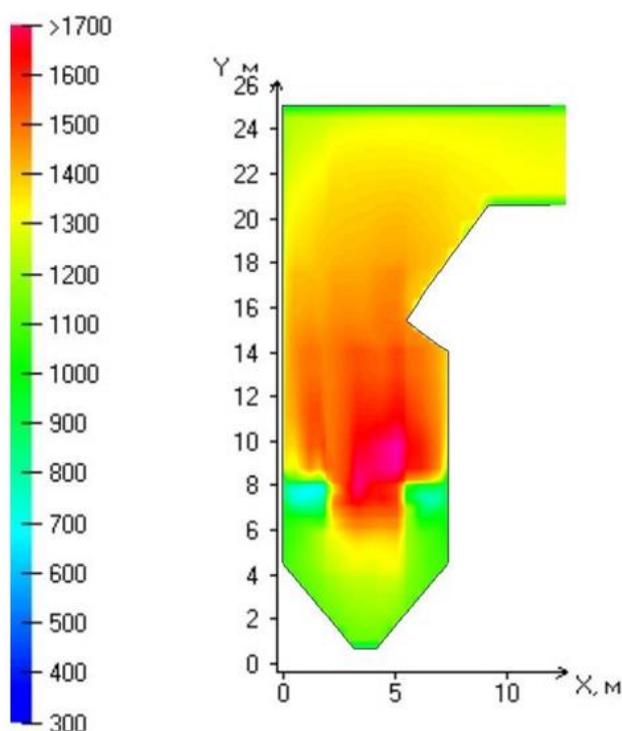


Рис. 1. Распределение температуры в топке котла при  $R_{90} = 8 \%$

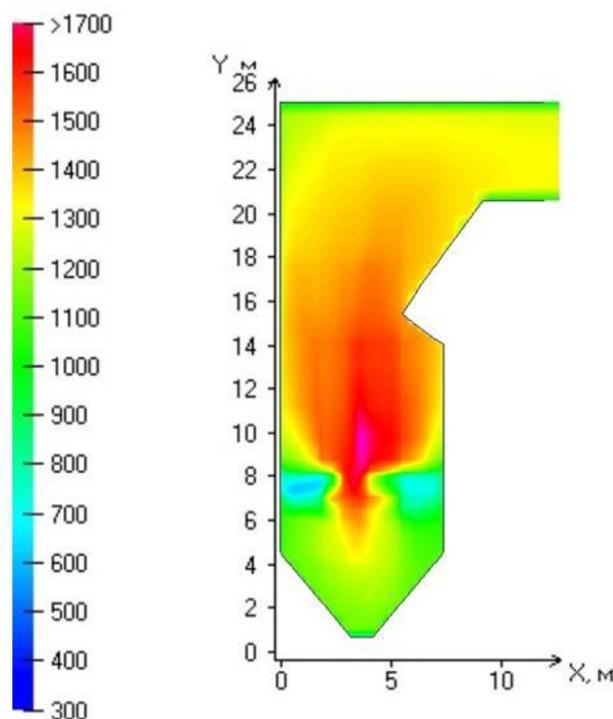


Рис. 2. Распределение температуры в топке котла при  $R_{90} = 10 \%$

Изменение гранулометрического состава главным образом влияет на реакционную способность пылеугольного факела. С угрублением зернового состава топлива при сжигании в котле с тангенциальным угловым расположением горелок происходит изменение аэродинамики в нижней части топки и сужение факела по высоте, рис. 3–5.

Из графика, рис. 6, видно, что область максимальной температуры наблюдается прямо над уровнем яруса горелок.

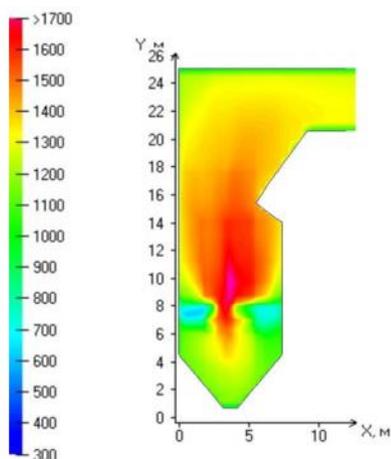


Рис. 3. Распределение температуры в топке котла при  $R_{90} = 14\%$

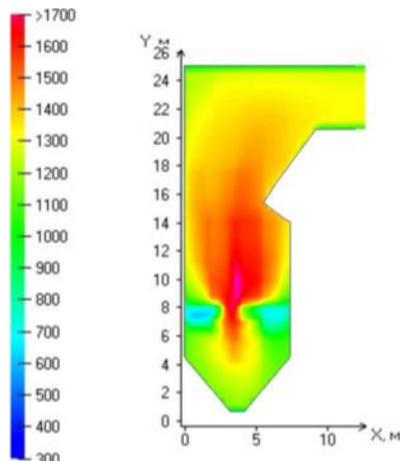


Рис. 4. Распределение температуры в топке котла при  $R_{90} = 18\%$

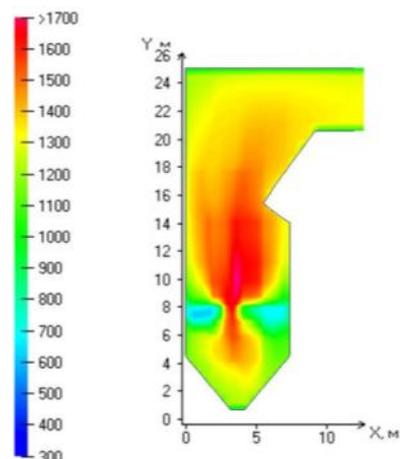


Рис. 5. Распределение температуры в топке котла при  $R_{90} = 28\%$

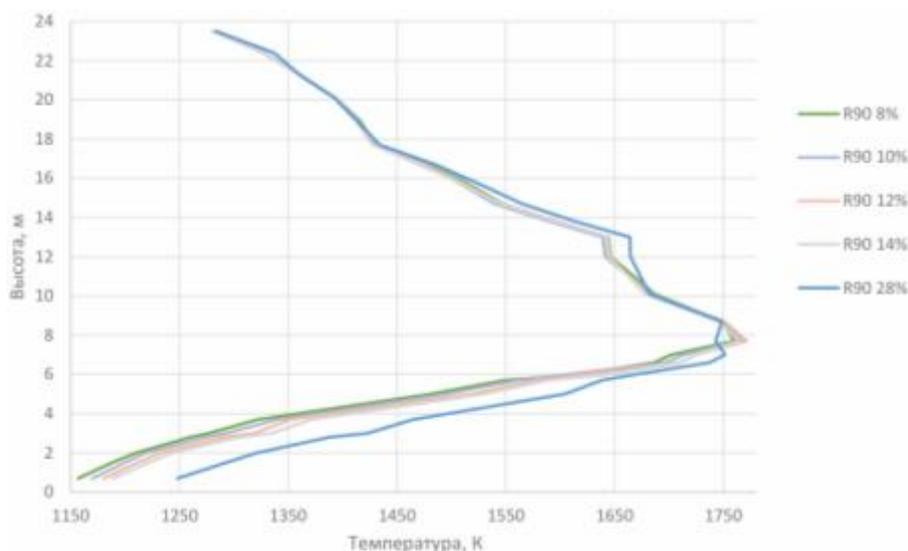


Рис. 6. Зависимость максимальной температуры от высоты в топке котла с прямоточными горелками

Таким образом, исследование влияния изменения зернового состава на температурный режим и аэродинамику в котле с тангенциальным расположением горелочных устройств в топочной камере, при использовании численного моделирования, позволило определить снижение пылеугольного факела по высоте топки и выявить область максимальных температур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
2. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / ред. Э.Х. Вербовецкий, Н.Г. Жмерик. – СПб.: ВТИ-ЦКТИ, 1996. – 270 с.
3. Справочник по пыли- и золоулавливанию: 2-е изд. изд. / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.И. Урбах, А.А. Русанов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
4. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – СПб.: Химия, 1974. – 280 с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КИМОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭС И АЭС

И.О. Агутенков

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5091

Научный руководитель: А.В. Воробьев, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Метод коэффициентов изменения мощности (КИМ) был предложен [1] для оценки влияния малых изменений параметров и структуры тепловых схем ПТУ на их тепловую экономичность. По определению коэффициент изменения мощности  $e$  это коэффициент пропорциональности в следующем уравнении

$$\Delta N = eQ,$$

где  $Q$  – количество теплоты, подводимое извне к той или иной ступени подогрева питательной воды;  $\Delta N$  – изменение мощности турбоустановки.

Для расчета схемы методом КИМ, определения  $e$  нужно различать два типа ступеней подогрева, отсюда и две основные формулы для  $e$ .

Каскадная ступень – поверхностный подогреватель вместе с охладителем дренажа и пара, в котором происходит слив дренажа в нижестоящую ступень подогрева или в конденсатор, если это первый подогреватель по ходу воды. Узловая ступень – ступень без слива дренажа, в которой обрывается каскад дренажа и образуется узел смешения потока дренажа и главного конденсата.

Для примера использования метода КИМ, была рассчитана турбоустановка К-1000-60/1500 Калининской АЭС. Сначала был проведен расчет методом балансов, затем методом КИМов.

1. Расчет схемы традиционным методом тепловых балансов [2].

КПД турбоустановки:

$$\eta_{\text{ТУ}}^{\text{э}} = N_3 / Q_{\text{ТУ}}^{\text{э}} = 1000 / 2526 = 0,396.$$

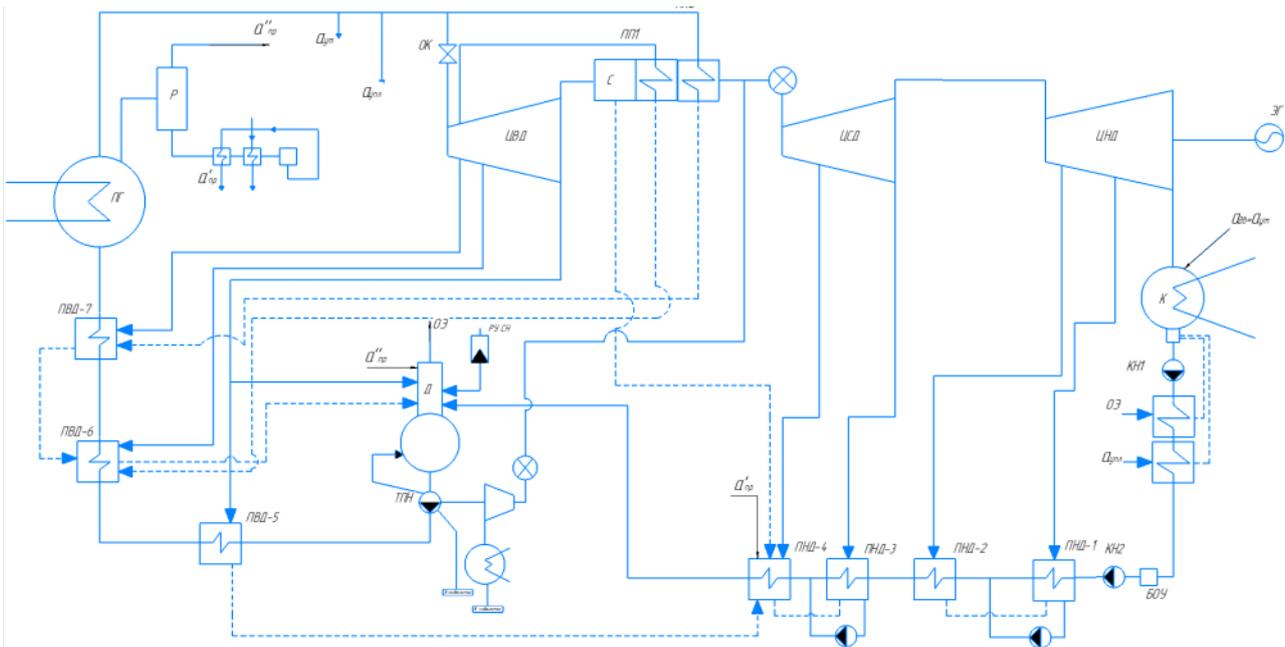


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1000-60/1500 для расчета методом балансов

Таблица 1. Полученные значения относительных расходов

$\alpha_1=0,054$	$\alpha_{пп2}=0,0404$
$\alpha_2=0,044$	$\alpha_c=0,088$
$\alpha_3=0,029$	$\alpha_{см}=0,755$
$\alpha_4=0,025$	$\alpha_{пв}=1,065$
$\alpha_5=0,044$	$\alpha_d=0,028$
$\alpha_6=0,032$	$\alpha_{ок}=0,626$
$\alpha_7=0,028$	$\alpha_{пп1}=0,0266$

## 2. Расчет тепловой схемы методом КИМов.

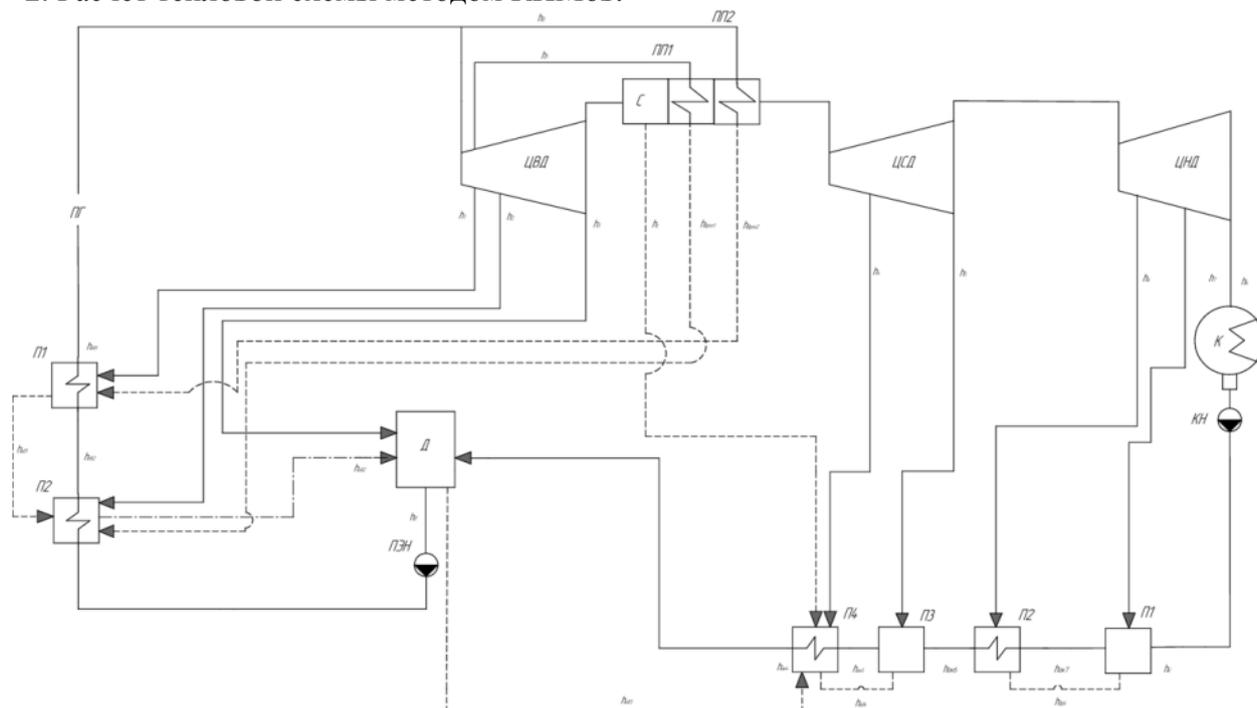


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема турбоустановки К-1000-60/1500 для расчета методом КИМов

Определение коэффициентов изменения мощности в регенеративных ступенях приведено в табл. 2.

Абсолютный внутренний КПД ТУ по методу КИМов:

$$\eta_{\text{ТУ}}^{\text{аб}} = \frac{h_0 - h_k - \sum_1^n e_i \cdot \Delta h_{\text{В}i} + \sum_1^m (1 - e_{\text{О}ci}) \cdot \Delta h_{\text{О}ci}}{h_0 - h_{\text{пв}}} = \frac{2783 - 2117 - 201 + 267}{2783 - 960} = 0,401,$$

где  $n = 7$  – число ступеней подогрева;  $m = 3$  – число осушителей пара.

Расхождение значения абсолютного внутреннего КПД ТУ, полученного по методу абсолютных расходов, со значением, полученным по методу КИМов:

$$\delta \eta_{\text{ТУ}}^{\text{аб}} = \frac{|\eta_{\text{ТУ}}^{\text{аб}} - \eta_{\text{ТУ}}^{\text{аб}}|}{\eta_{\text{ТУ}}^{\text{аб}}} = \frac{|0,402 - 0,401|}{0,402} \cdot 100 \% = 0,2 \%$$

Как видно, метод КИМов дает достаточно точное значение КПД ТУ, что говорит о возможности применения метода для расчета тепловых схем, возможных модернизаций или исследований. Этот метод является перспективным за счет меньшего количества расчетов, более простого анализа, а также возможностью проследить изменение показателей тепловой экономичности при небольших изменениях параметров тепловой схемы, что нельзя сделать при использовании метода балансов.

Таблица 2. Формулы для расчета ступеней каждой ступени подогрева

П7, узловая ступень	$e_1 = \frac{h_7 - h_k}{h_7 - h'_k} = \frac{h_7 - h_k}{h_7 - h'_k}$
П6, каскадная ступень	$e_2 = 1 - (1 - e_1) \cdot \frac{h_7 - h_{др6}}{h_6 - h_{др6}}$
П5, каскадная ступень	$e_3 = \frac{h_5 - h_k - (e_1 \cdot \Delta h_{B1} + e_2 \cdot \Delta h_{B2})}{h_5 - h_{ок6}}$
П4, каскадная ступень	$e_4 = 1 - (1 - e_3) \cdot \frac{h_5 - h_{др4}}{h_4 - h_{др4}}$
Деаэратор и ПЗ, узловая ступень	$e_5 = 1 - [h_k - h_{ок4} + (e_1 \cdot \Delta h_{B1} + e_2 \cdot \Delta h_{B2} + e_3 \cdot \Delta h_{B3} + e_4 \cdot \Delta h_{B4} - (1 - e_{OC1}) \cdot \Delta h_{OC1} - (1 - e_{OC2}) \cdot \Delta h_{OC2} - (1 - e_{OC3}) \cdot \Delta h_{OC3}] / (h_3 - h_{ок4})$
П2, каскадная ступень	$1 - e_6 = (1 - e_5) \cdot \frac{h_3 - h_{OD2}}{h_2 - h_{OD2}}$
П1, каскадная ступень	$1 - e_7 = (1 - e_6) \cdot \frac{h_2 - h_{OD1}}{h_1 - h_{OD1}}$
С, осушитель	$e_{OC1} = e_4$
ПП1, осушитель	$1 - e_{OC2} = (1 - e_7) \cdot \frac{h_1 - h'_{ПП1}}{h_c - h'_{ПП1}}$
ПП2, осушитель	$1 - e_{OC3} = (1 - e_7) \cdot \frac{h_1 - h'_{ПП2}}{h_{ПП1} - h'_{ПП2}}$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И. Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭС. – М.: Энергоиздат, 1982. – 271 с.
2. Антонова А.М., Воробьев А.В. Атомные электростанции: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 276 с.

## ИННОВАЦИИ В ОБЛАСТИ МИКРОЭНЕРГЕТИКИ: МИКРОГРИДЫ КАК РЕШЕНИЕ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ

**Д.С. Клименко**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-11*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент АлтГТУ

### Введение

В последние годы наблюдается значительный интерес к микроэнергетике и микрогридам как к эффективным решениям для локального производства тепловой и электрической энергии. Микрогриды представляют собой децентрализованные системы электроснабжения, обеспечивающие электроэнергией и теплом отдельные здания, районы или, в некоторых случаях, целые города. Они объединяют в себе такие источники энергии, как солнечные панели, ветряные турбины, генераторы на биогазе и другие, так же позволяют эффективно использовать возобновляемые источники энергии для локального производства электроэнергии и тепла. Целью данной статьи является анализ концепции микрогридов, их потенциала для решения проблем локального производства электрической и тепловой энергии.

Задачи исследования:

1. Изучение основных принципов работы микрогридов.
2. Рассмотрение преимуществ и недостатков микрогридов по сравнению с традиционными системами электроснабжения.
3. Анализ перспектив развития микрогридов в контексте микроэнергетики.
4. Оценка потенциала микрогридов для обеспечения надёжного и устойчивого энергоснабжения.

### **Основная часть**

1. Основные принципы работы.

Микрогриды работают на основе принципа децентрализации, который позволяет создавать автономные системы электроснабжения на уровне отдельных зданий, районов или городов. В их состав входят следующие компоненты:

- 1.1. Источники энергии: солнечные панели, ветряные турбины, биогазовые генераторы и т. д.
- 1.2. Системы хранения энергии: аккумуляторы, суперконденсаторы и т. п.
- 1.3. Устройства управления и контроля: контроллеры, инверторы и др.
- 1.4. Сети передачи энергии: линии электропередачи, тепловые сети и т. д.

Управление микрогридом осуществляется с помощью интеллектуальных систем управления, которые, в свою очередь, обеспечивают оптимальное использование источников энергии и эффективное распределение электрической и тепловой энергии между потребителями.

2. Преимущества и недостатки.

Преимущества микрогридов включают:

- 2.1. Высокую эффективность использования альтернативных источников энергии.
- 2.2. Снижение потерь при передаче электроэнергии и тепла.
- 2.3. Уменьшение колебаний напряжения и частоты за счёт улучшения качества электроснабжения.
- 2.4. Интеграция с другими источниками энергии, например, такими как централизованные электросети.
- 2.5. Обеспечение надёжного энергоснабжения в случае отключения центральной электросети.

Недостатки микрогридов связаны с необходимостью больших инвестиций в их создание и эксплуатацию, а также с возможными сложностями в управлении и контроле за работой. Кроме того, микрогриды требуют разработки новых стандартов и правил для обеспечения безопасной и надёжной работы системы.

3. Перспективы развития.

Развитие микрогридов имеет большой потенциал в микроэнергетики, так как они позволяют создавать эффективные системы локального производства электроэнергии и тепла на основе возобновляемых источников энергии. Это может привести к снижению зависимости от централизованных электросетей и повышению устойчивости энергосистемы в целом.

Кроме того, развитие микрогридов может значительно способствовать прогрессу в области технологий хранения энергии, управления энергопотреблением и интеграции различных источников энергии. Эти инновации могут привести к созданию более эффективных и устойчивых систем электроснабжения, которые будут лучше адаптироваться к изменяющимся условиям и потребностям. В результате, мы сможем обеспечить надёжное и экологически чистое энергоснабжение, что станет важным шагом к устойчивому развитию в будущем.

4. Потенциал микрогридов для надёжного и устойчивого энергоснабжения.

Потенциал микрогридов заключается в том, что они могут обеспечивать надёжное и устойчивое энергоснабжение в условиях нестабильности централизованных электросетей.

Микрогриды могут работать автономно от централизованной электросети, что позволяет избежать перебоев электроснабжения в аварийных ситуациях или других проблемах.

Также они могут быть использованы для объединения возобновляемых источников энергии в энергосистему, что будет способствовать снижению выбросов парниковых газов и улучшению экологической ситуации.

### **Заключение**

Таким образом, концепция микрогридов представляет собой перспективное направление развития микроэнергетики, она может стать решением для локального производства электрической и тепловой энергии на основе возобновляемых источников. Однако для успешного внедрения микрогридов необходимо решить ряд проблем, связанных с инвестициями, управлением и контролем, а также разработкой новых стандартов и правил.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Андреев В.М. Децентрализованная энергетика и микрогриды // Энергетика за рубежом. – 2019. – № 3. – С. 3–12.
2. Башмаков И.А. Микрогриды как перспективное направление развития электроэнергетики // Энергосбережение. – 2020. – № 4. – С. 56–63.
3. Волков С.В., Гамазин С.И., Цырук С.А. Локальные системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 176 с.
4. Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина Н.В. Альтернативные энергоносители. – М.: Наука, 2004. – 159 с.
5. Грибков С.В. Микрогриды: перспективы развития и внедрения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № 2 (47). – С. 82–87.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СНИЖЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ТЕПЛОВУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПТУ К-500-65**

**Н.В. Зубов**

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
ИФФ, АЭС, группа 1-ЯЭУ*

Научный руководитель: М.А. Вольман, к.т.н., доцент каф. АЭС ИГЭУ

Нарастающий дефицит органического топлива и устойчивый рост энергопотребления в странах мирового сообщества диктуют необходимость развития альтернативных источников энергии, наиболее реальным из которых в настоящее время является ядерное топливо [4, с. 8].

Сейчас ядерная энергетика является значительной составляющей мировой экономики, альтернатив её широкомасштабному развитию в нашей стране и в мире попросту нет. Модель замены первичных энергоносителей итальянского физика Маркетти, предсказывает, что к 2050 на энергетическом рынке будут господствовать ядерная энергетика и природный газ [3, с. 398].

Атомная электростанция практически не влияет на радиационную обстановку окружающей местности, выбросы аэрозолей, парниковых и ядовитых газов по сравнению с традиционными ТЭС у нее практически отсутствуют.

Однако поскольку паротурбинные установки одноконтурных и двухконтурных АЭС имеют дело с насыщенным паром, показатели их тепловой экономичности ниже, чем у ТЭС. А чем ниже показатели тепловой экономичности, тем больше тепловое загрязнение окружающей среды, больше потребление топлива, больше капитальные затраты на сооружение энергоблока.

В данной работе анализируется тепловая схема и один из способов повышения тепловой экономичности паротурбинной установки К-500-65, работающей в энергоблоке с реактором РБМК-1000.

Тепловая схема паротурбинной установки К-500-65 (рис. 1) имеет каскадную схему сброса дренажей подогревателей низкого давления, все дренажи сепаратора-подогревателя сбрасываются в деаэратор, схема не имеет в своем составе подогревателей высокого давления. Такие решения серьезно влияют на снижение тепловой экономичности.

Существуют резервы повышения тепловой экономичности.

К таким резервам относятся [2, с. 418]:

- использование бездеаэраторной схемы;
- снижение гидравлического сопротивления паропроводов отбора пара на регенеративные подогреватели;
- увеличение числа регенеративных подогревателей;
- снижение гидравлического сопротивления тракта промежуточного перегрева.

Для тепловой схемы ПТУ К-500-65 недопустимо исключение из схемы деаэратора, не предусмотрено увеличение числа регенеративных подогревателей. Но возможны варианты со снижением гидравлических сопротивлений.

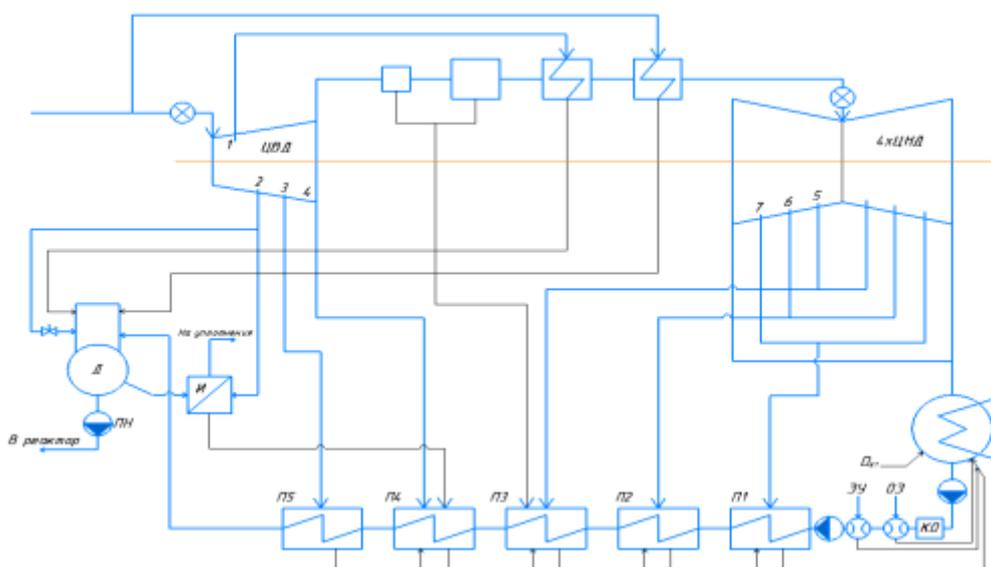


Рис. 1. Тепловая схема К-500-65

В данной работе анализируется влияние снижения гидравлических сопротивлений паропроводов отбора пара на регенеративные подогреватели и гидравлического сопротивления тракта промежуточного перегрева на тепловую экономичность.

Расчет тепловой схемы ПТУ К-500-65 был выполнен по методике, описанной в [1]. Расчитанные показатели тепловой экономичности представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета тепловой схемы турбоустановки К-500-5,9/30

Схема	КПД брутто, $\eta_b$ , %	Удельный расход теплоты на турбоустановку, $q_{\text{т}}$ , кДж/(кВт·ч)	Удельный расход выгоревшего ядерного топлива, $b_{\text{я.т}}$ , г/(МВт·ч)
Исходная	32,32	11138,747	0,1662

Рассмотрены случаи снижения гидравлических сопротивлений паропроводов отбора пара на каждый регенеративный подогреватель низкого давления по отдельности друг от друга на 10, 20 и 30 %. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты расчета для вариантов со снижением гидравлических сопротивлений в регенеративных подогревателях К-500-5,9/30

Схема	ΔРП5 КПД брутто η <sub>э</sub> , %	ΔРП4 КПД брутто η <sub>э</sub> , %	ΔРП3 КПД брутто η <sub>э</sub> , %	ΔРП2 КПД брутто η <sub>э</sub> , %	ΔРП1 КПД брутто η <sub>э</sub> , %
-10 %ΔР	32,326	32,32	32,32	32,321	32,321
-20 %ΔР	32,333	32,321	32,32	32,322	32,322
-30 %ΔР	32,339	32,322	32,32	32,323	32,323

Сколько-либо заметные изменения получаются лишь при изменении гидравлических сопротивлений в паропроводах на первый по ходу пара подогреватель низкого давления.

Рассмотрены случаи снижения гидравлических сопротивлений в элементах тракта промежуточного перегрева. Поскольку потери в каждом элементе тракта оцениваются в 2–3 %. Рассчитаны варианты снижения сопротивления в каждом элементе сепаратора-подогревателя с 3 до 2 %, т. е. на 33 %.

Таблица 3. Результаты расчета для вариантов со снижением гидравлических сопротивлений в элементах тракта промежуточного перегрева К-500-5,9/30

Схема	ΔРС КПД брутто, η <sub>э</sub> , %	ΔРПП1 КПД брутто, η <sub>э</sub> , %	ΔРПП2 КПД брутто, η <sub>э</sub> , %
-33 %ΔР	32,349	32,343	32,344

### Заключение

В тепловой схеме ПТУ К-500-65 для повышения тепловой экономичности наиболее эффективно снижать гидравлические сопротивления в тракте промежуточного перегрева и в паропроводе отбора на первый регенеративный подогреватель (П5).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов С.Г., Ильченко А.Г., Каёкин В.С. Расчет тепловых схем атомных электрических станций. – Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, 2016. – 96 с.
2. Аметистов Е.В., Трухний А.Д., Макаров А.А. Основы современной энергетики. Современная теплоэнергетика. Часть первая. Современная теплоэнергетика. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 368 с.: ил. – ISBN: 5-7046-0890-6 (ч. 1).
3. Роудс Р.Л. Энергия: история человечества / пер. с англ. Д. Прокофьева. – Москва : КоЛибри : Азбука-Аттикус, 2021. – 494 с. : ил.
4. Скачек М.А. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация [Текст]: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Ядерная энергетика и теплофизика». – Москва: Изд. дом МЭИ, 2014. – 551 с.: ил.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РЕГИОНАХ РОССИИ

**И.В. Зарубин**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, группа Э-14*

Научный руководитель: И.А. Павличенко, ассистент каф. ЭПП, АлтГТУ им. И.И. Ползунова

Ядерная энергетика получила свое распространение из-за большого количества выделяемой энергии в процессе деления ядерных атомов, эту энергию можно использовать для получения тепло и электроэнергии.

Ядерная энергетика имеет свои преимущества над другими способами добычи электроэнергии, примером может служить, что ядерная энергетика является экологически безопасным источником энергии, ядерные станции не выделяют вредные газы и парниковые газы, ядерная энергетика является одним из самых эффективных способов добычи энергии, потому что небольшое количество ядерного топлива может обеспечить получение большого количества электроэнергии. Оба перечисленных пункта вместе позволяют значительно снизить загрязнение экологии, что сейчас является важным пунктом в развитии всех стран. На этом достоинства ядерной энергетике не заканчиваются, ядерные станции имеют высокий уровень надежности при соблюдении всех норм и правил, они могут долгий промежуток времени работать без перерывов, это позволяет иметь энергетическую независимость стран, от других стран, поставщиков электроэнергии. В настоящее время происходят активные исследования и разработки в области ядерных реакторов, разработки направлены на создание более безопасных ядерных реакторов, а также на повышение их эффективности и экономичности. Так же не стоит забывать о недостатке ядерных реакторов в виде ядерных отходов, сейчас активно исследуются способы снижения их количества и способы снижения их действия на окружающую природу. Ядерные реакторы являются независимыми от погодных условий, в отличие от зависимых солнечных и ветровых электростанций. Особенностью электроэнергии вырабатываемой ядерной станцией является ее расположение в графиках суточной нагрузки, где по горизонтали расположены часы суток, а по вертикали нагрузки в значения млн кВт. Особенность заключается в том, что электроэнергия от ядерных реакторов, является фундаментальной, ядерные реакторы работают всегда на свою номинальную мощность и не отключаются в зависимости от нагрузок, что снижает нагрузки на другие способы получения электроэнергии.

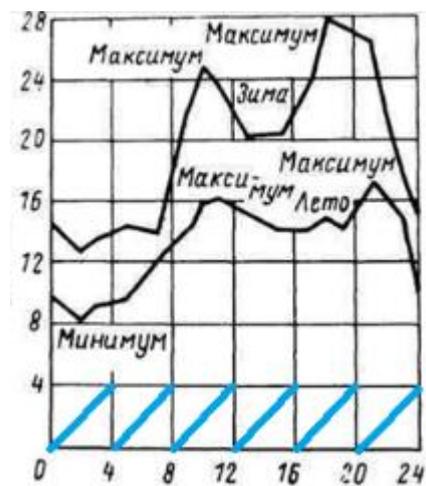


Рис. 1. График суточной нагрузки

Вскоре ядерная электроэнергетике, будет иметь наибольшее распространение в большинстве регионах, регионы будут иметь электроэнергетическую независимость, все это позволит снизить потери на перетоки мощности, снизить загрузки ТЭЦ и вследствие сократить выбросы вредных веществ. Позволит создавать новые промышленные объекты, требующие больших мощностей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ядерный реактор // Википедия [Электронный ресурс]. – URL: <http://surl.li/svxuch> (дата обращения: 12.11.2024).
2. Обзор ядерных технологий 2024 // Международное агентство по атомной энергии [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-inf4\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-inf4_rus.pdf) (дата обращения: 12.11.2024).
3. Взгляд в будущее // kommersant [Электронный ресурс]. – URL: <https://special.kommersant.ru/rosatom-2022/future.php> (дата обращения: 13.11.2024).

## ОГРАНИЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В РЕГИОНАХ РОССИИ

**И.В. Зарубин**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, ЭФ, группа Э-14*

В настоящее время для получения электроэнергии при технико-экономическом сравнении вариантов все чаще рассматривается солнечная генерация, которую в свою очередь принято считать экологически чистым источником энергии. С ростом распространенности солнечных панелей возникает вопрос о правильном способе их утилизации после истечения их эксплуатационного срока, с этим возникают диалоги о правильной утилизации солнечных панелей, рациональностью их использования, стоимостью переработки и наличием нормативной базы для их переработки.

Основной недостаток – зависимость от погодных условий, обусловленный снижением эффективности выработки электроэнергии солнечными панелями в облачные дни, а также зависимость солнечной инсоляции в течение суток, что, зачастую, не совпадает с пиками в суточном графике электропотребления. Отсюда вытекает необходимость использования данного типа генерации в гибридном формате с традиционной генерацией или же установкой накопителей электроэнергии, что несёт за собой дополнительные затраты на капитальные вложения и эксплуатацию таких электростанций. Вторая проблема акцентирована вокруг утилизации солнечных панелей, она включает в себя такие пункты, как недостаток информирования потребителей о утилизации солнечных панелей, которые не знают о необходимости их утилизации. Проблема утилизации солнечных панелей стоит на уровне инфраструктуры и государства, в многих регионах нет мест для сбора и переработки отработанных солнечных панелей, из-за этого панели могут оказаться просто на свалке, что может привести к загрязнению окружающей среды, государство должно регламентировать стандарты по утилизации, где указывались четкие требования и стандарты. Возможно отсутствие утилизационной базы связано с экономической сферой, следовательно создание солнечных панелей становится не рациональным, и стоит уйти к другим источникам электроэнергии.

С учетом роста интереса к устойчивому развитию и уменьшению углеродного следа проблемы утилизации должны решаться как на уровне компаний, продающих солнечные батареи, которое будут проводить информирование о правильной утилизации, и предоставлять информацию о центрах сбора и переработки, так и на уровне государства, которому следует разработать обязательный стандарт утилизации для всех поставщиков солнечных панелей. Стандарт так же должен затрагивать пункт о повторном использовании материалов, что позволит снизить количество отходов, которые попадают на свалки. Разработка новых методов и технологий переработки позволит сократить количество отходов и минимизировать использование токсичных материалов.

Утилизация солнечных панелей является важным аспектом, который необходимо учитывать в случае выбора источников получения электроэнергии, потому что выбор в пользу постройки гидроэлектростанции или ядерного реактора, может быть более технически рациональным и выгодным, чем застройка больших территорий солнечными панелями. Решение проблем утилизации может гарантировать, что солнечная энергия будет не только чистым, но и экологически безопасным и бюджетным источником энергии

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Краткие сведения о солнечных панелях // Энерготрейд [Электронный ресурс]. – URL: <https://energotrade.ru/blog/about-solarbattery.htm> (дата обращения: 12.11.2024).
2. Утилизация солнечных панелей: экологический вызов и пути решения // Технолайн [Электронный ресурс]. – URL: <https://e-solarpower.ru/stati/utilizaciya-solnechnyh-batarey-ekologicheskij-vyzov-i-puti-resheniya/> (дата обращения: 12.11.2024).
3. Как производятся солнечные панели // Reenergo [Электронный ресурс]. – URL: <https://reenergo.ru/blog/kak-proizvodyatsya-solnechnye-paneli/> (дата обращения: 13.11.2024).

## ВНЕДРЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В ТРАНСПОРТ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**А.Р. Балыбердин**

*Казанский государственный энергетический университет, ИЭЭ ЭКиС, группа ЭМТ-1-21*

Научный руководитель: М.В. Савина, к.т.н., доцент ИТЭ ЭМС

Транспортная отрасль является одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов и загрязнителей окружающей среды. Доля выбросов углекислого газа, оксидов азота, твердых частиц и других вредных веществ, возникающих вследствие использования традиционных видов топлива, таких как бензин и дизельное топливо, остается значительной, что способствует изменению климата и ухудшению качества воздуха в городах. В связи с этим внедрение альтернативных видов топлива в транспорт становится приоритетной задачей для повышения экологической безопасности и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

### **Электрический транспорт и его преимущества**

Электромобили стали одной из наиболее перспективных технологий для экологически чистого транспорта. Преимущества использования электричества в транспортных средствах:

- *Отсутствие локальных выбросов:* Электрические автомобили не выделяют выхлопных газов, что снижает загрязнение воздуха в городах.
- *Энергоэффективность:* Электродвигатели значительно эффективнее ДВС, что позволяет экономить энергию и ресурсы.
- *Использование возобновляемых источников:* Электротранспорт может заряжаться от возобновляемых источников энергии (солнечных, ветровых, гидроэнергетических станций).

Ключевыми проблемами для широкого распространения электромобилей остаются недостаточно развитая инфраструктура зарядных станций и высокая стоимость аккумуляторов. Их можно решить увеличением объемов производства и технологических улучшений.

### **Водородное топливо: перспективы и проблемы**

Водородное топливо привлекает все больше внимания как альтернатива углеводородам. Транспортные средства на водородных топливных элементах предлагают несколько ключевых экологических преимуществ:

*Нулевые выбросы:* Единственным побочным продуктом при использовании водорода является вода, что делает водородный транспорт полностью экологически чистым.

*Быстрая заправка:* Заправка водородного автомобиля занимает несколько минут, что сравнимо с традиционными заправками бензином или дизелем, в отличие от более длительного времени зарядки электромобилей.

Есть несколько проблем, связанных с водородным топливом: высокая стоимость производства водорода, сложная инфраструктура хранения и транспортировки, а также необходимость использования возобновляемых источников энергии для производства экологически чистого водорода. Несмотря на это, в ближайшие годы ожидается рост инвестиций в водородную инфраструктуру.

### **Биотопливо: снижение углеродного следа**

Биотопливо, получаемое из возобновляемых органических ресурсов, таких как растительные культуры, водоросли или сельскохозяйственные отходы, представляет собой еще один перспективный источник для снижения выбросов в транспортной отрасли. Основные виды биотоплива включают биоэтанол и биодизель.

- *Биоэтанол:* Производится из сельскохозяйственных культур. Этот вид топлива может использоваться как добавка к бензину, снижая объем выбросов углекислого газа.

- *Биодизель*: Изготавливается из растительных масел и животных жиров. Этот вид топлива уже активно используется в некоторых странах, так как может заменить традиционный дизель.

Биотопливо уменьшает выбросы углекислого газа и других загрязнителей. Однако оно также вызывает споры из-за конкуренции за сельскохозяйственные ресурсы и возможного увеличения вырубки лесов для выращивания биомассы. Для решения этих проблем разрабатываются новые виды биотоплива, такие как биотопливо второго поколения, которое производится из отходов и не требует использования сельхозугодий.

### **Синтетическое топливо: путь к углеродно-нейтральному транспорту**

Синтетическое топливо, также известное как электросинтетическое или Power-to-Liquid (PtL), производится из водорода и углекислого газа, извлеченного из атмосферы или промышленных выбросов. Этот вид топлива может использоваться в традиционных ДВС, что делает его подходящим для транспортных средств, которые сложно перевести на электрическую тягу (например, авиация и грузовой транспорт).

Преимущества синтетического топлива включают:

- *Углеродная нейтральность*: Поскольку углекислый газ, используемый для производства топлива, уже содержится в атмосфере, его повторное использование не увеличивает общий объем выбросов CO<sub>2</sub>.

- *Совместимость с существующей инфраструктурой*: Синтетическое топливо можно использовать в современных двигателях и топливных системах, что снижает затраты на переход.

Хотя синтетическое топливо обещает стать ключевым решением для транспортных отраслей с высокой интенсивностью выбросов, его производство требует больших объемов энергии, и на данный момент оно остается дорогим.

### **Метан и сжатый природный газ (СПГ)**

Сжатый природный газ (СПГ) и метан также рассматриваются как более экологически чистые виды топлива. Они могут существенно сократить выбросы углекислого газа, оксидов азота и твердых частиц по сравнению с бензином и дизелем. Метан может производиться из органических отходов (биогаз), что делает его возобновляемым ресурсом.

*Метан как биогаз*: Производство метана из отходов и биомассы позволяет решать сразу две задачи: утилизацию отходов и получение чистого топлива.

*СПГ как переходное топливо*: Сжатый природный газ имеет значительно меньший углеродный след, чем традиционные виды топлива, и может использоваться в тяжелом транспорте, таком как грузовики и автобусы.

Однако СПГ все еще является ископаемым топливом, и его широкое использование не решает проблему долгосрочного отказа от углеводородов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ахметов С.И. Альтернативные виды топлива и их применение в транспорте // Экологический вестник России. – 2019. – № 3. – С. 55–61.
2. Климов А.Г. Перспективы развития водородного транспорта // Водородная энергетика и транспорт. – 2020. – Т. 5, № 2. – С. 28–34.
3. Иванов П.А. Электромобили: технология, инфраструктура и экологические преимущества // Инновации в транспорте. – 2021. – № 6. – С. 15–22.
4. Лебедев И.В., Сидорова, Е. М. «Синтетическое топливо: технология производства и перспективы применения // Топливная энергетика будущего. – 2020. – № 8. – С. 72–80.
5. Смирнов В.А. Биотопливо: экологические преимущества и вызовы // Журнал альтернативных источников энергии. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 44–51.
6. Соколова Н.П. Метан и СПГ в транспортной системе: экологические аспекты и применение // Газовая промышленность и транспорт. – 2019. – № 9. – С. 60–66.
7. Федоров К.В. Инновации в области альтернативных видов топлива // Международный журнал экологии и технологий. – 2022. – № 10. – С. 87–95.
8. Чернышов Д.А. Возобновляемые источники энергии для электромобилей: будущее и проблемы развития // Технологии чистой энергии. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 35–42.

# Секция 4

## Экологические проблемы энергетики

### ВЛИЯНИЕ СОПЕЛ ТРЕТИЧНОГО ДУТЯ НА ТОПОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СЖИГАНИИ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРНОЙ ТОПКЕ

К.И. Мальцев

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, ассистент

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Одним из самых дешевых и распространенным источников энергии являлся уголь, и, по всей видимости, сохранит эти свойства в ближайшем будущем. Наиболее распространенным способом сжигания твердого топлива на ТЭС является факельное сжигание. Большая часть тепловой и электрической энергии вырабатывается на ТЭС, однако при сжигании твердого топлива образуется множество вредных веществ [2, 3].

Целью работы является оценка влияния сопел третичного дутья на процессы, протекающие в топочной камере, при сжигании твердого топлива и повышение экологической эффективности.

В качестве объекта исследования выбран барабанный паровой котел с П-образной компоновкой БКЗ-210-140. Топочная камера которого имеет почти квадратную форму с размерами 7424×7808 мм по осям. Сжигание твердого топлива осуществляется путем создания вихря в центре топочной камеры прямоточными щелевыми горелками, которые располагаются в ее углах.

Для уменьшения воздействия на окружающую среду исследовано воздействия сопел третичного дутья на процессы сжигания. Четыре сопла, сечением 508×204 мм каждое расположены на отметке +11,5 м, направленные сопел противоположно направлению основных горелок.

Исследование топочных процессов проведены при помощи численного моделирования с использованием ANSYS Fluent [4].

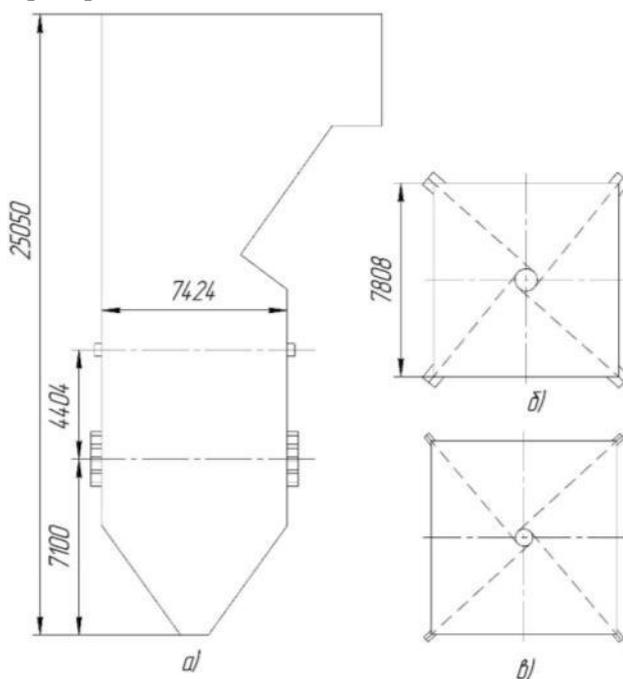


Рис. 1. Топочная камера котла БКЗ-210-140:  
а) продольное сечение; б) горизонтальное сечение (отметка +7,1 м); в) горизонтальное сечение (отметка +11,5 м)

В отсутствии третичного дутья локальный максимум температуры наблюдается в области горелочных устройств (рис. 1), где температура достигает  $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При значениях доли третичного дутья в пределах от 10 до 20 % изменение распределения температуры в топочном объеме незначительно. При увеличении доли воздуха на третичное дутье свыше 30 % фиксируется снижение температуры в центре горения, что связано с дефицитом окислителя в этой зоне, в результате чего топливо не выгорает полностью. При дальнейшем увеличении доли на третичное дутье (40 и 50 %) максимальные температуры составляют 1320 и  $1215\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно.

При отсутствии третичного дутья температура перед высокотемпературными поверхностями нагрева составляет  $1087\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при увеличении воздуха, подаваемого на третичное дутье, в диапазоне от 0 до 20 % изменение значений температур незначительно. Отмечается снижение температур ( $980\text{--}1020\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) при увеличении доли третичного дутья от 40 % и выше.

Тангенциальная компоновка горелочных устройств обеспечивает создание вихря в центре топочной камеры. При увеличении доли третичного воздуха свыше 30 % отмечено снижение температур в ядре горения.

В базовом варианте максимальное значение  $\text{O}_2$  по центральной оси топки наблюдается в зоне активного горения. В целом по всей высоте топочной камеры содержание кислорода в центральной оси составляет от 0 до 3 %, что обуславливается сосредоточением ядра факела в центре топочной камеры. Во всех рассматриваемых вариантах, содержание кислорода в нижней части топки составляет минимальные значения, близкие к нулю. Содержание кислорода в топочном объеме возрастает на высотных отметках от 7 до 9 м из-за подачи воздуха для горения через основные горелочные устройства. Также отмечено повышенное содержание кислорода  $\text{O}_2$  после аэродинамического выступа (8 %) при доле третичного воздуха свыше 30 %.

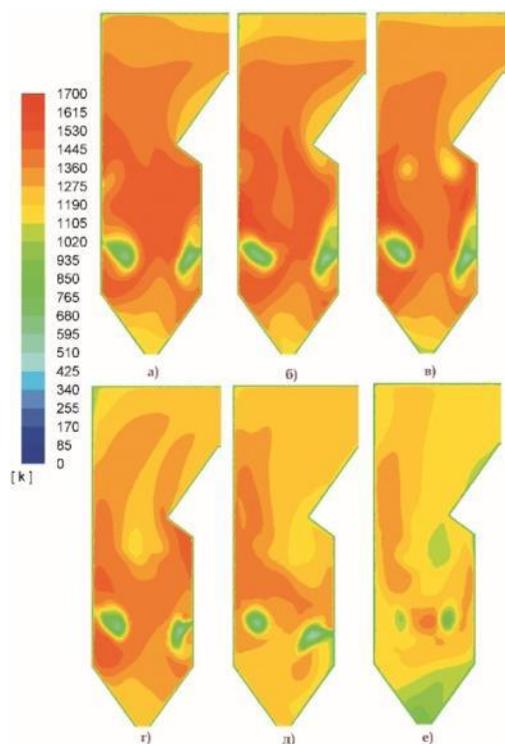


Рис. 2. Поле температур в продольном сечении топки. Доля третичного воздуха, %: а) 0; б) 10; в) 20; г) 30; д) 40; е) 50

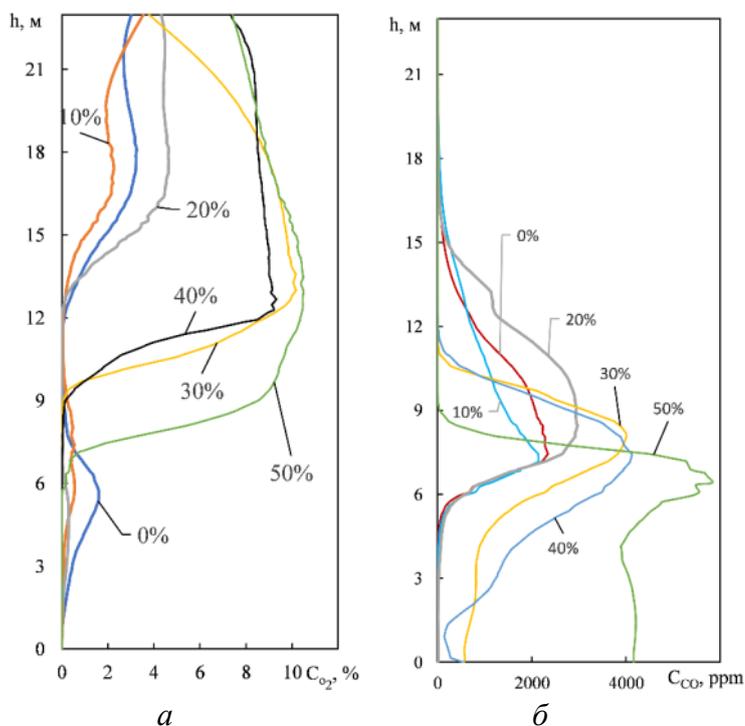


Рис. 3. Изменение концентрации кислорода (а) и монооксида углерода (б) по высоте топки в ее центральной оси

Во всех исследуемых случаях содержание СО на выходе из топочной камеры приближается к нулю. В базовом варианте локальный максимум концентрации СО находится в нижней части топочной камеры и достигает значения не более 2000 ppm. При доле третичного воздуха 40 % содержание угарного газа в нижней части топки достигает 3750 ppm. При доли третичного воздуха 50 % содержание угарного газа в нижней части топочной камеры и в области горелок составляет 6000 ppm, что указывает на неполную реакцию горения топлива и возможный механический недожог твердого топлива, который впоследствии удаляется через холодную воронку, с повышенным содержанием горючих компонентов в шлаке.

С увеличением доли третичного дутья также отмечается снижение концентрации оксидов азота. В базовом варианте концентрация NO<sub>x</sub> на выходе из топочной камеры составляет 598 мг/м<sup>3</sup>, тогда как при доле третичного дутья 30 % уровень их образования снижается на 25 %, достигнув значения 448 мг/м<sup>3</sup>.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274/>*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
2. Хзмалян Д.М., Каган А.Я. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
3. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
4. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле паропроизводительностью 220 т/ч / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, А.С. Заворин, Д.В. Лебедь // Теплоэнергетика. – 2022. – Т. 12. – № 12. – С. 73–83.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПИРОЛИЗА ПЛАСТИКА

**М.Е. Макарейкин**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ им. Бутакова, группа 5Б21*

Научный руководитель: К.Б. Ларионов, к.т.н., доцент НОЦ им. Бутакова ИШЭ ТПУ

Пластики стали незаменимым материалом в жизни человека: за счёт своей малой плотности, высокой механической прочности, химической стабильности и других свойств, они покорили все сферы жизни человека: люди используют полимеры в машиностроении, строительстве обычных домов и даже в сельском хозяйстве, кроме того вся бытовая техника, цифровые гаджеты и украшения – это предметы из пластика. Однако отрицательная сторона данного материала – негативное влияние на окружающую среду. С 1950 года было произведено более 8 миллиардов тонн пластика, более половины из которых были складированы на свалках, и лишь около 9 % было переработано [1]. Разрушение окружающей среды от пластика связано с процессом его распада, из-за чего химические вещества, используемые для его производства, начинают выделяться в почву и грунтовые воды. Стоит отметить, что зачастую в процессе разложения пластика происходит выделение его составляющих (таких как фенол, бисфенол А, стирол, диоксины, хлоропрен, ртуть, формальдегиды и прочие вещества) в окружающую среду, что оказывает на неё губительное влияние. Так, деградация биоразлагаемых пластиков может привести к выбросу метана – одного из самых сильных парниковых газов, играющих ключевую роль в усилении глобального потепления. [2].

На данный момент для решения проблемы утилизации использованного пластика существует 3 способа переработки: механический, химический и термический. Механический способ заключается в дроблении, расплавлении и создании гранул, из которых будут сделаны новые бутылки, контейнеры и другие изделия, а химический – в разложении на составляющие и восстановлении обратно в сырьё [3]. К термическим методам относится пиролиз – термохимическая конверсия сырья на основе отходов без участия кислорода или воздуха при повышенных температурах (450–800 °С). В результате данного процесса пластик распадается на неконденсируемые газы, жидкие углеводороды и кокс [4].

Полученный полукокс может быть использован в качестве твердого топлива. Исследование жидких углеводородов (пиролитического масла) проводилось путём спектроскопического анализа: к таким методам анализа относятся Н ЯМР; С ЯМР; ИК-Фурье. В результате анализа методом С ЯМР было выяснено, что свойства полученных путём пиролиза пластика жидких углеводородов в целом схожи с характеристиками бензина и дизельного топлива. Это дает возможность рассматривать пиролитическое масло как альтернативный источник топлива как для отопительных систем, так и для транспортных средств при смешивании с традиционными видами топлива [4]. Исследования показали, что оптимальное соотношение составляет 20 % пиролитического масла и 80 % обычного дизельного топлива, что обеспечивает лучшую эффективность сгорания при уровне выбросов, сопоставимом с чистым дизельным топливом. Повышение доли пиролитического масла в смеси (например, до 50 %) приводит к увеличению расхода топлива и выбросов, что делает такое соотношение менее целесообразным. Теплотворная способность пиролитического масла варьируется от 38 до 42 МДж/кг, что немного ниже, чем у дизеля. Соотношение 20/80 способствует эффективному использованию ресурсов и снижению потребления природных энергетических ресурсов, делая его привлекательным как с экологической, так и с точки зрения экономики.

В данной работе приведено описание итогов исследования процессов горения различных фракций жидких углеводородов, которые были получены пиролизом пластиковых отходов. Изучение процессов капельного зажигания и горения проводилось на специальной экспериментальной установке, условия теплообмена которой максимально приближены к реальным условиям работы оборудования на промышленных предприятиях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Plastic Pollution by Country 2024 / [Электронный ресурс] // World Population Review : [сайт]. – URL: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/plastic-pollution-by-country> (дата обращения: 18.11.2024).
2. Манаков В.Ю. Отходы пластика в современном мире и их воздействие на природу // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 12 [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_43929161\\_97295663.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43929161_97295663.pdf) (дата обращения: 18.11.2024).
3. От химии до радиации: какие бывают способы переработки пластика? / [Электронный ресурс] // Зелёный: [сайт]. – URL: <https://green.reo.ru/articles/tpost/dmvp8j69p1-ot-himii-do-radiatsii-kakie-bivayut-spos> (дата обращения: 18.11.2024).
4. Ковалева, Н.Ю., Раевская, Е.Г., Рошин, А.В. Пиролиз пластиковых отходов. Обзор // Химическая безопасность. – 2020. – № 1. [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_43127093\\_35464608.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43127093_35464608.pdf) (дата обращения: 18.11.2024).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА В ДУГЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПЛАЗМОТРОНА

К.И. Бабич, Ю.С. Денисов, М.В. Обрывалин

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН

Научный руководитель: Д.И. Субботин, к.х.н., ИЭЭ РАН

Сероводород, с точки зрения химической промышленности обладает некой двойственностью. С одной стороны, это крупнотоннажный побочный продукт нефтехимической промышленности, и его утилизация является важной задачей, с другой в будущем, при разработке соответствующих технологий, сероводород может стать ценным сырьем, т. к. существуют довольно больше природные запасы этого соединения. В настоящий момент основным способом утилизации сероводорода является процесс Клауса, обладающий рядом недостатков. В данном процессе происходит окисление сероводорода до элементарной серы и воды, что не позволяет использовать ценное сырье – водород, который можно было бы получить в процессе утилизации  $H_2S$  другими методами. Кроме того, процесс Клауса сопровождающееся выделением низкопотенциального тепла, которое сложно использовать [1]. В данной работе представлен новый метод переработки и разложения сероводорода на водород и элементарную серу с помощью плазменной дуги высоковольтного плазматрона переменного тока.

Первым этапом исследований стали термодинамические расчеты для оценки параметров работы плазматрона: температура в реакторе, удельный расход защитного газа (аргона) относительно сероводорода. Расчет проводился в программе Chemical Workbench ver. 3.5 в равновесном реакторе типа РТ (рис. 1–2).

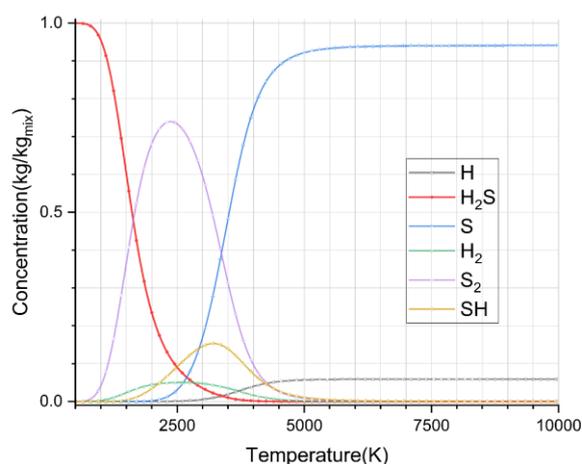


Рис. 1. Зависимость состава реакционной смеси от температуры в реакторе

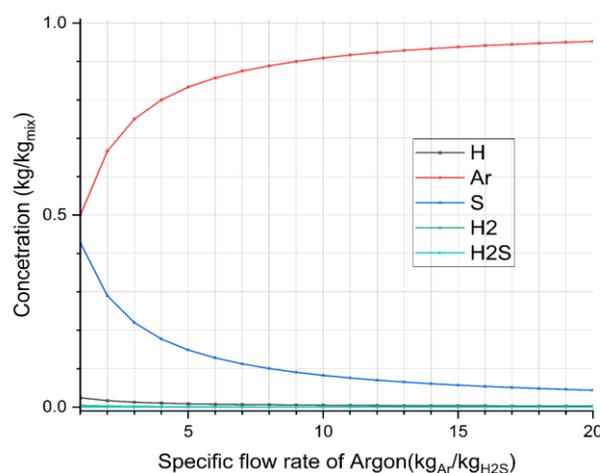


Рис. 2. Зависимость состава от удельного расхода аргона

Проанализировав расчётные данные мы выбрали оптимальные параметры проведения эксперимента. Затем был проведен опыт на экспериментальном стенде ИЭЭ РАН, с использованием высоковольтного трёхфазного плазматрона. Во время опыта снимались следующие данные: температура в разных зонах реактора, мгновенные значения тока и напряжения на плазматроне, химически состав газовой смеси на выходе. Анализ состава газовой смеси велся при помощи масс-спектрометра с квадрупольной ловушкой. Были получены данные пиковой конверсии сероводорода (она составляла 98 % в оптимальных условиях). Были рассчита-

ны затраты энергии, необходимые для разложения 1 килограмма сероводорода: 35,50 МДж (9,03 кВт·ч) и получения чистого элементарного водорода: 812,57 МДж (225,69 кВт·ч). В дальнейшем планируется усовершенствование данного метода и адаптация его под промышленное использование.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydrogen Sulfide emission sources, regulations and removal techniques: a review / O.A. Habeeb, R. Kanthasamy, G.A. Ali, et al. // Reviews in Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 34, I. 6. – P. 837–854

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ СТРУЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ

**П.А. Плаунов, А.В. Зенков**

*Томский политехнический университет, НОЦ И.Н. Бутакова, ИШЭ, группа А4-44*

Научный руководитель: Д.В. Гвоздяков, к.т.н., доцент НОЦ ИШЭ ТПУ

Струйная дезактивация, как одна из ключевых технологий радиационной безопасности, эффективно сочетает физические и химические процессы для минимизации радионуклидных загрязнений.

Цель работы – анализ современных технологий струйной дезактивации, их эффективности, преимуществ, недостатков и применимости в различных условиях.

Струйная дезактивация радиации представляет собой метод очистки поверхностей от радиоактивных загрязнений с использованием струи жидкости, воздуха или другого рабочего тела. Этот процесс основан на механических, химических и физико-химических взаимодействиях, которые способствуют снижению уровня радиоактивных веществ на обрабатываемых поверхностях [1].

Процесс дезактивации состоит из двух стадий [1]:

- *Первая стадия.* Под действием газового (водного) потока происходит отрыв прилипших радиоактивных частиц от загрязнённых поверхностей за счёт аэродинамической и подъёмной сил.

- *Вторая стадия.* Удаление радиоактивных загрязнений, потерявших связь с поверхностью обрабатываемого объекта, и предотвращение возможного вторичного загрязнения.

Существует несколько видов струйной дезактивации [2]:

- *Гидроструйная дезактивация* – это метод удаления радиоактивных загрязнений с поверхностей с использованием сильного напора воды или жидкости с добавлением химических веществ, способствующих растворению или дисперсии радиоактивных загрязнений.

- *Пневматическая дезактивация* – это метод применения струи сжатого воздуха для удаления налипших загрязнений. Данный метод может быть использован для легких загрязнений, однако менее эффективен при наличии застарелых или прочно прикрепленных частиц.

- *Абразивная дезактивация* – это метод, при котором струя абразивного вещества (например, песка или дробленого стекла) используется для механического удаления загрязнений. Эта техника может быть эффективной для удаления упорных загрязнений, но требует осторожности из-за потенциального повреждения обрабатываемой поверхности.

*Дезактивация струёй воды под давлением.* Использование водяной струи для дезактивации – это доступный и распространенный метод, применяемый для очистки оборудования,

твердых поверхностей и транспортных средств. Эффективность этого способа зависит от параметров струи, объема используемой воды и давления. Для очищения поверхностей различных изделий, учитывая их размеры и тип загрязнений, можно применять гидравлические струи с давлением от 0,05 до 50 МПа. Повышение эффективности очистки может быть достигнуто за счет добавления поверхностно-активных веществ или применения водных растворов технических моющих средств [1, 3, 6].

*Преимущества:* удовлетворительная степень очистки различных форм поверхностей, увлажнение помогает предотвратить распыление радиоактивных частиц в воздух, простота оборудования и относительно низкие эксплуатационные затраты.

*Недостатки:* неэффективна для стойких загрязнителей, большое количество радиоактивных отходов.

*Дезактивация с использованием пара* – разновидность струйной дезактивации, в которой для используют пар в качестве рабочего тела. Струя пара действует на радиоактивные загрязнения подобно воздушной струе. Она эффективно очищает замасленные поверхности и глубинные загрязнения, застрявшие в порах и углублениях. Дезактивация может происходить как в «сухом», так и в «мокром» варианте. В «сухом» варианте применяется перегретый пар, который не конденсируется на более холодных поверхностях, действует аналогично газовой, но пар обладает большей кинетической энергией и первоначальной скоростью. В «мокром» варианте, после взаимодействия струи с поверхностью, образуется жидкая пленка, способствующая удалению радиоактивных материалов [3, 4].

*Преимущества:* высокая степень очистки стойких загрязнений, меньшее количество отходов по сравнению с дезактивацией струёй воды.

*Недостатки:* относительно большие материальные и энергетические затраты, сложность эксплуатации.

*Криогенный бластинг* – разновидность абразивно-струйной дезактивации. Технология аналогична пескоструйной очистке, только вместо песка для очистки поверхности используется сухой лед под давлением. Принцип действия заключается в том, что в струйный пистолет подается сжатый воздух и гранулы сухого льда температурой  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При обработке поверхности сухой лед превращается в газообразную двуокись углерода и, увеличиваясь в объеме в 700 раз, глубоко проникает в загрязнение, «отбивая» его. Криобластинг предназначен для дезактивации радиационно загрязненных металлических поверхностей [2].

*Преимущества:* сухой лед при сублимации не оставляет никаких остатков, минимальное повреждение поверхности, удаление стойких загрязнений, не наносит вреда окружающей среде.

*Недостатки:* высокие затраты на сухой лёд и его хранение, низкий коэффициент дезактивации оборудования сложной конфигурации.

*Пневмоабразивный способ* использует энергетический потенциал твердых абразивных частиц, таких как песок или электрокорунд, которые разгоняются до высоких скоростей (50–100 м/с) с помощью газового потока. Этот метод позволяет эффективно очищать поверхности от практически всех видов загрязнений. Однако мелкие частицы пыли и продукты очистки способствуют загрязнению окружающей среды и рабочей зоны, поэтому применяется замкнутая система подачи абразивных материалов. Также стоит отметить, что пневмоабразивный способ не подходит для очистки жирных поверхностей, так как абразивные частицы с остатками масла могут прилипнуть к стенкам транспортирующей магистрали, что приводит к ее засорению и повторному загрязнению очищаемых поверхностей [2, 5].

*Преимущества:* высокая степень очистки, быстрота обработки, возможность использовать на широком спектре поверхностей.

*Недостатки:* образование пыли, относительно сильное повреждение поверхности, возможность попадания абразивных частиц в технологические полости деталей.

*Гидроабразивный способ* использует струю, состоящую из воды и абразива. Гидроабразивная обработка обеспечивает хорошую дезактивацию и эффективное удаление ржавчины и краски, причиняя меньший ущерб поверхностям по сравнению с сухим абразивным обдувом. Установки для гидроабразивной очистки, из-за значительного расхода воды, работают в замкнутом цикле использования гидроабразивных материалов, что ограничивает применение этого метода вне рабочего пространства установок. Несмотря на снижение производительности гидроабразивной очистки на 10–20 % по сравнению с пескоструйными методами, это компенсируется уменьшением вредного воздействия на здоровье и значительно меньшим негативным влиянием абразивных частиц на обрабатываемые поверхности деталей [2, 4].

*Преимущества:* снижение пылеобразования, высокая степень очистки, быстрота обработки.

*Недостатки:* возможность попадания абразивных частиц в технологические полости деталей.

*Дезактивация фреоном* представляет собой один из методов струйной очистки, при котором в качестве очищающего агента выступают фреоны. Благодаря своей низкой плотности и поверхностному натяжению, фреон легко проникает в мелкие трещины и щели, эффективно устраняя такие загрязнения, как масла и смазочные жидкости. Он не горюч и химически инертен, что позволяет безопасно дезактивировать различные тонкие компоненты оборудования без риска их повреждения. Большинство радиоактивных загрязнений не растворяются во фреоне, и их удаление происходит путем фильтрации с последующим возвращением фреона в цикл очистки [1].

*Преимущества:* многократное использование фреона после его фильтрации, возможность дезактивации электрооборудования

*Недостатки:* сложность утилизации отработанного фреона, разлагается при высоких температурах, высокие затраты на обработку и соблюдение экологических норм.

Струйная дезактивация представляет собой универсальный подход, обладающий высокой эффективностью в борьбе с радиационными загрязнениями. Современные технологии, такие как гидроструйная, пневматическая, абразивная и другие методы, позволяют с успехом очищать различные поверхности. Тем не менее, каждой технологии присущи свои преимущества и недостатки, и выбор метода дезактивации должен основываться на специфике задачи. Перспективы совершенствования струйной дезактивации заключаются в разработке новых материалов и технологий, которые могут повысить эффективность и надежность данного процесса, минимизируя при этом негативное воздействие на окружающую среду и здоровье людей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриш В.М., Дербасова Н.М. Основы технологии дезактивации. – Севастополь: СевГУ, 2017. – 316 с
2. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. – М.: Изд-во АТ, 1994. – 336 с.
3. Ампелогова Н.И. и др. Дезактивация в ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1982. – 256 с.
4. Жидкостная дезактивация узлов оборудования в растворах с комплексообразователями с электрохимической и комбинированной интенсификацией процесса / И.В. Кузнецов, М.Ю. Каленова, О.Н. Будин [и др.] // Радиохимия. – 2022. – Т. 64, № 1. – С. 45–52.
5. Кулагина Т.А., Шеленкова В.В. Способы дезактивации поверхностей с радиоактивным загрязнением // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 352–363.
6. Балабан-Ирменин Ю.В. Опыт дезактивации оборудования АЭС с реакторами ВВЭР-440 // Атомные электрические станции. – 1981. – № 4.

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК НА ИХ ИЗМЕЛЬЧАЕМОСТЬ

А.Д. Мисюкова, С.А. Янковский, В.Е. Губин

*Томский политехнический университет, ИШЭ, группа А4-44*

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Ископаемое топливо для выработки тепловой и электрической энергии является наиболее распространенным и доступным по всему миру. Ежегодное развитие производства и прирост населения приводит к увеличению объемов потребления ресурсов, и в первую очередь энергетических. Как следствие – рост выработки энергии и потребления топлива, влечет за собой колоссальные объемы выбросов парниковых газов (углекислый газ, метан и оксид азота) [1]. Углекислый газ является основной причиной глобального потепления и изменения климата. Например, на территории Сибири за последние 20 лет рост среднегодовой температуры воздуха составил +3,9 °С [2]. Однако, прекращение использования угля на тепловых электрических станциях многих стран мира на данный момент не является возможным в виду дороговизны прочих альтернативных источников энергии. В последние годы наиболее активно ведется поиск решений по снижению воздействия на окружающую среду угольными ТЭС за счет частичной замены угля более экологичными добавками. Одним из возможных решений может стать совместное сжигание угля с лигноцеллюлозной биомассой, в частности, с отходами переработки деловой древесины. Одним из наиболее активно развивающихся способов является совместное сжигание угля и биомассы в котлоагрегатах большой и малой мощности, технология которого была реализована, например, в Финляндии и США [3, 4].

Одним из важнейших этапов подготовки угля перед его подачей в котел является его дробление и измельчение. Решение задачи по подготовке топлив к сжиганию, является одной из самых важных в энергетике. Подготовка древесно-угольных топливных смесей для их совместного сжигания в горелочных устройствах также является до сих пор не решенным вопросом.

В исследованиях, выполненных нами ранее [5] было установлено, что за 12 часов совместного помола угля и древесных опилок в барабанной шаровой мельнице остаток на сите составил  $R_{200} > 30$  %. Был сделан вывод, что 12 часов помола недостаточно для массового формирования топливных смесей на основе бурых углей и древесных отходов.

Однако, для промышленного применения топливных смесей увеличение времени помола смеси нецелесообразно, поэтому была предложена гипотеза о необходимости предварительной термической обработки древесины перед её подачей в барабанную шаровую мельницу.

Целью данной работы является оценка влияния предварительной термической обработки древесных опилок на характеристики их измельчаемости при просеивании и совместном размоле с улем.

### Методика исследования

Объектом исследования являются мелкодисперсные сосновые опилки, остающиеся после лесопиления и переработки деловой древесины. Перед началом экспериментов древесные опилки очищались от древесной коры и веток, после одну часть древесины подсушивали до влажности не более 6 %, а вторую часть – до влажности не более 1 %. После высушивания опилки фракционировались на стандартизированной системе сит с размером ячеек от 1000 до 180 мкм в течение 10 минут, остаток на каждом сите взвешивался на высокоточных весах.

Результаты фракционного исследования представлены в табл. 1.

Для определения влияния термической обработки древесных опилок на характеристики их измельчения в смеси с углем был выполнен совместный размол различных компонент смесевых топлив с учетом сушки и без нее в барабанной шаровой мельнице. Для этого угольные частицы, просеянные через сито с размером ячеек 1000 мкм смешивались с древесными опилками в различных концентрациях по массе с общим весом 200 г смеси помещались в барабанную шаровую мельницу. Процесс смешивания и измельчения выполнялся одновременно в течение 12 ч. После завершения помола выполнялся просев смеси через стандартизованную систему сит.

### Результаты и обсуждение

В результате исследования определено, что смесь с высушенными древесными опилками фракционировалась лучше смеси, в которой опилки не были дополнительно обработаны. Результаты фракционного анализа графически представлены на рис. 1.

Типичные изображения смесей после смешения и размола приведены на рис. 2, а, б.

Из анализа рис. 2 видно, что опилки, не прошедшие предварительную термическую обработку, в большей части прессуются под воздействием угля и размольных шаров. Волокна древесины не распадаются, что препятствует достаточному измельчению.

Дополнительно просушенные древесные опилки показали лучшие результаты – спрессованных частиц в смеси было меньше, и проход через сито с размером ячеек 200 мкм увеличился в 4 раза.

В результате выполненных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что предварительный нагрев и сушка древесных опилок до значений  $W^a \leq 1\%$  существенно влияет на совместное измельчение древесно-угольных смесей. Результаты экспериментов показали, что для подсушенной древесной биомассы проход через сито с размером ячеек 500 мкм увеличился в 0,87 раз, через сито с размером ячеек 400 мкм – в 2 раза, а с размером ячеек 180 мкм – в 4 раза. Таким образом можно сделать вывод, что дополнительная

Таблица 1. Результаты фракционного исследования древесных опилок

Влажность аналитическая	$W^a = 6\%$	$W^a = 0,7\%$
Остаток на сите, мкм		
$R_{1000}$	35,2	25,8
$R_{500}$	10,8	17,0
$R_{400}$	3,2	5,6
$R_{180}$	0,4	1,8

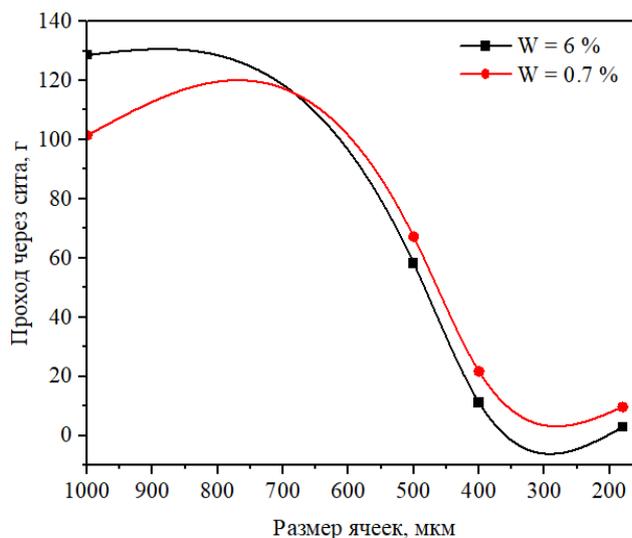


Рис. 1. Интегральная зерновая характеристика, полученная на шаровой барабанной мельнице: 1 – У-100; 2 – У-90/Д-10; 3 – У-75/Д-25; 4 – У-50/Д-50; 5 – область тонких фракций пыли; 6 – область грубых фракций пыли

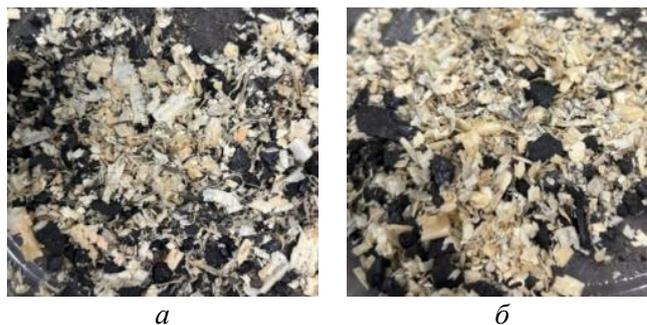


Рис. 2. Типичные изображения смесей угля и древесных опилок после совместного смешения в шаро-барабанной мельнице: а – влажность опилок 6 %; б – влажность опилок 0,7 %

сушка древесных опилок перед измельчением и смешением с углем для последующего совместного помола позволит существенно оптимизировать процессы подготовки угольно-древесных смесевых топлив для совместного сжигания в пылеугольных котлах.

*Работа выполнена при поддержке гранта FSWW-2022-0018, реализуемого в рамках проекта создания новых молодежных лабораторий.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Overview of Greenhouse Gases // U.S. Environmental Protection Agency 2024. – URL: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (дата обращения 01.11.2024)
2. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia / A.B. Mikhailova, A.N. Grenaderova, I.V. Kurina, L.S. Shumilovskikh, T.G. Stojko // An international journal of Quaternary research. – 2021. – V. 50. – P. 948–966.
3. A review of biomass co-firing in north America / E. Agbor, X. Zhang, A. Kumar // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 40. – P. 930–943.
4. An evaluation of biomass co-firing in Europe / F. Al-Mansour, J. Zuwala // Biomass Bioenergy. – 2010. – V. 34. – P. 620–629.
5. Мисюкова А.Д., Янковский С.А. Фракционный анализ топлив на основе угля и древесной биомассы после их совместного измельчения // XL Сибирский теплофизический семинар. – Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2024. – С. 258.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ И ГОРЕНИЯ УГЛЕЙ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ИХ ОСНОВЕ

**К.А. Карташова, В.В. Дорохов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ33*

Научный руководитель: К.Ю. Вершинина, к.ф.-м.н., доцент ИШФВП ТПУ

В наши дни наблюдается рост урбанизации и индустриализации, что вызывает множество экологических и энергетических проблем. В этой связи увеличивается количество исследований, посвященных изучению нетрадиционных источников энергии и совместному сжиганию топлив с высокой теплотворной способностью [1]. Таким образом, со временем можно заметить тенденцию к возможности внедрения новых топливных композиций. В качестве компонентов для топливных смесей можно использовать отходы промышленности, разные виды биомассы и их производные [2].

Использование отходов для создания композитных топлив – современный и эффективный метод переработки, обеспечивающий экономическую выгоду и экологическую безопасность. Жидкие добавки к топливу способствуют уменьшению вредных выбросов, снижают сажеобразование, увеличивают скорость горения (несмотря на меньшую теплоту сгорания) и изменяют режим горения, создавая эффект микровзрыва [3,4].

Для определения характеристик термического разложения и горения смесевых топлив на основе бурого угля, опилок, воды и отработанного моторного масла использовали TGA анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Скорость нагрева окислительной среды варьировалась от 10 до 30 °С.

Приготовленные образцы топлива представляли собой топливные смеси с следующими составами: 90 % бурого угля, 10 % древесных опилок; 60 % бурого угля, 40 % воды; 50 % бурого угля, 40 % воды, 10 % отработанного моторного масла. Все доли указаны в массовой концентрации.

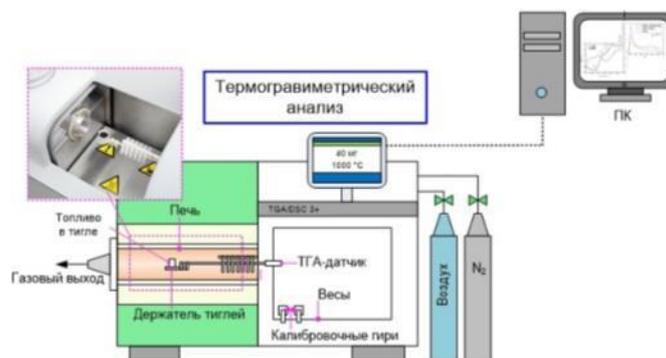


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

На рис. 2 представлены TG-DTG кривые исследуемых композиционных топлив, полученные при скорости нагрева  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . Как и в случае с моносжиганием компонентов, на термогравиметрических кривых можно выделить три стадии: испарение влаги (1 стадия), выход и горение летучих (2 стадия) и горение твердого коксового остатка (3 стадия).

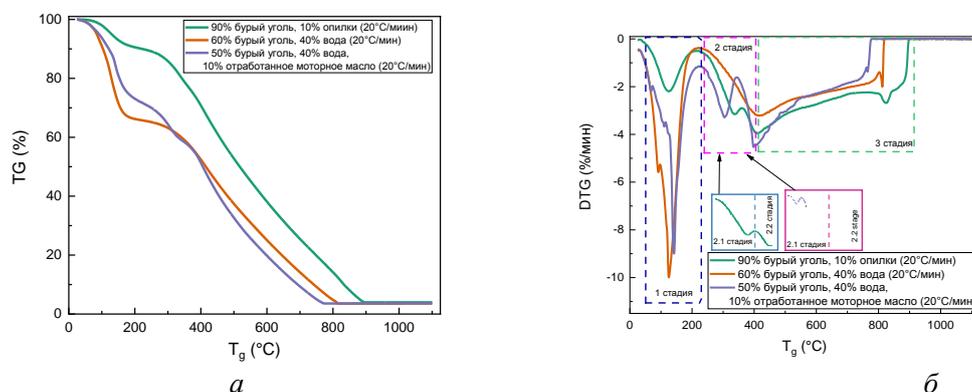


Рис. 2. TG-DTG кривые исследуемых композиционных топлив при скорости нагрева  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

Максимальной скоростью потери массы в ходе 1 стадии характеризуется композиционное топливо «60 % бурый уголь, 40 % вода» ввиду высокой доли влаги в ее составе. Максимальная скорость потери массы образца «60 % бурый уголь, 40 % вода» выше ( $9,99\text{ } \%/ \text{мин}$ ), чем у суспензии с добавкой моторного масла ( $8,99\text{ } \%/ \text{мин}$ ) (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики горения исследуемых топливных смесей

Топливо	Скорость нагрева, $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$	Потеря массы, %	$T_b$ , $^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{max}}$ , $\%/ \text{мин}$	$T_{\text{max}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$R_{\text{comb\_max}}$ , $\%/ \text{мин}$	$T_{\text{comb\_max}}$ , $^{\circ}\text{C}$
90 % бурый уголь, 10 % древесные опилки	10	96,37	707	3,13	378	3,13	378
90 % бурый уголь, 10 % древесные опилки	20	96,04	897	3,95	413	3,95	413
90 % бурый уголь, 10 % древесные опилки	30	96,93	1084	5,05	421	5,05	421
60 % бурый уголь, 40 % вода	10	97,34	688	7,64	101	2,48	379
60 % бурый уголь, 40 % вода	20	96,44	818	9,99	125	3,22	415
60 % бурый уголь, 40 % вода	30	97,73	934	14,91	153	4,12	426
50 % бурый уголь, 40 % вода, 10 % отработанное моторное масло	10	96,89	695	4,79	95	2,61	395
50 % бурый уголь, 40 % вода, 10 % отработанное моторное масло	20	96,37	775	8,99	142	4,53	398

$T_b$ : температура выгорания,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{\text{max}}$ : максимальная скорость потери массы,  $\%/ \text{мин}$ ;  $T_{\text{max}}$ : температура, соответствующая максимальному пику потери веса,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_{\text{comb\_max}}$ : максимальная скорость потери веса на стадии сжигания,  $\%/ \text{мин}$ ;  $T_{\text{comb\_max}}$ : температура, соответствующая максимальному пику потери массы на стадии сжигания,  $^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3 приведены относительные отклонения между теоретическими и экспериментальными термогравиметрическими кривыми композиционных топлив при скорости нагрева 20 °С/мин. На стадии выхода влаги суспензионного топлива «60 % бурый уголь, 40 % вода» наблюдается интенсификация данного процесса на величину до 0,42 % ввиду образования микропор на поверхности исследуемого образца. При использовании добавки отработанного моторного масла зарегистрирован ингибирующий эффект, вызванный образованием масляной пленки на поверхности образца, предотвращающей выход влаги. Величина  $\Delta TG$  на данном этапе составляет 0,28 %. Значительный синергетический эффект наблюдается на этапах выхода и горения летучих и горения коксового остатка. Так, при использовании водоугольной суспензии величина синергетического эффекта достигает 1,72 %, а при использовании суспензионного топлива с добавкой отработанного моторного масла – 1,92 %.

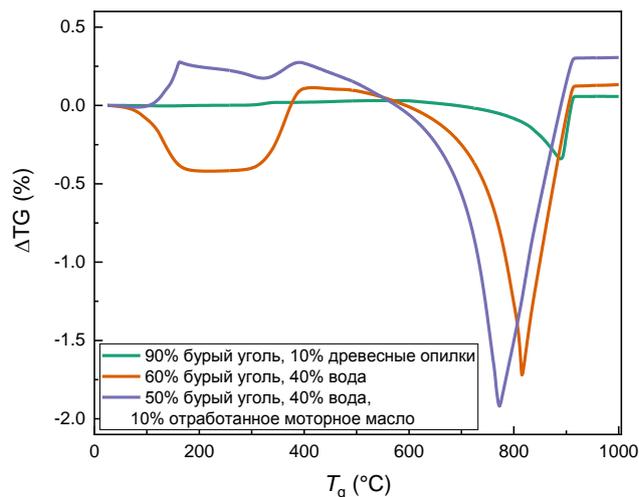


Рис. 3. Отклонение теоретических и экспериментальных кривых ТГ при сжигании композиционных топлив при скорости нагрева 20 °С/мин

На рис. 4 представлены зависимости энергии активации и предэкспоненциального множителя от степени конверсии исследуемых топлив. Для образцов твердых топлив («100 % бурый уголь» и «90 % бурый уголь, 10 % опилки») полученные зависимости характеризуются наличием одного максимума энергии активации, достигаемого на этапе выхода летучих. Причем, с увеличением содержания летучих в составе топлива, энергия активации увеличивается. Так, при использовании добавки опилок 10 %, энергия активации увеличилась на 29 % при степени конверсии 0.2. Аналогичный результат, заключающийся в увеличении  $E_a$  с ростом доли летучих регистрировался в [5] при совместном сжигании бурого угля и осадка сточных вод, в [6] при совместном сжигании из маслячной биомассы и полубитуминозного угля, в [7] при совместном сжигании микроводорослей и бурого угля. Согласно [8], реакции с высокой энергией активации требуют больших температур либо большей длительности теплового воздействия для их осуществления. Соответственно, большее содержание летучих в биомассе приводит к росту энергии активации на стадии выхода и горения летучих.

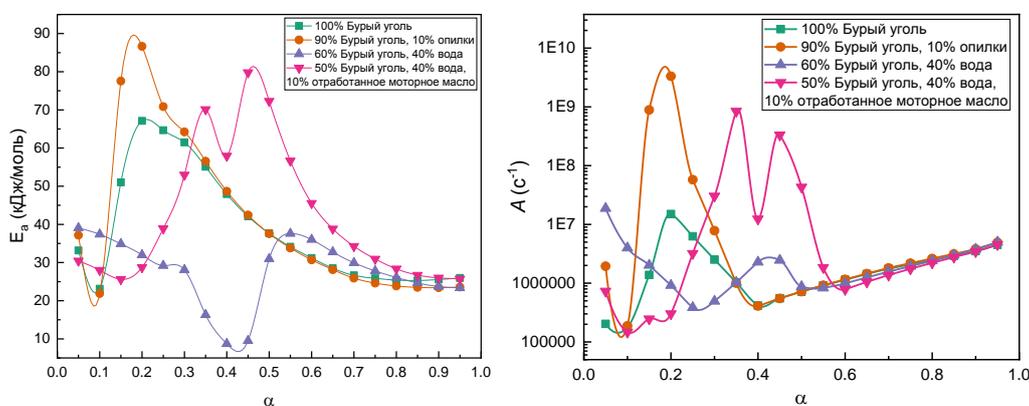


Рис. 4. Изменение энергии активации в зависимости от конверсии исследуемых композиционных топлив

Экспериментально определены характеристики термического разложения и горения композиционных топлив на основе бурого угля, отработанного моторного масла, древесных опилок. Установлено влияние скорости нагрева на процессы термического окисления композиционных топлив. Определена величина синергетического эффекта, возникающего при совместном сжигании компонентов в составе композиционных топлив.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang D., Li S., He S. Zero/negative carbon emission coal and biomass staged co-gasification power generation system via biomass heating // *Applied Energy*. – 2024. – V. 357. – P. 122469.
2. Sun Y., Liu M.A study on the path planning and optimization of carbon peaking and carbon neutrality in the highway service area // *Building and Environment*. – 2025. – V. 267. – P. 112187.
3. San José J., Sanz-Tejedor M.A., Arroyo Y., toychev P. SAnalysis of vegetable oil mixture combustion in a conventional 50 KW thermal energy installation // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 164. – P. 1133–1142.
4. Li T.X., Zhu D.L., Akafuah N.K., Saito K., Law C.K. Synthesis, droplet combustion, and sooting characteristics of biodiesel produced from waste vegetable oils // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2011. – V. 33, № 2. – P. 2039–2046.
5. Chen J., Mu L., Cai J., Yin H., Song X., Li A. Thermal characteristics and kinetics of refining and chemicals wastewater, lignite and their blends during combustion // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 100. – P. 201–211.
6. Idris S.S., Rahman N.A., Ismail K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA) // *Bioresource Technology*. – 2012. – V. 123. – P. 581–591.
7. Tahmasebi A., Kassim M.A., Yu J., Bhattacharya S. Thermogravimetric study of the combustion of *Tetraselmis suecica* microalgae and its blend with a Victorian brown coal in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres // *Bioresource Technology*. – 2013. – V. 150. – P. 15–27.
8. Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion // *Bioresource technology*. – 2010. – V. 101, № 14. – P. 5601–5608.

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ КАРТОНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ПЕЛЛЕТИРОВАННОГО ТОПЛИВА

**Д.К. Шведов, В.В. Дорохов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ33*

Научный руководитель: Г.С. Няшина, к.т.н., доцент, НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В настоящее время создание композиционных топлив с использованием отходов стало популярной технологией переработки отходов за счет экономической эффективности и экологической безопасности [1].

Использование отходов в составе композиционного топлива является одним из перспективных способов расширения сырьевой базы и утилизации отходов. В частности, смешивание бумажных отходов (макулатура, картон, газеты) с биомассой можно считать одним из наиболее перспективных методов его переработки для получения композиционных топлив [2].

Схема экспериментального стенда, используемого для определения прочностных характеристик и характеристик термического разложения pelletированного топлива представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлены рассчитанные коэффициенты ударопрочности pellet исследуемых составов. Данный показатель имеет важное значение при транспортировке, погрузочно-разгрузочных работах и хранении pellet. Чем ниже показатель ударопрочности, тем выше вероятность образования осколков и пылевидных мелких частиц при ударных нагрузках, которые не могут быть полезно использованы в дальнейшем.

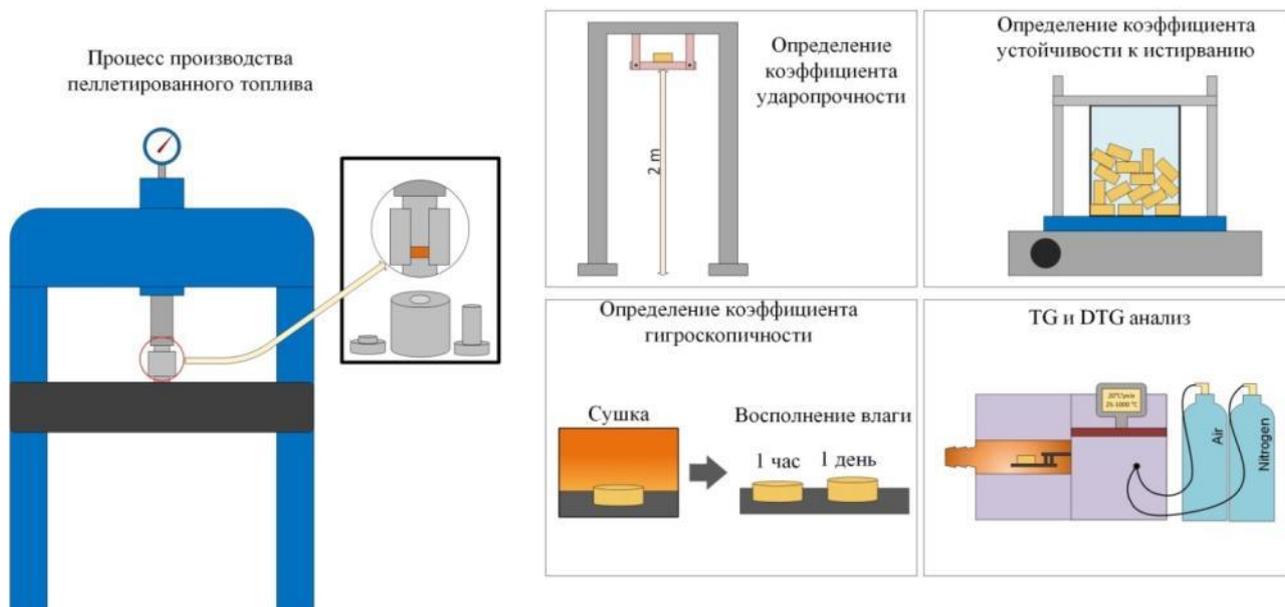


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Установлено, что ударопрочность пеллет, в составе которых есть картон либо соизмерима, либо превышает установленные значения для пеллет W100. При прессовании частицы картона и опилок сближались, вызывая межчастичные связи. Естественные связующие компоненты, такие как крахмал, белок, лигнин и водорастворимые углеводы в материалах опилок и картона, выдавливались из частиц, что способствовало образованию прочных мостиков [3]. На стадии сжатия частицы картона и опилок перестраивались, подвергались упругой и пластической деформации, в результате чего образовывались связи и генерировались силы ближнего действия. По мере сжатия из-за наличия влаги развивались межфазные силы и капиллярное давление, что в свою очередь увеличивало сцепление между частицами картона и опилок и образовывало жидкие мостики. Более мелкие частицы картона обеспечивали большую площадь контактной поверхности, что являлось основным параметром для достижения более высокой плотности и ударопрочности. Также длинные волокна картона сцеплялись или складывались друг вокруг друга за счет поперечных связей и диффузии молекул из одной частицы в другую в точках контакта после сжатия. Это усиливало межчастичные связи. Похожие результаты были достигнуты другими исследователями. Таким образом для достижения высокой ударопрочности пеллет предпочтительно использовать составы с 30 и 50 % картона.

Коэффициент устойчивости к истиранию (рис. 2) характеризует свойства пеллет сохранять целостность при колебательных и вибрационных нагрузках, вызванных тряской при транспортировке, в случае соударения пеллет друг с другом, либо о стенки тары или транспортного средства. Установлено, что максимальным коэффициентом устойчивости к истира-

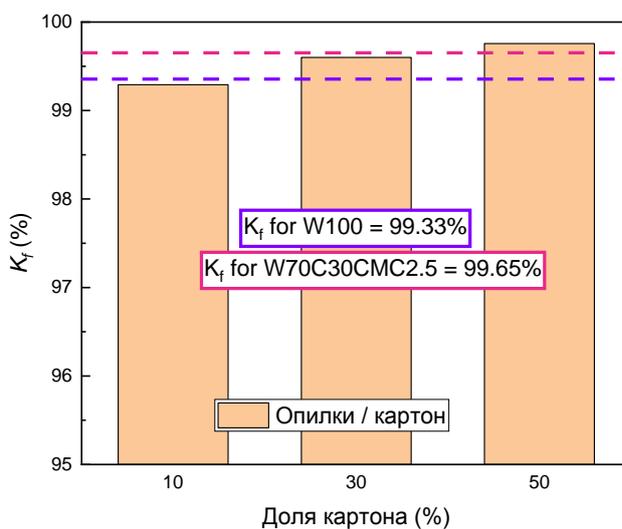


Рис. 2. Зависимость коэффициента ударопрочности ( $K_f$ ) исследуемых пеллет при изменении доли добавок

нию характеризовались образцы W100. При воздействии на них колебательных нагрузок образец потерял в виде осколочных частиц и мелкой пыли около 2 % от исходной массы. Наиболее близким к W100 коэффициентами устойчивости к истиранию обладали составы W70C30CMC2.5 и W50C50. Для данных образцов потеря при тряске составила не более 2,4 %. В случае использования только древесной биомассы (W100) давление при прессовании приводило к образованию твердых мостиков из-за размягчения и диффузии молекул между частицами, химических реакций на поверхности частиц, затвердевания расплавленных компонентов или связующих веществ между частицами. В случае древесных гранул лигнин образовывал эти твердые мостики. Вязкие связующие вещества, такие как смола или деготь, склеивали смежные поверхности частиц, создавая прочную связь, похожую на твердый мостик. Таким образом, для достижения максимальной устойчивости пеллет к колебательным и вибрационным нагрузкам рекомендуется использовать древесные пеллеты, композиции с картоном в количестве 50 %, либо с 30 % картона в совокупности со связующей добавкой.

Гигроскопичность пеллет ( $H$ ) оценивалась по свойству пеллет поглощать влагу из атмосферного воздуха и представлена на рис. 4. Чем ниже коэффициент гигроскопичности, тем меньше атмосферной влаги впитывал в себя образец при хранении на открытом воздухе. Способность пеллет из биомассы поглощать как можно меньше влаги позволит избежать снижения энергетической плотности топлива, биоразложения и гниения материала. Установлено, что коэффициент гигроскопичности для большинства составов имеет приближенные значения к древесным пеллетам. Разница в значениях не превышала 0.4 %. Результат связан со схожей природой компонентов картона, опилок. Присутствие в обоих материалах лигноцеллюлозных волокон объясняет высокие гидрофильные свойства. Влага в лигноцеллюлозной матрице биомассы может впитываться в клеточные стенки и образовывать водородные связи с гидроксильными группами компонентов клеточной стенки.

Установлено, что при использовании добавки карбоксиметилцеллюлозы к пеллетам с картоном регистрировался рост коэффициента гигроскопичности. Полученный эффект может объясняться взаимными взаимодействиями добавки с картоном, которое приводит к накоплению и удержанию влаги в пеллетах.

На рис. 5 представлены термогравиметрические профили исследуемых композиционных пеллетированных топлив на основе смеси опилок с картоном. Процесс термического разло-

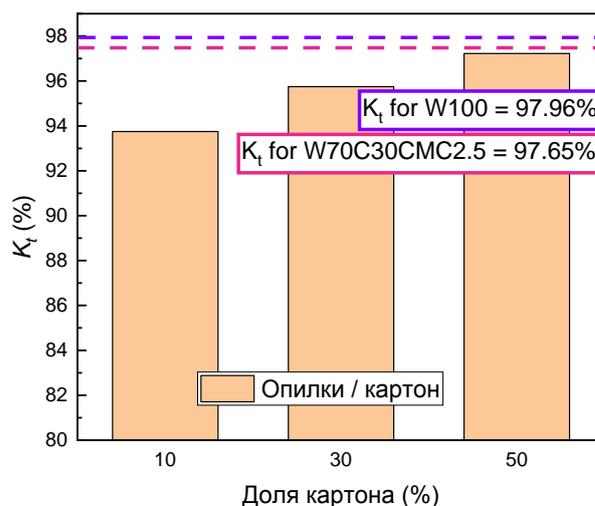


Рис. 3. Зависимость коэффициента устойчивости к истиранию ( $K_t$ ) исследуемых пеллет при изменении доли добавок

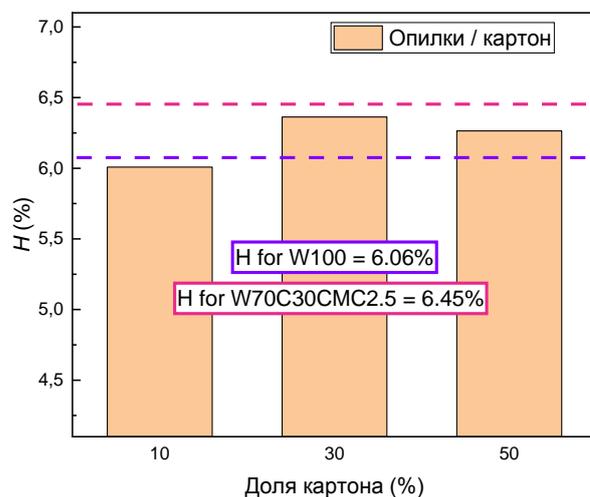


Рис. 4. Зависимость коэффициента гигроскопичности ( $H$ ) исследуемых пеллет при изменении доли добавок

жения топливных пеллет включал в себя три стадии: 1 стадия – сушка образца от внутренней влаги; 2 стадия – выход и горение летучих; 3 стадия – горение твердого коксового остатка.

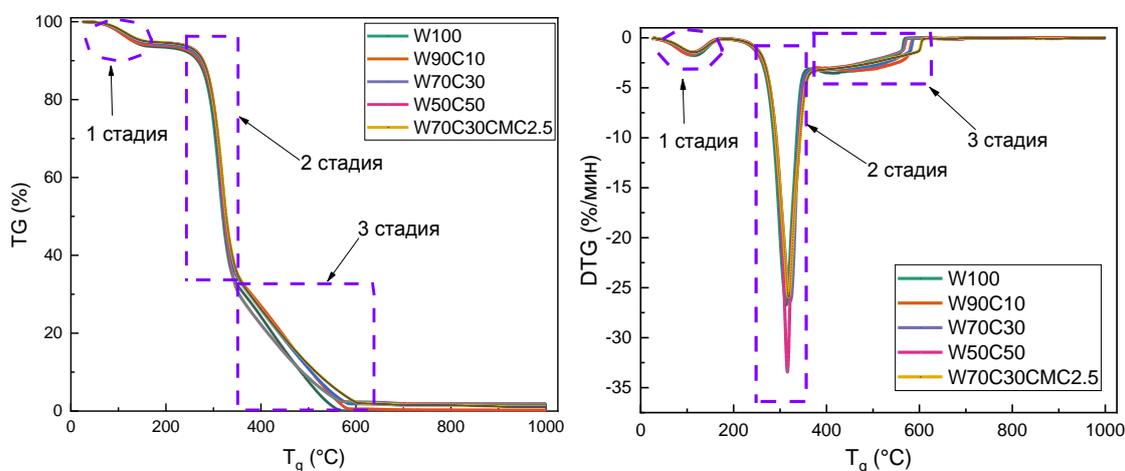


Рис. 5. TG и DTG кривые пеллет с картоном при скорости нагрева 20 °C/мин

Интенсивная потеря массы в ходе 2 стадии (230–380 °C) обусловлена, главным образом, разложением наименее термически стабильных фракций биомассы. Начало термического разложения гемицеллюлозы соответствует температуре около 230 °C, а термическое разложение целлюлозы происходит при температурах выше 280 °C. Лигнин, в свою очередь, наиболее интенсивно разлагается при температурах более 400 °C. Это обуславливает меньшую величину кривой DTG пеллет с добавками картона 30 и 50 % в ходе 3 стадии, поскольку содержание лигнина в составе картона меньше, чем в опилках. Также в области высоких температур происходит разложение минеральной составляющей, например, разложение карбонатов в составе биомассы, богатой кальциевыми соединениями. Помимо этого, в составе картона также содержатся карбонаты кальция, приводящие к увеличению температуры окончания термического разложения исследуемых образцов по сравнению с пеллетами без добавок. По сравнению с W100, при увеличении доли картона в составе топливных пеллет в диапазоне от 10 до 50 %, температура окончания термического разложения увеличилась на 2–23 %.

Максимальная скорость потери массы регистрировалась для образца W50C50. Данный результат обусловлен наибольшим содержанием термически нестабильных соединений (гемицеллюлозы и целлюлозы) в составе картона, что привело к интенсивному термическому разложению исследуемого образца в ходе 2 стадии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант №23-79-10098).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li H, Jiang LB, Li CZ, Liang J, Yuan XZ, Xiao ZH, et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The energy input and properties of pellets // *Fuel Process Technol.* – 2015. – V. 132. – P. 55–61.
2. Kuptz D, Kuchler C, Rist E, Eickenscheidt T, Mack R, Schön C, et al. Combustion behaviour and slagging tendencies of pure, blended and kaolin additivated biomass pellets from fen paludicultures in two small-scale boilers < 30 kW // *Biomass and Bioenergy.* – 2022. – V. 164. – P. 106532.
3. Jiang L, Liang J, Yuan X, Li H, Li C, Xiao Z, et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet // *Bioresour Technol.* – 2014. – V. 166. – P. 435–443.

## СПОСОБЫ ДЕЗАКТИВАЦИИ: ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ

**К.В. Дубровский, А.В. Зенков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А4-44*

Научный руководитель: Д.В. Гвоздяков, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова, ИШЭ ТПУ

Загрязнение материалов может возникать из-за утечек радиоактивного теплоносителя из первого контура реактора, в процессе хранения и обращения с радиоактивными отходами, а также во время технического обслуживания, ремонта и замены ядерного топлива. Загрязнение воздуха может привести к оседанию радиоактивных веществ на стенах, потолках и в вентиляционных системах [1].

Существует несколько видов радиоактивных загрязнений [2]:

- нефиксированное, этот тип загрязнений обусловлен слабой адгезией, при которой между радиоактивными частицами и поверхностью сохраняется чёткая граница;
- прочнофиксированное загрязнения, проникают глубоко в структуру материала, что связано с процессами коррозии, диффузией и образованием оксидных слоёв;
- слабофиксированное загрязнения чаще всего формируются благодаря ионному обмену и адсорбции нуклидов, затрагивая только поверхностные слои материалов.

Радиоактивные вещества, как правило, концентрируются на поверхности оборудования и редко проникают вглубь, за исключением пористых материалов, таких как бетон. Их распределение может быть неоднородным: нередко загрязнения скапливаются на полах, стенах, а также под оборудованием или в его труднодоступных частях. В процессе демонтажа таких элементов, как трубопроводы, резервуары, кабели или двигатели, требуется учитывать возможные утечки радиоактивных веществ [3].

Целью дезактивации является снижение уровня загрязнений до безопасных значений, соответствующих установленным нормативам, или до уровня, при котором обеспечиваются комфортные условия труда для персонала АЭС, выполняющего ремонтные работы [4].

Методы дезактивации можно разделить на химические, физико-химические и физико-механические. Эти подходы неоднократно становились объектом научных исследований как в теории, так и на практике [5].

Наиболее часто применимыми являются химические методы, предполагающие использование специальных растворов для разрушения связей между радиоактивными веществами и поверхностью. Такие растворы переводят загрязнения в жидкую фазу, упрощая их удаление. Основными компонентами этих средств являются вода, кислоты, щелочи, соли, а также вещества с поверхностно-активными и комплексообразующими свойствами. Чаще всего применяются комбинированные растворы, состав которых подбирается исходя из характеристик загрязнений, включая силу их связи с поверхностью [6]. Эффективность очистки увеличивается при чередовании кислотных и щелочных составов, а также окислителей и восстановителей.

Помимо данной очистки, также довольно часто применяются физико-химические и физико-механические методы. К первому способу относятся технологии, такие как электрохимическая обработка, использование специализированных паст, съёмных покрытий или порошкообразных составов. Во втором способе предполагают удаление верхних слоёв материалов вместе с радиоактивными загрязнениями. [7].

Однако эти методы могут повредить поверхности оборудования, особенно при работе с плотными отложениями, такими как свинец, его оксиды или шлаки. Они требуют значительных усилий и часто характеризуются ограниченной эффективностью, что увеличивает радиационное воздействие на персонал, занимающийся очисткой и ремонтом.

Методы дезактивации должны отвечать ряду требований [8]:

- минимизировать образование радиоактивных отходов;
- предотвращать значительные коррозионные и механические повреждения очищаемого материала;
- быть экономичными, безопасными, предотвращать распространение загрязнений и допускать механизацию процессов;
- обеспечивать эффективное удаление радиоактивных загрязнений с поверхности.

При выборе метода дезактивации необходимо учитывать вопросы утилизации и безопасного захоронения образующихся радиоактивных отходов. Методы очистки жидких радиоактивных отходов должны эффективно удалять радионуклиды, концентрируя их в минимальных объемах и надежно изолируя от окружающей среды для безопасного длительного хранения. Существует множество методов дезактивации контурного оборудования реакторных установок с водными и натриевыми жидкометаллическими теплоносителями, которые используют физические, физико-химические и химические процессы для удаления радиоактивных загрязнений [9].

Рассмотрим метод струйной дезактивации оборудования. Этот метод активно используется для очистки оборудования, твердых покрытий и транспортных средств благодаря своей доступности и высокой эффективности. Эффективность струйного метода дезактивации определяется параметрами струи: её структурой, расходом воды и давлением, создаваемым насадкой. Водяная струя может иметь различные формы: быть непрерывной, разделённой на компактные струйки или распадаться на капли. Такие капли могут формироваться естественным образом в результате разрушения струи либо создаваться искусственно.

При дезактивации главное воздействие на обрабатываемую поверхность оказывают начальные порции воды, которые в первую очередь удаляют загрязнения с поверхности. В дальнейшем струйки и капли соединяются, образуя водяную плёнку. Под воздействием последующих порций воды эта плёнка начинает двигаться. Движение плёнки способствует удалению загрязнений с тех участков поверхности, которые не подверглись прямому воздействию струи. Кроме того, она переносит радиоактивные частицы за пределы зоны обработки. Чтобы избежать повторного оседания загрязнений на очищенной поверхности, важно обеспечить достаточно высокую скорость движения плёнки. [10].

Метод струйной дезактивации широко применяется для очистки стен зданий, поверхностей корпуса реактора, а также внутренних и внешних элементов резервуаров и контейнеров. Горячая вода, подающаяся под давлением, часто используется для очистки парогенераторов, теплообменников и других видов оборудования.

Дезактивация струёй воды может проводиться при разном давлении, и каждый подход имеет свои преимущества и недостатки [11]:

- при давлении до 5 атм. основным преимуществом является высокая мобильность и простота использования, однако коэффициент дезактивации остаётся низким;
- при давлении от 5 до 50 атм. достигается более высокий коэффициент дезактивации и сохраняется мобильность, но недостатками становятся высокое энергопотребление, значительный расход дезактивационных растворов и необходимость в сложной инфраструктуре.

Высокоскоростной водоструйный метод, при котором струя достигает сверхзвуковой скорости, эффективно удаляет загрязнения и минимизирует вторичные отходы, но требует значительных финансовых затрат.

Дезактивация с помощью гидромониторов позволяет автоматизировать процесс, использовать различные растворы и обрабатывать всю поверхность, но применима только к специфическим помещениям, имеет низкие коэффициенты дезактивации и требует большого количества реагентов.

Основными недостатками метода водной дезактивации являются высокие энергозатраты и экологические проблемы, так как требуется большой объем моющего раствора, утилизация которого представляет технические и финансовые сложности.

Дальнейшие перспективные исследования будут направлены на изучение взаимодействия дезактивирующих веществ с обрабатываемыми поверхностями и поиск оптимальных способов их нанесения для улучшения эффективности дезактивации оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеленкова В.В., Кулагина Т.А. Совершенствование технологии дезактивации оборудования с радиоактивным загрязнением // Радиоактивные отходы. – 2021. – № 1(14). – С. 28–38.
2. Способ дезактивации поверхности оборудования и помещений атомных станций: № 94015861/25: заявл. 28.04.1994: опубл. 10.09.1996. – 5 с.
3. Способ дезактивации: № 2009136788/07: заявл. 05.10.2009: опубл. 20.04.2011. – 6 с.
4. Кутьков В.А., Ткаченко В.В., Романцов В.П. и др. Основы радиационного контроля на АЭС. – М.; Обнинск: Концерн «Росэнергоатом», ИАТЭ, 2005. – 268 с.
5. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. – 1985. – 184 с.
6. Способ химической дезактивации поверхности металлических изделий, зараженных радиоактивными веществами: № 98120260/25: заявл. 13.11.1998: опубл. 27.06.1999. – 9 с.
7. Способ очистки и дезактивации оборудования атомных электрических станций (варианты): № 2009128935/06: заявл. 27.07.2009: опубл. 20.08.2010. – 12 с.
8. Ампелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. Дезактивация в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат. 1982. – 256 с.
9. Никифоров А.С., Куличенко В.В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов. – М.: Энергоатомиздат. 1985. – 184 с.
10. Коряковский Ю.С., Доильницын В.А., Акатов А.А. Способы повышения эффективности удаления прочнофиксированных поверхностных радиоактивных загрязнений при химической дезактивации по месту (insitu) // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 76–88.
11. Основы технологии дезактивации: учеб. пособие / В.М. Гавриш, Н.М. Дербасова. – Севастополь: СевГУ, 2017. – 316 с.
12. Зимон А.Д., Пикалов В.К. Дезактивация. – М.: Издат. 1994. – 336 с.

## ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ВЫБРОСЫ $\text{NO}_x$ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ СЖИГАНИЕМ

**Н.В. Абрамов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А2-46*

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью поиска эффективных методов для уменьшения выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) при сжигании угля в котельных агрегатах. Несмотря на переход мировой энергетики к низкоуглеродным источникам, уголь продолжает оставаться значимым топливом на ТЭС, что требует эффективных методов для снижения его экологических рисков [1]. Одним из таких методов является использование третичного дутья, которое позволяет регулировать распределение окислителя в топке [2].

Цель исследования – анализ влияния перераспределения окислителя между вторичным воздухом и третичным дутьем на процессы горения и выбросы  $\text{NO}_x$ . В рамках исследования численное моделирование позволило выявить оптимальные условия сгорания и аэродинамики для повышения эффективности и экологической безопасности работы исследуемого котельного агрегата.

Объект исследования – топочная камера котла мощностью 150 МВт с тангенциальной схемой расположения горелок. В топочной камере, размеры которой 7424×7808 мм, установлены горелочные устройства, а также сопла третичного дутья. Схема обеспечивает интен-

сивное смещение топлива и окислителя, но при этом требует оптимизации для минимизации эмиссии  $\text{NO}_x$ .

Использован численный метод моделирования на основе программного обеспечения FIRE 3D с применением Эйлера-Лагранжева подхода [3]. Модель включает стандартную двух-параметрическую  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности и метод P1 для расчета теплообмена [4]. Алгоритм SIMPLE позволил точно спрогнозировать распределение температуры, скоростей и концентраций компонентов горения по объему топочной камеры [5]. В результате моделирования были определены ключевые параметры, влияющие на процессы горения и распределения температурных полей, что позволило выявить оптимальную долю третичного воздуха.

В результате численного моделирования получены аэродинамические и температурные профили при изменении доли третичного дутья. Увеличение доли третичного воздуха показало ряд эффектов:

Смещение зоны активного горения вверх по топке, что снижает тепловую нагрузку на стенки в нижней части камеры сгорания. При этом увеличивается зона высоких температур на выходе из топки.

Оптимальная доля третичного воздуха для эффективного сгорания и снижения выбросов  $\text{NO}_x$  составляет 0,2. При превышении этой доли наблюдается рост температуры продуктов сгорания на выходе из топки, что приводит к рискам шлакования.

Аэродинамическая структура факела в топочной камере остается стабильной благодаря вертикальному вихрю, который формируется за счет тангенциальной компоновки горелок. Однако распределение скоростей и температур вдоль высоты топки изменяется с увеличением доли третичного воздуха, создавая градиенты, которые негативно влияют на равномерность выгорания.

Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  достигается за счет частичного ограничения подачи вторичного воздуха и увеличения доли третичного дутья. Это создает восстановительную зону в нижней части топки, где происходит сжигание с пониженным содержанием кислорода, что позволяет снизить выбросы  $\text{NO}_x$ . Однако при доле третичного воздуха более 0,2 эффект снижения выбросов нивелируется ростом температуры на выходе из топки.

На рис. 1 представлены температурные распределения в продольном сечении топочной камеры, показывающие разницу в температурах в зависимости от доли третичного воздуха.

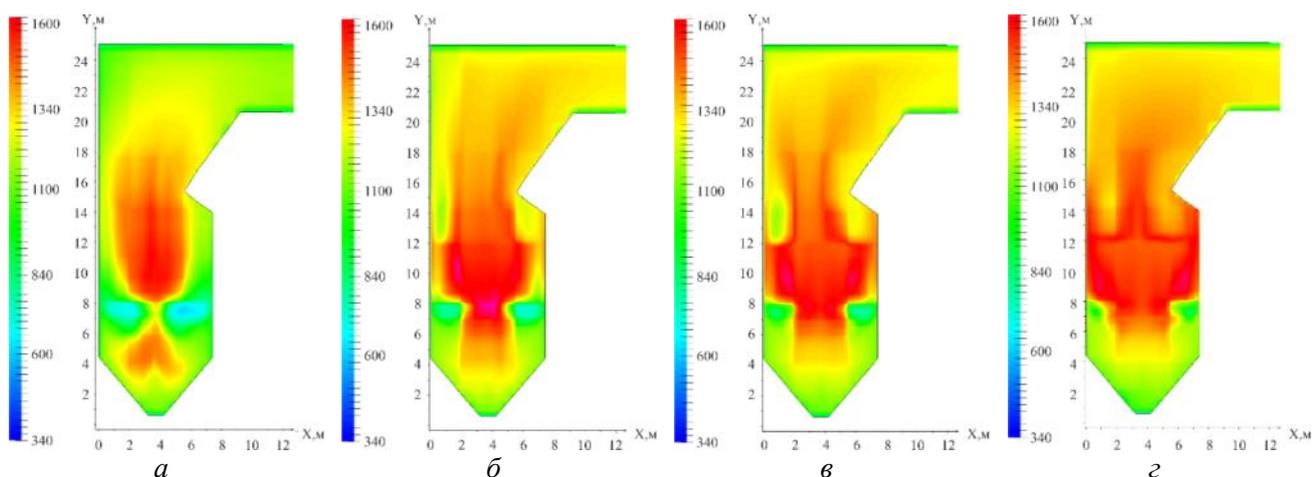


Рис. 1 Распределение температуры (К) в продольном сечении топочной камеры:  
а – базовая компоновка; б – доля третичного дутья 0,2; в – доля третичного дутья 0,3;  
г – доля третичного дутья 0,4

Исследование показало, что перераспределение окислителя в топке котельного агрегата с тангенциальной компоновкой позволяет оптимизировать условия горения и снизить выбросы

NO<sub>x</sub>. Оптимальное соотношение вторичного и третичного воздуха (0,2) обеспечивает равномерное распределение температурных полей и эффективное сгорание топлива. Предложенный метод численного моделирования подтвердил свою эффективность для анализа и оптимизации работы топочных камер котлов, что позволяет использовать его для технико-экономических обоснований модернизации котлов на ТЭС.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274/>.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BP Statistical Review of World Energy – 2021. BP p.l.c., 2021. – URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-global-insights.pdf> (дата обращения: 29.10.2024).
2. Алехнович А.Н. Распределение воздуха и топлива по горелкам котлов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 128 с.
3. Rawlins B.T., Laubscher R., Rousseau P. A fast thermal non-equilibrium eulerian-eulerian numerical simulation methodology of a pulverised fuel combustor // Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – Vol. 41. – P. 101842. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101842.
4. Jin W., Si F., Cao Y., Ma H., Wang Y. Numerical optimization of separated overfire air distribution for air staged combustion in a 1000 MW coal-fired boiler considering the corrosion hazard to water walls // Fuel. – 2022. – Vol. 309. – P. 122022. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122022.
5. Li Z., Yi Q., Zhang Y., Zhou H., Zhao Y., Huang Y., Gao D., Hao Y. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – P. 119656. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119656.

## К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМ

**Ж.С. Акмаганбетова**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, 5АМ35*

О.С. Качин, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

На сегодняшний день в «Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы», утвержденной постановлением Республики Казахстан от 30 декабря 2021 года обозначены цели задачи, связанные с увеличением:

- экспорта продукции агропромышленного комплекса (АПК) по сравнению с 2020 годом (в 3 раза);
- уровнем обеспеченности продовольственными товарами, в том числе особо значимыми не 90 %;
- доли маточного поголовья, имеющего породные преобразования до 43 %;
- долю переработки молока, мяса, риса, подсолнечника и гречихи до 70 % [1].

Необходимо отметить, что в АПК в настоящее время наблюдается ухудшение материально-технической базы, в том числе оснащенность фермерских хозяйств, занятых разведением крупнорогатого скота (КРС) и мелкорогатого скота (МРС), в связи с физической изношенностью и моральным устареванием оборудованием.

Факторы, направленные на улучшение и создание условий для перспективного развития животноводческой отрасли, являются также основными принципами Концепции развития АПК в Республики Казахстан на 2021–2030 годы. Обеспечение микроклимата в животноводческих фермах является основополагающим условием обеспечения эффективного производства животноводческой продукции.

Таким образом, имеется потребность в усовершенствовании животноводческих ферм, в том числе и систем вентиляции для них, ведь выпуск качественной сельскохозяйственной продукции ферм возможен за счет обеспечения оптимальных условий для животных.

Система вентиляции предусматривает создание комфортных условий для разведения и содержания КРС и МРС, а также поддержание микроклимата в скотоводческих хозяйствах. Оптимизация же систем вентиляции позволит качественно поддерживать условия содержания животных и поддерживать в пределах нормы температуру, влажность, скорость воздуха с необходимыми для него параметрами, а именно, его химический состав и содержание в нем механических примесей [2].

Неправильно организованная система вентиляции приводит к снижению производственных показателей:

- потери удоев молока на 10–20 %;
- дополнительный расход корма;
- повышенную заболеваемость КРС и МРС;
- повышение теплового режима содержания скота.

Поэтому поддержание микроклимата в нормативных пределах в животноводческих фермах является важным и актуальным.

Как известно, вентиляционные установки бывают с естественной тягой, с механическим побуждением тяги и комбинированного действия. Естественной вентиляцией является процесс воздухообмена, который является разницей между внутренним и внешним давлениями атмосферного потока.

Механической вентиляцией является процесс воздухообмена, который происходит между вентилятором и эжектором, а именно, разницы между их давлениями.

Комбинированного действия включает в себя обе эти системы вентиляции.

Согласно исследований в результате несоблюдения условий микроклимата в животноводческих фермах животные подтверждены тепловому стрессу (табл. 1) [3].

Таблица 1. Зоны теплового комфорта и тепловой стресс коров

		Относительная влажность, %										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Температура, °С	24								72	73	74	75
	27					73	74	75	76	78	79	80
	29			72	74	76	78	79	81	82	84	85
	32	72	74	76	78	79	81	83	85	86	88	90
	35	75	77	79	81	83	85	87	89	91	93	95
	38	77	79	82	84	86	88	91	93	95	98	
	41	79	82	84	87	89	92	95	97			
	43	81	84	87	90	93	96					
	46	84	87	90	93	97						
	49	86	89	93	96							

Уровень стресса

 нет стресса  
 средняя степень

 легкая степень  
 тяжелая степень

Из табл. 1 видно, что у коров наблюдается:

- учащенное дыхание и сердцебиение;
- увеличенное слюноотделение;
- повышенная температура тела;
- увеличение потребления животными воды.

Вышеперечисленные факторы приводят к снижению потребления кормов; уменьшению производимой продукции и размножению животных.

Обеспечение процессом воздухообмена принудительным образом осуществляется за счет оптимального управления вентиляционной установкой. С ростом объема воздухообмена увеличивается вентиляционная сеть, эффективную работу которой необходимо обеспечивать системой управления соответствующим электроприводом.

Таким образом, задача разработки системы вентиляции животноводческой фермы является необходимым решением для создания оптимальных условий воздухообмена и обеспечения решения вопросов, поставленных в Концепции развития агропромышленного комплекса Республики Казахстан на 2021–2030 годы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление Правительства Республики Казахстан от 30 декабря 2021 г., № 960, 2.2. Животноводство. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000960>
2. Фоменков А.П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий. – Колос, 1973. – С. 75–76.
3. Борисов В.И., Тарасов В.В., Тувин О.Н. Особенности организации систем вентиляции и их выбора для животноводческих ферм и комплексов. – М.: МГУ им. Н.П. Огарёва. – С. 1–2.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТРАССАХ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**А.В. Крюков<sup>1</sup>, Д.А. Середкин<sup>1</sup>, Куок Хиеу Нгуен<sup>2</sup>, Тьен Лыонг До<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения,  
профессор кафедры электроэнергетики транспорта, e-mail: and\_kryukov@mail.ru*

*<sup>2</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
аспирант кафедры электроснабжения и электротехники*

*<sup>3</sup> Офицерское училище Военно-Воздушных Сил,  
Социалистическая Республика Вьетнам, г. Нячанг, заместитель декана*

### Введение

В современных условиях определение и реализация мероприятий по улучшению электромагнитной безопасности, определяемой напряженностями электромагнитных полей (ЭМП), должны осуществляться на основе компьютерных технологий. Важность задачи разработки методов и средств моделирования ЭМП тяговых сетей (ТС) подтверждается большим числом публикаций, посвященных данной тематике. Так, например, характеристики импульсного ЭМП ТС рассмотрены в [1]. Задача оценки влияния цистерн с жидкостями на напряженности электромагнитной среды железнодорожных станций решена в [2]. Результаты исследования ЭМП ТС переменного тока приведены в [3]. Вопросы воздействия ЭМП низкочастотного диапазона на работников железных дорог рассмотрены в [4]. Методика моделирования магнитного поля ТС описана в [5]. Результаты экспериментальных исследований ЭМП на подвижном составе приведены в [6]. Алгоритм расчета напряженностей ЭМП, создаваемых ТС постоянного тока (ПТ), предложен в [7]. Анализ ЭМП в зонах железнодорожного оборудования выполнен в [8]. Вопросы моделирования ЭМП ТС рассмотрены в [9]. В описанных выше публикациях представлены многие важные аспекты проблемы расчета ЭМП ТС. Однако комплексный подход, позволяющий рассчитывать ЭМП на основе совместного моделирования режимов питающих сетей переменного и ТС ПТ в указанных публикациях отсутствует.

### Методика и результаты моделирования

Комплексный подход, позволяющий определять ЭМП ТС ПТ на основе совместного моделирования режимов питающих сетей переменного и ТС ПТ с учетом движения поездов по реальным участкам, предложен в [10]. Его отличительная особенность состоит в том, что расчет напряженностей ЭМП, базируются на предварительном нахождении параметров режима электроэнергетической системы (ЭЭС) с вычисленными токами отдельных проводов многопроводных линий, включая тяговые сети железной дороги постоянного тока [11]. Максимальное число токоведущих частей ЛЭП или ТС определяется памятью и быстродействием применяемого компьютера и может достигать нескольких сотен.

Определение режимов и ЭМП ТС ПТ с напряжением 3 кВ проводилось в промышленном ПК Fazonord, версия 5.3.6.0–2024. В нем реализована технология моделирования систем постоянного тока описанного в [10]. Ниже описаны результаты вычисления ЭМП в системе электроснабжения участка дороги постоянного тока, представленные на рис. 1–5. Расчеты выполнялись с учетом высших гармоник (ВГ), генерируемых преобразователями тяговых подстанций. ЭМП определялись на высоте 1,8 м.

На рис. 1 показаны зависимости амплитуд напряженностей

$$E_{\max} = E_{\max}(t);$$

$$H_{\max} = H_{\max}(t)$$

для тяговой сети. Относительно небольшие потенциалы ТС не вызывает значительных уровней  $E_{\max}$ . Однако  $H_{\max}$ , состоящие из смеси полей, создаваемых токами разного рода, могут достигать 250 А/м, рис. 2, б.

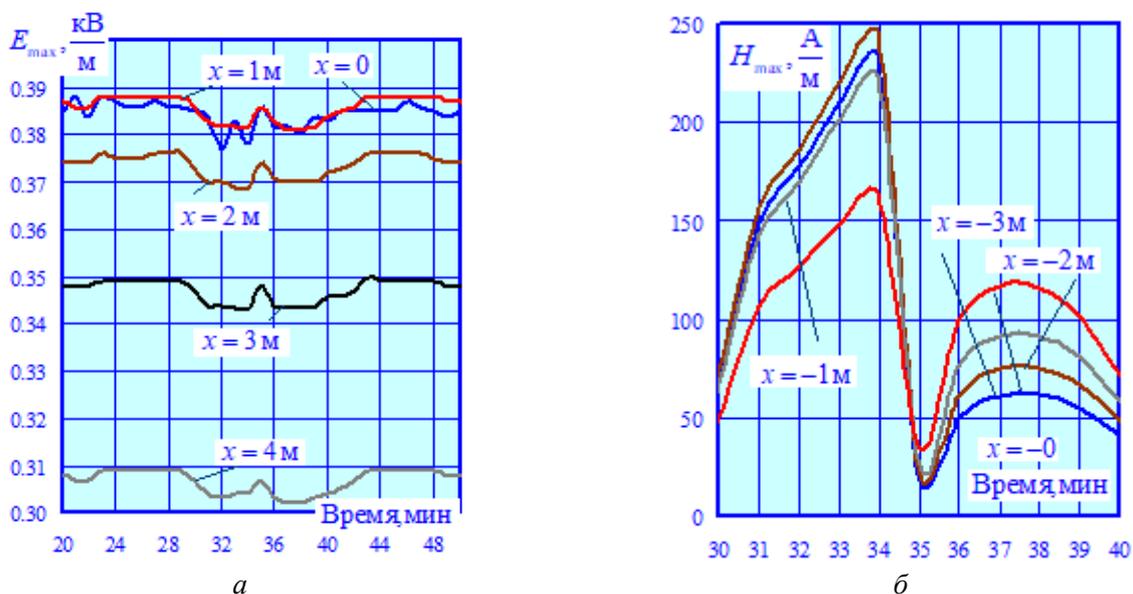


Рис. 1. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(t)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(t)$  для тяговой сети

Зависимости максимальных значений амплитуд  $E_{\max}$ ,  $H_{\max}$  ЭМП ТС ПТ от  $x$  приведены на рис. 2. Из него видно, что ВГ заметно влияют на электрическое поле, но практически не изменяют зависимость  $H_{\max} = H_{\max}(x)$ .

Формы кривых ЭМП  $E = E(t)$  и  $H = H(t)$  на седьмой минуте моделирования для ТС показаны на рис. 3. Они показывают как проявляется влияние ВГ на характер вариаций ЭМП во времени.

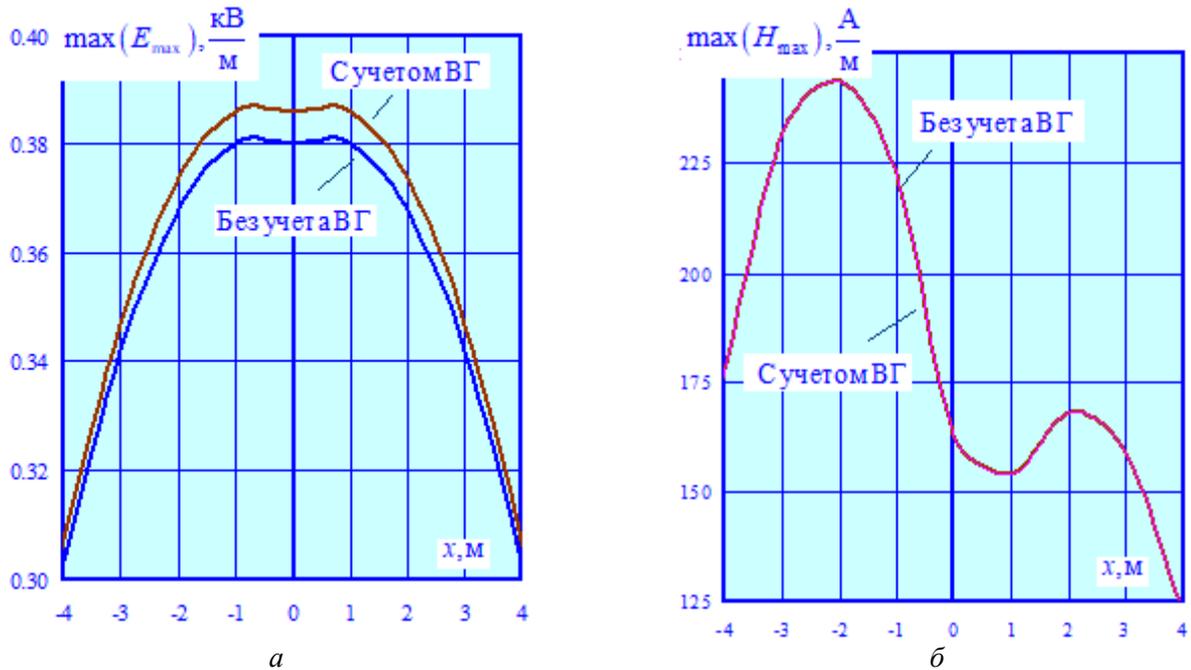


Рис. 2. Зависимости максимумов амплитуд ЭМП ТС от координаты  $x$ : а –  $\max(E_{\max})$ ; б –  $\max(H_{\max})$

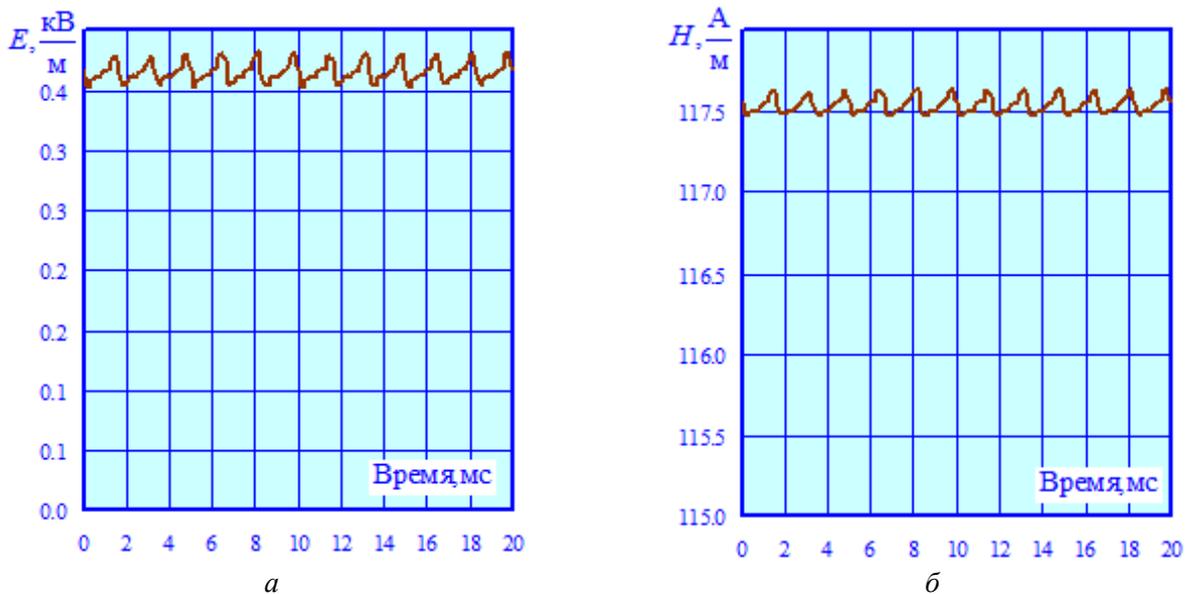


Рис. 3. Графики  $E = E(t)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(t)$  (б)

На рис. 4, 5 представлены результаты моделирования ЭМП на отправном конце питающей ЛЭП. На рис. 4 приведены графики  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  для максимумов амплитуд ЭМП ЛЭП. Они показывают, что учет ВГ заметно изменяет величины этих параметров.

На рис. 5 представлены зависимости (годографы)  $E_y = E_y(E_x)$  и  $H_y = H_y(E_x)$  для ЛЭП 2, полученные на 37 минуте моделирования. Из них видно, что гармоники заметно влияют на характер изменений ЭМП.

На основе моделирования сформулированы следующие выводы: относительно небольшие потенциалы ТС ПТ 3 кВ не вызывает значительных уровней напряженностей электрического поля; однако аналогичные параметры для магнитного, состоящего из смеси, создаваемых токами разного рода, могут достигать сотен ампер на метр; формы кривых ЭМП для ТС и ЛЭП позволяют оценить влияние ВГ на характер изменения ЭМП во времени.

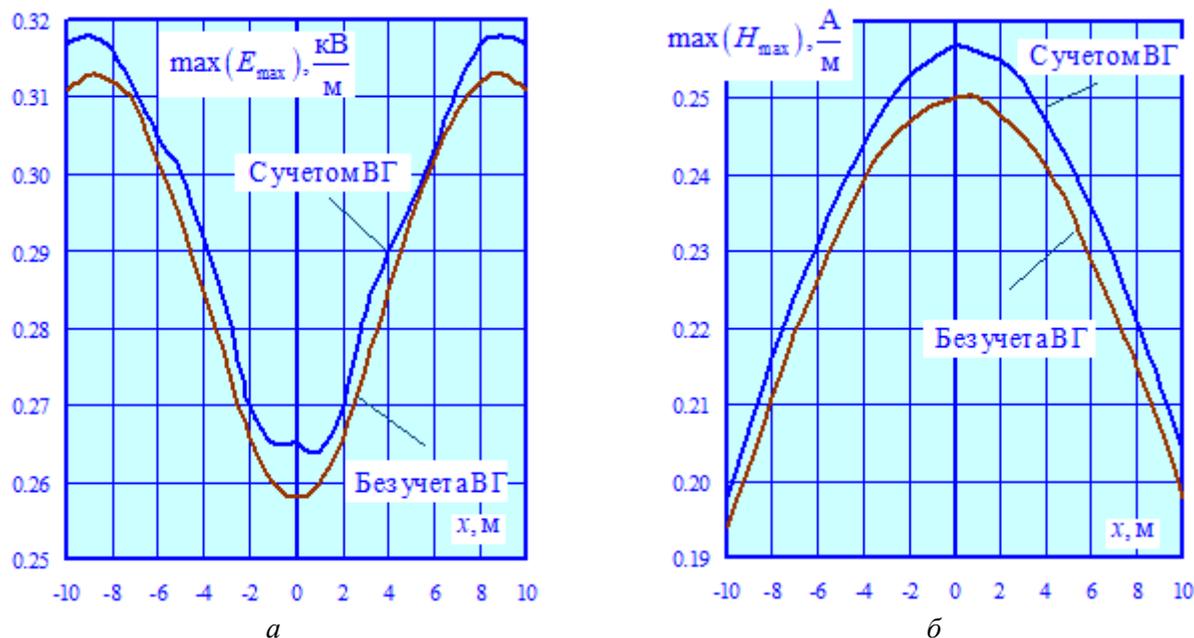


Рис. 4. Зависимости максимумов амплитуд ЭМП ЛЭП от координаты  $x$ : а –  $\max(E_{\max})$ ; б –  $\max(H_{\max})$

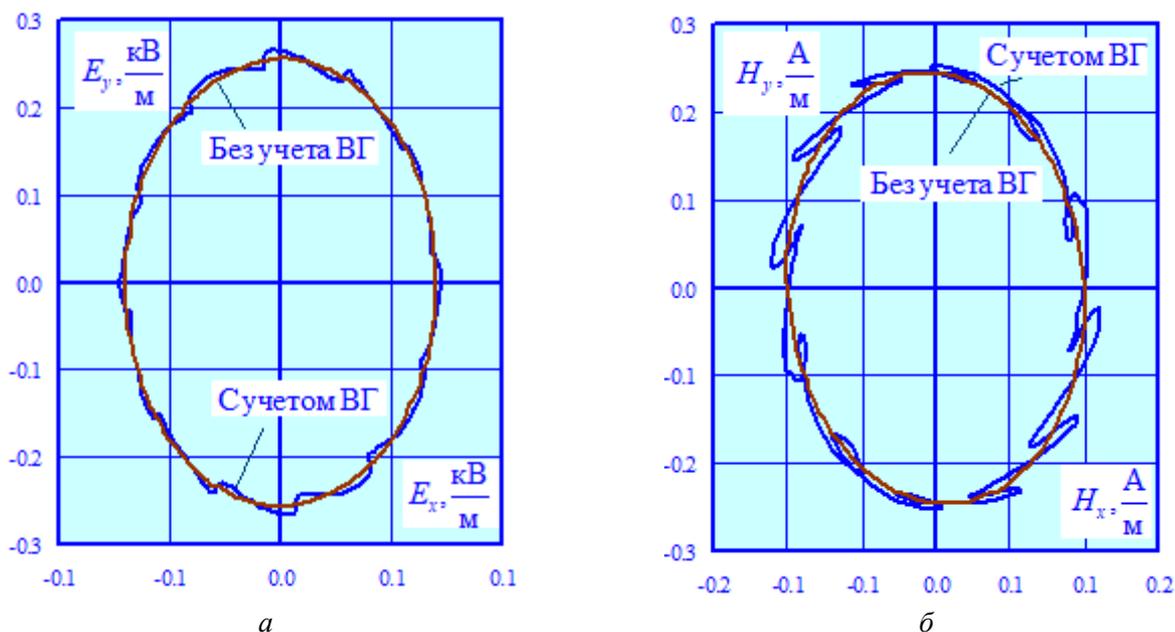


Рис. 5. Годографы векторов  $E$  (а) и  $H$  (б) для ЛЭП

### Заключение

Разработаны модели, обеспечивающие определение электромагнитных полей в тяговых сетях постоянного тока и высоковольтных ЛЭП. Они могут применяться в практике проектирования ТС и ЛЭП, питающих тяговые подстанции ПТ. На их основе могут выбираться мероприятия по защите электротехнического персонала от воздействия ЭМП.

Методика моделирования является универсальной и может использоваться при определении режимов и ЭМП для электроэнергетических систем любой конфигурации и ТС ПТ различного конструктивного исполнения, например, перспективных ТС повышенного напряжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишнев В.С. Некоторые характеристики техногенного электромагнитного импульсного поля тяговой сети железной дороги // Уральский геофизический вестник. – 2003. – № 1 (5). – С. 16–23.
2. Аполлонский С.М., Богаринова А.Н. Воздействие на напряженности электромагнитной среды железнодорожных составов с жидкими грузами // Вестник МАНЭБ. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 8–14.
3. Микаэльян Е.Ю., Черных В.Н. Исследование электромагнитных полей участка железной дороги переменного тока // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8 (59). ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6155.
4. Белинский С.О. Воздействие электромагнитных полей низкочастотного диапазона на работников железнодорожного транспорта // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 10 (166). – С. 21–32.
5. Колесников С.С., Осипов В.А. Моделирование магнитного поля участка железной дороги переменного тока // Интерактивная наука. – 2016. – № 7. – С. 36–37.
6. Сергеевков Н.А., Горский А.Н., Васильев П.Ю. Экспериментальные исследования электромагнитных полей на электрическом подвижном составе // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – № 2. – С. 48–58.
7. Stanislav M. Apollonskii, Anatoliy N. Gorsky. Calculation of electric and magnetic field strengths produced by a direct current traction network. IEEE EUROCON. – Publisher: IEEE, 2009.
8. Constantin Daniel Oancea, Florin Calin, Valentin Golea. On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN). – 2019.
9. Lu Zhang, Yun Zhu, Song Chen, Dan Zhang. Simulation and Analysis for Electromagnetic Environment of Traction Network. 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). – Publisher: IEEE, 2021.
10. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование систем тягового электроснабжения постоянного тока на основе фазных координат. – Москва: Директ-Медиа, 2023. – 156 с.
11. Моделирование режимов электроэнергетических систем, питающих тяговые подстанции постоянного и переменного тока / А.В. Крюков, К.В. Сулов, А.В. Черепанов, Нгуен Куок Хиеу // Энергетик. – 2024. – № 7. – С. 9–14.

## ПРОБЛЕМАТИКА ВЫБОРА КОНСЕРВИРУЮЩЕЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

И.А. Павлова<sup>1</sup>, А.В. Губин<sup>2</sup>

Севастопольский государственный университет, Россия, Севастополь,  
<sup>1</sup>avgubin@sevsu.ru; <sup>2</sup>pavlovaira2001@mail.ru

Основной задачей энергетики перед человечеством является способность обеспечить достаточный уровень генерации электроэнергии для поддержания технологического прогресса и улучшения условий жизни людей. На сегодняшний день атомная энергетика – лидирующий среди остальных способов генерации электроэнергии. Ядерное топливо обладает значительной теплотворной способностью и в сравнении с органическим топливом обладает большей теплотворной способностью (на единицу массы различаются примерно в 2,5 млн раз). Для неподлежащих к дальнейшему использованию радиоактивных материалов и веществ используют захоронение РАО. Проблема захоронения радиоактивных отходов сводится к выбору наиболее оптимального способа. В работе предложен метод использования материалов матрицы.

По рекомендациям МАГАТЭ, существует два основных параметра для классификации РАО: период полураспада (короткоживущие, среднего времени жизни и долгоживущие) и удельная активность.

В табл. 1 представлена классификация РАО по величинам удельной активности.

Таблица 8. Классификация РАО по удельной активности

Категория отходов	Удельная активность, Ки/кг		
	Бета-излучающие радионуклиды	Альфа-излучающие радионуклиды	Мощность дозы гамма-излучения
Низкоактивные	$2 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-4}$
Среднеактивные	$10^{-4} - 10^{-1}$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-2}$
Высокоактивные	Выше $10^{-1}$	Выше $10^{-2}$	Выше $10^{-2}$

Еще одним, и самым главным отличием высокоактивных отходов от других видов являются остаточные тепловыделения из-за долгоживущих изотопов, которые могут повлиять на структуру и прочностные свойства выбранной матрицы захоронения.

Самым основным типом консервирующей матрицы является цемент различного состава. На рис. 1 представлен принцип работы цементирования. На рис. 1, а представлена фаза, где пространство между цементными гранулами заполнено водой, но гидратация еще не происходит. Рис. 1, б характеризует начала процесса гидратации, с дальнейшей интенсификацией процесса, как показано на рис. 1, в. На рис. 1, г представлена почти затвердевшая цементная структура. Процесс происходит до тех пор, пока в системе присутствует вода и негидратированные соединения [1].

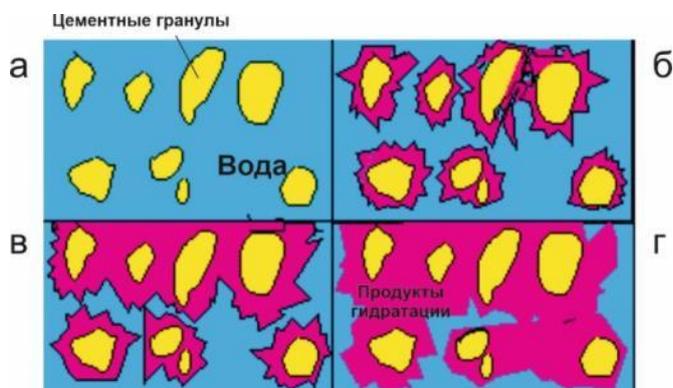


Рис. 1. Принцип работы цементирования

Широкое применение на АЭС цементные материалы получили в строительстве бассейнов выдержки и хранилищ отработавшего ядерного топлива.

Существуют различные исследования по исследованию свойств различных бетонов в условиях ионизирующего облучения. Результаты, полученные в рамках таких исследований, указывают на то, что целесообразно использовать цементную композицию как материал для захоронения ряда высокоактивных отходов [2].

Тем не менее, цементные матрицы не получили особого применения в реальных условиях захоронения ВАО, так как при достаточной устойчивости к включениям радионуклидов, они обладают высокой проницаемостью, что не соответствует требованиям, предъявляемым к консервирующим матрицами. Также, из-за добавления в состав цемента воды, при воздействии ионизирующего излучения разделяющейся на кислород и водород, следует разрушение цементной матрицы.

Решением данной проблемы стало использование стекла в качестве экологически безопасного захоронения отходов, содержащих долгоживущие радионуклиды. Поэтому, в настоящее время самым используемым методом для захоронения ВАО является их остекловывание, технология которого отработана достаточно хорошо.

Одним из самых распространенных материалов для остекловывания ВАО на данный момент является Na–Al–P стекла. Их преимуществом является однородность распределения элементов отходов. Главный недостаток такого подхода – низкое содержание продуктов деления и актиноидов, что влечет за собой огромные затраты на строительство хранилищ. Данная проблема вызвана остаточными выделениями ВАО, которые ограничивают содержания долгоживущих нуклидов в матрице, в другом случае, возможно возникновение быстрой раскристаллизации стекла [3]. Данное свойство вызвано образованием кристаллических фаз внутри стекла, при этом вокруг образуются напряжения, которые приводят к разрушению матрицы. В настоящее время мировое сообщество занимается совершенствованием существующих составов стекол.

На рис. 2 представлена принципиальная схема получения стеклянной матрицы.

Стоит отметить, что технологии стеклоиспользования отличаются своей дороговизной, так как данный процесс является высокотемпературным (до 1800 °С) и, следовательно, энергозатратным. На 2020 г. тариф захоронения 1 м<sup>3</sup> ВАО определен в 1.48 млн. рублей [5]. Существует ряд исследований, предлагающих решения по модернизации составов используе-

мых стекол. Так, для повышения устойчивости матрицы предлагается добавлять В, Si или Fe в Na–Al–P стекла, использовать Pb–Fe–P и Fe–P стекла, переходить к В–Si [6–10]. Также, авторы данных работ заявляют, что фракционирование ВАО, которое представляет из себя процесс разделения этих отходов на группы радионуклидов, близких по свойствам, в перспективе приведет к утилизации нерадиоактивных составляющих и увеличению содержания радиоактивных на единицу объема матрицы.

Одним из самых перспективных направлений исследований по захоронению ВАО является использование в качестве матрицы захоронения синтезированных материалов, которые по свойствам схожи с минеральными породами [11]. Данный интерес вызван наличием материалов, которые содержат в себе большое количество радионуклидов (уран, торий и продукты их деления), при этом сохраняя кристаллические свойства на протяжении долгих лет. Одним из таких материалов является диоксид циркония. В настоящее время ведутся исследования по синтезу данных материалов в лабораторных условиях и обоснование целесообразности создания промышленных установок [12].

Необходимость правильного обращения с отходами, полученными в результате длительной работы в ядерном реакторе, обусловлена их высокой радиоактивностью, поэтому, исходя из предложенных в работе методов, стоит надеяться, что применение и создание новых матриц позволит безопасно и эффективно осуществлять захоронение радиоактивных отходов.

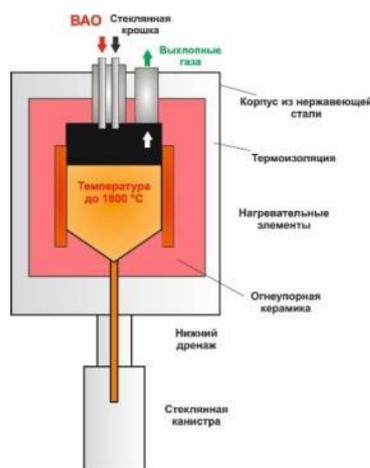


Рис. 2. Способ получения стеклянной матрицы для захоронения ВАО [4]

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific Principles of Concrete [Электронный ресурс]. Concrete Décor. – URL: <https://www.concretedecor.net/decorativeconcretearticles/online-exclusives/scientific-principles/> (дата обращения: 24.10.2024).
2. Варлаков А.П., Капустин В.В., Варлакова Г.А., Жеребцов А.А., Петров В.Г., Ширшин Е.А., Калмыков С.Н. Влияние радиоактивных нагрузок, характерных для высокоактивных отходов, на свойства цементной матрицы // Радиоактивные отходы. – 2018. – № 1(2).
3. Юдинцев С.В. Изоляция фракционированных отходов ядерной энергетики // Радиохимия. – 2021. – Т. 63, № 5.
4. Sublimationsverhalten von CsReO<sub>4</sub> [Электронный ресурс]. Karlsruhe Institute of Technology. – URL: [https://www.ine.kit.edu/downloads/Ausschreibung%20Master\\_Bachelor\\_Vertiefearbeit%20Reststoffseparation.pdf](https://www.ine.kit.edu/downloads/Ausschreibung%20Master_Bachelor_Vertiefearbeit%20Reststoffseparation.pdf) (дата обращения: 24.10.2024).
5. Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов классов 1, 2, 3, 4, 6 на период с 2018 по 2022 годы и тарифов на захоронение радиоактивных отходов класса 5 на 2018 год: Приказ ФАС России от 28.12.2017 № 1812/17 (ред. от 15.11.2018).
6. Radioactive Waste Forms for the Future / Eds. W. Lutze, R.C. Ewing. – New York: Elsevier, 1988. – 778 p.
7. Donald I.W., Metcalfe B.F., Taylor R.N. // J. Mater. Sci. – 1997. – Vol. 32. – P. 5851–5897.
8. Donald I.W. Waste Immobilization in Glass and Ceramic-Based Hosts: Radioactive, Toxic, and Hazardous Wastes. – UK: Wiley, 2010. – 507 p.
9. Козлов П.В., Ремизов М.Б., Беланова Е.А., Власова Н.В., Орлова В.А., Мартынов К.В. // Вопр. радиац. безопасности. – 2019. – № 1. – С. 3–15.
10. Stefanovsky S.V., Stefanovsky O.I., Remizov M.B., Kozlov P.V., Belanova E.A., Makarovskiy R.A., Myasoedov B.F. // Progr. Nucl. Energy. – 2017. – Vol. 94. – P. 229–234.
12. Андрияшин И.А., Юдин Ю.А. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. – Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010. – 138 с. : табл.; 20 см.; ISBN 978-5-9515-0149-3
13. Патент № 2580138 С1 Российская Федерация, МПК C01G 25/02, B01J 21/06. способ получения стабилизированного диоксида циркония : № 2014152536/05 : заявл. 25.12.2014 : опубл. 10.04.2016 / Е.Н. Лебедева, Е.Е. Никишина, Д. В. Дробот [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технологический университет». – EDN ZEONYL

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

Д.С. Силемонов<sup>1</sup>, Г. Сафарзода<sup>1</sup>, Б.В. Худоназаров<sup>2</sup>

Институт энергетики Таджикистана,

<sup>1</sup>Магистрант ИЭТ, группа 430105-05, <sup>2</sup>Бакалавр, группа 430105-05

Научный руководитель: И.Б. Махсумов, к.т.н., зав. кафедрой АИЭ, ИЭТ

### Введение

В условиях глобальных усилий по борьбе с изменением климата и необходимости поиска устойчивых решений для энергетических нужд городов, солнечная энергетика занимает центральное место. Быстро растущее население городов и урбанизация требуют значительных объемов энергии для поддержания городской инфраструктуры, транспорта, промышленности и жилого сектора. Однако традиционные источники энергии, такие как уголь и нефть, не только ограничены в своих ресурсах, но и являются основными источниками выбросов парниковых газов, способствующих глобальному потеплению и загрязнению окружающей среды.

Солнечная энергия, являющаяся возобновляемым источником, способна стать важным инструментом для решения этих проблем. Она не только помогает снизить зависимость от ископаемых источников энергии, но и обеспечивает ряд преимуществ с точки зрения экономической рентабельности и экологической устойчивости. В частности, города, будучи основными потребителями энергии, могут значительно снизить свой углеродный след, переходя на солнечные технологии, такие как солнечные панели и тепловые системы [1].

Согласно данным Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA), в 2020 г. глобальная установленная мощность солнечной энергетики достигла 710 ГВт, что на 18 % больше по сравнению с предыдущим годом (рис. 1). Это отражает как возросший интерес к возобновляемым источникам энергии, так и снижение стоимости солнечных технологий за последние десятилетия. Цена на установку солнечных панелей снизилась почти на 80 % с 2010 г., что делает её более доступной для частных домовладельцев, коммерческих объектов и государственных учреждений [2].

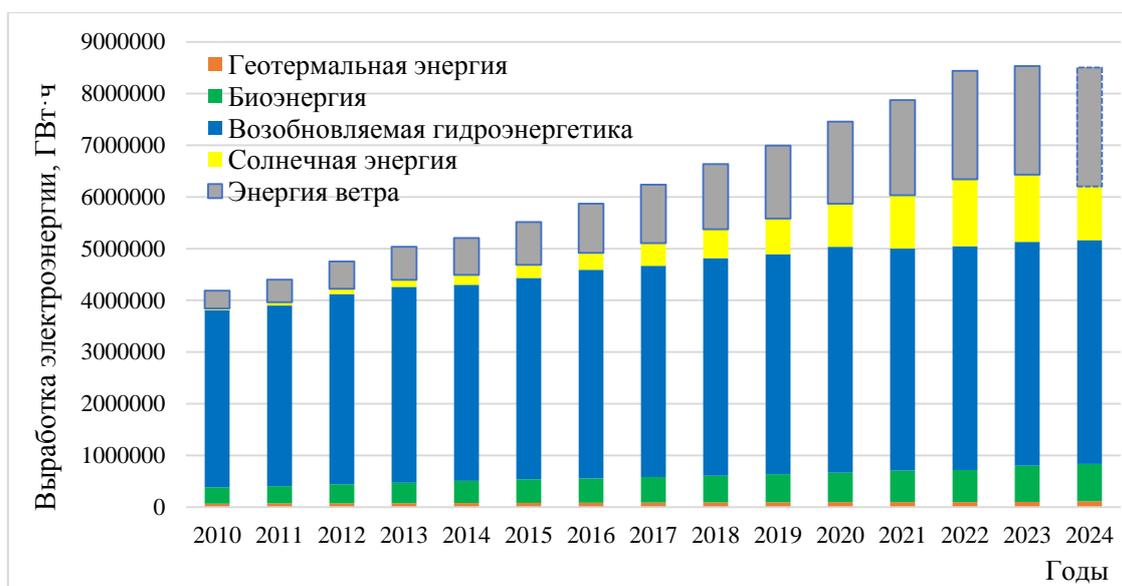


Рис. 1. Глобальная тенденция развития ВИЭ за последние 14 лет

Использование солнечной энергии в городах сопровождается рядом экономических и экологических преимуществ. С экономической точки зрения, это позволяет снизить затраты на электроэнергию, а также снизить зависимость от изменчивых цен на ископаемые ресурсы. В свою очередь, экологические выгоды включают значительное снижение выбросов парниковых газов, улучшение качества воздуха и снижение воздействия на природные экосистемы.

Однако внедрение солнечных систем в городах также сопровождается вызовами. Ограниченное пространство для размещения панелей, сложность интеграции в существующую городскую энергосеть и необходимость создания инфраструктуры для накопления энергии требуют инновационных решений. Тем не менее, развитие технологий и появление новых финансовых и законодательных стимулов способствуют дальнейшему распространению солнечных систем в городских условиях.

В этой статье рассматриваются ключевые экономические и экологические аспекты использования солнечной энергии в городах, анализируются текущие тенденции и вызовы, а также обсуждаются перспективы её развития в будущем.

## **Экономические аспекты солнечной энергии в городах**

### ***1. Снижение затрат на энергию***

Основное экономическое преимущество использования солнечных панелей в городах это снижение затрат на электроэнергию для домохозяйств, предприятий и муниципальных учреждений. Хотя первоначальные инвестиции в установку солнечных панелей могут быть высокими, последующие эксплуатационные расходы минимальны. Срок окупаемости таких систем варьируется в зависимости от региона и уровня солнечной инсоляции, но в среднем составляет от 5 до 10 лет [3].

Долгосрочные выгоды: после амортизации системы затраты на электроэнергию значительно снижаются, что делает солнечные панели привлекательным решением для долгосрочной экономии.

Инвестиционные стимулы: многие страны и города предлагают субсидии, налоговые льготы и другие формы поддержки для ускорения внедрения солнечных технологий.

### ***2. Устойчивость к изменению цен на традиционные энергоносители***

Цены на ископаемое топливо часто подвержены резким колебаниям, что создает нестабильность в экономике и повышает риски для бизнеса и домохозяйств. Использование солнечной энергии позволяет снизить зависимость от таких традиционных источников энергии и минимизировать влияние изменения цен на энергорынке.

### ***3. Развитие городской инфраструктуры и рабочих мест***

Солнечные системы требуют монтажа, технического обслуживания и инновационного развития, что способствует созданию новых рабочих мест. Внедрение возобновляемых источников энергии в городскую среду стимулирует рост новых отраслей и образовательных программ, направленных на подготовку кадров в сфере зелёной энергетики.

## **Экологические аспекты использования солнечной энергии в городах**

### ***1. Снижение выбросов парниковых газов***

Города являются основными потребителями энергии, производимой из ископаемого топлива, что вносит значительный вклад в выбросы углекислого газа. Переход на солнечную энергетику позволяет значительно снизить эти выбросы. В отличие от традиционных электростанций, солнечные панели не выбрасывают парниковых газов при производстве электроэнергии [4].

Эффект на качество воздуха: улучшение качества воздуха в городах благодаря снижению выбросов от сжигания угля и нефти снижает заболеваемость среди населения, особенно среди уязвимых групп.

### ***2. Уменьшение использования природных ресурсов***

Для традиционных источников энергии требуется постоянное потребление угля, нефти или газа. Солнечная энергия, напротив, использует возобновляемый источник – солнечный свет, что помогает сохранить природные ресурсы и минимизировать негативное воздействие на экосистемы.

### ***3. Сокращение теплового загрязнения***

Городские зоны страдают от феномена «городского теплового острова», когда плотная застройка и высокая концентрация транспорта способствуют повышению температуры воздуха. Солнечные панели могут помочь смягчить этот эффект, преобразуя солнечную энергию в электричество, что снижает нагрев зданий и окружающей среды.

## **Технические и инфраструктурные вызовы**

Несмотря на очевидные преимущества, солнечная энергия сталкивается с рядом инфраструктурных вызовов в городских условиях:

Ограниченное пространство для установки: В густонаселённых городах часто не хватает места для больших солнечных ферм, поэтому особую важность приобретают решения, такие как установка панелей на крышах зданий и использование вертикальных солнечных панелей.

Интеграция в сеть: Эффективное подключение солнечных панелей к городской энергосети требует модернизации существующей инфраструктуры и создания систем накопления энергии для использования её в ночное время или в пасмурные дни.

Влияние климатических условий: Погодные условия могут влиять на эффективность солнечных систем, особенно в регионах с низкой солнечной активностью или частыми осадками.

## **Перспективы развития**

В будущем можно ожидать дальнейшего снижения стоимости солнечных панелей и повышения их эффективности. Разработка новых технологий накопления энергии, таких как более ёмкие батареи, позволит расширить использование солнечной энергии в городах. Внедрение систем умного управления энергопотреблением, а также интеграция солнечных панелей в элементы городской архитектуры и инфраструктуры от умных остановок до уличного освещения станут важным шагом на пути к устойчивому городу [5–7]. В будущем можно ожидать несколько ключевых тенденций, которые будут способствовать развитию солнечной энергии в городских условиях:

### ***Снижение стоимости солнечных панелей и повышение их эффективности***

Ожидается, что продолжение исследований и разработок в области фотогальванических технологий приведет к дальнейшему снижению цен на солнечные панели. Снижение затрат на материалы и оптимизация производственных процессов могут сделать солнечную энергию еще более доступной для городов. Технологии, такие как перовскитные солнечные панели, показывают многообещающие результаты в плане эффективности и могут занять свою нишу на рынке.

### ***Разработка технологий накопления энергии***

С учетом переменной природы солнечной энергии, важным направлением будет развитие более ёмких и доступных технологий хранения энергии. Новые решения, такие как натрий-ионные батареи и технологии накопления на основе редкоземельных металлов, могут значи-

тельно увеличить потенциал использования солнечной энергии в городах, позволяя хранить избыток энергии для последующего использования.

### ***Внедрение систем умного управления энергопотреблением***

Интеграция технологий умного управления позволит оптимизировать потребление солнечной энергии. Системы, использующие искусственный интеллект и данные о потреблении, смогут автоматически регулировать распределение энергии в зависимости от спроса, что повысит общую эффективность и надежность городской энергосистемы.

### ***Интеграция солнечных панелей в городскую архитектуру и инфраструктуру***

Солнечные панели все чаще будут интегрироваться в элементы городской архитектуры, такие как крыши зданий, фасады и даже уличное освещение. Использование солнечных технологий в таких решениях, как умные остановки и светильники, не только улучшит энергообеспечение, но и повысит визуальную привлекательность городской среды. Таким образом, сочетание снижения затрат, технологических инноваций и интеграции с городской инфраструктурой будет способствовать созданию устойчивых и энергоэффективных городов, в которых солнечная энергия станет одним из ключевых источников питания.

## **Заключение**

Использование солнечной энергии в городах предоставляет как экономические, так и экологические преимущества. Оно способствует снижению затрат на электроэнергию, созданию рабочих мест и повышению устойчивости к изменениям в энергорынке, одновременно улучшая качество воздуха и снижая нагрузку на экосистемы. При этом, для успешного внедрения солнечных технологий необходимо решать инфраструктурные проблемы и развивать систему накопления энергии. С учётом этих вызовов, солнечная энергетика может стать важным элементом устойчивого развития городов в ближайшие десятилетия.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. World Adds Record New Renewable Energy Capacity in 2020. IRENA – International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.irena.org/News/pressreleases/2021/Apr/World-Adds-Record-New-Renewable-Energy-Capacity-in-2020> (дата обращения: 04.09.2024).
2. Solar costs have fallen 82 % since 2010 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pv-magazine.com/2020/06/03/solar-costs-have-fallen-82-since-2010/> (дата обращения: 04.09.2024).
3. Goel M., Verma V. S., Tripathi N. G. Solar Energy in Cities // Solar Energy. Green Energy and Technology. – Singapore: Springer, 2022. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2099-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2099-8_13).
4. REN21 Secretariat. Renewables in Cities 2021 Global Status Report. – Paris: REN21, 2021. – 112 с.
5. Strzalka A., Alam N., Duminil E., Coors V., Eicker U. Large scale integration of photovoltaics in cities // Applied Energy. – 2012. – Т. 93. – С. 413–421.
6. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA). Rise of Renewables in Cities – Energy Solutions for the Urban Future. – IRENA, 2021. – 88 с.
7. The Role of Solar Energy in Shaping Sustainable Cities of the Future [Электронный ресурс]. – URL: <https://green.org/2024/01/30/the-role-of-solar-energy-in-shaping-sustainable-cities-of-the-future/> (дата обращения: 04.09.2024).

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ИЗЛУЧАЮЩЕГО ИСТОЧНИКА**

**А.С. Соловской**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПБ, группа ОТМехЭ-12*

Научный руководитель: Е.В. Титов, д.т.н., профессор ЭПБ ЭФ АлтГТУ

В соответствие с Федеральным законом № 52-ФЗ от 30.03.1999 «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (изм. № 382-ФЗ от 24.07.2023) для обеспечения благоприятных условий жизнедеятельности людей необходимо совершенствование системы мер по снижению риска воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности с использованием инструментов социально-гигиенического мониторинга и принципов оценки состояния условий труда на рабочих местах [1].

Как показывает анализ [1–3], интенсивное использование электромагнитной энергии в электротехнологических процессах агропромышленного комплекса и масштабное применение широкополосных источников электромагнитных полей в сельскохозяйственном производстве и быте может представлять потенциально высокую опасность для биологических объектов из-за существенного превышения предельно допустимых уровней нормируемых параметров.

Биологическое действие электромагнитных полей складывается из их взаимодействия с системами, органами, тканями, клетками и молекулами организма человека и животных, включая поглощение и распределение энергии излучения, определяющее характер и направленность ответных реакций [1]. Результатом влияния электромагнитных полей на биологические объекты являются возникающие биологические эффекты, образованные в результате преобразования энергии излучения через различные первичные механизмы взаимодействия [1–2]. В связи с этим, с энергетической точки зрения механизмы воздействия электромагнитных излучений условно разделяются на тепловые, микротепловые и нетепловые [1]. При этом различают действия на клеточном, органно-тканевом, организменном и молекулярно-генетический уровнях [1].

Действия ЭМП на клеточном уровне связаны, прежде всего, с гипотезой резонансного характера влияния на биологические объекты, которая подробно описана в [2]. Окислительный стресс рассматривается как другой механизм воздействия ЭМП на клеточном уровне, заключающийся в дисбалансе активных форм кислорода и антиоксидантов, приводящие к нарушению функции клеток [2]. На основании реакции Фентона, образующая свободные радикалы, наблюдаются генотоксические эффекты [1]. В связи с этим, клетки, являющиеся метаболическими активными или имеющие более высокие клеточные концентрации свободного железа в тканях организма, таких как клетки мозга, более уязвимы к воздействию ЭМП [2–3].

К ухудшению электромагнитной обстановки может приводить формирование наложенных электромагнитных волн и высокая интенсивность поглощения энергии электромагнитного поля биологическими тканями человека, а также неопределенность изменения параметров электромагнитного поля в зависимости от расстояния до излучающего источника.

В табл. 1 представлены результаты измерения параметров электромагнитного поля (напряженности электрического поля и плотность потока энергии) от маршрутизатора TP-LINK TL-WR841N, который используется для построения беспроводной точки доступа в сеть Интернет. Экспериментальные измерения проводились измерителем электромагнитных полей ПЗ-41.

*Таблица 1. Результаты измерений параметров ЭМП*

Частота	Расстояние до источника ЭМП, см	Значение параметра ЭМП	ПДУ
Напряженность электрического поля, В/м			
30 кГц	0	25,66	25
	25	6,32	
	50	0,8	
100 кГц	0	7,98	
	25	2,06	
	50	0,62	
2,5 МГц	0	7,2	15
	25	1,85	
	50	0,21	
10 МГц	0	6,11	10
	25	1,55	
	50	0,69	
50 МГц	0	6,55	3
	25	1,86	
	50	0,49	
100 МГц	0	6,06	
	25	1,71	
	50	0,35	
300 МГц	0	8	
	25	1,84	
	50	0,36	
Плотность потока энергии, мкВт/см <sup>2</sup>			
500 МГц	0	1,88	10
	25	0,7	
3,5 ГГц	0	3,44	
	25	0,15	
12,5 ГГц	0	4,31	
	25	0,33	

Результаты измерений, приведенные в табл. 1, показывают, что превышение предельно допустимых уровней параметров электромагнитного поля зарегистрировано на частотах 30 кГц и 100 МГц при размещении измерителя в непосредственной близости с излучающим источником. При этом среднее снижение интенсивности ЭМП в зависимости от расстояния (с 0 до 25 см) составляет 70 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мигалев И.Е. Автоматизированный контроль электромагнитных излучений в технологиях АПК: автореф. дис. канд. тех. наук. – Барнаул, 2018. – 126 с.
2. Соловской А.С., Титов Е.В. Развитие принципов формирования объёмных картин опасности электромагнитной обстановки в условиях производственной среды // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 2(106). – С. 192–196. – DOI 10.37670/2073-0853-2024-106-2-192-196.
3. Куликова Л.В., Никольский О.К., Сошников А.А. Основы электромагнитной совместимости. – Москва-Берлин: Изд-во Директ-Медиа, 2020. – 405 с. – ISBN 978-5-4499-1175-9.

## ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЕКТА БРЕСТ-ОД-300

Д.М. Ретунский, А.О. Сакерин, И.А. Сероев, А.В. Губин

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия,  
avgubin@sevsu.ru, retunsky.denis@yandex.ru, sakerin\_andrey@mail.ru, i.seroev@mail.ru

Потребление энергетики растет с каждым днем, что обосновано различными факторами: будь то увеличение промышленных мощностей или же рост бытовых нужд население. Данная тенденция требует исследований более энергоэффективных и экологически чистых технологий для получения электроэнергии. Самым перспективным направлением в этой отрасли по праву считается атомная энергетика, которая, в процессе выгорания ядерного топлива не ведет к эмиссии вредных газов в атмосферу. Таким образом, по генеральной схеме размещения объектов энергетики до 2042 г., на территории Российской Федерации планируется строительство семи крупных и четырех малых станций для повышения доли энерговыработки атомных электростанций с 18,9 до 24,0 процентов [1]. Но в то же время, важным фактором для обоснования экологической целесообразности внедрения той или иной технологии атомной энергетики является радиационная безопасность.

Одним из перспективных проектов на данный момент является реактор БРЕСТ-ОД-300, особенностью которого является использование свинцового теплоносителя в первом контуре, а в качестве топлива – нитридное уран-плутониевое. Эти особенности обосновывают необходимость исследования и анализа радиационной безопасности при переходных процессах, возникающих при проектных и запроектных авариях.

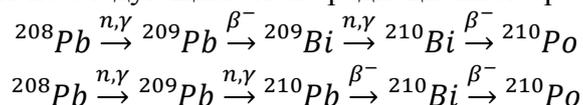
Таким образом, в работе [2], авторы разделяют процесс расчетного обоснования радиационной безопасности энергоблока с БРЕСТ-ОД-300 на два основных этапа:

- оценка выбросов радионуклидов при нормальной работе и при аварийных ситуациях;
- расчет доз облучения населения вследствие выбросов радиоактивных веществ в атмосферу.

На первом этапе выделены основные радионуклиды, которые возникают при работе реактора БРЕСТ-ОД-300 на мощности:

- продукты активации свинцового теплоносителя и его примесей, в том числе радионуклид  $^{210}\text{Po}$ ;
- продукты деления, которые могут поступать в теплоноситель в случае разгерметизации твэлов;
- тритий, образующийся в топливе и компонентах системы управления и защиты.

Особое внимание в исследованиях уделяется изотопам свинца из-за их высокой активности. Отдельно оценена активность изотопа полония  $^{210}\text{Po}$ , так как в отличие от других радиоизотопов он обладает большими показателями летучести. В реакторе БРЕСТ-ОД-300 образование полония происходит по следующим схема радиационного распада:



По результатам оценки, объемная активность изотопа  $^{210}\text{Po}$  меньше допустимого значения среднегодовой объемной активности, установленных нормами радиационной безопасности, более чем в 10 тысяч раз. Течь в парогенераторе может привести к увеличению летучести полония [3], но тем не менее, данное нарушение не приводит к значительному увеличению объемной активности полония относительно допустимого значения.

На рис. 1 показана расчетная модель распространения радионуклидов в энергоблоке с БРЕСТ-ОД-300. Данная модель позволяет аналитически с помощью компьютерного моделирования оценить активность продуктов деления.

Расчеты, выполненные путем моделирования в исследовании [2], говорят о том, что объемная активность изотопов цезия (не более 0,2 %) и йода (не более 0,8 % при эксплуатационном пределе и не более 2,2 при безопасной эксплуатации) в центральном зале значительно ниже допустимых уровней.

Радиоактивные изотопы йода являются особо интересующими факторами для анализа радиационной безопасности любой реакторной установки, так как оказывает антропогенное воздействие на человека. Наибольший вред приносит накопление радиоактивного йода в щитовидной железе, и в следствие, увеличение радиационных нагрузок на организм [4]. В работах [4–5] проведены исследования по влиянию данной патологии у лиц различных возрастных групп, подвергшимся воздействию радиации в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Результаты этих работ говорят о увеличении статистических показателей заболеваемости раком щитовидной железы, а также негативное влияние на здоровье детей, подвергшихся радиационному облучению.

Причинами образования радиоактивного изотопа йода в реакторной установке БРЕСТ-ОД-300 могут являться [6]:

- твэлы, герметичность которых нарушена, что приводит к проникновению продуктов деления ядерного топлива в теплоноситель;
- реакция активации примесного теллура в теплоносителе;
- деление примесных актиноидов в свинцовом теплоносителе.

Для минимизации рисков выхода радиоактивных изотопов йода в реакторной установке БРЕСТ-ОД-300 применены следующие меры:

*Использование нитридного топлива.* Топливо обладает высокой термической стабильностью и устойчивостью к радиационным повреждениям, что уменьшает вероятность утечки продуктов деления, таких как радиоактивный йод

*Использование свинцового теплоносителя.* Свинец является химически инертным материалом, эффективно изолирующим летучие радионуклиды. Это снижает вероятность их высвобождения в газовую среду даже в аварийных ситуациях

*Системы фильтрации и улавливания радионуклидов.* Реактор оснащен современными фильтрами, предотвращающими выбросы радиоактивных веществ в атмосферу как при нормальной эксплуатации, так и при её нарушении.

Эти технологические решения делают БРЕСТ-ОД-300 безопасным в эксплуатации, эффективно ограничивая выделение радиоактивного йода и других потенциально опасных продуктов деления.

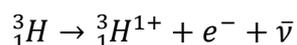
В работе [6] приводятся экспериментальные данные, полученные на установке, разработанной АО «ИРМ», для обеспечения условий, приближенных к условиям реакторной установки БРЕСТ-ОД-300. В рамках исследований добавлялись примеси: продукты активации, коррозии и деления (на реакторном экспериментальном устройстве) для определения характера взаимодействия радиоактивного йода с этими примесями. В заключении авторы делают



Рис. 1. Расчетная модель распространения радионуклидов в энергоблоке с БРЕСТ-ОД-300

акцент на том, что при расчетном обосновании радиационной безопасности проекта следует принимать нахождение йода в соединении со свинцом ( $PbI_2$ ), так как он обладает большей летучестью, по сравнению с соединением с цезием ( $CsI$ ). Теоретические данные, которые были рассмотрены в вышеупомянутой работе, говорят о том, что при нормальной эксплуатации реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 образование молекулярного йода не происходит.

Тритий, как радиоактивный изотоп водорода, нарабатываемый в процессе работы реактора БРЕСТ-ОД-300 требует анализа с точки зрения радиационной безопасности. Он имеет относительно большой период полураспада (около 12 лет) и распадается по цепочке [7]:



Образовавшаяся при делении бета-частица не сможет преодолеть даже верхние слои кожи, а малая энергия распада (около 19 кэВ) позволяет удерживать электроны на одежде. Тем не менее, он считается радиотоксичным при попадании внутрь организма. Попадание трития при нормальной эксплуатации АЭС обосновывается испарением течей и сдувок емкостей [8]. По расчетам, приведенным в работе [2], предельная концентрация радиоактивного трития равна половине допустимого значения без учета его удаления в газовом контуре. По прогнозируемым расчетам, реальная концентрация трития при условии его удаления будет в десятки раз меньше предельной.

Таким образом, проект БРЕСТ-ОД-300 в перспективе может решить вопрос обеспечения безопасности атомной энергии, так как приведенные теоретические и расчетные данные говорят об их соответствии с существующими требованиями и нормативами

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Общественное обсуждение Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года [Электронный ресурс]. Системный оператор единой энергетической системы. – URL: <https://www.so-ups.ru/future-planning/public-discussion-genshema/2042/> (дата обращения: 03.11.2024).
2. Обоснование радиационной безопасности реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 / Н.Е. Дубенков, А.В. Проухин, А.А. Бажанов [и др.] // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130, № 4. – С. 223–228. – EDN PNLSTZ.
3. Васюхно В.П., Дубенков Н.Е., Лемехов В.В. и др. Исследование процессов массопереноса продуктов деления топлива и продуктов активации примесей свинцового теплоносителя на комплексе свинцово-газовых петлевых установок. – В сб.: Инновации в атомной энергетике. 23–24 мая 2017 г. – М.: АО «НИКИЭТ». – С. 322–330.
4. Мирогов В.П. Облучение щитовидной железы в условиях йодного дефицита после аварии на ЧАЭС / В.П. Миронов, В.В. Журавков, О.П. Кудина – URL: <https://elib.sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/8918/MironovVP.pdf?sequence=1> (дата обращения: 03.11.2024).
5. Балева Л.С., Яковлева И.Н., Карахан Н.М., Данилычева Л.И. Радиоиндуцированная патология щитовидной железы у лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на ЧАЭС во внутриутробном, детском и подростковом возрасте // Рос вестн перинатол и педиат. 2013. №5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radioindutsirovannaya-patologiya-schitovidnoy-zhelezy-u-lits-podvergshih-sya-vozdeystviyu-radiatsii-v-rezultate-avarii-na-chaes-vo> (дата обращения: 13.11.2024).
6. Дубенков Н.Е., Васюхно В.П., Хачересов Г.А. Возможные соединения йода в свинцовом теплоносителе реактора БРЕСТ-ОД-300 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2021. – № 1(99). – С. 5–13. – DOI 10.26277/SECNRS.2021.99.1.001. – EDN ANZFTF.
7. Патент № 2592078 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/00. Способ иммобилизации жидких содержащих тритий радиоактивных отходов : № 2015129657/07 : заявл. 20.07.2015 : опубл. 20.07.2016 / С.А. Коновалов, В.Э. Петров ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТВЭЛЛ». – EDN RTGGCI.
8. Егоров Ю.А. О радиационной опасности трития, нарабатываемого на АЭС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2002. – № 6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-radiatsionnoy-opasnosti-tritiya-narabatyvaemogo-na-aes> (дата обращения: 13.11.2024).

## ВЛИЯНИЕ ТЭЦ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЭКОСИСТЕМУ И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НЕГАТИВНЫМИ ПОСЛЕДСТВИЯМИ

Н.А. Балашов

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-14*

Научный руководитель: И.А. Павличенко, ассистент ЭФ ЭПП АлтГТУ

Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) играют важную роль в обеспечении энергией и теплом городов и промышленных объектов. Однако их эксплуатация также связана с серьезными экологическими последствиями: современные мощные ТЭЦ могут выбрасывать ежедневно в атмосферу до 200 т оксидов азота, 650–700 т диоксида серы, 120–240 т твердых частиц пыли и золы. В данной статье мы рассмотрим основные аспекты влияния ТЭЦ на экосистему и возможные способы минимизации негативных последствий.

Одним из основных источников негативного воздействия ТЭЦ на окружающую среду являются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. При сжигании топлива, такого как уголь, газ или мазут образуются:

- *Углекислый газ.* Основной парниковый газ, способствующий глобальному потеплению.
- *Сернистые соединения.* Из-за сжигания угля выделяется диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), который может вызывать кислотные дожди, негативно влияя на почву и водоемы.
- *Оксиды азота.* Эти вещества способствуют образованию смога и могут вызывать респираторные заболевания у людей.
- *Частицы твердых веществ.* Пыль и сажа, выбрасываемые в атмосферу, могут оседать на растениях и в водоемах, нарушая экосистему.

ТЭЦ оказывают весомое влияние на водные ресурсы. Они потребляют значительное количество воды для охлаждения оборудования и конденсации пара. Это приводит к следующим последствиям:

- *Изменению температуры водоемов.* Сброс большого количества горячей воды в реки и озера может нарушать экосистемы, вызывая негативные последствия, такие как снижение концентрации кислорода в воде и нарушение биоритмов водных животных.
- *Загрязнению водоемов,* поскольку со сбросом сточных вод в водную систему попадают тяжелые металлы и другие загрязняющие вещества, что негативно сказывается на качестве воды и здоровье водных флоры и фауны.

Строительство и эксплуатация ТЭЦ могут приводить к уничтожению природных экосистем. Вырубка лесов, изменение ландшафта и загрязнение почвы негативно сказываются на биоразнообразии и впоследствии могут привести к исчезновению некоторых видов растений и животных.

Существуют различные методы и технологии, которые могут помочь снизить негативное воздействие ТЭЦ на окружающую среду:

- *Переход на более чистые источники энергии.* Как один из наиболее эффективных и перспективных методов снижения выбросов – переход на возобновляемые источники энергии (солнечная и ветровая энергетика), а также использование природного газа вместо угля позволяют сократить использование ископаемого топлива на ТЭЦ.
- *Использование технологий очистки выбросов.* Современные технологии, такие как:
  - *Установка систем очистки газов* (например, десульфуризация и денитрификация) позволяет значительно снизить выбросы серы и азота.
  - *Установка фильтров и скрубберов для удаления золы, пыли и других твердых веществ из выбросов.*

– *Улавливание и хранение углерода (CCS-технология)*. Технология, позволяющая улавливать CO<sub>2</sub> из выбросов и хранить его под землей.

– *Энергоэффективность*. Повышение энергоэффективности ТЭЦ может значительно снизить потребление топлива и, соответственно, выбросы. Это может быть достигнуто путем модернизации оборудования, оптимизации процессов и внедрения новых технологий.

– *Мониторинг и регулирование*. Разработка и установление строгих норм и стандартов на выбросы, а также регулярный мониторинг состояния окружающей среды помогут контролировать уровень загрязнения и принимать меры по его снижению.

### Заключение

ТЭЦ играют важную роль в обеспечении энергией, но их воздействие на окружающую среду является серьезной проблемой, которая требует серьезного внимания. Через внедрение современных технологий, переход на более чистые источники энергии и повышение энергоэффективности можно добиться снижения негативного влияния ТЭЦ на природу.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.В. Экологические аспекты работы тепловых электростанций. – М.: Энергия, 2018. – 256 с.
2. Григорьев И.Н. Воздействие тепловых электростанций на окружающую среду. – СПб.: Наука, 2019. – 312 с.
3. Кузнецов С.П. Тепловые электростанции и экология: проблемы и решения. – Екатеринбург: УрФУ, 2020. – 198 с.
4. Лебедев В.А., Петров Н.С. Влияние выбросов ТЭЦ на атмосферу и здоровье человека. – Казань: Казанский университет, 2021. – 150 с.
5. Сидоров А.И. Экологические последствия эксплуатации ТЭЦ. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2022. – 220 с.
6. Федоров М.В. Тепловые электростанции: экология и устойчивое развитие. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2023. – 175 с.
7. Шевченко Е.А. Оценка воздействия ТЭЦ на экосистему. – Владивосток: ДВФУ, 2020. – 130 с.

## МЕХАНИЗМ РЕАКЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИОСЕМИКАРБАЗОНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СО (III) В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРА

Д.А. Логвинов, А.С. Баранникова

*Южный Федеральный университет, ХФ, КФикХ, группа 3*

Научный руководитель: И.Н. Щербаков, д.х.н., зав. кафедрой ФикХ ХФ ЮФУ

Одна из основных проблем экологии – это загрязнение воздуха побочными продуктами сгорания органического топлива. Решением являются ТЭ, использующие водородное топливо. Водород получается в ходе реакции электролиза воды. Для снижения перенапряжения в этом процессе используют катализаторы. Анализ литературных данных показал, что ими могут являться комплексы переходных Me на основе *бис*-тиосемикарбазонов.

Для изучения механизма реакции электрохимического получения молекулярного водорода в качестве катализатора были использованы комплексы Со(III) на основе *бис*-тиосемикарбазонов диацетила – продуктов конденсации 4-R-тиосемикарбазидов (R = H, t-Bu, Ph) и диацетила (H<sub>2</sub>L).

На основании методов элементного анализа, ИК-спектроскопии и РСА было установлено, что комплекс с R = Ph имеет биядерное строение состава [Co<sup>III</sup><sub>2</sub>L<sub>2</sub>(SCN)<sub>2</sub>], где L – дважды депротонированная енольная форма *бис*-гидразона. Другие комплексы имеют аналогичное строение, так как являются изоструктурными. На рисунке 1 показано молекулярное строение комплекса по данным РСА.

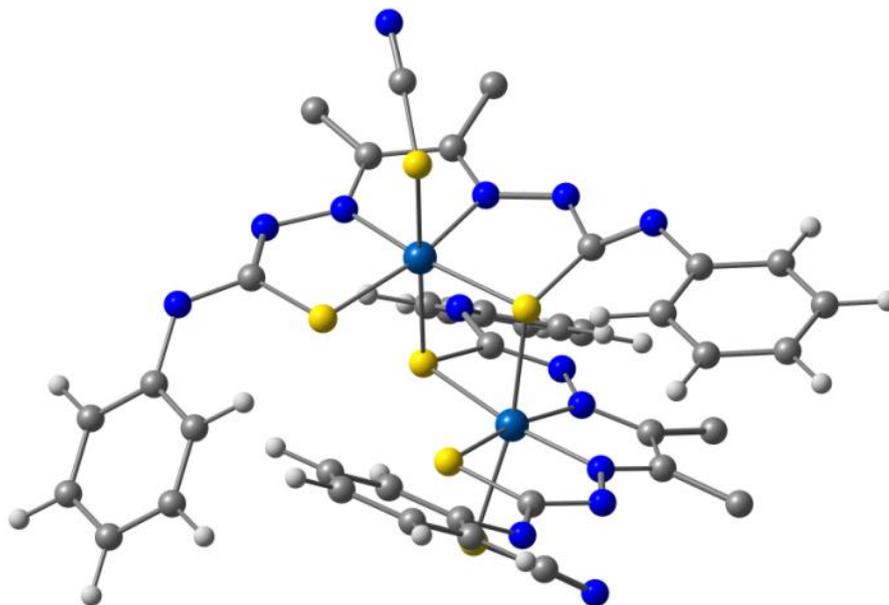


Рис. 1. Молекулярное строение комплекса  $Co(III)$  с фенильным заместителем

Примечательно, что комплекс имеет биядерное строение состава два к двум. Кобальт имеет КЧ=6, т. е. октаэдрическое строение, и проявляет степень окисления +3. В мономерном фрагменте координация происходит через атомы азота азометинового фрагмента и серы. Димеризация осуществилась за счёт мостиковых атомов серы. В аксиальных положениях находятся роданид-ионы.

Из литературы [2] было установлено, что каталитической активностью обладает мономерный комплекс, который получается при диссоциации биядерного комплекса в ходе электрохимической реакции (т. е. происходит необратимое восстановление).

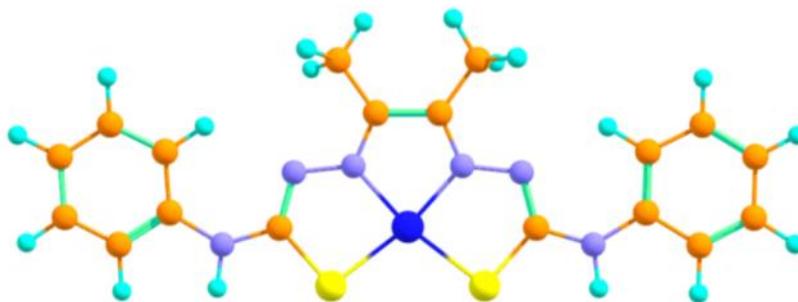


Рис. 2. Молекулярная структура комплекса  $Co(II)$  с фенильным заместителем

Согласно полученным результатам и литературным данным [2] предполагаемый процесс протекает через чередующиеся стадии присоединения электрона и протонирования комплекса  $Co(II)$ .

Для установления механизма реакции были проведены квантово-химические расчёты методом DFT с функционалом B3LYP и базисным набором 6-311G(d). Для этого на каждой стадии были оптимизированы структуры интермедиатов с учетом возможных спиновых состояний. Затем были выбраны структуры с минимальной энергией.

После первого обратимого восстановления электрон находится на лиганде.

Местами присоединения протона могут являться 5 атомов: 3 азота, сера и кобальт. После первого восстановления водород локализуется на металле.

После второго восстановления протон переходит на координированный азот.

При втором протонировании были рассмотрены структуры с симметричными расположениями водорода, либо где они находятся на соседних атомах. Отдельный случай представляет образование водорода через гидрид, где протону легче всего подойти к отрицательно заряженной частице.

В этой структуре электрон находится на металле и на лиганде (рис. 3). Об этом говорит форма ВЗМО и спиновая плотность. Разница в энергии между структурой, где водород находится на координированном азоте и структурой с гидрид-ионом составляет 4 ккал/моль, что может говорить о таутомерном равновесии этих 2-х форм. Образование водорода происходит с увеличением спина системы, который затем приводит к образованию электронной пары на металле. Она переходит к гидрид-иону, который координирует протон, с высвобождением комплекса и молекулы водорода. По-видимому, последняя стадия может являться лимитирующей, так как разница между энергиями последних двух структур составляет около 45 ккал/моль.

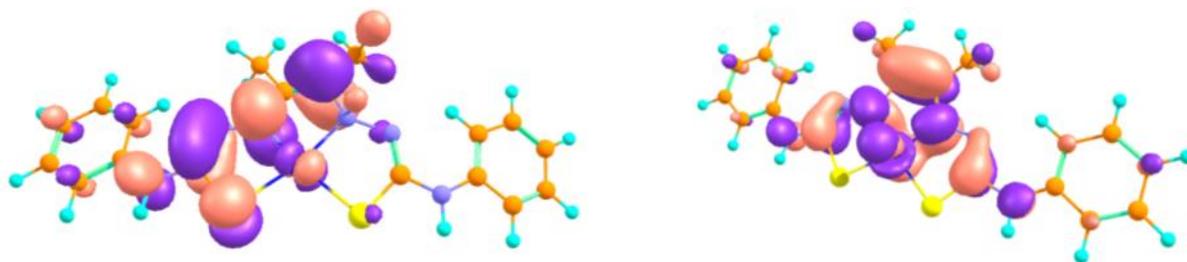


Рис. 3. Форма ВЗМО  $[Co^I-L\cdot H]^-$  (слева) и ВЗМО  $[Co^{III}H-L]^-$

На рис. 4 представлен итоговый механизм с участием бис-тиосемикарбазона с фенильным заместителем.

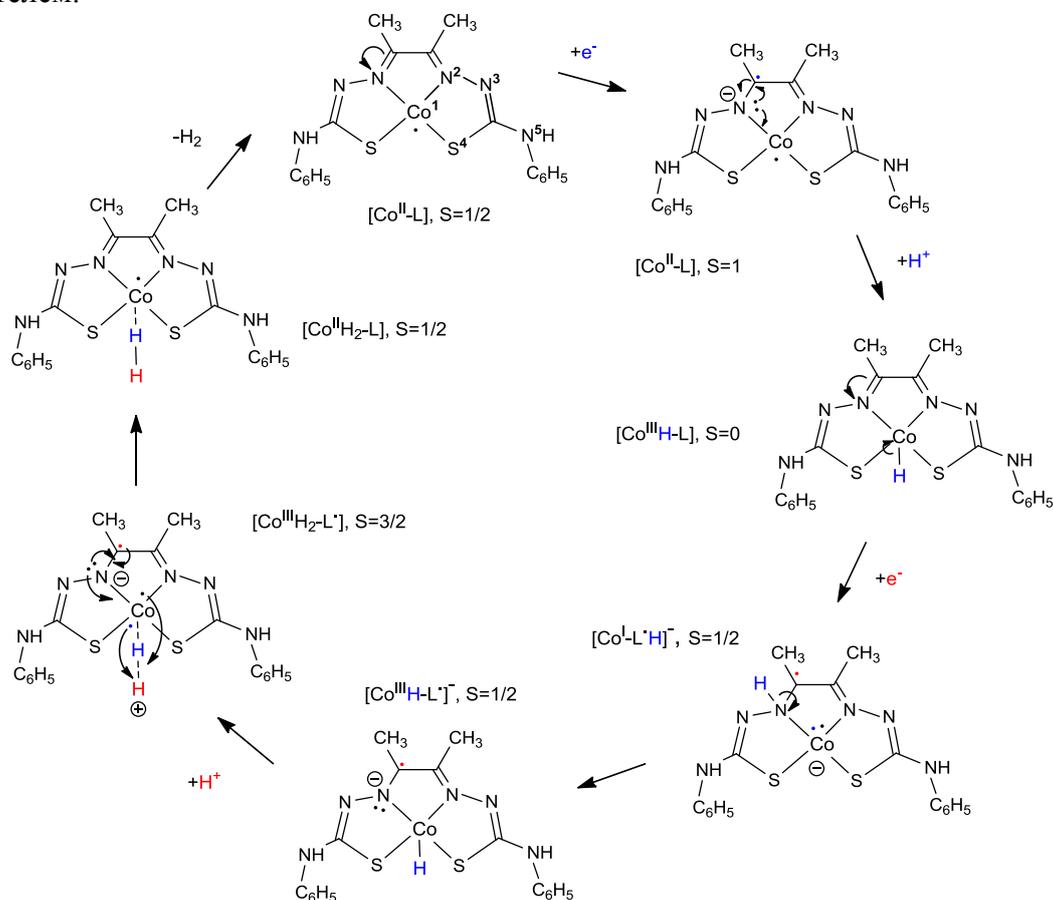


Рис. 4. Предполагаемый механизм восстановления водорода комплексом  $[Co^{II}L]$

Для комплексов с другими заместителями также был установлен механизм, и он протекает аналогично. Получается, что для кобальта характерно металлцентрированное восстановление с участием лиганда и оно не зависит от природы заместителя в лиганде.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang S., Lu A., Zhong C.J. Hydrogen production from water electrolysis: role of catalysts // Nano Convergence. – 2021. – Т. 8. – С. 1–23.
2. Haddad A.Z. et al. Metal-assisted ligand-centered electrocatalytic hydrogen evolution upon reduction of a bis (thiosemicarbazonato) Cu (II) complex // Inorganic chemistry. – 2017. – Т. 56. – №. 18. – С. 11254–11265.

## ИЗУЧЕНИЕ ВОДОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИТНЫХ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИХ ПЕНОМАТЕРИАЛОВ

**С.С. Кузнецов**

*Забайкальский государственный университет, ЭФ, группа ЭПм-23*

Научный руководитель: А.Г. Батухтин, д.т.н., доцент кафедры энергетики ЭФ ЗабГУ

### Актуальность

Тепловые сети – несомненно важный компонент системы теплоснабжения, который во многих регионах страны отличается критичной изношенностью в результате влияния механических, климатических, гидравлических и других факторов. Доля тепловых потерь достигает до 30 %, часть которых связана с дефектами теплоизоляции. Не смотря на широкий ассортимент теплоизоляционных материалов и конструкций для решения проблемы повышения энергоэффективности систем теплоснабжения требуется усовершенствование их характеристик (прочности, долговечности, коэффициента теплопроводности, экономической и экологической целесообразности и т. д.).

Теплоизоляционные пеноматериалы минеральной природы обладают рядом преимуществ по сравнению органическими, теплозащитные свойства которых со временем снижаются. В качестве сырья перспективны природные цеолитсодержащие породы, золошлаки, обладающие вспучивающей способностью. Такой подход позволит получить продукт с необходимыми свойствами, обеспечит экологичность, энергоэффективность, рентабельность производства.

Цель работы – получение и оценка водостойкости вспененных минеральных композитных материалов.

### Материалы и методы

В качестве компонентов шихты для синтеза пенокомпозитов применялись: цеолитсодержащая алюмосиликатная порода Забайкальского Шивиртуйского месторождения, угольная зола золошлакоотвала Читинской ТЭЦ (уголь Харанорского месторождения), вспомогательные компоненты (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, уголь), концентрация которых варьировалась у разных образцов [1–3]. Составляющие измельчались до гомогенного состояния и подвергались термическому воздействию в муфельной печи (900 °С): 1) цеолит-зола-NaOH-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O; 2) цеолит-зола-NaHCO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O; 3) цеолит-зола-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-уголь-H<sub>2</sub>O [1–3]. Определение водопоглощения, общей и сорбционной влажности проводили согласно ГОСТу 17177–94, водостойкости – по ГОСТу 10134.1–2017.

## Результаты и их обсуждение

При спекании синтезированы три образца пеностекольных материалов, морфологическое описание которых представлено в табл. 1. Механизм поризации полученных систем «цеолит-зола» в присутствии щелочного компонента обусловлен закономерностями пенообразования в пиропластических силикатных системах [3].

Таблица 1. Морфологические особенности полученных образцов

Образец	Внешний вид, морфология поверхности
1	хорошо вспененный, изменение объёма незначительно, высокая пористость, поры округлой формы, одного размера, равномерно распределены
2	хорошо вспененный, изменение объёма незначительно, высокая пористость, поры разного размера, распределение неравномерное
3	хорошо вспененный, изменение объёма незначительно, высокая пористость, поры разного размера, некоторые имеют вид каналов, распределение неравномерное

Результаты изучения свойств по отношению к воде приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры влажности, водопоглощения и водостойкости пеностекольных образцов

Параметр	Образцы			Нормативные данные
	1	2	3	
Общая влажность, %	0,05	0,05	0,03	0,2–0,5 (ГОСТ 17177-94)
Сорбционная влажность, %	0,2	0,1	0,2	< 0,7 (ГОСТ 33949-2016)
Водопоглощение, %	3,7	4,2	3,9	< 5,0 (ГОСТ 33949-2016)
Водостойкость, см <sup>3</sup>	2,9	2,7	3,1	< 3,5 (ГОСТ 10134.1-2017)

Анализ полученных результатов свидетельствует, что все синтезированные образцы соответствуют нормативным показателям и способны оказывать длительное сопротивление разрушающему действию воды. Композит № 1 в целом имеет лучшие физико-химические свойства.

Таким образом, исследование показало возможность получения композитного пеноматериала путем термического вспенивания алюмосиликатного сырья. При совместном использовании цеолитсодержащей породы и золошлаковых отходов может быть получен пористый водостойкий теплоизоляционный материал с широкими перспективами дальнейшего изучения и использования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Абияка А.Н. Оценка составов и компонентов для получения пеностеклокристаллических материалов на основе алюмосиликатного сырья // Стекло и керамика. – 2009. – № 3. – С. 6–8.
3. Сигачев Н.П., Коновалова Н.А., Непомнящих Е.В. Низкотемпературная вспениваемость химически и механохимически модифицированных цеолитсодержащих пород для получения теплоизоляционных материалов // Вестник ЗабГУ. – 2014. – № 6 (109). – С. 12–20.
4. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Константинова К.К. Эффективные пеностекла на основе эффузивных пород и стеклобоя: монография. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2006. – 166 с.

## ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

М.Р. Пильковская, М.А. Сильвановия, А.С. Мелькова

Белорусский национальный технический университет, ЭФ ЭОП, группа 10601722

Научный руководитель: Е.П. Корсак, м.э.н. ст. преподаватель кафедры экономики и организации энергетики

Ядерная энергия уже долгое время рассматривается как эффективный способ производства электроэнергии. Одним из её главных преимуществ является способность генерировать электричество без выбросов углекислого газа и других парниковых газов, что делает её важным элементом в борьбе с изменением климата. Однако, несмотря на экологические преимущества, остаются значительные риски, связанные с безопасностью и утилизацией ядерных отходов.

Эти риски особенно ярко проявились в крупнейших ядерных катастрофах – на Чернобыльской АЭС (1986) и АЭС «Фукусима» (2011). Обе аварии привели к значительному выбросу радиоактивных изотопов в окружающую среду, вызвав серьёзные последствия для здоровья людей и экосистем. Эти трагические события усилили обеспокоенность по поводу безопасности ядерной энергетики и стимулировали мировые правительства к поиску более безопасных альтернатив и улучшению методов хранения и утилизации ядерных отходов.

Но в последнее время меры предосторожности на работающих атомных электростанциях становятся все более строгими, и теперь они безопасны. Тем не менее, они по-прежнему ежегодно производят тонны очень опасных отходов, которые трудно перемещать.

В табл. 1 указаны риски, связанные с ядерными отходами, которые зависят от их типа и уровня радиоактивности.

Таблица 1. Риски ядерных отходов по типу и уровню радиоактивности

Тип ядерных отходов	Уровень радиоактивности	Основные риски
Низкоактивные отходы (НАО)	Низкий уровень радиоактивности (сотни лет полураспада)	<ul style="list-style-type: none"><li>длительное хранение в специализированных хранилищах;</li><li>загрязнение при неправильной утилизации</li></ul>
Среднеактивные отходы (САО)	Умеренный уровень радиоактивности (сотни – тысячи лет полураспада)	<ul style="list-style-type: none"><li>риски радиоактивного излучения при утечках или нарушении упаковки;</li><li>требует изоляции в более защищенных хранилищах</li></ul>
Высокоактивные отходы (ВАО)	Высокий уровень радиоактивности (десятки тысяч лет полураспада)	<ul style="list-style-type: none"><li>опасность для окружающей среды и здоровья при утечках;</li><li>требуют длительного контроля и изоляции на тысячелетия;</li><li>опасны при транспортировке и авариях</li></ul>
Отработавшее ядерное топливо	Очень высокий уровень радиоактивности (сотни тысяч – миллионы лет полураспада)	<ul style="list-style-type: none"><li>максимальные риски для здоровья и экосистем при нарушении герметичности;</li><li>долгосрочное хранение в глубоких геологических захоронениях;</li><li>риск термохимической нестабильности</li></ul>

Наша способность управлять отходами низкой и средней активности (НАО и САО) доказана бесспорно. Первые можно уплотнить, сжечь и безопасно закопать на небольшой глубине. Вторые, более радиоактивные, сначала должны быть защищены бетонным или битумным щитом.

Напротив, обращение с высокоактивными отходами является более сложным. Их особенно длительный срок службы, а также их высокий уровень радиоактивности (в основном это касается топлива, израсходованного при делении) означают, что они должны быть не только соответствующим образом экранированы, но и что затем они должны быть помещены в стабильную среду на 1 млн лет.

Действующее предложение состоит в том, чтобы захоронить их в глубоких геологических слоях, сложность заключается в том, чтобы гарантировать, что выбранные участки будут стабильными в течение всего этого времени (с точки зрения температуры, уровня воды и т. д.). Сегодня большая часть ВАО хранится на поверхности в соответствии с многобарьерной системой.

Но если мы хотим должным образом позаботиться об этом, крайне важно разработать долгосрочные решения, такие как глубокие геологические захоронения. Швеция и Финляндия, безусловно, являются наиболее передовыми странами в этой области [2].

На сегодняшний день одним из наиболее эффективных способов утилизации ядерных отходов считается их подземное захоронение. Около дюжины стран Европы уже разработали планы по созданию глубоких геологических хранилищ для хранения отработанного топлива.

Одним из самых успешных примеров является проект Финляндии, который предполагает захоронение 2300 т высокоактивных отходов в подземных шахтах на острове Олкилуото. Этот остров, находящийся в муниципалитете Эурайоки, также является местом расположения двух из четырёх ядерных реакторов страны, которые вырабатывают значительную долю электроэнергии Финляндии.

Проект демонстрирует надёжный способ долгосрочного хранения опасных материалов, разработанный после длительных исследований и переговоров.

Однако современные технологии предлагают дополнительные решения для повышения эффективности утилизации отходов. Одним из перспективных направлений является ядерное трансмутирование, при котором радиоактивные изотопы преобразуются в менее опасные или стабильные элементы. Это осуществляется посредством бомбардировки нейтронами, что позволяет уменьшить как объем, так и радиоактивность отходов.

Другим нововведением являются усовершенствованные топливные циклы, включающие переработку отработанного топлива и использование реакторов на быстрых нейтронах. Эти технологии не только повышают эффективность использования ядерного топлива, но и уменьшают количество отходов, требующих захоронения.

Малые модульные реакторы также играют ключевую роль в решении проблем с ядерными отходами. Их компактные размеры и возможность сборки на заводах позволяют гибко применять их в различных регионах. Такие реакторы не только обеспечивают надёжное энергоснабжение, но и способствуют уменьшению количества отходов, образующихся в процессе их эксплуатации [3].

Эти инновационные технологии вместе образуют комплексный подход к сокращению объёмов ядерных отходов и повышению их безопасности, что делает проблему их утилизации более решаемой.

Ядерная энергетика остаётся важным источником чистой энергии в условиях необходимости снижения выбросов углекислого газа. Несмотря на свои преимущества, она сталкивается с вызовами в области безопасности и утилизации радиоактивных отходов, о чем свидетельствуют трагедии Чернобыля и Фукусимы.

Однако современные технологии, такие как ядерная трансмутация и малые модульные реакторы, открывают новые горизонты для безопасной утилизации отходов. Инвестиции в эти инновации позволят не только минимизировать риски, но и повысить устойчивость ядерной энергетике. Таким образом, с правильным подходом и технологиями ядерная энергетика может стать ключевым игроком в борьбе с изменением климата и обеспечении экологической безопасности для будущих поколений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Nuclear Waste Disposal Dilemma // Docslide. 2014. – URL: <https://earth.org/nuclear-waste-disposal/> (дата обращения 03.10.2024).
2. Nuclear Waste Disposal Problems And Solutions // Docslide. 2014. – URL: <http://waste-disposal.net/NuclearWaste/nuclear-waste-disposal-problems-and-solutions/> (дата обращения 03.10.2024).
3. Петров Г.А. Инновационный энергосберегающие технологии переработки радиоактивных отходов. – М.: Книжный мир, 2022. – 723 с.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ТАЛЫХ И ДОЖДЕВЫХ ВОД

**А.Р. Балыбердин**

*Казанский государственный энергетический университет, ИЭЭ ЭКиС, группа ЭМТ-1-21*

Научный руководитель: М.В. Савина, к.т.н., доцент ИТЭ ЭМС

### **Актуальность проблемы**

Дождевые и талые воды играют важную роль в водном балансе городов и природных экосистем. Однако урбанизация нарушает естественные процессы фильтрации и распределения воды, что приводит к её загрязнению. Вода, стекающая с непроницаемых поверхностей (асфальт, бетон), не успевает естественным образом фильтроваться через почву. Это приводит к тому, что в водоёмы и реки попадают загрязняющие вещества, ухудшая их экологическое состояние.

В связи с изменением климата увеличивается частота экстремальных осадков, что усугубляет проблему ливневых стоков. В будущем эта тенденция, скорее всего, сохранится, что делает совершенствование систем очистки талых и дождевых вод особенно актуальным.

### **Современные методы очистки**

Сегодня существует множество технологий для очистки дождевых и талых вод. Основные из них можно разделить на механические, физико-химические и биологические методы.

Механические методы – основаны на фильтрации и улавливании крупных примесей, таких как песок, мусор и другие твердые частицы. Это первичный этап очистки, который не позволяет удалить растворённые вещества.

Физико-химические методы включают использование сорбентов, коагулянтов и флокулянтов для удаления мелкодисперсных загрязнений и тяжелых металлов. Это более сложные технологии, направленные на глубокую очистку воды.

Биологические методы – искусственные или естественные биофильтры с участием микроорганизмов, которые перерабатывают органические загрязнители. Такой подход более экологически безопасен и устойчив в долгосрочной перспективе.

### **Тенденции и инновации**

Перспективы развития технологий очистки дождевых и талых вод связаны с несколькими ключевыми направлениями:

- *Интеграция систем очистки с природными насаждениями.* Концепция экологической инфраструктуры становится всё более популярной. Создание экокрыш, дождевых садов, биопрудов и фильтрационных канав позволяет одновременно задерживать и очищать воду. Эти решения не только улучшают качество воды, но и способствуют улучшению микроклимата в городах.

- *Нанотехнологии.* Развитие наноматериалов для очистки воды открывает новые возможности для фильтрации мелкодисперсных частиц и удаления химических соединений. Наночастицы и катализаторы могут значительно повысить эффективность очистки стоков при минимальных затратах.

- *Автоматизация и цифровизация систем.* Интеллектуальные системы мониторинга и управления позволяют в реальном времени отслеживать качество воды и управлять процессами очистки. Такие системы могут автоматически реагировать на изменения погодных условий и уровня загрязнения, регулируя работу фильтров и очистных сооружений.

- *Энергоэффективные технологии.* Уменьшение энергозатрат на процессы очистки становится одной из ключевых задач. Например, использование солнечной энергии для работы насосов и фильтров может существенно сократить эксплуатационные расходы.
- *Переработка осадков и вторичное использование ресурсов.* Важно не только очищать воду, но и эффективно утилизировать отходы очистки. Современные технологии позволяют перерабатывать осадки в биогаз или компост, снижая нагрузку на полигоны и уменьшая выбросы углекислого газа.

### Проблемы

Несмотря на активное развитие технологий, есть и ряд проблем, которые препятствуют их широкому внедрению:

- *Высокая стоимость инновационных технологий.* Многие из передовых решений требуют значительных инвестиций на этапе внедрения, что ограничивает их использование в развивающихся странах и небольших городах.
- *Нехватка нормативной базы и стандартов.* В некоторых странах отсутствуют чёткие требования к качеству очистки дождевых и талых вод, что замедляет внедрение передовых технологий.
- *Необходимость массового внедрения на муниципальном уровне.* Эффективная работа систем очистки требует комплексного подхода и интеграции на уровне городских коммунальных служб и управляющих компаний.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротков В.В., Иванов А.Н. Системы очистки ливневых сточных вод: современные технологии и методы. – Москва: Институт водных проблем РАН, 2019. – 254 с.
2. Смирнова Н.В. Экологические аспекты очистки дождевых и талых вод в условиях урбанизации // Вестник экологической безопасности. – 2021. – № 3. – С. 45–54.
3. Николаев И.В. Технологии фильтрации и сорбции при очистке ливневых стоков // Научный журнал водных технологий. – 2020. – № 7. – С. 60–69.
4. Петров Е.А., Орлов М.А. Перспективы применения наноматериалов для очистки сточных вод // Вестник нанотехнологий. – 2022. – № 10. – С. 12–20.
5. Семёнова И.Ю. Энергоэффективные решения в системах очистки сточных вод // Устойчивое развитие городов. – 2021. – № 4. – С. 77–85.
6. Белов А.С. Зеленая инфраструктура и её роль в управлении водными ресурсами. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2020. – 312 с.
7. Федеральное агентство водных ресурсов. Методические рекомендации по проектированию систем очистки дождевых и талых вод. – Москва: Росводресурсы, 2021. – 98 с.
8. Беляев М.В., Козлов П.С. Биологические методы очистки ливневых стоков в условиях урбанизации // Экология и промышленность России. – 2019. – № 5. – С. 21–28.
9. Грушин Д.А., Козлова И.Р. Автоматизация процессов очистки сточных вод: новые технологии // Водные ресурсы и инженерные системы. – 2020. – №8. – С. 34–43.
10. Артемьева Л.П. Нормативная база и проблемы внедрения систем очистки дождевых вод в России // Журнал экологического законодательства. – 2021. – № 2. – С. 59–66.

## ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЕОТХОДОВ ПИРОЛИЗОМ ДЛЯ ЭНЕРГОГЕНЕРАЦИИ

С.В. Турчин<sup>1</sup>, А.К. Берикболов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Завод аэроэнергопром», г. Минск, представитель компании в РФ

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, ИШЭ, аспирант

Научный руководитель: А.С. Заворин, д.т.н., профессор,  
профессор-консультант НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Добыча углеводородного сырья всегда сопряжена с образованием различного рода отходов. Это отходы III–IV класса опасности, которые образуются в процессе производства, непригодные для повторного использования и подлежащие рециклингу. Нефтегазовая отрасль является одним из лидеров в образовании, хранении и захоронении отходов. За период с 2010 по 2017 гг. их количество увеличилось с 3334,6 млн т (89,2 %) до 5786,2 млн т (93 %), объемы хранения и захоронения составили 95 и 94 % соответственно [1]. Только в Ханты-Мансийском автономном округе нефтепромыслами накоплены десятки тысяч тонн нефтешламов, загрязнены более 3 тысяч га территорий и до настоящего времени не очищены [2]. Нефтешламы миллиардами тонн проникают в биосферу, нанося вред окружающей среде [3, 4]. Их образование приводит к нарушению естественных природных процессов круговорота воды в природе, фауна и флора приходят в упадок, происходит отчуждение загрязненных территорий [5, 6]. Несмотря на существенные затраты, прогрессивную законодательную политику, направленную на охрану природной среды от техногенных выбросов, сократить динамику накопления нефтеотходов не удастся. В среднем годовой ущерб, наносимый окружающей среде от загрязнений в различных регионах РФ, оценивается специалистами в 200–550 млн рублей [7, 8]. Западный опыт констатирует, что своевременно инвестированные средства в технологии, направленные на сохранение окружающей среды, оказываются менее затратными по сравнению со средствами, затрачиваемыми на ликвидацию экологического ущерба. По некоторым оценкам, капитальные затраты технологий обезвреживания и переработки в 1,3 раза ниже затрат ликвидации загрязнений [9]. Средний состав отходов нефтепромыслов в зависимости от источников их образования представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав нефтеотходов [13, 14, 15]

Нефтешламы	Состав, %					
	Механические примеси	Нефть, нефтепродукты	Асфальтены	Смолы	Парафины	Вода
Амбарный верхний слой	0,5–1,5	90–95	9,5	–	3	1,5–5
Буровые шламы	11–25	7–14	–	–	–	75–90
Ловущечная нефть	0,05–0,5	70–90	4–15	10–45	2–10	до 15
Водонефтяная эмульсия	1,5–15	30–80	5–10	10–20	3–10	до 70
Продукты зачистки резервуаров	5–10	50–70	42	20	5,6	25–40
Донный шлам	15–50	10–30	6,5	18	2,5	до 60
Замазученный грунт	50–90	До 10	–	–	–	до 20

К оптимальным технологиям переработки и обезвреживания нефтеотходов относят термические, такие как: пиролиз, газификация, гетерогенный катализ, плазменная и огневая утилизация [10, 11]. Среди них интерес представляют технологии, позволяющие не только снижать экологическую нагрузку, но и эффективно использовать отходы в качестве сырья для получения энергоносителей [12]. Таким образом, в сложных климатических и логистиче-

ских условиях нефтепромыслов наиболее привлекательной становится переработка углеводородсодержащих отходов пиролизом с возможностью получения топлив для энергогенерации.

Пиролиз – это технология термической деструкции высоко и низкомолекулярных углеводородных соединений (отходов) в отсутствие кислорода воздуха. В рассматриваемом контексте, задачей является получение синтетического сырья и производства бензин-дизельного топлива для энергогенерации. Углеродистый остаток, в данном случае, рассматривается как побочный продукт, подлежащий утилизации. Балансовый выход и фракционный состав продуктов при этом зависит от физико-химических свойств, морфологического состава отходов и технологического режима их переработки.

Так, например, компанией ООО «Завод аэроэнергопром», г. Минск, налажен выпуск мобильных комплексов переработки отходов «Пульсар» (рис. 1). Принцип действия основан на термической деструкции отходов при температурах до 650 °С. Температурный режим переработки обеспечивается за счет электронагревательных элементов до температуры пиролиза отходов в реакторе. Образованная парогазовая смесь транспортируется в конденсационный блок, где происходит фазовое разделение на пиролизную жидкость и газ с одновременной полной очисткой неконденсируемых пиролизных газов. Стопроцентно очищенный пиролизный газ используется для выработки электроэнергии на газопоршневой электростанции (ГПЭС). Жидкий продукт пиролиза, в зависимости от качества осветленного продукта, может использоваться в адаптированных дизель-генераторных установках или в получении ректификата с помощью комплекса дистилляции и ректификации. По данным завода, из синтетического сырья в среднем получается до 80 % светлых нефтепродуктов с температурой кипения до +350 °С (бензин-дизельная фракция) и до 20 % темных нефтепродуктов, с температурой кипения выше +350 °С (мазут). Таким образом, в сочетании с установкой энергогенерации, переработка отходов может осуществляться в автономном режиме при производительности комплекса от 0,125 до 1,25 т/ч по исходному сырью. При оснащении пиролизного комплекса блоком высокотемпературного крекинга возможно получение только синтез-газа с содержанием водорода (H<sub>2</sub>) до 50–56 %, монооксида углерода (CO) до 28–32 % и других попутных газов. При этом утилизация углеродистого остатка может осуществляться в компактном модуле фильтрационного горения (беспламенный режим, температура окисления 900–1200 °С) до состояния золы с получением полезной теплоты (рис. 2).

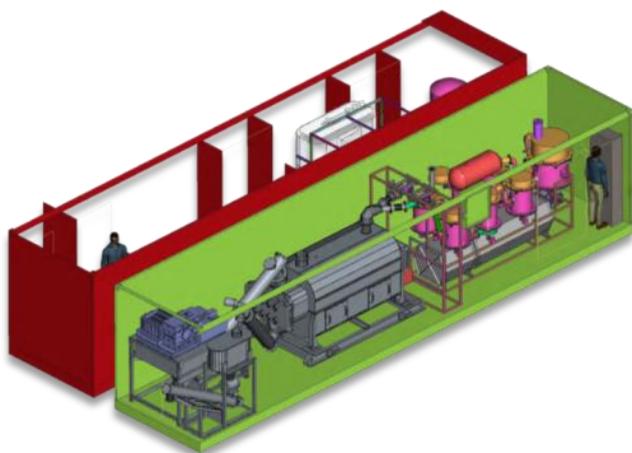


Рис. 1. Комплекс переработки отходов пиролизом «Пульсар» [16] контейнерное исполнение

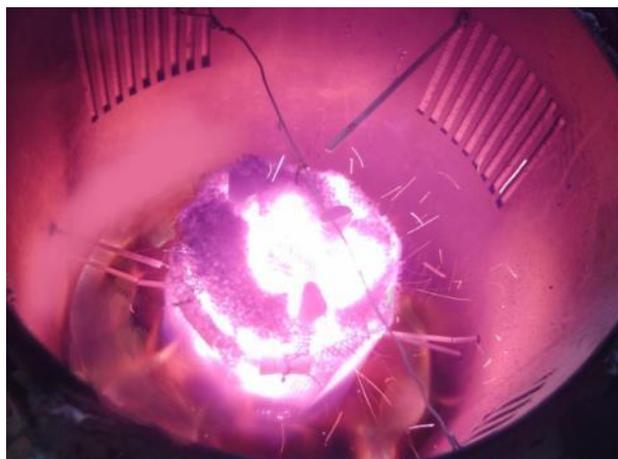


Рис. 2. Фото рабочего участка экспериментального стенда теплогенератора [17] с модулем фильтрационного горения

Исследования пиролиза нефтешлама и закономерности влияния содержания органической фракций на выход массовых долей пиролизной жидкости, газа и углеродистого остатка (рис. 3), дают возможность укрупненно оценить рентабельность применения технологии. Анализируя данные, можно рассчитать количество светлых и темных продуктов, потенциальных к получению путем переработки нефтешлама (рис. 4).

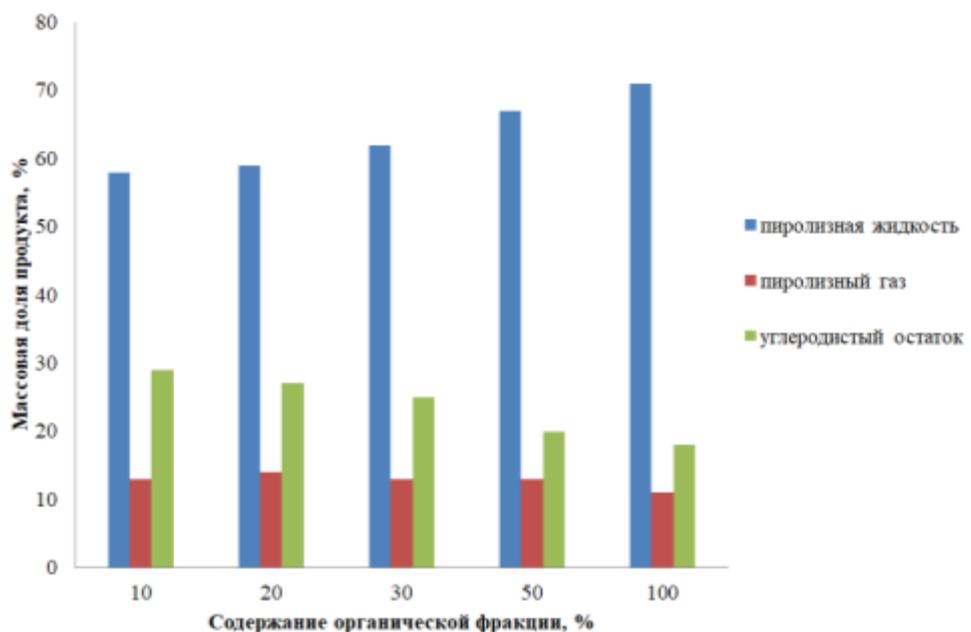


Рис. 3. Массовая доля продуктов пиролиза в зависимости от содержания органической (углеводородсодержащей) фракции в нефтеотходах [18]

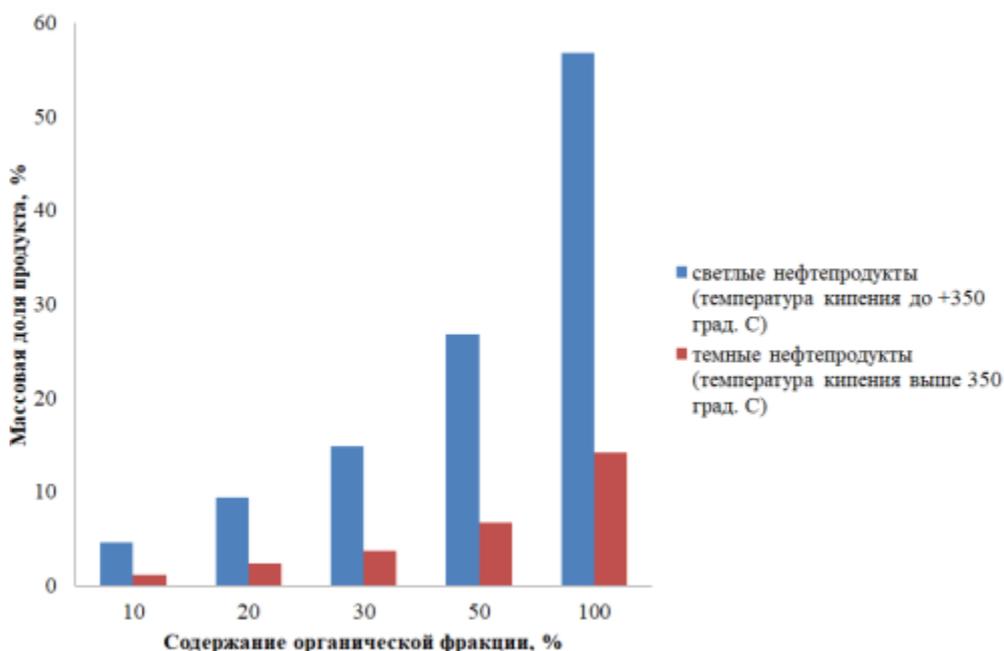


Рис. 4. Массовая доля продукта дистилляции, ректификации в зависимости от содержания органической (углеводородсодержащей) фракции в нефтеотходах [18]

Например, для обеспечения топливом энергоустановки ДГУ АД-1000-Т400-2РБК, 0,4 кВ номинальной производительностью 1000 кВт мобильным комплексом переработки отходов достаточно перерабатывать отход с массовой долей содержания органической (углеводород-

содержащей) фракции 30 % при количестве перерабатываемого отхода 1,25 т/ч. При этом диапазон энергопотребления комплекса «Пульсар» составит 250–450 кВт·ч [16].

Углубленный анализ данных [16, 18] показал, что массовая доля содержания в отходах органической фракции 20 % является достаточной для производства жидкого топлива в количестве, необходимом для нужд собственной энергогенерации, т. е. удовлетворения комплекса «Пульсар» в электрической энергии. Использование отходов с содержанием органической фракции менее 20 % является не достаточным в производстве топлива, энергогенерации для нужд комплекса переработки.

Существует множество конструктивных решений установок пиролиза с различной эффективностью своей работы. Учитывая это, для конструирования оптимального технологического комплекса и режима переработки необходимым становятся лабораторные исследования сырья, а именно: морфологический состав отходов, качественно – количественная оценка выхода продуктов пиролиза, отработка технологических режимов выхода ценных нефтепродуктов, эффективная утилизация неликвидных продуктов пиролиза: газ, углеводородная жидкость, твердый углеродистый остаток. Поэтому решение каждой конкретной задачи требует индивидуального подхода в разработке технологической цепочки и конструктивных решений технологических блоков комплекса переработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редина М.М., Хаустов А.П., Вторичные ресурсы, образующиеся в нефтедобывающей промышленности // Энциклопедия технологий. – 2020. – С. 706–741.
2. Абдрахманов Р.Ф. Гидрогеоэкология Башкортостана. – Уфа: Информреклама, 2005. – 344 с.
3. Cherubini F., Bargigli S., Ulgiati S. Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration // Energy. – 2009. – Vol. 34. – Iss. 12. – P. 2116–2123.
4. Дьяков М.С., Солдатенко Н.А., Глушанкова И.С. Обоснование выбора ресурсосберегающих технологий утилизации отработанных масел // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 16–19.
5. Наркевич И.П., Печковский В.В. Утилизация и ликвидация отходов технологии органических веществ. – М.: Химия, 1984. – 239 с.
6. Дадашев М.Н., Кобелев К.В., Раджабов З.М., Филенко Д.Г., Капустин М.А., Винокуров В.А. Экологические и экономические аспекты безопасной утилизации отходов перерабатывающих предприятий // Экология промышленного производства. – 2011. – № 1. – С. 49–54.
7. Венцулис Л.С., Воронов Н.В., Быстрова Н.Ю. Эколого-экономические ущербы от складированных на полигонах твердых бытовых отходов, образованных в Санкт-Петербурге за последние 40 лет // Вестник МАНЭБ. – 2015. – № 1. – С. 84–90.
8. Юзбеков М.А., Юзбеков А.К. Совершенствование экологической политики в регионе на основе оценки воздействий промышленного производства на качество жизни населения // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11. – С. 877–882.
9. Абдрахимов Ю.Р., Закирова З.А., Гайнуллина Л.А. Способы обеспечения экологической безопасности в нефтегазовой отрасли // Уральский экологический вестник. – 2014. – 2. – С. 91–97.
11. Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления: справочное издание. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 496 с.
12. Жаров О.А., Лавров В.Л. Современные методы переработки нефтешламов // Экология производства. – 2004. – № 5. – С. 43–51.
13. Лотош В.Е. Переработка отходов природопользования. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. – 2002. – 463 с.
14. Бобович Б.Б. Переработка промышленных отходов. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1999. – 445 с.
15. Шпербер Д.Р. Разработка ресурсосберегающих технологий переработки нефтешламов: дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08. – Краснодар, 2014. – 154 с.
16. Эйвазова А.Г. Нефтяной шлам и возможные области его применения // XVIII Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». – 2012.
17. ООО «Завод Аэроэнергопром» [сайт]: <https://www.aerom.com>
18. Теплогенератор: пат. Рос. Федерация, № 2747900, заявл. 02.10.2020; опубл. 17.05.2021, Бюл. № 14. – 16 с.
19. Чалов К.В. Каталитический пиролиз нефтешламов: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Москва, 2013. – 18 с.

# Секция 5

## Электротехнические комплексы и системы

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Б.С. Доржиева, А.Б. Раднаев

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А1-28*

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Развитие электроэнергетики неразрывно с увеличением единичной мощности энергоблоков. С ростом мощности электрических машин увеличиваются и электромагнитные и тепловые нагрузки. Для анализа работы генераторов во всех режимах применяются различные модели. Моделирование реализуется в различных программных средах, в данной работе приведены результаты моделирования в пакете Ansys. Для автоматизации процесса создания модели в Ansys Electronics Desktop был разработан код (скрипт) на языке программирования Python.

Язык программирования Python характеризуется эффективностью, простым синтаксисом, и универсальностью, что позволяет использовать его в инженерных задачах и научных исследованиях.

Объектом исследования являлся двухполюсный синхронный генератор с частотой вращения ротора 3000 об/мин, трехфазной двухслойной обмоткой, с газовым охлаждением обмоток, сердечника статора и ротора.

Фрагмент кода для задания переменных и исходных данных:

```
oDesign.SetVariable («Da» )
```

```
Da = 2480
```

```
oDesign.SetVariable («D1» )
```

```
D1 = 1170
```

```
oDesign.SetVariable («L1» )
```

```
L1 = 3700
```

Фрагмент кода для создания геометрии:

```
oEditor.CreateCircle(
```

```
[
```

```
«NAME:CircleParameters» ,
```

```
«XCenter:=«, «0mm» ,
```

```
«YCenter:=«, «0mm» ,
```

```
«ZCenter:=«, «0mm» ,
```

```
«Radius:=«, «Da/2» ,
```

```
«WhichAxis:=«, «Z» ,  
«Height:=«, «L1» ,  
«NumSegments:=«, «0»  
],  
[«NAME:Attributes» ,  
«Name:=«, «Stator_yoke» ,  
«Color:=«, «(0 0 255)» ,  
«MaterialValue:=«, «\» Stator Steel\» «,  
«SolveInside:=«, True
```

Аналогичным образом задаются ток в обмотках, настройки решателя.

Код запускается ANSYS Electronics Desktop, после выполнения кода создается проект в формате .aedt. В модели автоматически задаются токи в обмотках статора и ротора, частота вращения ротора, параметры варианта расчета (Analysis – Setup). Далее необходимо решить модель с заданными параметрами (Setup – Analyze).

Результаты могут быть представлены в табличном и графическом виде, представлены в виде распределения полей заданных величин.

Для расчета различных режимов работы генератора необходимо редактировать параметры в разделе Excitation, автоматически приведены параметры номинального режима.

Пример построенной модели (вертикальный разрез, по середине длины модели) приведен на рис. 1.

Благодаря полученному коду возможно гибкое изменение параметров модели без необходимости редактировать каждый элемент, проведение параметрических исследований путем изменения значений переменных и быстрый запуск разных конфигураций модели, автоматизация расчета и анализа различных параметров.

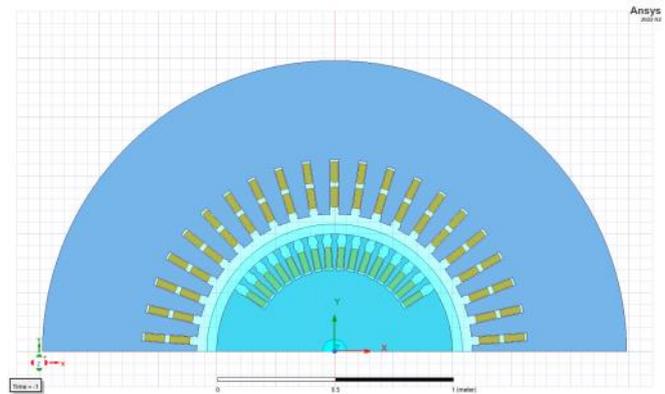


Рис. 1. Пример построения модели по скрипту Python

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жорняк А.Г., Морозова Т.А. Специализированный дистрибутив Python(x,y) языка программирования Python для научных и инженерных вычислений // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – № 7. – С. 39–42.
2. Maxwell Scripting Guide 2022. Ansys Electromagnetics Suite 2022R2 // ANSYS. 2022. – URL: <https://www.ansys.com> (дата обращения 11.11.2024).

## БЕСКОЛЛЕКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПРЯМЫМ УПРАВЛЕНИЕМ МОМЕНТА БЕЗ КОНТРОЛЯ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ

**Д.И. Ульянов**

*Томский политехнический университет, аспирант, diu3@tpu.ru*

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Бесколлекторный двигатель постоянного тока (БДПТ) является аналогом двигателя постоянного тока (ДПТ). В ДПТ электромагнитный момент возникает при протекании тока по секциям обмотки якоря, находящихся в неподвижном магнитном поле обмотки возбуждения (постоянных магнитов), следовательно, при постоянстве тока электромагнитный момент будет неизменным. Неконтролируемые пульсации электромагнитного момента в ДПТ возникают во время коммутации секций обмотки с помощью коллектора и щёток.

В БДПТ механический коллектор со щётками заменяется электронным блоком управления (ЭБУ). Фактически, БДПТ представляет собой обращённый ДПТ с тремя коллекторными пластинами, секциями обмотки якоря в данном случае становятся фазы обмотки статора.

Для устранения пульсаций электромагнитного момента и в целом для более точного управления моментом электродвигателя (ЭД) необходимо контролировать потокосцепление и величину тока, протекающего в обмотке статора.

Задача прямого управления моментом БДПТ решается тремя способами: с помощью прямого контроля потокосцепления, с помощью косвенного контроля потокосцепления и без контроля потокосцепления [1–3].

При отсутствии контроля потокосцепления ЭД со стороны ЭБУ для устранения пульсаций электромагнитного момента между коммутациями секций требуется спроектировать магнитную систему электродвигателя таким образом, чтобы ток, протекающий в обмотке между коммутациями, находился под воздействием неизменяющегося магнитного поля.

Однако, пульсации электромагнитного момента в БДПТ возникают не только за счёт изменения магнитного потока, воздействующего на витки обмотки, но и за счёт пульсаций тока. Особенно сильно пульсации тока проявляются во время коммутаций фаз [4].

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что прямое управление моментом БДПТ без контроля потокосцепления возможно при постоянстве магнитного потока, пронизывающего витки обмотки статора, по которым протекает ток, и при отсутствии неконтролируемых пульсаций тока как в межкоммутационный период, так и во время коммутации фаз.

В данной статье рассмотрен бесколлекторный электропривод постоянного тока с прямым управлением момента без контроля потокосцепления с датчиками положения ротора Холла и вариантом магнитной системы ЭД, в котором скорость изменения потокосцепления  $d\psi/dt$  остаётся неизменной на протяжении 120 градусов электрического вращения ротора (в установившемся режиме). Такая магнитная система ЭД не требует контроля потокосцепления для прямого управления моментом.

На рис. 1 показана структурная схема электропривода на основе БДПТ с прямым управлением момента без контроля потокосцепления.

Электродвигатель приводится в действие трёхфазным инвертором напряжения с питанием от источника постоянного тока 48 В. Частота переключения инвертора является плавающей и зависит от нескольких параметров: величины токовой нагрузки, индуктивности обмотки статора, величины фазных ЭДС. Верхняя граница частоты переключения при данной логике управления устанавливается скоростью аналогово-цифрового преобразования контроллером. В рассматриваемом случае предельная частота равна 50 кГц.

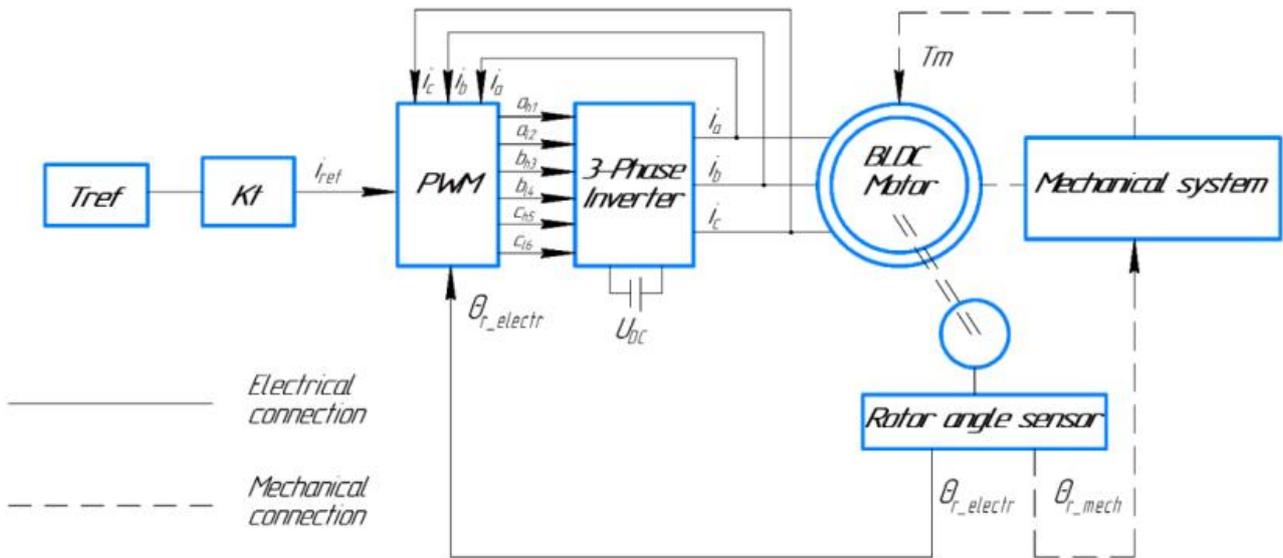


Рис. 1. Структурная схема электропривода на основе БДПТ с прямым управлением момента без контроля потокосцепления

На рис. 2 представлен график отработки электроприводом заданного момента. Электромагнитный момент ЭД полностью повторяет форму заданного момента без задержек и ярко выраженных пульсаций, что говорит о высоких динамических показателях данного электропривода.

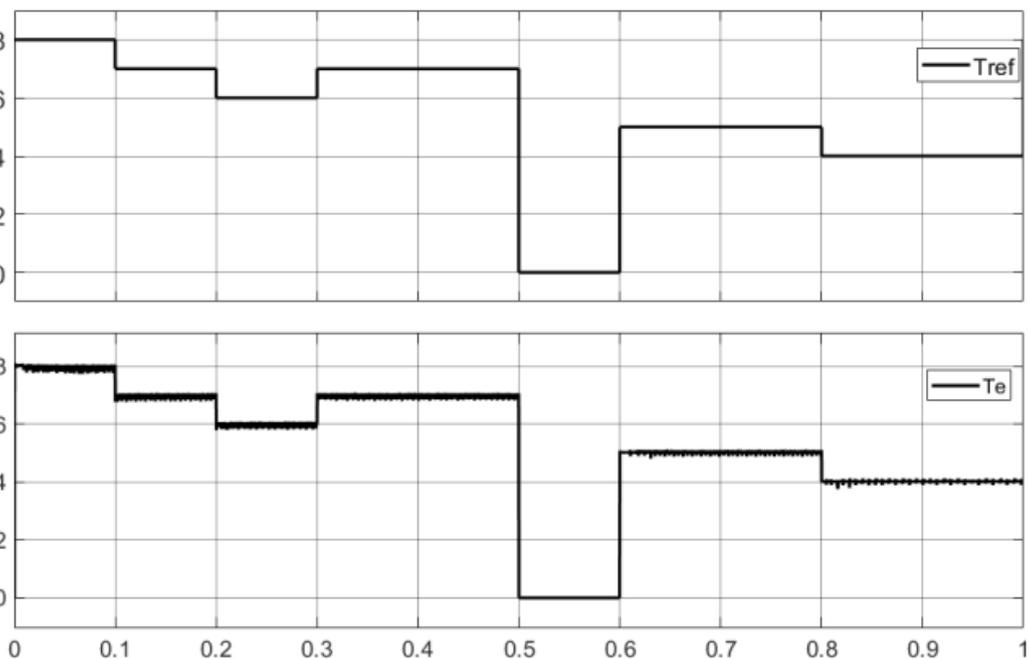


Рис. 2. Зависимость выходного момента от момента задания

На рис. 3 представлен фазный ток ЭД. Фактически прямое управление моментом БДПТ подразумевает прямое управление током ЭД. Сигнал задания на момент после усиления через коэффициент момента переходит в сигнал задания на ток. На рисунке можно заметить, что ток имеет трапецеидальную форму, и полностью повторяет форму сигнала задания на момент.

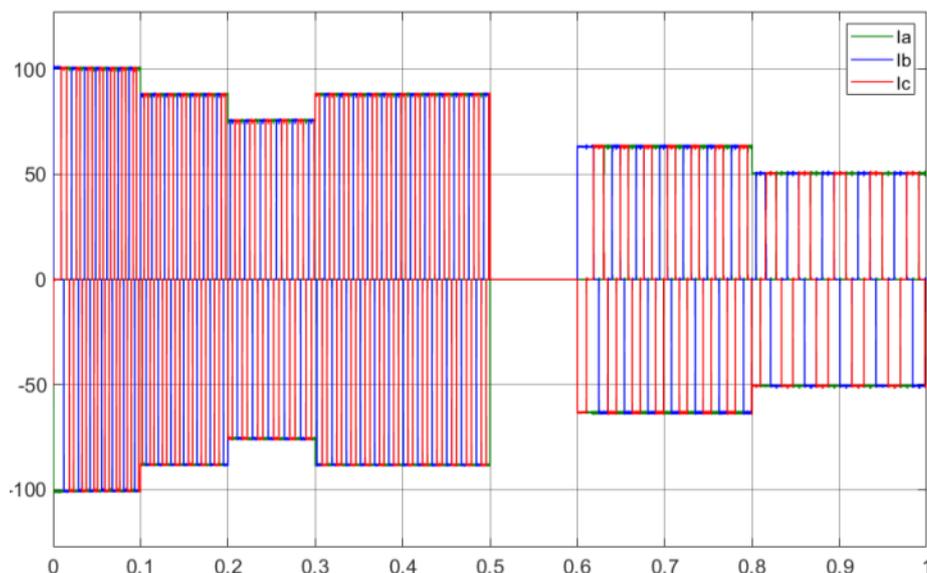


Рис. 3. Фазный ток ЭД

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что полученная авторами имитационная модель электропривода на основе БДПТ с прямым управлением момента без контроля потокосцепления адекватно отображает соответствующие динамические электро-механические процессы. Данная модель благодаря простоте своей реализации может быть легко интегрирована в различные системы и механизмы. Главными преимуществами такой системы управления являются:

- быстрый отклик системы на задающий сигнал, благодаря отсутствию каких-либо математических операций в системе управления ЭД. Алгоритм построен чисто на логических операциях;
- практически полное отсутствие пульсаций электромагнитного момента в рабочем диапазоне скоростей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Development of a model of high-quality brushless DC electric drive systems/ T.Kh. Abuzyarov, A.S. Plekhov, A.B. Daryenkov, A.I. Ermolayev // Vestnik of Ivanovo State Energy University. – 2020. – № 1. – С. 31–45. – DOI 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045. – EDN BUARIL.
2. Zhang Q., Deng J., Fu N. Minimum Copper Loss Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drive in Electric and Hybrid Electric Vehicles // IEEE Access. – 2019. – V. 7, P. 113264–113271, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2927416. keywords: {Couplings;Stators;Torque;Torque measurement;Copper;Torque control;Voltage control;Brushless dc motor (BLDCM);direct torque control (DTC);maximum torque per ampere (MTPA);minimum copper loss;stator flux linkage control},
3. Liu Y., Zhu Z.Q., Howe D. Direct Torque Control of Brushless DC Drives With Reduced Torque Ripple. Industry Applications // IEEE Transactions on. – 2005. – V. 41. – P. 599–608. 10.1109/TIA.2005.844853.
4. Пульсации электромагнитного момента бесконтактного двигателя постоянного тока / А.В. Сапсалева, Н.П. Савин, С.А. Харитонов, О.Е. Овчинникова // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2018. – № 1. – С. 369–373. – EDN PNUBCX.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

А.Б. Раднаев, Б.С. Доржиева

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А1-28

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Асинхронные электродвигатели являются одними из самых распространенных типов электрических машин благодаря своей надежности, простоте конструкции и экономичности. Хотя большинство исследований сосредоточено на статорных обмотках, до 15 % отказов связано с роторными обмотками, что обусловлено термомеханическими напряжениями и недостаточным охлаждением [1]. Учитывая возрастающие удельные нагрузки, исследование теплового состояния роторных обмоток является актуальной задачей. В статье представлены результаты исследования с помощью аналитических и численных методов нестационарных режимов работы асинхронных двигателей, таких как пуск и торможение, а также методы оптимизации конструкции для снижения тепловых и механических нагрузок.

В переходных режимах, таких как пуск, торможение и перегрузки по моменту, увеличение скольжения приводит к усилению поверхностного эффекта, когда токи концентрируются на поверхности стержня, вызывая повышенный нагрев ротора и возникновения значительных термонапряжений. В совокупности с такими факторами как различные условия охлаждения, неравномерная пайка, несовершенство материала и других технологических факторов эти напряжения могут достигать пределов прочности материала, что приводит к деформации обмотки как например на рис. 1.

Наиболее тяжелыми режимами для ротора, с точки зрения термомеханических напряжений и нагрева, являются режим прямого пуска, частые пуски-остановки, работа на высоком скольжении (перегрузка) и условия недостаточного охлаждения. При прямом пуске асинхронный двигатель потребляет большой пусковой ток, который может достигать 5–7 номинальных значений, в то время как потери в клетке зависят от квадрата тока. Это приводит к значительному нагреву ротора за короткий промежуток времени. В режиме прямого пуска нагрев стержня сосредоточен в его наружных слоях, так как частота тока в клетке значительно выше, чем в номинальных режимах, это может привести к значительному локальному перегреву и механическим перенапряжениям.

Подъем температуры  $T$ , в течение заданного промежутка времени, можно рассчитать с использованием уравнения теплового баланса:

$$\frac{dQ}{dt} = mc \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где  $Q$  – мощность потерь в стержнях;  $m$  – масса обмотки;  $c$  – удельная теплоёмкость материала клетки;  $t$  – длительность процесса.

По известному по расчёту пусковой характеристики току  $I(t)$ , тепловая мощность  $Q(t)$  на каждом моменте времени может быть найдена как:

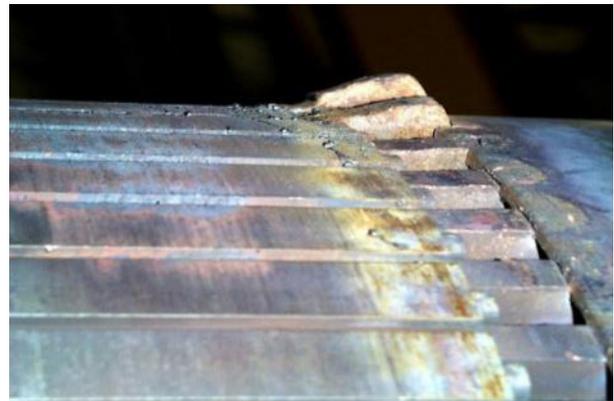


Рис. 1. Пример повреждения обмотки ротора асинхронного двигателя

$$Q(t) = R_{2эф}(t) \cdot I^2(t) + Q_{доб}(t), \quad (2)$$

где  $R_{2эф}$  – эффективная составляющая сопротивления от полного активного сопротивления ротора  $R_2$ , с учетом поверхностного эффекта;  $Q_{доб}$  – другие виды потерь, такие как добавочные потери от вихревых токов и потерь на гистерезис, которые также проявляются с ростом частоты и дополнительно подогревают обмотку [2].

Добавочные потери от вихревых токов и потерь на гистерезис можно определить как [2]:

$$Q_{доб}(t) = Q_{ec}(t) + Q_h(t); \quad (3)$$

$$Q_{ec}(t) = k_{ec} \cdot f^2 \cdot B_{max}^2; \quad (4)$$

$$Q_h(t) = \eta B_{max}^{1.6} \cdot f_2(t), \quad (5)$$

где  $B_{max}$  – максимальная магнитная индукция;  $d$  – толщина листа магнитопровода;  $\rho_{st}$  – удельное сопротивление стали ротора;  $\eta$  – коэффициент потерь на гистерезис, зависящий от свойств материала (1,6–2);  $k_{вс}$  – коэффициент, зависящий от свойств материала.

Температуру элементов ротора на каждом этапе пуска необходимо рассчитывать в несколько итераций, из-за температурного влияния на сопротивления и теплопроводности.

В табл. 1 приведены результаты расчёта при прямом пуске двигателя мощностью 3150 кВт и синхронной частотой 750 об/мин при напряжении 3,3 кВ.

Таблица 1. Результаты расчета времени пуска асинхронного двигателя

	Способ определения	
	Аналитический расчёт	Моделирование
Время, с	51,1	54,3

Время прямого пуска такого электродвигателя, работающего на вентиляторную нагрузку, составляет порядка 52 с.

На рис. 2 приведены результаты расчёта подъема температуры в обмотке ротора этого двигателя при адиабатном процессе.

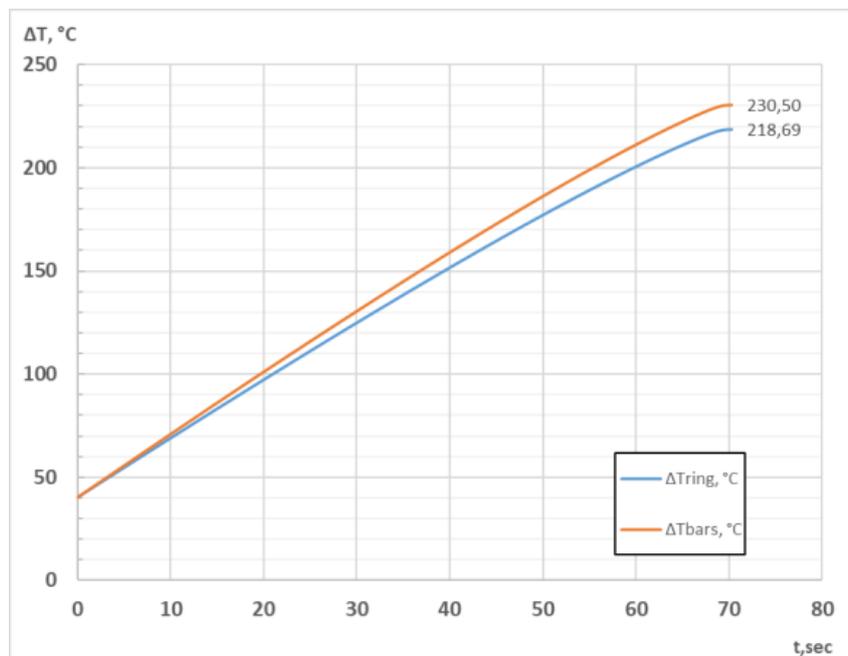


Рис. 2. Подъем температуры в клетке ротора за время пуска

На рис. 3 показано распределение потерь в стержнях ротора в начале и в конце пускового режима, где наглядно видно, что основная часть потерь локализуется в верхней части обмотки.

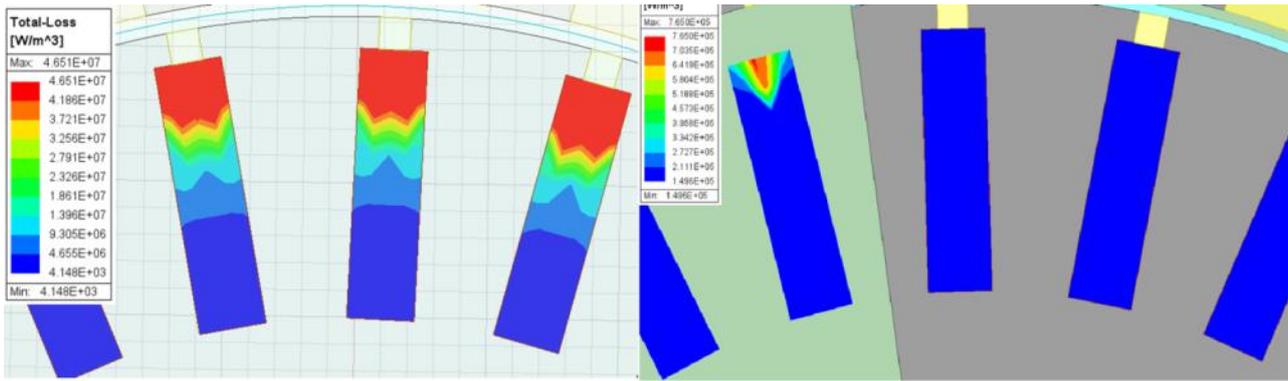


Рис. 3. Подъем температуры в клетке ротора за время пуска

### Методы оптимизации конструкции

Наиболее простым способом снижения нагрева роторной обмотки является увеличение площади поперечного сечения стержней, это позволяет значительно снизить нагрев обмотки за счет снижения плотности тока, уменьшения электрических потерь, увеличения массы и поверхности теплоотдачи. Однако данный способ хоть и является наиболее действенным, в то же время это ведет к увеличению габаритов машины и увеличению ее себестоимости.

Помимо снижения потерь другим способом снижения нагрева является сокращение времени пуска путем улучшения пусковых характеристик (увеличение пусковых моментов и снижение пускового тока). Улучшения пусковых характеристик без значительного увеличения расхода проводниковых материалов и применения фигурных пазов можно добиться подбором открытия паза ротора (ширина и высота шлица). Кроме улучшения пусковых характеристик и соответственно снижения времени пуска, правильно подобранные высота и ширина шлица позволяют значительно снизить добавочные потери в клетке ротора вызывающие дополнительный подогрев [3, 4], а также увеличить механическую жесткость самого шлица для предотвращения отгиба стержня от термонапряжений.

Также для улучшения пусковых характеристик в ответственных энергосистемах рекомендуется использование бокового ферромагнитного клина. В табл. 2 приведены результаты численного моделирования асинхронного двигателя с применением бокового клина.

Таблица 2. Влияние расположения бокового клина на пусковые характеристики двигателя

Эскиз	Высота расположения клина, мм	Кратность пускового тока, о.е.	Кратность пускового момента, о.е	Время пуска, с	Без клина		
					Кратность пускового тока, о.е.	Кратность пускового момента, о.е	Время пуска, с
	10	6,8	2,05	52,6	6,6	2,1	51,1
	15	6,6	2,26	49,6			
	20	6,5	2,4	48,6			
	25	6,3	2,6	43,2			
	35	6,4	2,5	43,5			

Из полученных результатов можно сделать вывод, что расположение бокового клина как можно ближе к поверхности бочки ротора позволяет улучшить пусковые характеристики асинхронного двигателя при сохранении высоких энергетических показателей. Оптимальным с точки зрения улучшения пусковых характеристик является расположение бокового клина в третьей четверти по высоте паза ротора. Такое расположение обеспечивает высокие энергетические показатели машины, наряду с сохранением простоты и надежности крепления стержня в пазу ротора [5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors, Georgia Institute of Technology, USA / P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler and B. Lu// IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – V. 47. – P. 34–46.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. – СПб.: Изд-во Питер, 2008. – 350 с.
3. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах. – М.: Энергия. 1964. – 263 с.
4. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия. 1981. – 352 с.
5. Корнеев К.В. Переходные процессы в специальных асинхронных двигателях: автореф. дис. ... к.т.н. – Новосибирск, 2011. – 19 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ТАДЖИКИСТАНА

О.А. Пичугова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
УралЭНИН, кафедра АЭС, группа ЭМ-230101

Научный руководитель: А.О. Егоров, к.т.н., доцент АЭС, УралЭНИН, УрФУ

По данным [1, 2] по состоянию на 01.01.2022 установленная мощность электростанций энергосистемы Таджикистана составляла 6626 МВт, а выработка электроэнергии – 20,624 млрд кВт·ч по итогам 2021 года. При этом установленная мощность гидроэлектростанций Таджикистана составила 5908 МВт (89 %), а выработка электроэнергии – 18,967 млрд кВт·ч (92 %). По официальным данным Правительства Таджикистана, гидроэнергетический потенциал страны оценивается более чем 100 ГВт с выработкой 527 млрд кВт·ч электроэнергии в год [3–5].

Ранее при проведении изысканий по энергосистеме Таджикистана [6] было установлено, что в составе энергосистемы функционируют крупные ГЭС с установленной мощностью в диапазоне от 8,7 до 3000 МВт. В стране ведутся масштабные стройки объектов гидроэнергетики, поэтому за период с 2020 до текущего 2024 г. такие данные изменились. Актуальная по состоянию на 01.01.2024 структура состава ГЭС приведена в табл. 1.

Таблица 1. Структура состава ГЭС Таджикистана по состоянию на 01.01.2022

№	ГЭС	Диапазон	$N_{ГЭС}$ , единиц	$P_{уст}$ , МВт	$W_{ген}$ , млн кВт·ч	КИУМ**
	По итогам 2021 г.			5 908,0	18 967,0	36,65 %
	На 01.01.2024*		13	5 721,6	22 730,0	45,35 %
1	Крупные ГЭС	$\geq 250$ МВт	4	5 030,0	19 200,0	43,57 %
2	Средние ГЭС	25,00–249,99 МВт	5	643,9	3 220,0	57,08 %
3	Малые ГЭС	5,00–24,99 МВт	4	47,7	310,0	74,19 %

\*Без учёта ГЭС установленной мощностью до 5 МВт, \*\*Средневзвешенная оценка

Всего по состоянию на 01.01.2024 в Таджикистане функционируют 13 ГЭС установленной мощностью от 5 МВт и выше, их суммарная мощность составляет 5721,6 МВт, а годовой объёмом выработки электроэнергии 22,7 млрд кВт·ч.

Одним из явных приоритетов научных изысканий и разработок в области электроэнергетики и гидроэнергетики, является поиск технологий, методов и ноу-хау, позволяющих повысить технологическую эффективность функционирования генерирующего оборудования. Так, для гидроэнергетики этот вопрос часто связан с увеличением объёма выработки электроэнергии при сохранении объёма расхода воды. В этом смысле энергосистема Таджикистана является уникальной и имеет ряд особенностей, среди которых можно выделить:

1. В энергосистеме функционируют всего 13 ГЭС, которые при ежегодной выработке электроэнергии ~20 млрд кВт·ч и потреблении электроэнергии в стране ~14 млрд кВт·ч, полностью обеспечивают потребности страны;
2. Энергосистема является компактной, сосредоточена на небольшой территории;
3. ГЭС функционируют в горах Средней Азии на значительной высоте над уровнем моря;
4. На площадках ГЭС присутствует и функционирует старое и новейшее силовое оборудование от разных мировых производителей.
5. Отмечается достаточно высокая научная активность энергетиков Таджикистана в области гидро- и электроэнергетики. Данные о функционировании ГЭС Таджикистана и технологические документы присутствуют в открытом доступе в достаточном количестве.

Приоритетной целью проводимых изысканий является поиск «условно эффективного [эталонного] гидроагрегата» с самыми высокими удельными объёмами выработки электроэнергии. Для обеспечения этой возможности на примере ГЭС энергосистемы Таджикистана имеется возможность создания и апробации методов сравнения генерирующего оборудования по различным технологическим характеристикам. Для этого в табл. 2 обозначены основные параметры функционирования ГЭС Таджикистана по [1, 6–10], а также численность и состав гидроагрегатов с указанием типа и единичной мощности.

Таблица 2. Основные параметры функционирования ГЭС Таджикистана на 01.01.2022

№	ГЭС		Ввод в работу	$P_{уст}$ , МВт	$N_{ГЛ}$ , шт	Тип турбин	Гидроагрегаты	$W_{ген}$ , млн кВт·ч
	<b>Всего ГЭС</b>	<b>13</b>		<b>5 721,6</b>	<b>51</b>		<b>400 / 1,7</b>	<b>22 730,0</b>
	Крупные ГЭС:	<b>4</b>		<b>5030,0</b>	<b>19</b>		400 / 150	<b>19 200,0</b>
1	Нурекская		1972	3000,0	9	РО	8×335+1×320	11 200,0
2	Рогунская		2018	760,0	2	РО	1×360+1×400	**2 800,0
3	Сангтудинская-1		2008	670,0	4	РО	4×167,5	2 700,0
4	Байпазинская		1985	600,0	4	РО	4×150	2 500,0
	Средние ГЭС:	<b>5</b>		<b>643,9</b>	<b>21</b>		110 / 7	<b>3 220,0</b>
5	Сарбанд (Головная)		1962	240,0	6	ПЛ	3×45+3×35	1 150,0
6	Сангтудинская-2		2011	220,0	2	ПЛ	2×110	930,0
7	Кайраккумская		1956	126,0	6	ПЛ	6×21	690,0
8	Шаршара (Перепадная)		1958	29,9	3	РО	2×10,8+1×8,4	250,0
9	Памир-1*		1994	28,0	4	РО	4×7	<200,0
	Малые ГЭС:	<b>4</b>		<b>47,7</b>	<b>11</b>		7,55 / 1,7	<b>310,0</b>
10	Маркази (Центральн.)		1964	15,1	2	ПЛ	2×7,55	110,0
11	Варзоб-2		1949	14,4	2	РО	2×7,2	90,0
12	Варзоб-1		1936	9,5	2	РО	2×4,75	80,0
13	Хорогская*			8,7	5	РО	2×1,8+3×1,7	~30,0

\*ГЭС работают в изолированной энергосистеме «Памир Энерджи» с общей установленной мощностью 37 МВт

\*\*Оценка по итогам 2021 года, на ГЭС введены в работу 2 гидроагрегата из проектируемых 6×600 МВт [7]

Первоочередное приближённое решение поставленной в изысканиях задачи возможно на основе опыта эксплуатации гидроагрегатов и имеющихся технико-экономических отчётов об их функционировании. Математические методы обработки статистики, совмещённые с технологиями вычислений в больших массивах данных (в т. ч. технологий искусственного интеллекта), позволяют вести поиск необходимых причинно-следственных связей.

Очевидно, что эффективность силового оборудования энергоблоков зависит от технологий энергетического машиностроения, применяемых для их изготовления, от режимов работы оборудования и от условий их эксплуатации. Каждая ГЭС уникальна по паспортным и эксплуатационным характеристикам энергоблоков, которые постоянно меняются во времени, и отслеживание их динамики изменения затруднительно. Однако условия эксплуатации ГЭС и их

энергоблоков не меняются в течение всего срока службы ГЭС и их можно описать условно-постоянными гидрогеографическими параметрами, которые с учётом [10] приведены в табл. 3.

Таблица 3. Гидрогеографические параметры ГЭС Таджикистана

№	ГЭС	*GPS координаты	Река	$h_y$ , м	$h_n$ , м
1	Нурекская	38.377404, 69.350615	Вахш	659	223
2	Рогунская	38.680877, 69.777166	Вахш	1193	**120
3	Сангтудинская-1	38.046115, 69.059891	Вахш	513	58,0
4	Байпазинская	38.267246, 69.123974	Вахш	607	54,0
5	Сарбанд (Головная)	37.883098, 68.936890	Вахш	470	23,3
6	Сангтудинская-2	37.969462, 69.027438	Вахш	498	22,5
7	Кайракумская	40.276134, 69.814875	Сырдарья	343	15,0
8	Шаршара (Перепадная)	37.722201, 68.850023	Вахш	417	40,0
9	Памир-1	37.593096, 71.728822	Гунт	2385	79,6
10	Маркази (Центральн.)	37.714052, 68.776124	Вахш	393	27,0
11	Варзоб-2	38.612166, 68.776634	Варзоб	848	76,0
12	Варзоб-1	38.672560, 68.768670	Варзоб	926	46,0
13	Хорогская	37.483786, 71.593357	Гунт	2104	59,0

\*GPS-координаты указаны для пола машинного зала ГЭС, внутри которого установлены гидроагрегаты

\*\*На время наполнения водохранилища в течение текущих строительных работ

Для ГЭС одними из основных параметров функционирования является  $h_n$  – расчётный напор [м] и высота ГЭС над уровнем моря, которая определяется по нормальному подпорному уровню (НПУ). Однако с точки зрения поиска «эталонного гидроагрегата» также имеет значение высота установки над уровнем моря, на которой установлен сам гидроагрегат. С учётом того, что большинство гидроагрегатов являются вертикальными, разница высот между нижней и верхней точками гидроагрегата может составлять до 20 м. Поэтому в Таблице 3 введённый параметр  $h_y$  – высота над уровнем моря [м], следует понимать, как высоту над уровнем моря пола машинного зала, на уровне которого установлены крышки гидрогенераторов гидроагрегата. Измеренные высоты ГЭС определены по данным [11].

Приведённые в табл. 1–3 параметры являются основой для проведения дальнейших исследований. При этом объектом исследований является поиск «эталонного гидроагрегата», функционирующего в составе парка гидроагрегатов, описанных в Таблице 2. Так установлено, что **по состоянию на 01.01.2024 на технологических площадках 13 ГЭС Таджикистана функционирует 51 гидроагрегат с единичной мощностью в диапазоне 1,7–400 МВт.**

Собранные в табл. 2 и 3 данные необходимы для дальнейшего формирования явных причинно-следственных связей между условно-постоянными и переменными параметрами функционирования ГЭС. Кроме структурирования, данные также требуют систематизации в части сбора в единую динамическую систему с привязкой ГЭС к высотам и каскадам рек. Для этого необходимо составить объёмную карту Таджикистана с рассредоточением площадок ГЭС и далее наращивать поверх карты динамические информационные слои (инфографику) с данными о технологическом функционировании ГЭС и их гидроагрегатов, которые позволят найти самый эффективный – «Эталонный гидроагрегат». При этом «условно-эталонный» гидроагрегат, поиск которого ведётся при исследованиях, можно считать таким, который при наименьшем напоре и наименьшем расходе воды обеспечивает наибольший объём выработки электроэнергии на 1 МВт установленной мощности за интервал времени (1 час, год или др.).

Для оценки эффективности технико-экономического функционирования электростанций, кроме расходных характеристик, часто используется коэффициент использования мощности (КИУМ), который для ГЭС часто находится в диапазоне 40-50 %. Например, если рассчитать КИУМ для Байпазинской ГЭС, которая с момента ввода в эксплуатацию до текущего 2024 г. функционирует с изначально установленными энергоблоками и её параметры более 20 лет являются относительно стабильными, то её КИУМ составит 47,56 %. Если посчитать объём

выработки электроэнергии  $W_{эфф}$  на 1 МВт установленной мощности, то данный показатель составит 4,17 млн кВт·ч на 1 МВт по итогам года. Очевидно, что КИУМ и  $W_{эфф}$  являются разными по смысловому содержанию параметрами, но могут иметь сильную корреляцию. Поэтому по мере дальнейших исследований, потребуется уточнение математического соотношения, по которому ведётся вычисление искомого параметра  $W_{эфф}$ . Одним из ожиданий от дальнейших исследований является проверка гипотезы о том, что малые и средние по установленной мощности гидроагрегаты ГЭС [9], при прочих равных или схожих условиях, могут работать эффективнее крупных гидроагрегатов ГЭС.

В настоящее время ведутся расчёты и уточнения КИУМ и  $W_{эфф}$  для ГЭС и гидроагрегатов ГЭС Таджикистана в начальном приближении. Условием проведения дальнейших исследований и подготовкой к физическим экспериментам является выполнение структурного анализа распределения установленной мощности и выработки электроэнергии на ГЭС. Для этого будет реализован следующий этап исследований, на котором будут определены следующие условно-постоянные параметры гидроагрегатов, которыми являются паспортные характеристики турбин и генераторов и будут определены объёмы мощностей и выработки электроэнергии по типам и заводам-изготовителям гидроагрегатов ГЭС Таджикистана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. – URL: <https://www.mewr.tj/> (дата обращения 02.11.24).
2. Гидроэнергетика Таджикистана: потенциал сегодня и возможности завтра / Н. Казеева, М. Козырева // Энергетическая политика. – 2023. – Т. 182. – No. 4. – С. 58–65.
3. Гидроэнергетические ресурсы Таджикистана и их использование / Г.Н. Петров // Центральная Азия и Кавказ. Журнал социально-политических исследований. «Central asia and Caucfsus». – 2003. – Т. 27. – No. 3. – С. 1–15.
4. Гидроэнергетика Таджикистана и ее уязвимость в условиях изменения климата / А. Д. Ахророва, Ш. Н. Саидова // Политический вестник. Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – Т. 49. – No. 1. – С. 38–43.
5. Халиков Х. Теоретико-прикладные основы комплексного использования водно-энергетических ресурсов Таджикистана: дис. канд. тех. наук. – Душанбе, 2022. – 183 с.
6. Пичугова О.А. Обзор численности и установленной мощности гидроэлектростанций энергосистемы Таджикистана // Сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции «Бутаковские чтения» / под ред. А.С. Заворина. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – С. 463–466.
7. ОАХК «БАРКИ ТОЧИК». Исследования ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС. Фаза II: Варианты определений проекта. Том 3: Инженерия и Проектирование. Глава 5: Исследования по моделированию эксплуатации водохранилища. 2014. 122 с.
8. Перечень основных гидроэнергетических сооружений Республики Таджикистан // – URL: [http://cawater-info.net/bk/dam-safety/pdf/hps\\_tj\\_r.pdf](http://cawater-info.net/bk/dam-safety/pdf/hps_tj_r.pdf) (дата обращения 30.10.24).
9. Стратегия развития малой гидроэнергетики Республики Таджикистан. 2007. 117 стр.
10. Султонов Ш.М. Оптимизация режимов работы энергосистемы с высокой долей гидроэлектростанций (на примере энергосистемы Таджикистана): дис. канд. тех. наук. – Новосибирск, 2016. – 163 с.
11. Топографическая карта мира. // – URL: <https://ru-ru.topographic-map.com/map/?center=38.04488%2C69.06019&zoom=16&popup=38.04613%2C69.05973> (дата обращения 05.11.24).

## ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

**Ф.В. Перевощиков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-28*

Научный руководитель: В.Г. Букреев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Системы электропитания современных регулируемых электроприводов в большинстве своем содержат автономные инверторы напряжения (АИН) с широтно-импульсным регулированием (ШИМ), которые формируют необходимые траектории кривых фазового портрета системы [1, 2]. Известно, что импульсное регулирование, на котором базируется любой АИН

предполагает искажение спектрального состава выходных токов и напряжений преобразователя, что в свою очередь не лучшим образом отражается на работе агрегата в целом (по параметрам энергоэффективности электропривода и качества регулирования угловой скорости). В ряде работ были предложены пути решения улучшения коэффициента гармонических искажений (КГИ) фазных токов [2–6]. Автором предлагается использование регулирования по отклонению модуля вектора фазных напряжений АИН с помощью регулятора, синтезированного при помощи корневых методов

$$W_{\text{рег}}(z) = K \frac{a_{nz3} \cdot z^{-3} + a_{nz2} \cdot z^{-2} + a_{nz1} \cdot z + 1}{b_{nz3} \cdot z^{-3} + b_{nz2} \cdot z^{-2} + b_{nz1} \cdot z + 1}, \quad (1)$$

где

$$K = \frac{a_{z0}}{b_{z0}}; a_{nz3} = \frac{a_{z3}}{a_{z0}}; a_{nz2} = \frac{a_{z2}}{a_{z0}}; a_{nz1} = \frac{a_{z1}}{a_{z0}}; b_{nz3} = \frac{b_{z3}}{b_{z0}}; b_{nz2} = \frac{b_{z2}}{b_{z0}}; b_{nz1} = \frac{b_{z1}}{b_{z0}};$$

$$a_{z3} = -8 \cdot a_3 \cdot f_d^3 + 4 \cdot a_2 \cdot f_d^2 - 2 \cdot a_1 \cdot f_d + a_0; a_{z2} = 24 \cdot a_3 \cdot f_d^3 - 4 \cdot a_2 \cdot f_d^2 - 2 \cdot a_1 \cdot f_d + 3 \cdot k_\phi;$$

$$a_{z1} = -24 \cdot a_3 \cdot f_d^3 - 4 \cdot a_2 \cdot f_d^2 + 2 \cdot a_1 \cdot f_d + 3 \cdot k_\phi; a_{z0} = 8 \cdot a_3 \cdot f_d^3 + 4 \cdot a_2 \cdot f_d^2 + 2 \cdot a_1 \cdot f_d + k_\phi;$$

$$b_{z3} = -8 \cdot b_3 \cdot f_d^3 + 4 \cdot b_2 \cdot f_d^2 - 2 \cdot b_1 \cdot f_d; b_{z2} = 24 \cdot b_3 \cdot f_d^3 - 4 \cdot b_2 \cdot f_d^2 - 2 \cdot b_1 \cdot f_d;$$

$$b_{z1} = -24 \cdot b_3 \cdot f_d^3 - 4 \cdot b_2 \cdot f_d^2 + 2 \cdot b_1 \cdot f_d; b_{z0} = 8 \cdot b_3 \cdot f_d^3 + 4 \cdot b_2 \cdot f_d^2 + 2 \cdot b_1 \cdot f_d; a_3 = T_3; a_2 = T_2;$$

$$a_1 = T_1; a_0 = T_0; b_3 = R \cdot \gamma^3; b_2 = R \cdot \gamma^2 \cdot A_2; b_1 = R \cdot \gamma \cdot A_1; T_3 = T_{\text{аин}}; T_2 = T_{\text{аин}} \cdot \zeta + 1; T_1 = T_{\text{аин}} \cdot k_\phi + \zeta;$$

$$T_0 = k_\phi; R = k_{\text{аин}} \cdot k_\phi \cdot k_{\text{дн}}; k_\phi$$

– обратная величина произведения индуктивности синус-фильтра, подключенного к выходу АИН  $L_\phi$  и емкости синус-фильтра  $C_\phi$ ;  $\zeta$  – отношение активного паразитного сопротивления фильтра  $R_\phi$  к индуктивности  $L_\phi$ ;  $T_{\text{аин}}$  – постоянная времени АИН, равная величине обратной несущей частоты ШИМ;  $k_{\text{дн}}$  – коэффициент передачи датчика напряжения;  $k_{\text{аин}}$  – коэффициент передачи АИН;  $\gamma$  – нормировочный коэффициент выбранного для синтеза полинома

Особый интерес при таком подходе организации управления АИН представляет способность данного регулятора обрабатывать ряд параметрических возмущений: изменение частоты ШИМ и изменение параметров синус-фильтра в результате тепловых воздействий и наработки при различных значениях  $\gamma$ . Для оценки робастности регулятора изменим параметры, входящие в состав его уравнений на  $\pm 20\%$ . Результаты представлены на рис. 1–4 для  $\gamma = 2 \cdot 10^{-4}$  с. Зеленый луч соответствует увеличению варьируемого параметра на 20%; розовый луч соответствует увеличению параметра на 10%; черный луч соответствует исходному переходному процессу; синий луч соответствует уменьшению параметра на 10%; красный луч соответствует уменьшению параметра на 20%

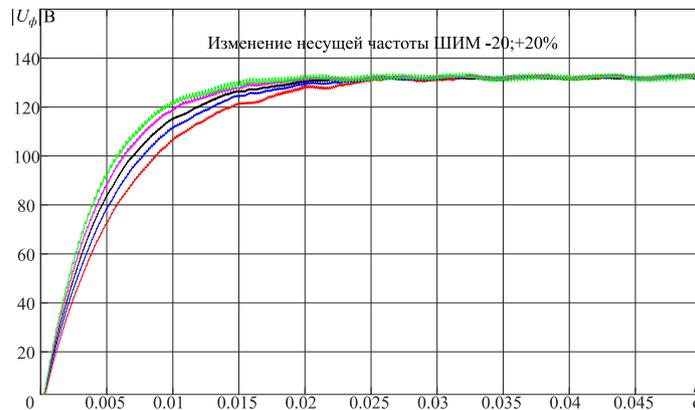


Рис. 1. Обработка задания регулятором при изменении несущей частоты ШИМ

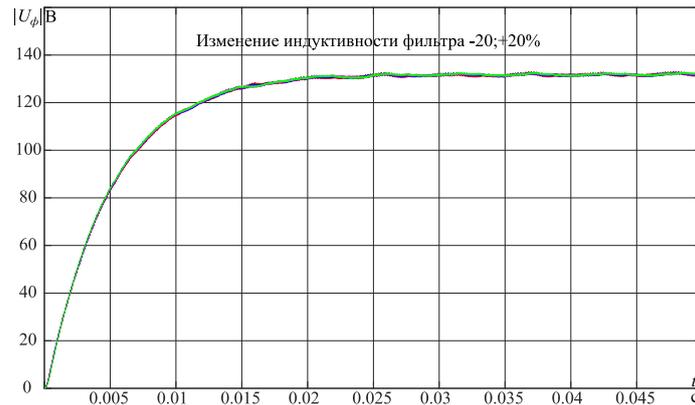


Рис. 2. Отработка задания регулятором при изменении индуктивности  $L_{\phi}$  синус-фильтра

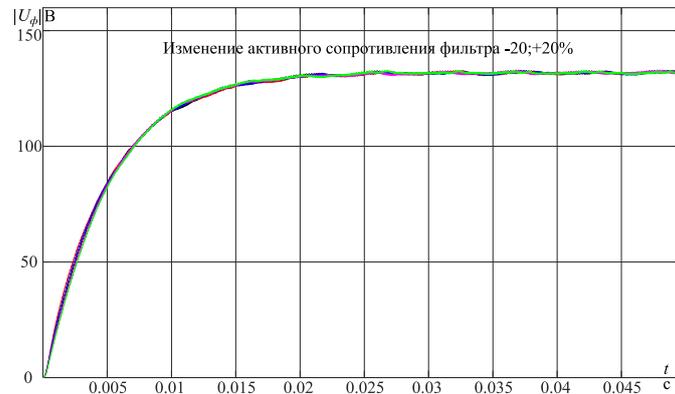


Рис. 3. Отработка задания регулятором при изменении активного сопротивления  $R_{\phi}$  синус-фильтра

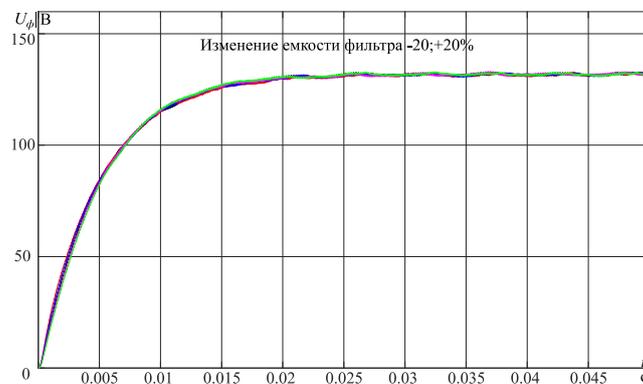


Рис. 4. Отработка задания регулятором при изменении емкости  $C_{\phi}$  синус-фильтра

Из вышеприведенных рисунков видно, что в статическом режиме работы регулятор отрабатывает параметрические возмущения объекта регулирования, что особенно важно в осложненных условиях эксплуатации при изменении температуры окружающей среды, в которой находится прибор. Так как параметры дросселя ( $L_{\phi}$ ,  $R_{\phi}$ ) и электролитических конденсаторов ( $C_{\phi}$ ), используемых в синус-фильтре могут существенно дрейфовать с увеличением наработки. Последний факт говорит о том, что параметры регулятора, рассчитанные и заложенные в оборудование при поставке, могут существенно отличаться от требуемых с течением времени, что в свою очередь может подтолкнуть систему управления преобразователя к некорректной отработке внешних воздействий, а это уже может привести к выходу из строя самого АИН, так и систему электропитания в целом. Однако, предложенный подход позволит избежать данной ситуации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – УРО РАН, 2000.
2. Богданов А.А., Быстров Е.А. Анализ влияния алгоритма и режимов работы трехфазного инвертора на спектральный состав выходных токов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов. – Томск, 2016. – С. 93–97.
3. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
4. Браславский И.Я., Костылев А.В., Цибанов Д.В. Исследование оптимальных пусковых процессов в системе «реальная сеть-ПЧ-АД» // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 35–39.
5. Zelechowski M. Space vector modulated–direct torque controlled (dct– svm) inverter–fed induction motor drive // Warsaw University of Technology Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics. – 2005.
6. Chao W., Qiang G., Jing T. An Implementation Method of SVPWM Modulation Algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Т. 646. – № 1. – С. 012066.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАЗ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СЧЕТЧИКОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА К НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

**И.А. Пузанов**

*Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева СО РАН, отдел ЭЭС*

Научный руководитель: Е.В. Болоев, к.т.н., с.н.с.

Счетчики интеллектуальной системы учета электроэнергии (ИСУ ЭЭ) устанавливаются электросетевыми организациями в низковольтных сетях на вводах распределительного устройства (РУ) трансформаторной подстанции (ТП) и в узлах подключения потребителей. Эти счетчики применяют для следующих целей:

- коммерческого и технического учета электроэнергии;
- измерения текущих параметров режима: действующие (среднеквадратичное) значения фазных токов; фазных и междуфазных напряжений; углов сдвига фаз между напряжениями и токами; однофазных и трехфазных активных и реактивных мощностей; коэффициентов мощности; частоты сети (период измерений параметров – 200 мс);
- измерения интервальных показаний: усредненных среднеквадратических значений токов и напряжений, активных и реактивных мощностей за интервалы времени от 1 до 60 мин;
- измерения показателей качества электроэнергии.

При достоверно известных фазах подключения счетчиков к сети текущие измерения и интервальные показания используют в качестве исходных данных для решения задач расчета потокораспределения и потерь электроэнергии [1], оценивания состояния [2], балансировки фазных нагрузок потребителей [3], выявления бездоговорного и безучетного электропотребления [4].

Счетчики не имеют устройств идентификации фаз подключения к сети. Информация о фазах подключения счетчиков потребителей к сети не отслеживается эксплуатационным персоналом и зачастую не отражена на принципиальной схеме сети. В связи с этим, возникает проблема идентификации фаз подключения счетчиков к сети.

Задачу определения фаз подключения счетчиков потребителей к сети принято называть фазовой идентификацией (ФИ) [4]. Задача ФИ решается при внедрении ИСУ ЭЭ. На принципиальной схеме сети возле счетчика указывается фазы его подключения к сети. При вводе счетчика в работу после проверки или при ремонте сетей может произойти изменение фазы подключения счетчика к сети. Поэтому для проверки соответствия между реальным подклю-

чением фаз счетчика к сети и указанным на принципиальной схеме сети необходимо выполнять ФИ после каждого отключения / включения счетчика.

Для ФИ используют аппаратные и программные методы [5]. ФИ аппаратными методами выполняется с помощью специальных устройств PLC (аббревиатура от Power Line Communications – коммуникации по линии электропередачи) или устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ). PLC-система состоит из передатчика, который отправляет коммуникационный сигнал в сеть переменного тока (модуляция), и приемника, извлекающего этот сигнал (демодуляция). Если сигнал отправленный на подстанции PLC-передатчиком в фазу  $A$  ( $B$ ,  $C$ ) совпадает с сигналом полученным PLC-приемником в фазном проводе потребителя, то этот провод счетчика потребителя подключен к фазе  $A$  ( $B$ ,  $C$ ). УСВИ синхронизируются по времени с помощью глобальной системы позиционирования с точностью до 0,2 мкс и передают в концентраторы СВЧ измеренные модули и фазовые углы напряжений каждые 20 мс. Погрешность измерения фазовых углов напряжений не превышает  $0,1^\circ$ . Фазу подключения провода счетчика определяют по малой разнице между углами напряжений измеренных УСВИ на ТП и у потребителя. Достоинством аппаратных методов ФИ [5] является достоверность идентификации, а недостатками – высокая стоимость устройств, большая трудоемкость ФИ, привлечение электротехнического персонала с выездом на место установки счетчиков.

В программных методах для ФИ используют профили или срезы напряжений/нагрузок, измеренные счетчиками ТП и потребителей. Под профилем параметра понимается усредненное за определенный интервал времени среднеквадратическое значение параметра, а под срезом – действующее значение параметра, измеренное в определенный момент времени. При установке счетчика в ТП его фазные провода подключают к шинам РУ по цветовому окрасу: фаза  $A$  – к желтой шине; фаза  $B$  – к зеленой; фаза  $C$  – к красной. Достоверные сведения о фазах подключения  $A$ ,  $B$ ,  $C$  счетчика ТП к сети являются опорой ФИ в программных методах. Программные методы ФИ подключения счетчика потребителя по напряжению / нагрузке основаны на выявлении взаимной зависимости между измеренными фазными напряжениями / нагрузками ТП и фазным напряжением/нагрузкой потребителя. Для ФИ по напряжениям применяют корреляционный метод Пирсона [6], методы линейной регрессии [7] и кластеризации [8], а по нагрузкам – методы баланса энергии (мощностей) [9], регрессии [10], машинного обучения [5]. Программные методы ФИ требуют большого числа измерений для обеспечения достоверности идентификации [5].

Одним из самых простых и достоверных методов ФИ считается корреляционный метод Пирсона по напряжениям. В данной работе определяется минимально необходимое число измерений напряжений, которое обеспечивает достоверное определение фазы подключения счетчика потребителя к сети этим методом. Для демонстрации ФИ по профилям и срезам напряжений будут использоваться реальные измерения счетчиков ТП и наиболее удаленного потребителя соответственно счетчиков МИР на рис. 1 и РиМ на рис. 2, выполненные через 30 минут.

Закон распределения напряжений в узлах низковольтной сети является нормальным (рис. 3). Статистическая зависимость между напряжениями одноименных фаз в разных узлах сети близка к линейной (см. рис. 4). Поэтому для выявления взаимозависимости между векторами напряжений  $A$ ,  $B$ ,  $C$  счетчика ТП  $U_{\text{ТП}}^{(A,B,C)} = [U_{\text{ТП}t}^{(A,B,C)}]$  и счетчика потребителя  $U_{\text{П}}^{(X)} = [U_{\text{П}t}^{(X)}]$  сформированных из генеральной совокупности или путем выборки из профилей или срезов измерений можно использовать коэффициенты парной корреляции Пирсона, где  $X$  – неизвестная фаза подключения,  $t$  – порядковый номер измерения.

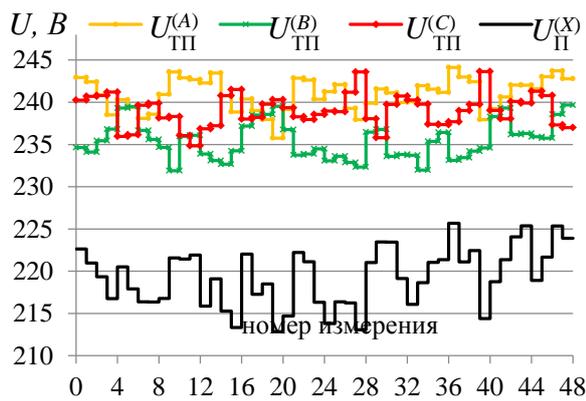


Рис. 1. Профили напряжений счетчиков МИР

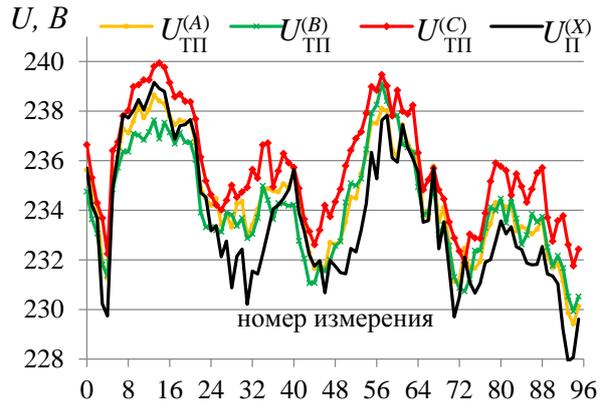


Рис. 2. Срезы напряжений счетчиков РИМ

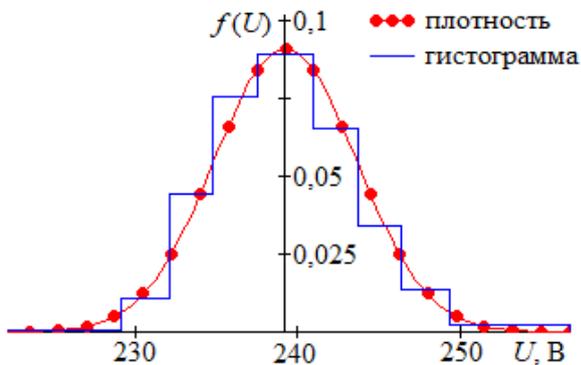


Рис. 3. Гистограмма и плотность распределения напряжения

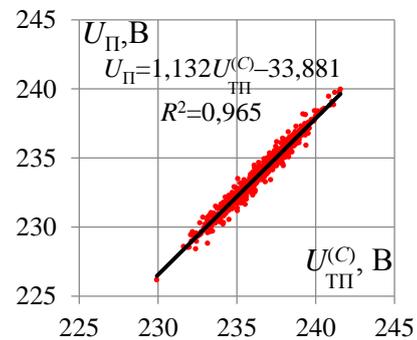


Рис. 4. Диаграмма рассеивания напряжений одноименных фаз разных узлов низковольтной сети

Идентификация фазы  $X$  счетчика потребителя производится по максимальному значению коэффициентов парной корреляции Пирсона между каждым из векторов напряжений  $U_{\Pi}^{(A,B,C)}$  ТП и вектором напряжений потребителя  $U_{\Pi}^{(X)}$  [6]:

$$r^{(A,B,C)} = r(U_{\Pi}^{(A,B,C)}; U_{\Pi}^{(X)}) = \frac{\sum_{t=1}^n (U_{\Pi t}^{(A,B,C)} - \overline{U_{\Pi}^{(A,B,C)}})(U_{\Pi t}^{(X)} - \overline{U_{\Pi}^{(X)}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (U_{\Pi t}^{(A,B,C)} - \overline{U_{\Pi}^{(A,B,C)}})^2 \sum_{t=1}^n (U_{\Pi t}^{(X)} - \overline{U_{\Pi}^{(X)}})^2}}, \quad (1)$$

где  $\overline{U_{\Pi}^{(A,B,C)}} = 1/n \sum_{t=1}^n U_{\Pi t}^{(A,B,C)}$ ,  $\overline{U_{\Pi}^{(X)}} = 1/n \sum_{t=1}^n U_{\Pi t}^{(X)}$  – средние значения напряжений.

Если коэффициент парной взаимной корреляции Пирсона  $r^{(A)}$  максимален, т. е. больше  $r^{(B)}$  и  $r^{(C)}$ , то  $X$  соответствует фазе  $A$ . Аналогичные выводы можно сделать в случае максимальных значений для других фаз  $B$  и  $C$ .

Для достоверной идентификации фазы подключения счетчика коэффициенты корреляции должны быть значимыми, т. е. число измерений  $n$  должно позволить рассчитать эти коэффициенты с доверительным интервалом 0,05 и надежностью 95 % [6]. Для расчета верхних  $r^{(A)}$ ,  $r^{(B)}$ ,  $r^{(C)}$  и нижних  $r^{(A)}$ ,  $r^{(B)}$ ,  $r^{(C)}$  границ доверительных интервалов в этой работе использовался калькулятор [11]. Необходимое число измерений для достоверной идентификации фазы счетчиков по получасовым профилям напряжений составило 1553, а для срезов измерений – 73.

В действительности о достоверной идентификации фазы подключения счетчика потребителя можно утверждать при меньшем числе измерений  $n$ , если нижняя граница доверительного интервала одного из коэффициентов корреляции будет выше верхних границ доверительных интервалов для двух других коэффициентов корреляции как на рис. 5 и 6.

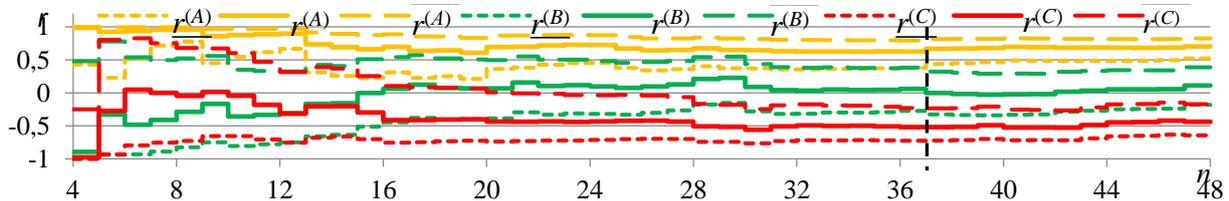


Рис. 5. Графики зависимости коэффициентов корреляции профилей напряжений  $r^{(A)}$ ,  $r^{(B)}$ ,  $r^{(C)}$ , их верхних  $\overline{r^{(A)}}$ ,  $\overline{r^{(B)}}$ ,  $\overline{r^{(C)}}$  и нижних  $\underline{r^{(A)}}$ ,  $\underline{r^{(B)}}$ ,  $\underline{r^{(C)}}$  границ доверительных интервалов от числа измерений  $n$

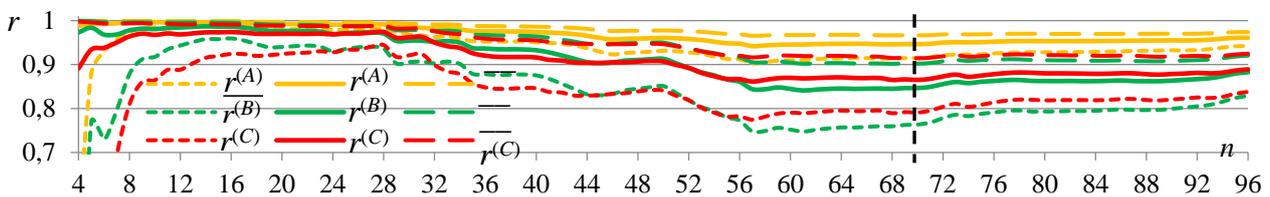


Рис. 6. Графики зависимости коэффициентов корреляции срезов напряжений  $r^{(A)}$ ,  $r^{(B)}$ ,  $r^{(C)}$ , их верхних  $\overline{r^{(A)}}$ ,  $\overline{r^{(B)}}$ ,  $\overline{r^{(C)}}$  и нижних  $\underline{r^{(A)}}$ ,  $\underline{r^{(B)}}$ ,  $\underline{r^{(C)}}$  границ доверительных интервалов от числа измерений  $n$

Коэффициенты корреляции срезов измерений напряжений ближе к единице по сравнению с коэффициентами корреляции профилей напряжений. Фаза подключения потребителя по профилям напряжений достоверно идентифицирована за 37 измерений, а по срезам напряжений – за 70.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ особенностей расчета потокораспределения и потерь мощности реальной распределительной сети низкого напряжения по измерениям интеллектуальных счетчиков / В.А. Стенников, И.И. Голуб, Е.В. Болоев, А.Ю. Анфиногенов, А.Л. Бучинский, А.Н. Масленников // *Электроэнергия. Передача и распределение*. – 2022. – Т.72, № 3. – С. 22–31.
2. Утюжникова В.А., Борисова Е.А., Болоев Е.В. Балансировка фазных нагрузок в низковольтных трехфазных четырехпроводных сетях // *Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета*. – 2023. – № 20. – С. 216–225.
3. Использование измерений интеллектуальных счётчиков для установления виновных в неучтённом потреблении электроэнергии / В.А. Стенников, И.И. Голуб, Е.В. Болоев, А.Ю. Анфиногенов, А.Л. Бучинский // *Энергетик*. – 2024. – № 4. – С. 649–662.
4. Phase identification in smart grids / V. Arya, D. Seetharam, S. Kalyanaraman, K. Dontas, C. Pavlovski, S. Hoy // *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Brussels (Belgium)*. – 2011. – P. 25–30.
5. Machine Learning-Enabled Distribution Network Phase Identification / Z.S. Hosseini, A. Khodaei, A. Paaso // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2021. – Vol. 36 (2). – P. 842–850.
6. Голуб И.И., Кузькина Я.И. Идентификация фаз подключения интеллектуальных счетчиков в низковольтной распределительной сети // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 135–144.
7. Short T.A. Advanced metering for phase identification, transformer identification, and secondary modeling // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2013. – Vol. 4 (2). – P. 651–658.
8. Phase Identification in Electric Power Distribution Systems by Clustering of Smart Meter Data / W. Wang, N. Yu, B. Foggo, J. Davis, J. Li // *2016 15th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (Anaheim, USA), 2016*. – P. 259–265.
9. Inferring connectivity model from meter measurements in distribution networks / V. Arya, T.S. Jayram, S. Pal, S. Kalyanaraman // *Proceedings of the the Fourth International Conference on Future Energy Systems*. – 2013. – P. 173–181.
10. Xu M., Li R., Li F. Phase Identification with Incomplete Data / M. Xu, // *IEEE Transactions on Smart Grids*. – 2018. – Vol. 9 (4). – P. 2777–2785.
11. Correlation Coefficient Confidence Interval Calculator: Given Correlation // *Math Help Resources*. – URL: <https://mathcracker.com/correlation-coefficient-confidence-interval-given#results> (дата обращения 12.11.2024 г.)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ, РАБОТАЮЩИХ В СРЕДЕ СВИНЕЦ-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

С.В. Колосов, Н.М. Сапожников, М.Д. Погорелов

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
ИЯЭиТФ, АТС, группа М24-ВТГР-ПИШ

Научный руководитель: Т.А. Бокова, к.т.н., доцент АТС ИЯЭиТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Сегодня развитие ядерной энергетики активно идет в направлении реакторов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ), такими как свинец и эвтектика свинец-висмут. Так, например, в России имеется достаточно богатый опыт разработки реакторных установок атомных подводных лодок (АПЛ), работающих в среде ТЖМТ, в настоящий момент ведутся разработки реакторных установок типа БРЕСТ-ОД-300, БР-1200 и СВБР, а в Бельгии проектируется ускорительно-управляемая система MYRRHA.

ТЖМТ обладают рядом уникальных свойств, отличающих их от традиционных теплоносителей: они не смачивают оксидные пленки на поверхности конструкционных материалов, имеют высокую плотность и низкую вязкость. Эти особенности ставят перед разработчиками новые задачи, особенно в области подшипниковых опор для циркуляционных насосов.

В отечественных проектах опыт конструирования и эксплуатации главных циркуляционных насосов, работающих в составе оборудования реакторных установок, привел к широкому использованию гидростатических подшипников (ГСП) двойного взаимнообратного щелевого дросселирования. И, тем не менее, существующие методики расчета этих узлов не учитывают специфику ТЖМТ [1].

Актуальность исследовательской работы определяется необходимостью гарантированной работоспособности циркуляционных насосов для стабильной работы реактора и надежного съема тепла с активной зоны. Необходим грамотный и глубокий анализ, направленный на выбор оптимального варианта подшипниковой опоры, учитывающего особенности ТЖМТ. Это позволит обеспечить долговечность и надежность работы всей системы.

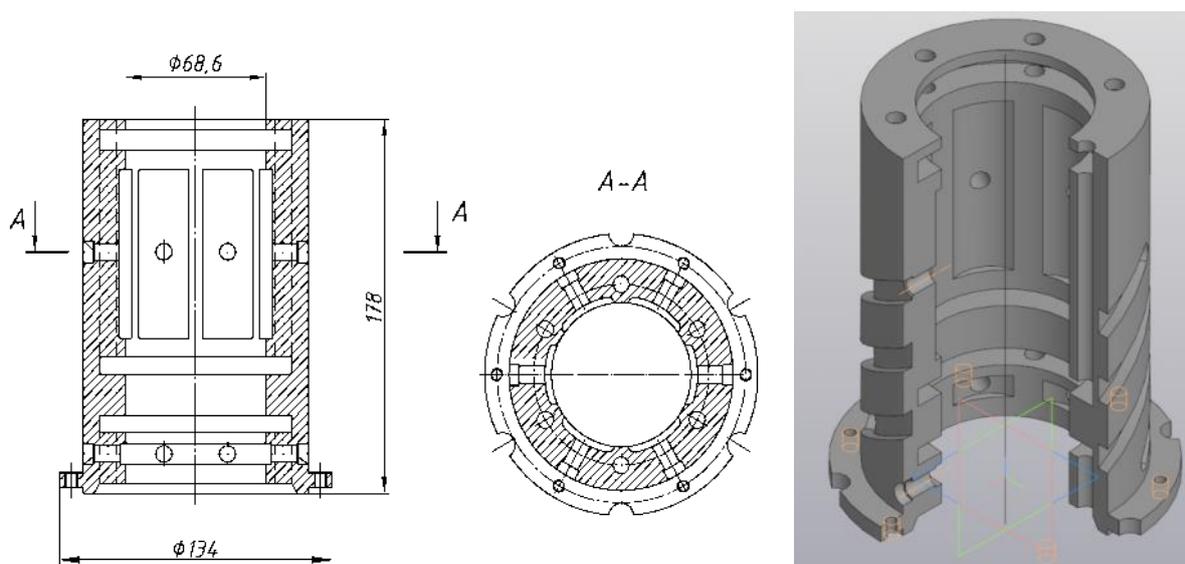


Рис. 1. Модель гидростатического подшипника № 1

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева были исследованы гидравлические характеристики (расход, перепад давления) трех моделей гидростатических подшипников двойного взаимобратного щелевого дросселирования. В рамках данной темы была отработана методика организации циркуляции ТЖМТ через модели ГСП, регулирования расхода и снятия гидравлических характеристик ГСП, после чего были сняты гидравлические характеристики ГСП при различных расходах ТЖМТ и частотах вращения вала в ГСП (0, 400, 600, 800, 1100 об/мин) при температурах ТЖМТ 390–410 °С.

Модели ГСП № 1 (рис. 1) и ГСП № 2 (рис. 2) отличаются количеством рабочих камер.

В модели ГСП № 3 (рис. 3) рабочие камеры выполнены под углом 15° по направлению вращения вала.

По полученным гидравлическим характеристикам были косвенно определены эмпирические коэффициенты: коэффициент расхода и параметр скорости вращения вала.

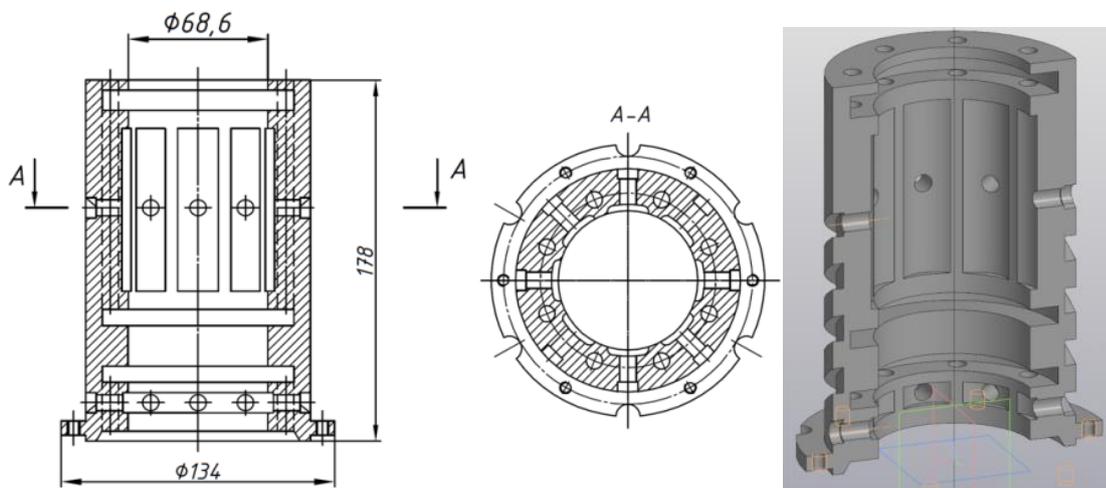


Рис. 2. Модель гидростатического подшипника № 2

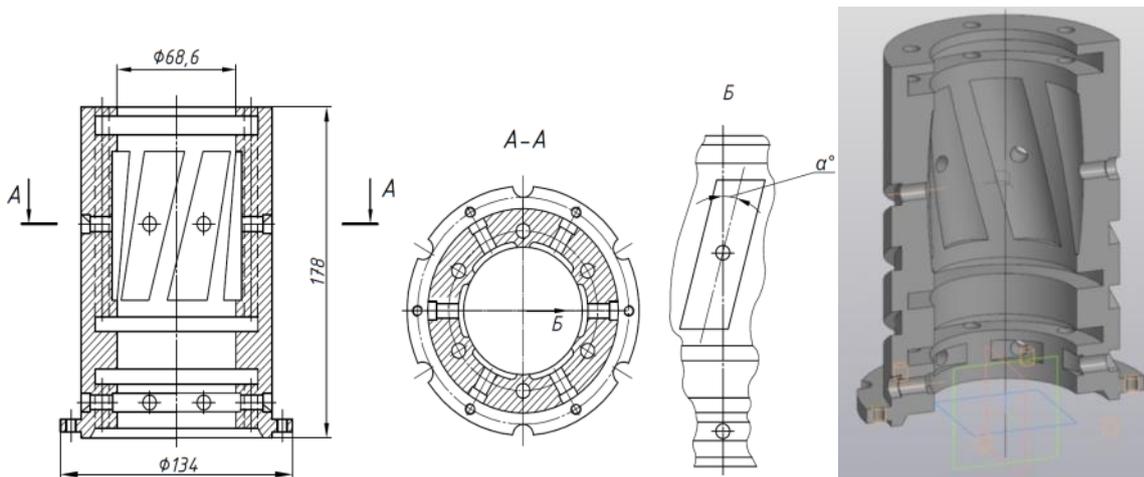


Рис. 3. Модель гидростатического подшипника № 3

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синев Н.М., Удовиченко П.М. Бессальниковые водяные насосы. – М.: Атомиздат, 1972. – 494 с.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНОГО ПАРКА

**Н.Н. Мухов**

*Российский технологический университет Московский институт радиотехники,  
электроники и автоматики, ИИТ, ПМ, группа ИММО-01-23*

Научный руководитель: С.М. Сидоров, к.т.н., доцент каф. ПМ ИИТ РТУ МИРЭА

Ветро-дизельные парки (далее – ВДП) могут стать важной частью энергосистемы России, в качестве основного источника энергии в малонаселенных регионах, где сложно и дорого подключать поселения к центральным электросетям [1]. Также ВДП могут найти широкое применение в арктических проектах России: на научных станциях, нефтедобывающих установках, где они являются отличной заменой классическим дизельным электростанциям, обладая большей автономностью за счет меньшего расхода топлива [2].

Одной из проблем любых автономных систем энергоснабжения, к которым относятся и ветро-дизельные парки, является надежность и своевременное снабжение топливом. ВДП совмещает в себе ветряные и дизельные электростанции. Дизельные генераторы в этой системе сглаживают колебания мощности ветряной установки, вызванные переменной скоростью ветра. Таким образом при неизменном объеме выдаваемой энергии, ВДП требует значительно меньше топлива, за счет того, что генератор редко работает на полной мощности.

Из-за сложной структуры ВДП и стохастичности его функционирования, актуальной является проблема определения его показателей надежности. С помощью построения марковских или скрытых марковских моделей можно найти показатели функционирования ВДП и, в дальнейшем, прогнозировать поведение системы на основе сигналов, получаемых в процессе ее функционирования.

В статьях [1] и [2] рассматривается экономическая целесообразность использования ВДП. Математическому моделированию ВДП посвящены следующие работы [3, 4], а исследованию надежности – [5]. В [3] приводится полумарковская модель автономного ветро-дизельного комплекса, позволяющая определять стационарные характеристики надежности. В монографии [4] рассматриваются математические модели ветряных, дизельных, и ветро-дизельных электростанций с изучением их энергетических характеристик. Статья [5] содержит расчет характеристик надежности ветро-дизельного комплекса логико-вероятностным методом.

### Постановка задачи

Простейший ВДП состоит из нескольких ветровых установок, такого же числа дизельных генераторов, аккумулятора контроллера и инвертора. Каждая пара «дизельный генератор» – ветровая установка» называется ветро-дизельным комплексом (ВДК) и может рассматриваться, как пример работы парка одинарного размера.

Рассмотрим систему, состоящую из двух ВДК. С целью упрощения модели, предположим, что контроллер, аккумулятор и инвертор, входящие в ВДК (рис. 1), являются абсолютно надежными в том смысле, что вероятность их отказа значительно меньше, чем ветрогенератора и генератора. Структурная схема рассматриваемой системы для этого случая представлена на рис. 2.

В данном исследовании разрабатывается математическая модель ВДП, состоящего из двух ветро-дизельных комплексов, работающих параллельно. С математической точки зрения, данную систему можно рассматривать как суперпозицию двух альтернирующих процессов восстановления.

Предположим, что времена безотказной работы первого и второго ВДК описываются случайными величинами (СВ)  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , соответственно. Эти СВ имеют функции распределения

$F_1(t) = P(\alpha_1 \leq t)$ ,  $F_2(t) = P(\alpha_2 \leq t)$  и плотности распределения  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$ . Время восстановления ВДК задается случайными величинами  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , имеющими функции распределения  $G_1(t) = P(\beta_1 \leq t)$ ,  $G_2(t) = P(\beta_2 \leq t)$  и плотности распределения  $g_1(t)$  и  $g_2(t)$ . Все, описанные выше, случайные величины предполагаются независимыми и имеющими конечные математические ожидания.

Особенность модели заключается в том, что времена безотказной работы и восстановления элементов системы описываются СВ с функциями распределения общего вида. Это расширяет область применимости предлагаемой модели. Следует отметить, что при должной переформулировке предлагаемую модель можно использовать для анализа надежности парка, состоящего из солнечных панелей.

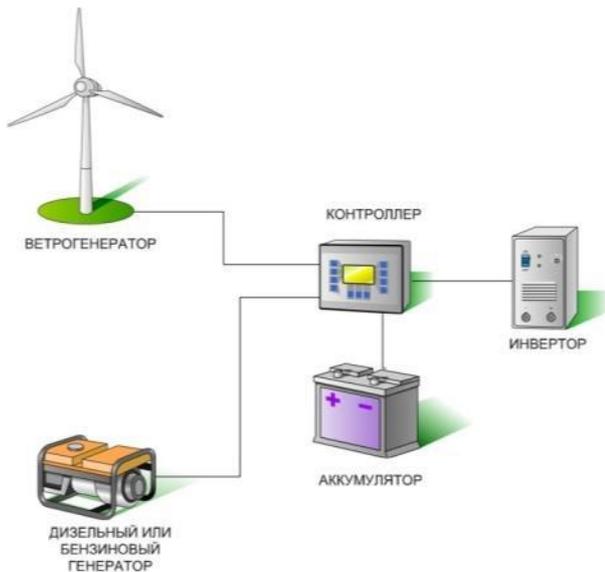


Рис. 1. Ветро-дизельный комплекс [6]

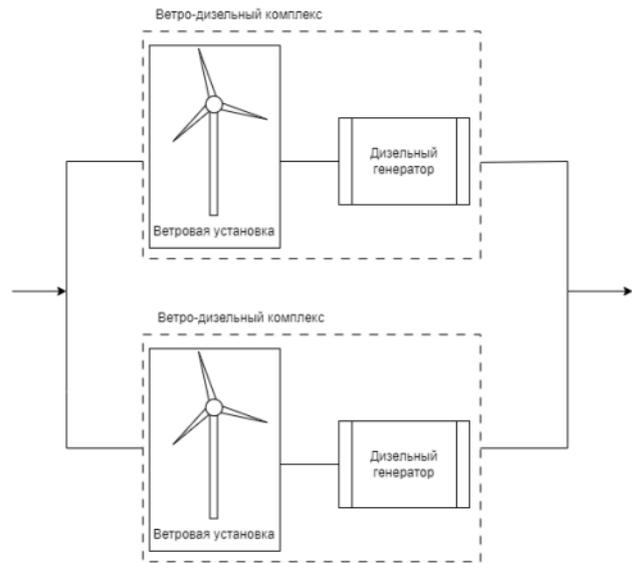


Рис. 2. Структурная схема ВДП

### Предлагаемые методы решения

При решении поставленной задачи предлагается использовать: аппарат теории полумарковских процессов для разработки математической модели и нахождения стационарных характеристик надежности, теорию скрытых марковских моделей для оценки и прогнозирования состояний системы.

В дальнейшем планируется разработка математической модели ВДП, состоящего из  $N$  ветро-дизельных комплексов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Александрова Т.А. Технико-экономический анализ применения ветродизельных электростанций для электроснабжения энергоудаленных поселений // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 1(112). – С. 65–72.
2. Минин В.А., Рожкова А.А. Оценка эффективности внедрения ветроэнергетических установок на дизельных электростанциях в арктической зоне РФ // Труды кольского научного центра РАН. – 2017. – Т. 8, № 14. – С. 93–99.
3. Обжерин Ю.Е., Сидоров С.М., Федоренко С.Н. Полумарковская и скрытая марковская модели функционирования автономного ветродизельного комплекса // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 70–82.
4. Бобров А.В., Тремясов В.А. Ветро-дизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении: монография. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 216 с.
5. Григорьева О.А., Кривенко Т.В., Тремясов В.А. Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2016. – № 2 (243). – С. 45–52.
6. Полная энергетическая автономия или как выжить с солнечными батареями в глубинке // Хабр. 2015. – URL: <https://habr.com/ru/amp/publications/254281/> (дата обращения 11.11.2024)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ В ЗАЗОРЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА

**В.Е. Шоронов**

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
аспирант кафедры ЭМ*

Научный руководитель: В.А. Филиппов, к.т.н., доцент каф. ЭМ ИГЭУ

Магнитожидкостные сепараторы (МЖС) нашли своё применение на финишных операциях технологических процессов обогащения и стадиях доводки, в геологоразведочных работах, при отработке технологий извлечения драгоценных металлов и тяжёлых минералов из руд, россыпей и техногенных месторождений, для сепарации электронного лома и вторичного сырья из цветных металлов.

Одной из основных характеристик МЖС является выталкивающая сила  $F$ , действующая на немагнитные тела в зазоре. По её величине можно оценить качество и точность сепарации. Наблюдение за этой величиной в процессе эксплуатации устройства позволяет своевременно узнать об изменении выталкивающих свойств магнитной жидкости (МЖ). Разработан способ измерения выталкивающей силы в зазоре МЖС.

Внешний вид опытной установки представлен на рис. 1.

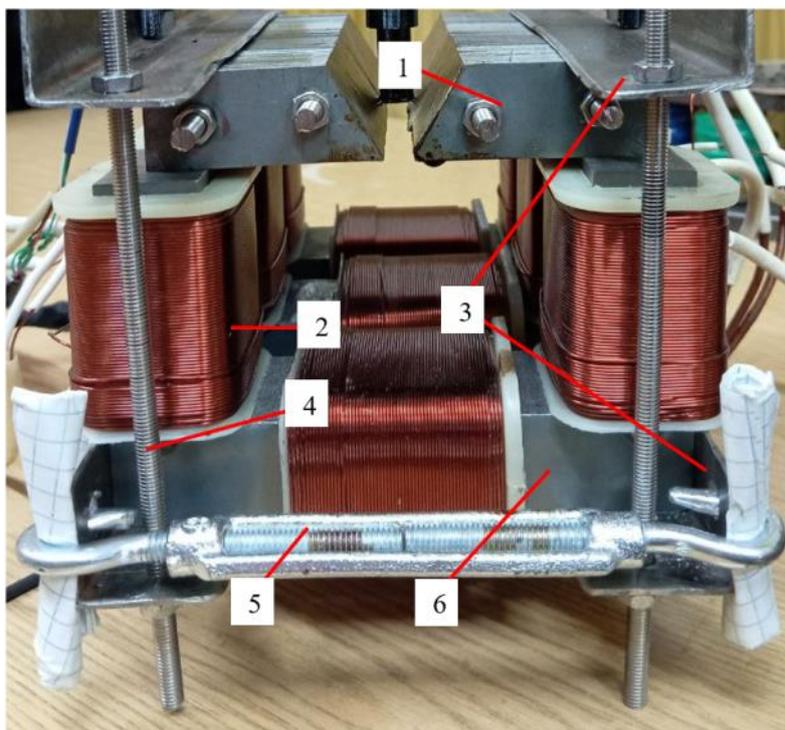


Рис. 1. Опытная установка электромагнитного магнитожидкостного сепаратора:  
1 – полюс магнитной системы; 2 – катушка возбуждения; 3 – Г-образные балки;  
4 – вертикальная шпилька; 5 – талреп; 6 – Г-образная часть секции магнитопровода

Измерительный механизм имеет следующий принцип действия. В зазоре МЖС расположен поплавок из немагнитного материала. МЖ оказывает выталкивающее усилие на поплавок, которое фиксируется тензодатчиком. Аналоговый сигнал с тензодатчика подаётся на микросхему, в составе которой присутствует усилитель сигнала и АЦП. Оцифрованный сиг-

нал подаётся на микроконтроллер, который передаёт измеренные данные на персональный компьютер.

Для измерения выбран тензодатчик фирмы XNQJALYCY с номинальной нагрузкой 200 г. Аналого-цифровое преобразование происходит через микросхему HX711. Используется микроконтроллер Atmega328P, который входит в состав платы Arduino Nano.

Структурная схема соединения аппаратных компонентов измерительного механизма изображена на рис. 2.

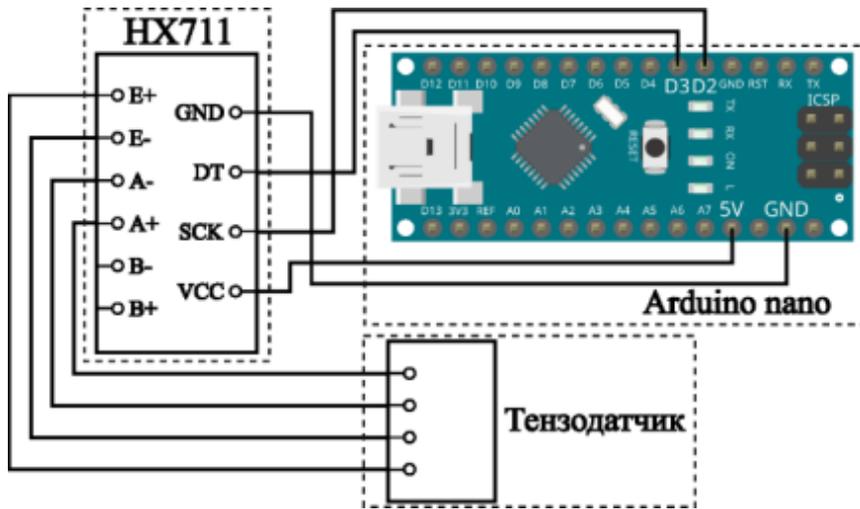


Рис. 2. Структурная схема соединения аппаратных компонентов измерительного механизма

3D-модель конструкции измерительного механизма представлена на рис. 3.

Измерения проводились с использованием МЖ на основе синтетического углеводородного масла с намагниченностями насыщения  $M_s = 15, 20, 30$  и  $35$  кА/м.

Результаты измерения представлены в виде зависимостей выталкивающей силы от времени на рис. 4.

В табл. 1 и на рис. 5 представлены экспериментальные значения зависимостей выталкивающей силы от тока возбуждения в сравнении с расчётными.

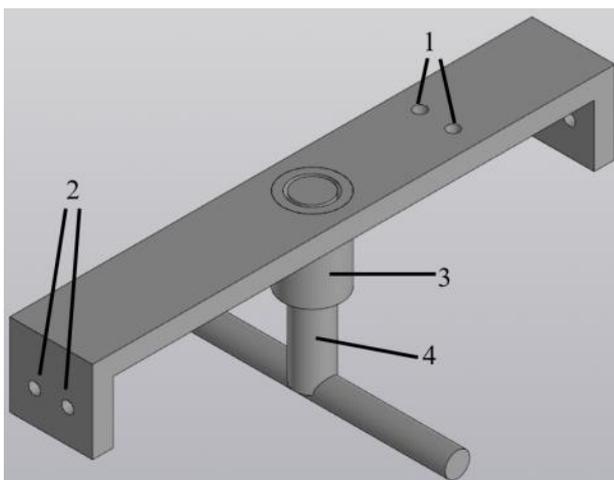


Рис. 3. Конструкция измерительного механизма:  
 1 – отверстия для крепления тензодатчика;  
 2 – отверстия для крепления к опытной установке; 3 – направляющая поплавок;  
 4 – подвижный поплавок

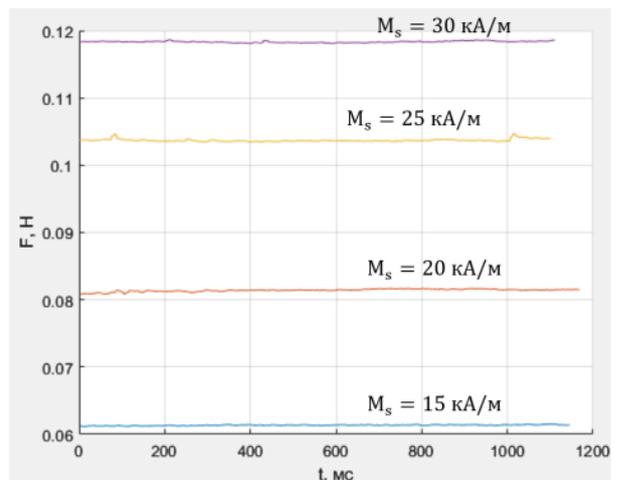


Рис. 4. Зависимости выталкивающей силы  $F$  от времени при токе возбуждения  $I = 3,5$  А

Таблица 1. Экспериментальные и рассчитанные зависимости выталкивающей силы

$M_s, \frac{\text{кА}}{\text{м}}$		Ток возбуждения I, А									
		2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25
		Выталкивающая сила F, мН									
15	Расч.	26,62	32,43	38,11	43,83	49,77	56,03	62,31	68,14	73,13	77,32
	Эксп.	24,48	32,09	38,13	45,03	51,73	55,83	61,35	73,04	80,13	83,2
20	Расч.	41,44	48,41	55,43	62,17	68,57	74,64	80,48	86,18	91,83	97,49
	Эксп.	44,55	53,97	56,67	64,49	70,98	75,22	81,41	86,5	94,87	99,1
25	Расч.	55,28	63,49	72,24	81,29	90,01	98,22	106,77	115,59	123,84	131,58
	Эксп.	56,91	66,23	72,54	80,53	88,29	95,82	103,7	110,77	118,54	125,23
30	Расч.	59,33	69,28	79,47	89,61	99,62	109,35	118,81	128,14	137,49	146,91
	Эксп.	66,47	75,95	85,32	94,87	102,59	110,05	118,34	127,39	134,28	144,97



Рис. 5. Экспериментальные и рассчитанные зависимости выталкивающей силы  $F$  от тока возбуждения  $I$

В табл. 2 приведены относительные погрешности рассчитанных зависимостей и экспериментальных точек.

Таблица 2. Погрешность рассчитанных зависимостей и экспериментальных точек

$M_s, \frac{\text{кА}}{\text{м}}$	Ток, А										Среднее, %
	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5	3,75	4	4,25	
	Относительная погрешность, %										
15	8,064	1,067	0,031	2,736	3,92	0,373	1,551	7,19	9,57	7,59	4,21
20	7,49	11,47	2,23	3,72	3,51	0,77	1,15	0,37	3,3	1,64	3,567
25	2,93	4,31	0,41	0,94	1,92	2,44	2,88	4,18	4,28	4,83	2,913
30	12,03	9,62	7,36	5,86	2,98	0,63	0,4	0,59	2,34	1,32	4,313

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Расчет силы, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости в присутствии неоднородного магнитного поля // Сборник научных трудов междунар. н.-т. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии». – 2011. – Т. 3. – С. 158–161.
2. Страдомский Ю.И., Филиппов В.А. Проектный расчет магнитожидкостного сепаратора дисперсных немагнитных материалов // Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения). – 2017. – Т. 3. – С. 211–214.
3. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. – Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ, 2011. – 264 с. ISBN 978-5-89482-772-8.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В ТЯЖЕЛОМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ НА РАБОТУ МАГНИТНОГО РАСХОДОМЕРА**

**Н.М. Сапожников, Р.В. Сумин, С.В. Колосов**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
ИЯЭиТФ, АТС, М24-ТС*

Научный руководитель: Т.А. Бокова, к.т.н., доцент АТС ИЯЭиТФ НГТУ

Ядерная энергетика имеет ряд преимуществ перед традиционными источниками энергии. В их числе экологичность, безопасность, а также высокие значения коэффициента использования установленной мощности АЭС. Сегодня особое внимание в мире уделяется реакторам с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ). К основным преимуществам ТЖМТ перед другими теплоносителями относят высокую температуру кипения, невысокое давление в корпусе реактора и др.

Сейчас в России активно ведется работа по усовершенствованию и монтажу реакторных установок, таких как БРЕСТ-ОД-300, БР-1200 (свинец) и СВБР (свинец-висмут). Данные типы реакторов отвечают стандартам пассивной, а также имеют более высокий КПД по сравнению с существующими водо-водяными ядерно-энергетическими установками (ЯЭУ). В свою очередь, для стабильной работы любой ЯЭУ необходимо непрерывный контроль параметров теплоносителя. В числе важнейших параметров для любой ЯЭУ является расход теплоносителя, ввиду наличия необходимости в постоянном отводе теплоты от активной зоны реактора.

Одним из возможных средств, позволяющих проводить контроль расхода ТЖМТ является магнитный расходомер. В таком устройстве преобразование значения расхода в сигнал происходит на основе закона электромагнитной индукции Фарадея.

Увеличение или уменьшение концентрации кислорода в ТЖМТ приводит к изменению толщины оксидной пленки на конструкционном материале трубопровода. Из-за роста толщины оксидных пленок, в свою очередь, растет контактное сопротивление между ТЖМТ и конструкционным материалом трубопровода.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева было проведено экспериментальное исследование на высокотемпературном стенде со свинец-висмутовым теплоносителем влияния концентрации кислорода в ТЖМТ на работу магнитного расходомера.

В ходе эксперимента расход теплоносителя измерялся объемным методом с помощью мерного бака. Начало и конец отсчета времени заполнения контролировались по работе электроконтактных датчиков уровня. Каждый из электроконтактных датчиков фиксирует конкретный уровень жидкой эвтектики свинец-висмут в мерном баке.

Возникающая при циркуляции токопроводящей жидкости в магнитном поле разность потенциалов снималась с помощью двух электродов магнитного расходомера, приваренных к наружной стенке трубопровода.

Регулирование концентрации кислорода в ТЖМТ осуществлялось с помощью водородной регенерации. Водород подавался в толщу теплоносителя в буферной емкости. При этом регенерация проходила более эффективно за счет осуществления непрерывной циркуляции теплоносителя по стенду. Термодинамическая активность кислорода в свинец-висмутовом теплоносителе, которая прямо-пропорциональна концентрации кислорода в нем, отслеживалась с помощью датчика активности кислорода (ДАК) разработанного в ФЭИ.

Изменение показаний, снимаемых с магнитного расходомера при изменении термодинамической активности кислорода в режиме водородной регенерации, происходило при неизменной гидравлической характеристике трассы и показано на рис. 1.

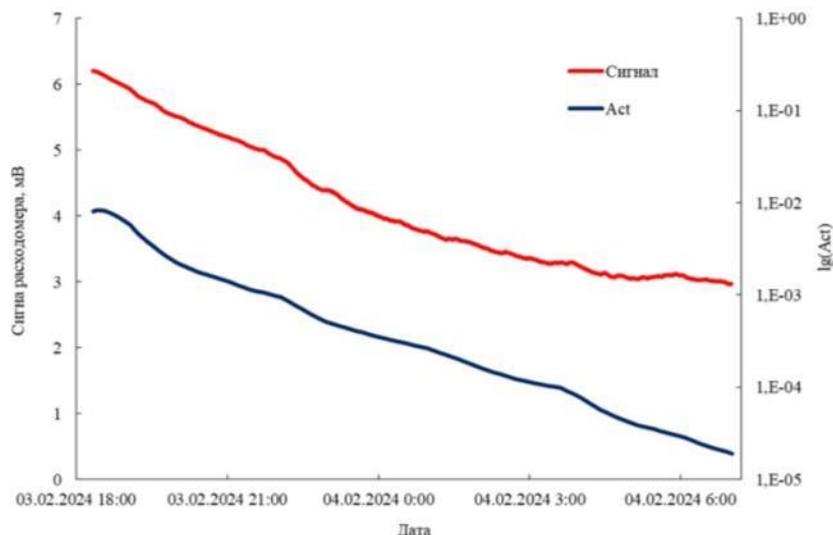


Рис. 1. Зависимость сигнала магнитного расходомера от термодинамической активности кислорода в режиме регенерации сплава водородом

Итоговые результаты тарировки магнитного расходомера для различных значений термодинамической активности кислорода представлены в табл. 1. Коэффициент пропорциональности для каждого из исследуемых кислородных режимов определен аналитически с помощью аппроксимации методом наименьших квадратов.

Таблица 1. Результаты тарировки магнитного расходомера

Термодинамическая активность кислорода	Сигнал магнитного расходомера, мВ	Объемный расход теплоносителя, л/мин	Коэффициент пропорциональности, л/(мин·мВ)
$a=10^0$	2,13	60,62	28,7
	1,10	34,10	
	0,88	23,36	
$a=10^{-3}-10^{-4}$	2,74	62,00	22,7
	1,79	40,37	
	1,00	23,23	
$a=10^{-4}-10^{-5}$	1,85	59,64	32,2
	1,05	33,52	
	0,75	24,90	

На рис. 2 показаны зависимости сигнала магнитного расходомера от расхода при различных кислородных режимах.

Магнитный расходомер, применяемый в данной работе, использован для получения экспериментальных данных, позволяющих изучить зависимость величины сигнала расходомера от расхода для различных значений термодинамической активности кислорода. Полученные значения позволяют оценить то, как кислородный режим влияет на величину сигнала магнитных расходомеров, используемых для ТЖМТ.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере

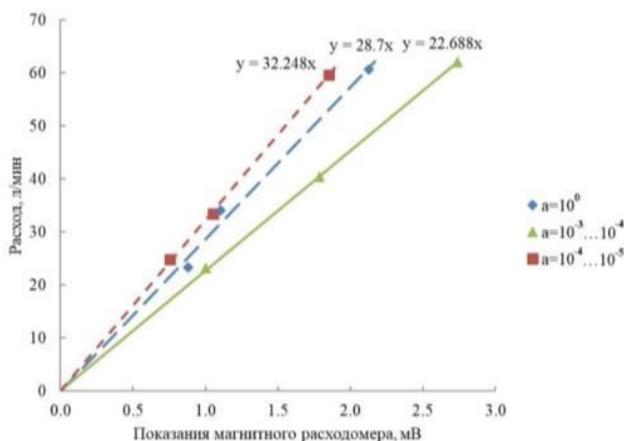


Рис. 2. Зависимость сигнала магнитного расходомера от расхода при различных кислородных режимах

научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной технике. – М.: Изд-во АТ, 2007. – С. 434.
2. Адамов Е.О., Большов Л.А., Ганев И.Х. и др. Белая книга ядерной энергетики. – М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001. – 269 с.
3. Джангобеков В.В., Степанов В.С., Дедуль А.В., Климов Н.Н., Болванчиков С.Н., Вахрушин М.П. Реакторная установка СВБР-100 для модульных атомных станций малой и средней мощности // Сборник трудов четвертой конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2013)» .– Обнинск: АО «ГЦН РФ – ФЭИ», 2013, С. 81–91.
4. Безносков А.В., Бокова Т.А. Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011.
5. Магнитный расходомер для быстрых натриевых реакторов / И. Д. Вельт, Е. А. Дьяконова, Ю. В. Михайлова, Н. В. Терехина // Атомная энергия. – 2017. – Т. 122, № 4. – С. 203–209.
6. Кириллов П. Л., Колесников В. Д., Кузнецов В. А., Турчин Н. М. Приборы для измерения давления, расхода и уровня расплавленных щелочных металлов // Атомная энергия. Том 9, вып. 3. – 1960. – С. 173–181.
7. Давыдов В.В. Методы управления движением вектора ядерной намагниченности в текущей жидкости в спектромерах и магнитометрах: дисс. канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2017. – 339 с.
8. Асхадуллин Р.Ш., Стороженко А.Н., Шелеметьев В.М., Скоморохов А.Н., Садовничий Р.П., Легких А.Ю. Современное состояние разработок датчиков активности кислорода для реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2017. – Специальный выпуск. – С. 12–19.
9. Исследование особенностей проведения водородной очистки циркуляционных контуров со свинецсодержащими теплоносителями при помощи механических диспергаторов газовой фазы / М.М. Кошелев, В.В. Ульянов, В.С. Кремлева и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – № 3. – С. 233–244.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ВБЛИЗИ ПУТЕПРОВОДА ПРИ АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ

**Е.В. Воронина<sup>1</sup>, А.В. Крюков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Иркутский государственный университет путей сообщения, аспирант кафедры электроэнергетики транспорта, eka7erina.voronina@yandex.ru*

<sup>2</sup> *Иркутский национальный исследовательский технический университет, профессор кафедры электроснабжения и электротехники, and\_kryukov@mail.ru*

### Введение

Цель исследований, результаты которых представлены в статье, состоит в разработке цифровых моделей для определения электромагнитных полей (ЭМП), возникающих вблизи заземленных металлических конструкций в аварийных режимах тяговой сети (ТС). При коротком замыкании (КЗ) в ТС образуются ЭМП высокой интенсивности. Они действуют в течение небольшого промежутка времени, определяемого быстродействием релейной защиты, но оказывают негативное влияние на устройства, используемые в системах управления процессами перевозок. Например, импульсы магнитного поля приводят к сбоям функционирования и повреждению чувствительных электронных компонентов. На смежных линиях электропередачи и связи могут возникать наведенные напряжения, опасные для обслуживающего персонала.

Вопросам изучения влияния ЭМП посвящено большое количество работ. Так, например, результаты исследования ЭМП в пространстве между линией электропередачи и железной

дорогой представлены в работе [1]. Анализ ЭМП, создаваемого ТС железнодорожного участка выполнен в статье [2]. Вопросы электромагнитной совместимости и безопасности на трассах электрифицированных железных дорог рассмотрены в работе [3].

При КЗ контактной подвески (КП) на рельсы или землю ЭМП является плоско-параллельным и может быть рассчитано на основе аналитических выражений. Однако в практике эксплуатации ТС наблюдаются ситуации пробоя поддерживающих изоляторов и замыкание КП на детали проводящего сооружения, например, путепровода (рис. 1), гальванически связанного с рельсовым путем. В этом случае задача расчета напряженностей существенно усложняется из-за того, что ЭМП приобретает трехмерную структуру. Она может быть решена на основе метода, предложенного в работе [4] и базирующегося на концепции использования проводников ограниченной длины. Он реализован в промышленном программном комплексе Fazonord, версия 5360-2024. Ниже представлены результаты разработки цифровых моделей для определения напряженностей ЭМП при КЗ контактной подвески на металлический путепровод.

### Результаты моделирования

Рассматривалась типовая система тягового электроснабжения (СТЭ) участка магистральной железной дороги переменного тока с ТС 25 кВ. Моделировался аварийный режим, вызванный соединением контактной подвески с деталями путепровода, заземленного на рельсовый путь. При расчете ЭМП использовался подход [4], базирующийся на следующих положениях: для определения электрического поля применялся метод эквивалентных зарядов [5]. Расчеты магнитного поля выполнялись с применением соотношений Био-Савара и суммированием комплексных величин напряженностей  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  элементарных отрезков проводников ограниченной длины, имитирующих путепровод. Особенность данной методики состоит в корректном учете системных свойств моделируемого объекта; при этом вычисление напряженностей ЭМП осуществляется на основе результатов определения режимов сложной СТЭ, модель которой может включать значительное число элементов, таких как высоковольтные линии электропередачи, силовые трансформаторы, контактные сети и рельсовые нити [6].

Расчетная модель СТЭ, которая использовалась при вычислении трехмерных ЭМП вблизи путепровода (рис. 1), включала следующие элементы: эквивалентный генератор питающей электроэнергетической системы, тяговая подстанция (ТП) с трансформатором мощностью 40 МВ·А; консольный участок ТС 25 кВ протяженностью в десять километров с контактной подвеской, выполненной проводами ПБСМ-95+МФ-100. Моделирование ЭМП было проведено в двух вариантах: при нормальном и аварийном режимах работы ТС. По результатам расчетов были построены зависимости амплитуд  $E_{\max}$  и  $H_{\max}$  напряженностей ЭМП от координаты  $x$  на высотах  $y = 1,8$  м (рис. 2) и  $y = 10,8$  м (рис. 3). Первое значение координаты  $y$

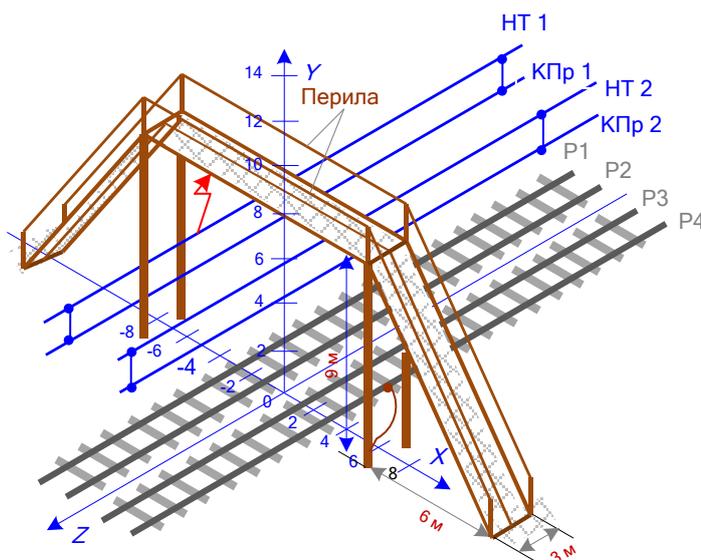


Рис. 1. Схема расположения ТС и путепровода:  
НТ – несущий трос; КПр – контактный провод;  
P1...P4 – рельсы

отвечало расположению головы человека, стоящего на земле, а второе – находящегося на путепроводе. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  от координаты  $x$ , расположенной перпендикулярно трассе дороге (рис. 1), приведены на рис. 2, 3. Сводные данные по амплитудам ЭМП представлены в табл. 1. На рис. 4, 5 показаны пространственные структуры распределения ЭМП при коротком замыкании на путепровод.

Таблица 1. Сводные данные по амплитудам ЭМП

Параметр	Показатель	Высота	
		1,8 м	10,8 м
При нормальном режиме работы ТС			
$E_m$ , кВ/м	Максимум	3,07	0,7
	Ср. значение	2,46	0,65
$H_{\max}$ , А/м	Максимум	81,02	30,61
	Ср. значение	60,83	27,34
При аварийном режиме работы ТС			
$E_{\max}$ , кВ/м	Максимум	4,16	2,39
	Ср. значение	3,18	1,98
$H_{\max}$ , А/м	Максимум	264,93	202,6
	Ср. значение	183,66	168,86

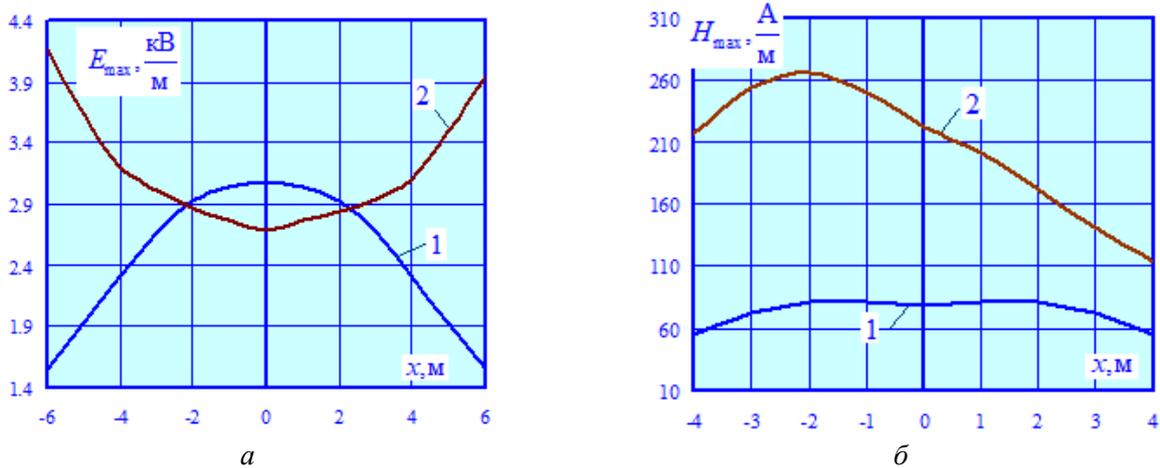


Рис. 2. Графики  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) на высоте 1,8 м:  
1 – нормальный режим работы ТС; 2 – КЗ на путепровод

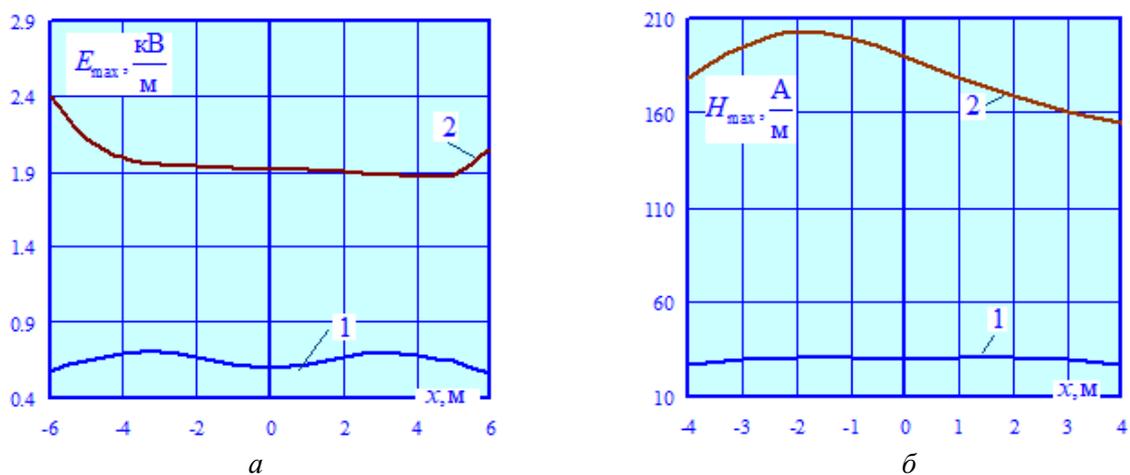


Рис. 3. Графики  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  (а) и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  (б) на высоте 10,8 м:  
1 – нормальный режим работы ТС; 2 – КЗ на путепровод

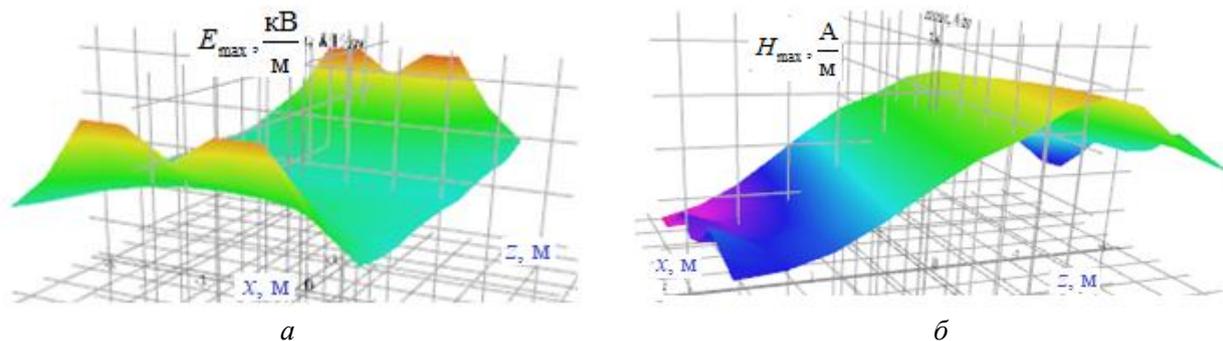


Рис. 4. Пространственные структуры распределения  $E_{\max}$  (а) и  $H_{\max}$  (б) на высоте 1,8 м при КЗ на путепровод

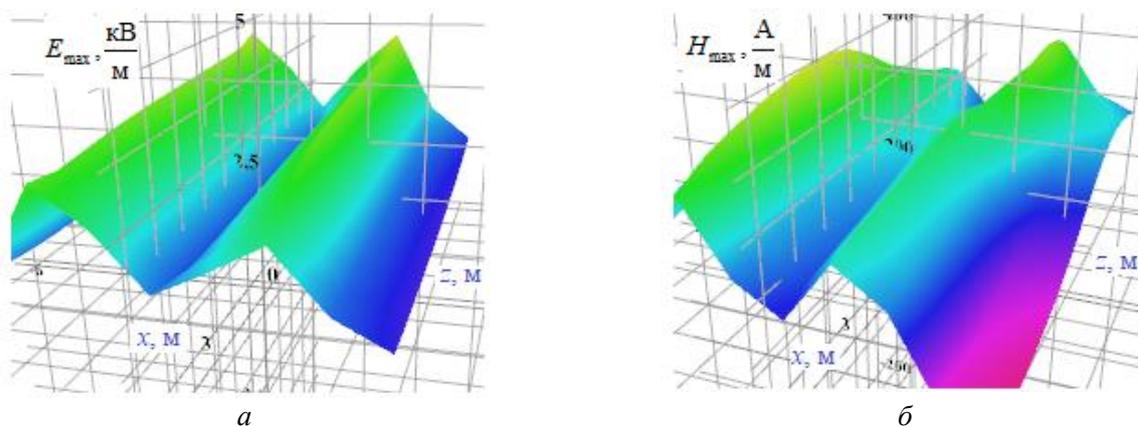


Рис. 5. Пространственные структуры распределения  $E_{\max}$  (а) и  $H_{\max}$  (б) полей на высоте 10,8 м при КЗ на путепровод

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Зависимости  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  для режима КЗ имеет выраженный нелинейный характер (рис. 2, 3).
2. Максимальные различия между графиками  $E_{\max} = E_{\max}(x)$  и  $H_{\max} = H_{\max}(x)$  в нормальном режиме и при КЗ на путепровод наблюдаются на высоте 10,8 м при  $x = -6$  м и составляют соответственно 63 и 83 % (рис. 3).
3. Под путепроводом амплитуды напряженностей ЭМП при КЗ уменьшаются; так по оси сооружения ( $z=0$  м) максимальное снижение  $dE_{\max}$  достигает: при  $y=1,8$  м – 35 %, а для  $y=10,8$  м – 15 %; максимум  $dH_{\max}$  при  $y=1,8$  м равен 16 %, а на высоте 10,8 м – 6 %.
4. Трехмерное электромагнитное поле при аварийном режиме работы тяговой сети, вызванным замыканием контактной подвески на путепровод, имеет сложную пространственную структуру, показанную на рис. 4, 5.

### Заключение

Результаты компьютерного моделирования показали, что представленная методика позволяет осуществлять корректный учет влияния проводящих сооружений на результаты определения электромагнитных полей при аварийных режимах работы тяговой сети. Алгоритм моделирования трехмерных ЭМП реализован в промышленном программном комплексе Fazonord. Его основная особенность состоит в том, что все однопроводные объекты расчетной схемы составляют единую группу элементов, создающих поле. Методика является универсальной и может использоваться для учета различных видов проводящих конструкций, к числу которых можно отнести опоры, мосты, молниеотводы, ограждения, трубопроводы и т. д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Al Dhalaan S.M., Elhirbawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway // CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology. Publisher: IEEE.
2. Oancea C.D., Calin F., Golea V. Analysis of the Influences of the Electromagnetic Field Produced by an Electrified Railway Section // 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria. – 2020. – P. 1–6. doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279005.
3. Xiaotian L., Haijing Zh., Bo Q., Bochong H. EMC in Rail Transportation // CUE2016-Applied Energy Symposium and Forum 2016: Low carbon cities & urban energy systems. Available online at www.sciencedirect.com
4. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей / System analysis and mathematical Modeling. – 2021. – № 2. – С. 145–163.
5. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / под ред. Е.С. Колечитского. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – 247 с.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск, 2005. – 273 с.

## АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАССЕЙЯНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ГИБРИДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Р.Г. Галеев

Новосибирский государственный технический университет, МиА, ТОЭ

Как известно, трансформатор функционирует на основе работы двух и более магнитосвязанных катушек индуктивности, связующим же звеном является магнитопровод. Трансформаторостроительная отрасль многие годы решает проблему по повышению эффективности магнитопровода, применяя, как конструкционные решения по уменьшению магнитных сопротивлений и потоков рассеяния, так и по увеличению магнитных свойств электротехнических сталей. Для большинства электротехнических сталей применяемых на частоте 50 Гц рабочая индукция составляет 1,3–1,6 Тл при полном насыщении 1,8–2 Тл. Увеличение рабочей индукции ведет к повышению индукции рассеяния, что в свою очередь приводит к возрастанию электродинамических усилий в обмотках трансформатора, что при неблагоприятных условиях эксплуатации может привести к межвитковым замыканиям и выходу трансформатора из эксплуатации.

Одним из методов увеличения надежности и повышения электродинамической устойчивости обмоток трансформатора, является применение сердечника с пространственной магнитной системой в совокупности с гибридным исполнением обмоток.

Принцип сверхпроводящего гибридного трансформатора заключается в использовании обмотки низкого напряжения (НН) из ВТСП [1, 2], в то время как обмотка высокого напряжения (ВН) из классического проводника. Обмотки имеют аксиальное расположение относительно друг друга

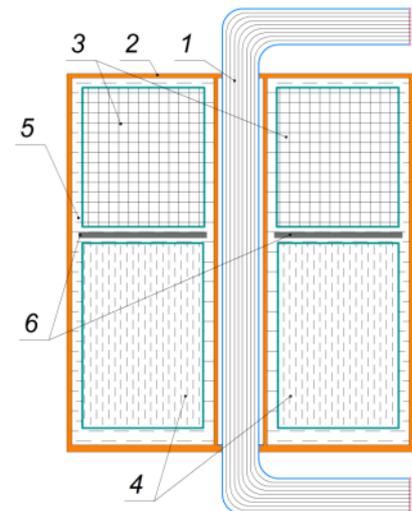


Рис. 1. Сверхпроводящий гибридный трансформатор:  
1 – магнитопровод;  
2 – криостат; 3 – обмотка высокого напряжения из материала с активным сопротивлением; 4 – обмотка низкого напряжения из ВТСП; 5 – диэлектрическая среда жидкий азот; 6 – экран из диамагнетика или сверхпроводящего материала

и погружены в криостат с криогенной жидкостью в виде жидкого азота. На Рис. 1 представлена концепция сверхпроводящего гибридного трансформатора [3, 4].

Собранный прототип СГТ, представленный на Рис. 2, позволяет провести исследование влияния ВСП устройства на повышение энергоэффективности электрических сетей и осуществить анализ магнитных потоков в магнитопроводе и в диэлектрической среде. Кроме того, верификация математической модели ВСП трансформатора позволяет провести анализ влияния ограничения токов КЗ не только на электрические системы наиболее сложных конфигураций, но и на все смежное оборудование.



Рис. 2. Испытания СГТ: а – рабочая модель СГТ в сборе; б – СГТ подключен к испытательному стенду

В математическом комплексе *ELCUT* версии «профессиональная» методом конечных элементов, построена двухмерная модель трансформатора с плоской и пространственной магнитной системой [5–7]. Магнитный моток пространственного сердечника намагничивается одинаково относительно друг друга и поэтому достаточно рассмотреть две фазы для получения необходимых значений индукции, как представлено на Рис. 3 аналогичная картина будет и для фаз В, С и А, С.

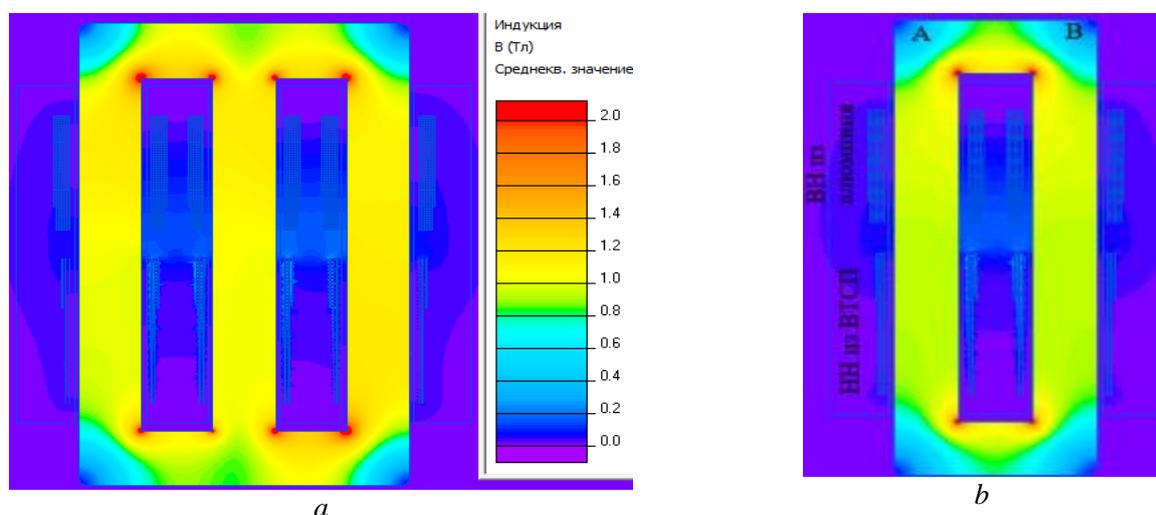


Рис. 3. Магнитные потоки СГТ:  
а – плоская магнитная система; б – пространственная магнитная система

На цветовой диаграмме индукции магнитных потоков в плоской магнитной системе (а) наглядно видно воздействие поля рассеяния фаз А и С на среднюю фазу В. Обратная картина наблюдается в пространственном магнитопроводе (б). Симметричная магнитная система приводит к тому, что магнитные потоки фаз пространственного сердечника образуют симметричное поле рассеяния, но при этом каждая фаза воздействует на две другие [8, 9].

Известно, что критическое значение тока ВТСП зависит от воздействия внешней магнитной индукции, следовательно, меньшее воздействие потоков рассеяния СГТ позволит увеличить устойчивость обмотки ВТСП в сверхпроводящем состоянии и повысить значение критического тока нагрузки.

### Выводы

Впервые предложен разработанный действующий прототип трехфазного сверхпроводящего трансформатора мощностью 25 кВА с диэлектрической криогенной средой в виде жидкого азота, гибридным исполнением обмоток и пространственной магнитной системой.

Выполнено исследование влияния на критический ток, выхода из сверхпроводимости ВТСП обмоток плоской и пространственной магнитной системы. Показано, что симметричная магнитная система снижает магнитное поле рассеяния и тем самым увеличивает критический ток на 5–10 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: МЦНМО, 2000. – XIV + 402 с.: ил. Библиогр.: 379 с.
2. СуперОкс: [сайт]. – 2023. – URL: <http://www.superoh.ru/> (дата обращения: 01.05.2023). – Текст: электронный.
3. Сверхпроводящий гибридный трансформатор: пат. Рос. Федерации, № 2815169 С1, заявл. 26.09.2023, опубл. 12.03.2024В.
4. Манусов В.З., Галеев Р.Г. Высокотемпературный сверхпроводящий трансформатор, работающий на повышенной частоте переменного тока // Проблемы региональной энергетики. – 2023. – V. 60, №. 4. – С. 43–54. DOI: 10.52254/1857-0070.2023.4-60.04.
5. ELCUT: Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6. Руководство пользователя. – Издательские решения, 2023, 290 с
6. Sissimatos E. Technik und Einsatz von hochtemperatur-supraleitenden Leistungstransformatoren. Dissertation. Universität Hannover, 2005.
7. Манусов В.З., Павлюченко Д.А., Ахьеев Дж.С. Анализ процессов ограничения токов короткого замыкания трансформатором с высокотемпературными сверхпроводящими обмотками // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 1(33). – С. 1–7. doi.org/10.5281/zenodo.1193551
8. Chu C., High W. Temperature Superconducting Materials: A Decade of Impressive Advancement // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – June 1997. – V. 7, No. 2.
9. Angeli G. Status of Superconducting Fault Current Limiter in Italy: Final Results from the In-Field Testing Activity and Design of the 9kV/15.6MVA Device // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2016. – V. 26. – P. 9.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

А.Е. Крюков

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
[appleforevor@mail.ru](mailto:appleforevor@mail.ru)*

### Введение

Для повышения пропускной способности, снижения потерь и улучшения качества электрической энергии планируется применять компактные линии электропередачи (КВЛ). Они отличаются от типовых ЛЭП более сложными конфигурациями расположения токоведущих частей, обеспечивающими концентрацию электромагнитного поля. Кроме того, с помощью изо-

ляционных расporок между проводами достигается уменьшение междуфазных расстояний. Вблизи КВЛ могут проходить трассы магистральных трубопроводов (МТ) с заземленными стальными трубами. Из-за значительной передаваемой мощности КВЛ могут создавать на МТ опасные наведенные напряжения (НН). Еще один негативный фактор заключается в протекании токов, которые приводят к сбоям систем защиты от электрохимической коррозии.

Задачам определения электромагнитных влияний ЛЭП различного типа на протяженные металлические сооружения посвящено большое число работ, часть из которых представлена в библиографическом списке. Так, например, в [1] показано, что удары молнии по проводам ЛЭП могут вызвать высокие НН на металлических деталях трубопровода. В [2] предлагается аналитический подход, использующий цепочечные модели и применимый для расчета переходного НН на МТ из-за индуктивной связи. В [3] представлена модель МТ, которая учитывающая взаимодействие между ним и соседними ЛЭП высокого напряжения. В [4] рассмотрены вопросы защиты МТ от негативного влияния ЛЭП переменного тока. Для снижения НН предложено использовать экранирующий проводник, проложенный рядом с трубами. В [5] исследуется влияние ЛЭП переменного и постоянного тока сверхвысокого напряжения на соседние МТ. В [6] предлагается применять заземляющие проводники для снижения влияний ЛЭП на МТ в режимах короткого замыкания. Показано, что при увеличении точек заземления потери в ЛЭП будут возрастать, однако заметно снизится уровень НН. На основе разработанных эквивалентных моделей многослойного грунта в [7] проведен детальный анализ НН переменного тока на подземном МТ для различных условий эксплуатации.

Анализ опубликованных работ, посвященных проблеме влияний ЛЭП на протяженные металлоконструкции, дает возможность сделать вывод о том, что универсальная методика расчета НН пока не реализована. Для ее формирования могут использоваться методы и средства моделирования ЭЭС в многофазной постановке [7]. Результаты разработки компьютерных моделей и расчёты наведенных напряжений и токов на МТ за счёт КВЛ представлены ниже.

### Методика и алгоритм моделирования

Преимуществом метода фазных координат, реализованного в ПК Fazonord [8], является то, что на их основе можно осуществлять корректное моделирование НН применительно к моделям линий передач 220 кВ компактного типа. Расположение токонесущих частей показано на рис. 1. Моделирование осуществлялось для следующих режимов: симметричный с нагрузками  $150 + j90$  МВ·А на приемном конце; неполнофазный с аналогичными нагрузками. Предполагалось, что в одном пространственном коридоре с КВЛ проложен стальной МТ диаметром 250 мм, имеющий стационарные заземлители с сопротивлением 10 Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление МТ 0,005 См/км. Для сравнительного анализа проведено моделирование ЛЭП 220 кВ типовой конструкции.

На рис. 2, 3 приведены графики

$$U = U(x);$$
$$I = I(x),$$

где  $U, I$  – соответственно, НН и токи, наведенные на МТ;  $x$  – координата продольной оси.

Представленные выше результаты дают возможность сформулировать следующие выводы:

1) расчётное значение НН в нормальном режиме (рис. 2, а) не превосходит допустимой величины 60 В; наибольшие НН создаются типовой ЛЭП и двухсегментной КВЛ коаксиального типа;

2) при неполнофазном режиме (рис 2, б) конструкция ЛЭП практически не влияет на НН; величины НН существенно превосходят допустимый уровень по ТRL-71.

3) токи, протекающие по трубе в симметричном и неполнофазном режимах (рис. 3) могут оказывать негативное влияние на электрохимическую защиту трубопровода.

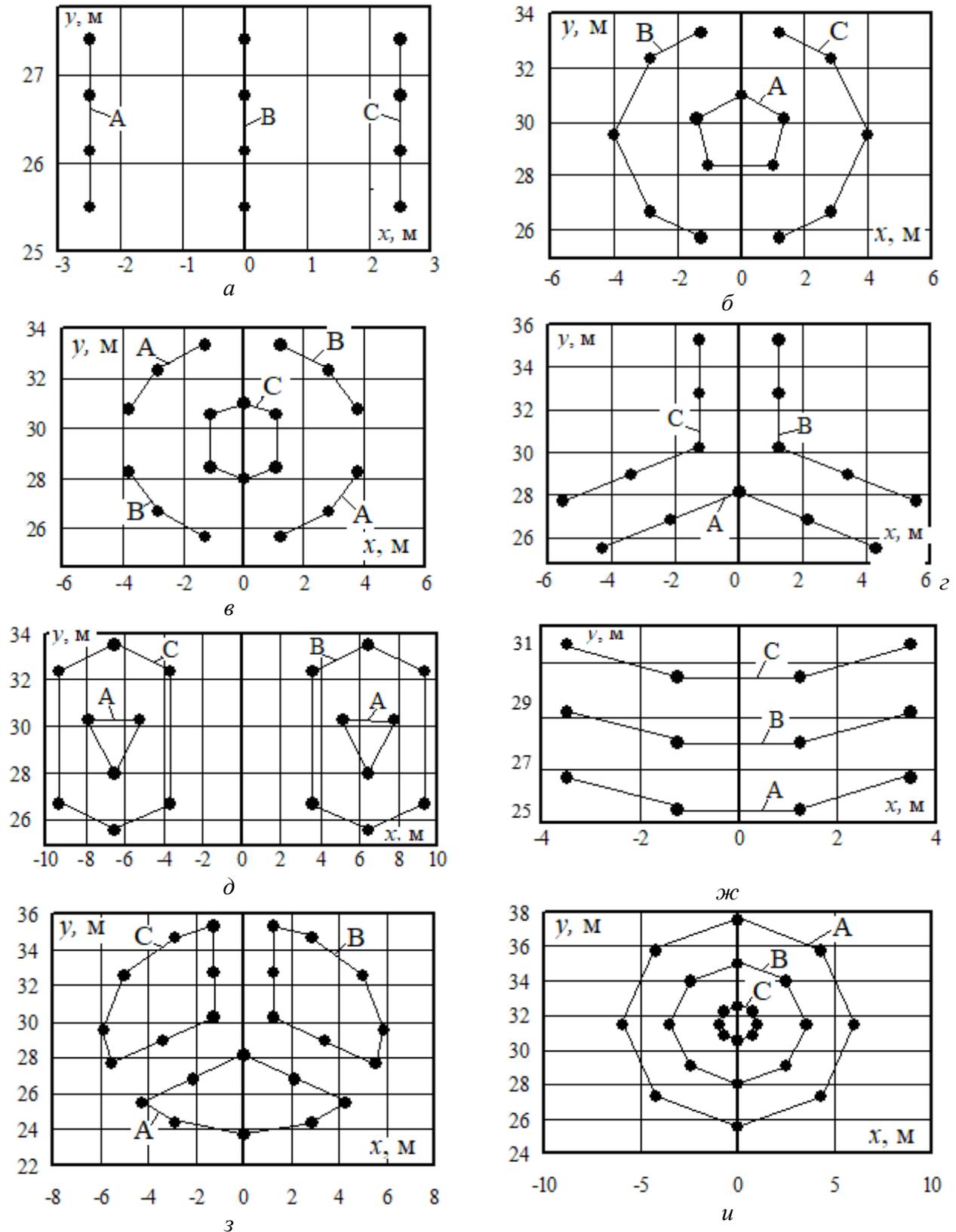


Рис. 1. Расположение проводов КВЛ:  
 а – с вертикальным расположением проводов; б – коаксиальная двухсегментная;  
 в – коаксиальная четырехсегментная; г – треугольная; д – двойная коаксиальная;  
 е – параболическая; ж – трехсегментная; з – концентрическая

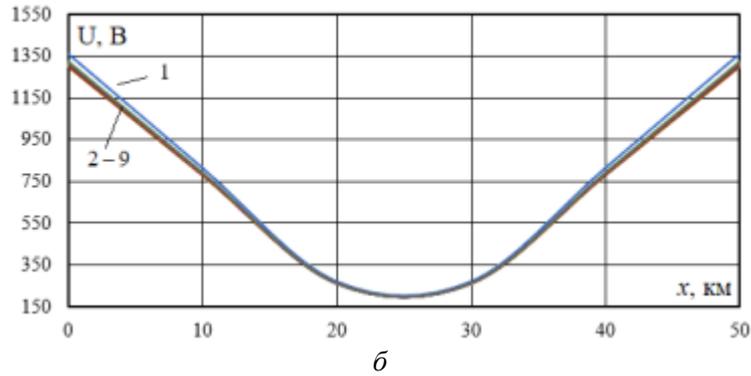
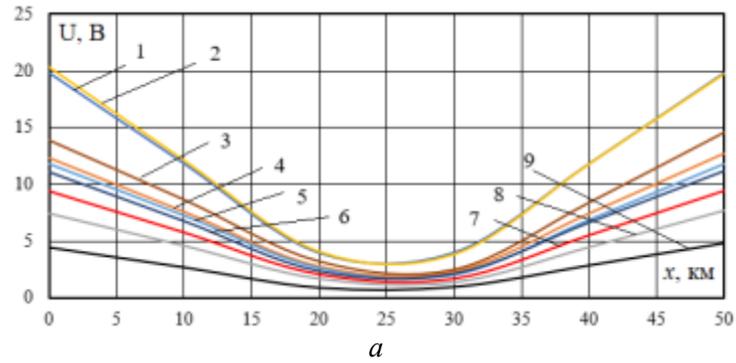


Рис. 2. Наведенные напряжения на трубопровод:  
а – симметричный режим; б – неполнофазный режим. Цифрами обозначены:  
1 – типовая двухцепная ЛЭП; 2 – коаксиальная двухсегментная;  
3 – коаксиальная четырёхсегментная; 4 – коаксиальная двойная; 5 – концентрическая;  
6 – параболическая; 7 – с вертикальным расположением проводов;  
8 – трехсегментная; 9 – треугольная

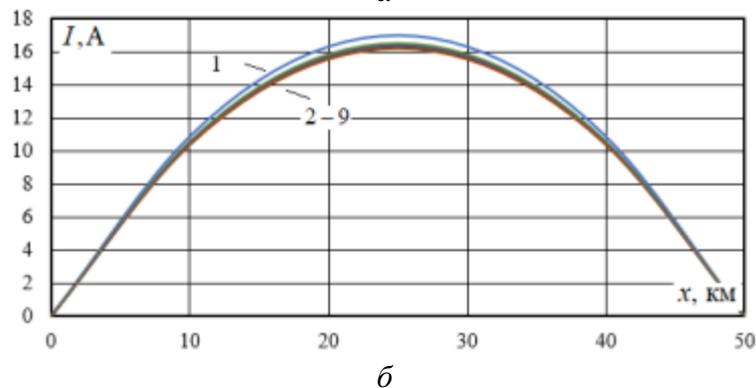
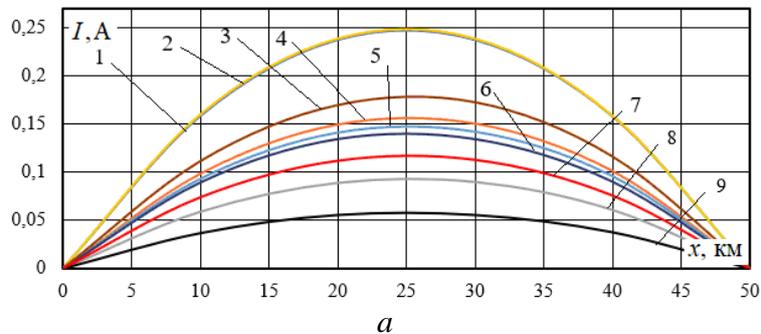


Рис. 3. Зависимости токов, протекающих по трубе, от координаты  $x$ :  
а) для симметричного режима; б) для неполнофазного режима.  
Цифровые обозначения аналогичны рис. 1

### Заключение

На основе технологий определения режимов ЭЭС в фазных координатах сформированы модели, дающие возможность адекватного учета конструкции ЛЭП при определении НН на трубопроводах. Они позволяют осуществлять выбор организационных и технических мероприятий по обеспечению электробезопасности и повышению надежности систем электрохимической защиты МТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Papadopoulos T.A., Datsios Z.G., Chrysochos A.I., Martins-Britto A.G., Papagiannis G.K., Transient induced voltages on above-ground pipelines parallel to overhead transmission lines // *Electric Power Systems Research*. – 2023. – V. 223.
2. Wu X., Zhang H., Karady G.G. Transient analysis of inductive induced voltage between power line and nearby pipeline // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2017. – V. 84. – P. 47–54.
3. Al-Gabalawy M.A., Mostafa M.A., Hamza A.S., Hussien Sh.A., Modeling of the KOH-Polarization cells for mitigating the induced AC voltage in the metallic pipelines // *Heliyon*. – 2020. – V. 6, Iss. 3.
4. Мокроусова Ю.В., Мюльбаер А.А. Применение компенсирующих проводников для снижения магнитного влияния линий электропередачи на магистральные трубопроводы // *Актуальные проблемы электронного приборостроения*. Новосибирск. – 2018. – С. 257–261.
5. AlShahri A.S. Analysis of Induced Potential on Gas/Water Pipelines due to Extra High Voltage AC/DC OHTL // *2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON)*, Riga, Latvia. – 2022. – P. 1–6.
6. Hu X., Wang Y., Xi X., Guo Y. Impact of Overhead Grounding Wire Arrangement on Induced Voltage of Adjacent Pipelines // *2023 IEEE International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP)*, Xuchang, China. – 2023. – P. 554–558.
7. Czumbil L., Şteţ D., Micu D.D., Țopa V., Ancăş L. Stream gas pipeline in proximity of high voltage power lines. Part II – Induced voltage evaluation // *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Uxbridge, UK. – 2012. – P. 1–6.
8. Закарюкин В.П.; Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. – Иркутск, 2005. – 273 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА САМОЗАПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВОДЯНОГО НАСОСА

Д.А. Хнычев

АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
ИЭТЭ, ЭМЭЭА, группа ЭЛ-11м-23

Научный руководитель: А.А. Кириякин, к.т.н., доцент ЭМЭЭА НИУ «МЭИ», ведущий инженер,  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

В разных отраслях промышленности самозапуск центробежных насосов имеет ключевое значение, особенно в тех производственных процессах, где даже кратковременное прекращение подачи воды может вызвать аварийные ситуации. Для обеспечения бесперебойного водоснабжения создаются резервные напорные емкости и аналогичные конструкции, способные накапливать воду. Применение самозапуска электрического центробежного насоса для воды (ЭЦВ) позволяет отказаться от резервных источников воды во время отключений электроэнергии [1].

Под самозапуском понимается процесс автоматического возвращения электродвигателя в номинальный режим после кратковременного отключения питания или значительного падения напряжения без участия обслуживающего персонала. Этот процесс заключается в том, что двигатель, снижая частоту вращения во время отключения от источника питания или при падении напряжения, не отключается защитными устройствами [2].

Для изучения процесса самозапуска погружного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, работающего вместе с насосом, была разработана математическая модель в среде *MATLAB Simulink* (рис. 1).

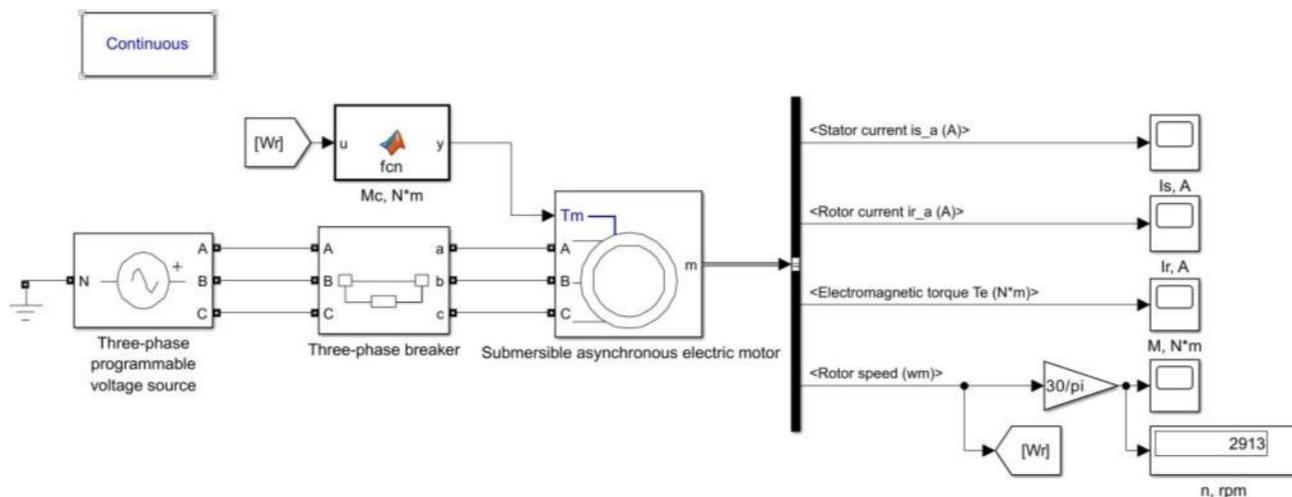


Рис. 1. Имитационная модель для исследования самозапуска погружного асинхронного двигателя в составе ЭЦВ

Данная модель содержит ключевые элементы, необходимые для анализа поведения электродвигателя при временном отсутствии электропитания: трехфазный источник напряжения, трехфазный выключатель, осциллографы и виртуальную модель асинхронного электродвигателя. Блок трехфазного выключателя состоит из трех идеальных ключей, управляемых таймером. Нагрузка вентилятора на вал двигателя задается через блок *Function*. Блок *Goto* передает текущее значение частоты вращения ротора в блок *Function*.

Параметры электродвигателя, используемого в насосе ЭЦВ 6-6,3-85, необходимые для моделирования, были вычислены по методикам, изложенным в [3, 4], и приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры погружного асинхронного двигателя насоса ЭЦВ 6-6,3-85

Параметры	Значение
Номинальная мощность $P_n$ , кВт	2,8
Номинальное линейное напряжение $U_n$ , В	380
Частота сети $f$ , Гц	50
Активное сопротивление статора $R_1$ , Ом	1,53
Индуктивность рассеяния статора $L_1$ , мГн	5,28
Приведенное активное сопротивление ротора $R_2$ , Ом	1,2
Приведенная индуктивность рассеяния ротора $L_2$ , мГн	9,94
Взаимная индуктивность $L_m$ , Гн	0,24
Суммарный момент инерции двигателя и нагрузки $J_\Sigma$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0063
Коэффициент трения $F$ , Н·с	0,0023
Число пар полюсов $p$	1

На основе проведенного моделирования было установлено критическое время отсутствия питания двигателя, составляющее 0,46 с. Если время отключения увеличивается, то самозапуск становится невозможен, а при отказе защитных устройств двигатель может перейти в режим короткого замыкания при номинальном напряжении, что приведет к повреждению насосного агрегата.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока статора  $I_1$  (А), электромагнитного момента  $M_2$  (Н·м) и частоты вращения ротора  $n_2$  (об/мин) в зависимости от времени  $t$  (с) при длительности отсутствия питания 0,46 с.

Прямой запуск электродвигателя выполняется в течение 0,6 с, после чего моделируется аварийная ситуация, заключающаяся в отключении всех трех фаз питания. Это достигается путем открытия ключей, после чего напряжение восстанавливается за счет их замыкания.

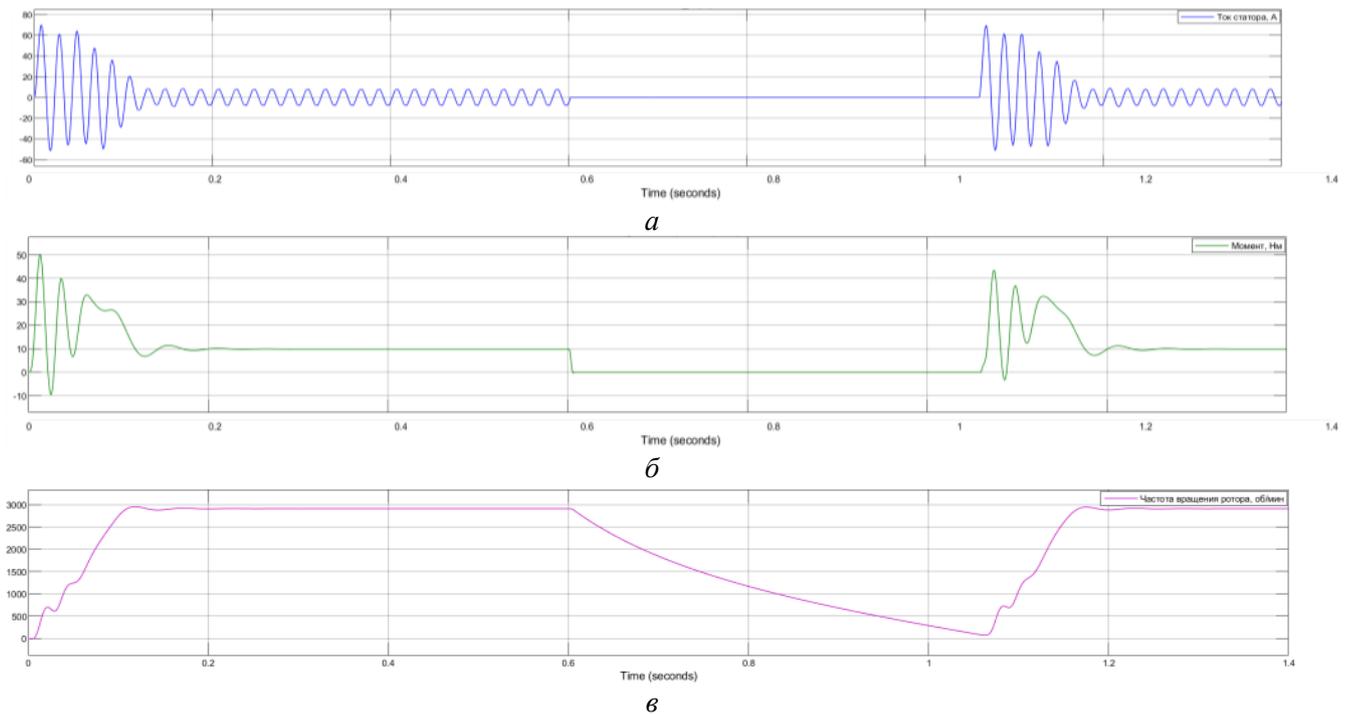


Рис. 2. Осциллограммы при самозапуске насосного агрегата:  
а – зависимость  $I_1(t)$ ; б – зависимость  $M_3(t)$ ; в – зависимость  $n_2(t)$

Амплитуда ударного тока при пуске составляет 69,7 А, а при самозапуске – 68,36 А. При пуске двигатель выходит на свою номинальную скорость вращения за 0,24 с, а после восстановления питания – за 0,215 с.

Созданная имитационная модель погружного асинхронного двигателя в связке с центробежным насосом даёт возможность исследовать процесс самозапуска и определять оптимальное время для настройки защитного оборудования. Это важно для повышения надёжности работы всей системы и минимизации рисков, возникающих вследствие сбоев в подаче электроэнергии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голоднов Ю.М., Хоренян А.Х. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергия, 1974. – 144 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. – М.: Энергоиздат, 1955. – 303 с.
3. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2015. – 767 с.
4. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М. Погружные асинхронные электродвигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

## РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ОБОЛОЧКИ СУДОВОГО КАБЕЛЯ

М.Д. Жульмина

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-27

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Увеличения глубины погружения глубоководных аппаратов (ГПА) и подводных судов, обуславливает необходимость создания соответствующих конструкций кабельных изделий.

Методика расчета толщины оболочки для судовых кабелей, под воздействием экстремально-го гидростатического давления на сегодняшний день однозначно не сформулирована, поэтому данный вопрос требует проработки и рассмотрения подходов к данному вопросу из смежных отраслей.

При выборе толщины оболочки важно обратить внимание на достаточную механическую прочность и технологичность оболочки. Из-за жестких условий эксплуатации толщина оболочки судовых кабелей выбирается несколько большей, чем у аналогичных несудовых. Базовая формула для определения минимальной, но достаточной толщины стенки цилиндра (идеальной оболочки кабеля) под воздействием внешнего гидростатического давления, выводится из уравнения внешнего давления:

$$t = \frac{P \cdot r}{2 \cdot \sigma}, \quad (1)$$

где  $t$  – необходимая толщина оболочки кабеля;  $P$  – гидростатическое давление;  $r$  – внутренний радиус кабеля;  $\sigma$  – допустимое напряжение для материала оболочки.

Данная формула основывается на теории о тонкостенном цилиндре и справедлива для тонкостенных цилиндрических сосудов высокого давления, подвергающихся воздействию внешнего радиального давления (оболочка кабеля рассматривается как цилиндр). К тонкостенной осесимметричной цилиндрической оболочке относится оболочка, имеющая форму тела вращения, т. е. оболочка полярно симметричная относительно некоторой оси.

Для применения теории о тонкостенном цилиндре необходимо выполнения следующих условий:

внешнее радиальное гидростатическое давление прикладывается равномерно вдоль радиального направления;

оболочка моделируется как тонкостенный цилиндрический сосуд под давлением, где  $D/t$  мало (обычно менее 1/10), поэтому допущения о тонкостенности остаются действительны;

материал ведет себя упруго, и допустимое напряжение – это максимальное напряжение, которое может выдержать материал оболочки без повреждений.

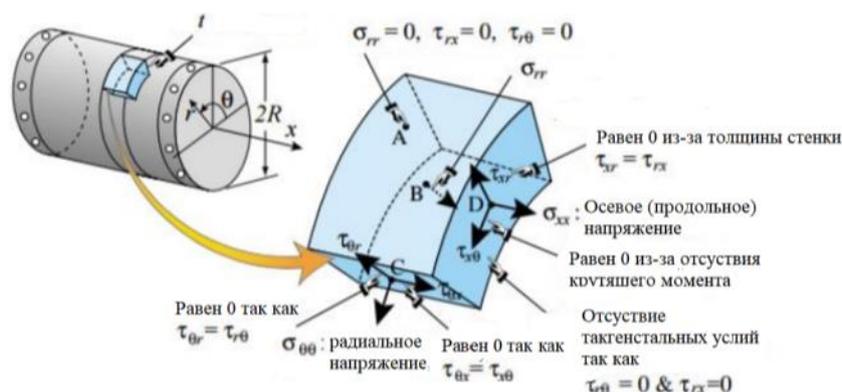


Рис. 1. Элемент стенки тонкостенного цилиндра под давлением

На сегодняшний момент помимо базовой формулы существуют еще несколько подходов к расчету толщины оболочки судового глубоководного кабеля, однако они основаны на прошлых наработках и эмпирическом подборе.

Уравнение нагрузки, используемое в [1], для расчета толщины трубопровода, надлежащего под воздействие внешнего гидростатического давления представляет собой уравнение Хагсмы, определяемое как

$$(p_c - p_{el}) \cdot (p_c^2 - p_p^2) = p_c \cdot p_{el} \cdot p_p \cdot f_o \cdot \frac{D}{t}. \quad (2)$$

В вышеизложенном уравнении:  $p_c$  – предельное давление разрушения;  $p_{el}$  – давление упругого сжатия;  $p_p$  – давление пластического разрушения;  $f_o$  – овальность поперечного сечения кабеля;  $D$  – номинальный наружный диаметр кабеля;  $t$  – номинальная толщина кабеля (трубы).

Овальность можно определить как

$$f_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D}. \quad (3)$$

Здесь  $D_{\max}$  и  $D_{\min}$  – максимальный и минимальный внешний диаметр кабеля соответственно, где  $D$  – номинальный внешний диаметр.

Стоит отметить, что существует другая формула для определения овальности, определяемое как

$$f_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}. \quad (4)$$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems: offshore standard. – Baerum: Det NorskeVeritas, 2012. – 367 с.
2. Расчет на прочность тонкостенных оболочек вращения и толстостенных цилиндров: учебное пособие / сост.: В.Ф. Першин, Ю.Т. Селиванов. – Тамбов : Из-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 20 с.
3. Björn Fallqvist. Collapse of thick deepwater pipelines due to hydrostatic pressure: Master thesis report. – Stockholm, 2009. – 74 p.
4. Конструирование и расчет элементов тонкостенных сосудов: учебное пособие / С.Н. Виноградов, К.В. Таранцев. – Пенза: Из-во Тамб. гос. ун-та, 2004. – 20 с.

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ МАССЫ ГРАФИТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РЕАКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Д.А. Корытов<sup>1</sup>, Т.С. Шляхов<sup>2</sup>, П.В. Поваляев<sup>3</sup>

*Томский политехнический университет,*

*<sup>1</sup> ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А26; <sup>2</sup> ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А22; <sup>3</sup> ИШЭ, ОЭЭ, группа А1-48*

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н, профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В настоящее время развитие методов синтеза тугоплавких, сверхтвердых материалов является важной областью развития промышленности и материаловедения, в частности. Существует большое количество методик получения материалов и исследований по их изучению. Наиболее распространёнными методами получения тугоплавких материалов являются такие методы как, металлотермическое восстановление, электролиз растворов и расплавов, метод зонной плавки [1, 2]. Также стоит отметить электродуговой метод синтеза материалов, авторами данного исследования в течение нескольких лет активно развивается данный метод [3].

Электродуговой синтез происходит в безвакуумной среде. Данный метод имеет ряд преимуществ за счет протекания реакций в атмосфере воздуха, то есть без использования защитных сред в виде вакуума или инертных газов, что значительно упрощает конструкцию установки, а также данная методика синтеза характеризуется высокой скоростью протекания процесса синтеза. Все вышеуказанные преимущества снижают энергетические и, соответственно, экономические затраты. Помимо этого, реализовано большое количество работ по получению карбидов и боридов металлов, также в процессе исследований разработано множество модификаций для реализации данной методики.

Большое внимание при изучении данного процесса уделяется вопросам повторяемости экспериментов и возможности их масштабирования. В связи с потребностью получения большого количества продукта синтеза для дальнейших исследований, возникает необходимость в проведении большого количества экспериментов и оценки расхода графитовых компонентов, используемых в экспериментах для создания реакционной зоны. Оценка изменения массы графитовых элементов в рабочем цикле дугового реактора, позволит прогнозировать и планировать процесс покупки требуемого количества расходных материалов их графита.

Поэтому целью данного исследования является оценка изменения массы графитовых элементов электродугового реактора постоянного тока.

Для исследования использовался однофазный дуговой реактор постоянного тока с вертикальным расположением электродов. Устройство включает в себя источник питания, систему перемещения (3-осевой линейный привод, оснащенный шаговыми двигателями), реакционную зону, включающую в себя стальную гильзу для установки графитовых стержней и алюминиевую пластину под установку графитовых тиглей. Для инициирования дугового разряда в установке предусмотрен источник постоянного тока (ИПТ), а именно выпрямительно-инверторный преобразователь Colt Condor 220 с встроенным регулятором рабочего тока в диапазоне от 20 до 220 А [4].

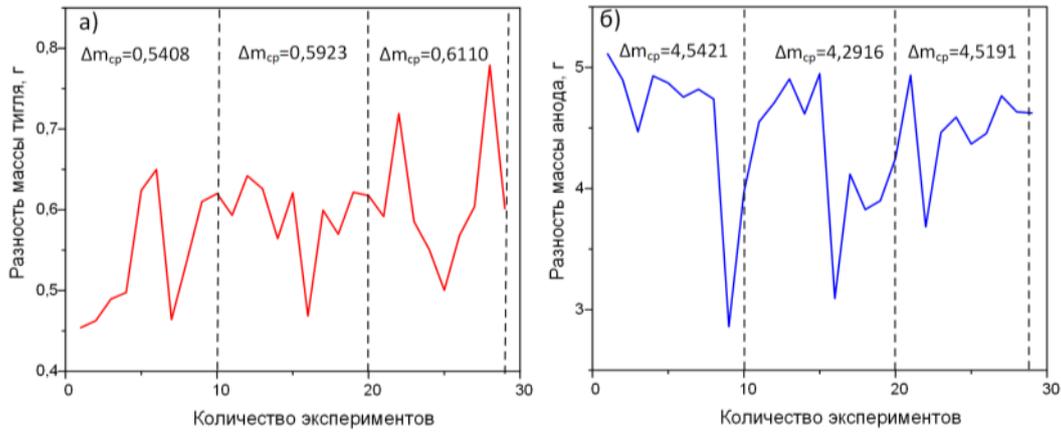
Для проведения экспериментов в графитовый тигель помещалась смесь исходных компонентов, после чего данный тигель закрывался графитовой крышкой и помещался в тигель большего размера. После чего тигли устанавливались в посадочное отверстие на алюминиевой пластине. Соосно сверху над внутренним тиглем с крышкой устанавливался графитовый электрод. После чего запускался ИПТ, устанавливались необходимые параметры силы тока и продолжительности дуговой стадии. После выбора параметров синтеза, посредством шагового двигателя графитовый электрод перемещался до контакта с графитовой крышкой. После кратковременного контакта электрод отводился на заданное расстояние, в результате чего происходил процесс инициирования дугового разряда. По завершении заданного времени горение дугового разряда прекращалось путем перемещения электрода в начальное положение. Для проведения экспериментов использовались графитовые элементы следующих размеров: внутренний графитовый тигель (20 мм высота, 20 мм диаметр, внутренний диаметр 14 мм); внешний графитовый тигель (40 мм высота, 30 мм диаметр и 22 мм внутренний диаметр); крышка 20 мм диаметр, 5 мм толщина; графитовый электрод длиной 100 мм и диаметром 8 мм.

Для оценки изменения массы графитовых элементов реактора в процессе экспериментов осуществлялись измерения масс каждого компонента до и после эксперимента с помощью аналитических весов Ньютон ГЛС. Все эксперименты проводились при максимальных параметрах реактора – значении силы тока ИПТ 220 А и времени дуговой стадии 60 с. Для регистрации электрических параметров и расчета количества подведенной энергии использовали осциллограф Rigol DS1052E.

По результатам измерений выявлено, что наибольшему изменению по массе подвержены внешний графитовый тигель и графитовый электрод, поэтому оценка изменения массы проводилась для данных элементов. На рисунке 1 представлены графики зависимостей разности масс внешнего графитового тигля и электродов полученных при вычислении разности масс соответствующих элементов до и после процесса синтеза.

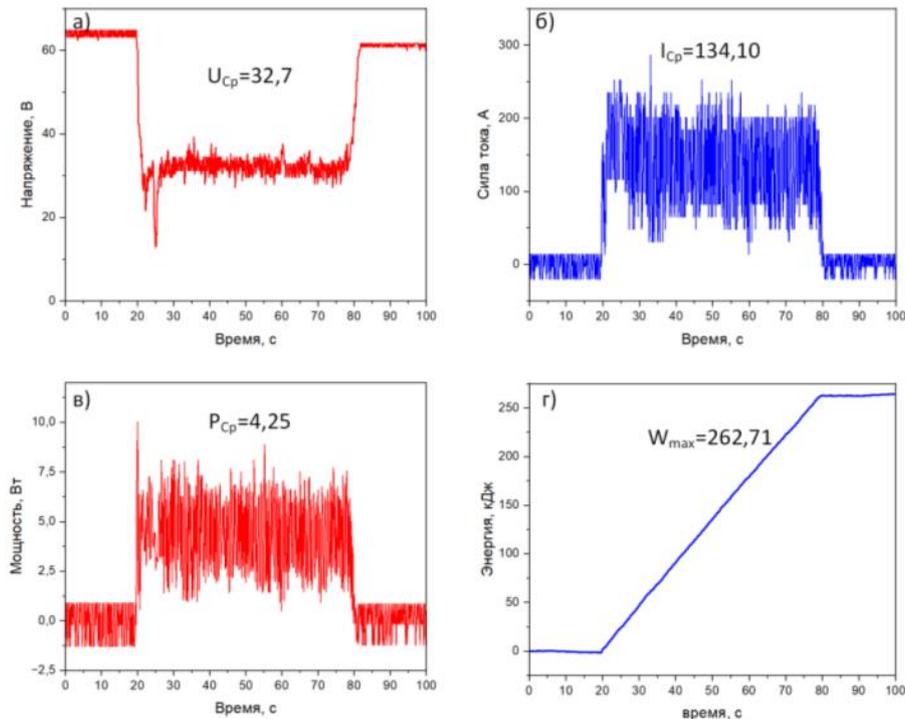
Стоит отметить, что один тигель использовался для проведения 29 экспериментов, дальнейшее использование приводило к нарушению целостности стенок тигля. По данным расхода массы графитового тигля (рис. 1, а), видно, что масса тигля уменьшается равномерно в течение 29 экспериментов, однако, увеличение количества экспериментов приводит к увеличению среднего расхода графитового тигля. Если за первые 10 экспериментов  $\Delta m_{cp}=0,54$  г, то за последние 10 опытов данное значение увеличивается до 0,61 г. Данный эффект можно объяснить тем, что с увеличением количества экспериментов масса тигля снижается, что

приводит к уменьшению стенок тигля и соответственно к ускоренному нагреву и разрушению графитового тигля. Известно, что при работе дугового реактора в атмосфере воздуха происходит разрушение внешних стенок графитового тигля, в результате чего выделяющийся углерод, взаимодействуя с кислородом, образует соединение монооксида  $\text{CO}_2$  и оксида углерода  $\text{CO}$ , что способствует формированию экранирующей газовой среды вокруг реакционной зоны, что препятствует окислению образца в полости тигля [3].



*Рис. 1. Графики расхода массы в процессе проведения экспериментов:  
а) графитового тигля; б) графитового электрода*

По данным представленным на рисунке 1Б, видно, что значительного изменения массы графитовых электродов в процессе проведения экспериментов не наблюдается. В свою очередь снижение значения  $\Delta m_{cp}$  в некоторых экспериментах ниже 4 г можно объяснить не стабильностью горения дугового разряда, в результате чего значение расхода графитового электрода, так и тигля может снижаться до указанных на графике (рис. 1, б) значений.



*Рис. 2. График зависимости а) напряжения от времени; б) силы тока от времени;  
в) электрической мощности от времени; г) количества подведенной энергии от времени*

На рис. 2 представлены зависимости тока и напряжения, а также мощности и энергии от времени зарегистрированные данные в процесс одного эксперимента (сила тока 200 А, время дуговой стадии 60 с).

По зарегистрированным данным определено, что значение силы тока и напряжения стабилизируются до следующих величин:  $I_{cp}$  до 134,10 А,  $U_{cp}$  до 32,70 В. На протяжении дуговой стадии среднее значение электрической мощности составляет 4,2501 кВт, а количество электрической энергии подведенной в зону реакции 0,0729 кВт·ч.

Таким образом, проведенное исследование позволило оценить изменение массы графитовых компонентов в процессе электродугового синтеза материалов. Определено что средний расход графитового тигля за один эксперимент составляет 0,5813 г, однако данное значение увеличивается при большем количестве экспериментов. Также определены энергетические параметры, так, например, за один эксперимент количество подведенной энергии в зону реакции составляет 262,71 кДж. Также определено что один тигель может использоваться в течение 29 экспериментов, при установлении максимальных параметров электродугового реактора (сила тока 200 А, время дуговой стадии 60 с).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2022-0018).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сандлер Р.А., Александровский С.В. Металлотермическое получение некоторых тугоплавких металлов и их сплавов восстановлением хлоридов из расплавов // Записки Горного института. – 1975. – № 3 55. – С. 35.
2. Труханов С.В. Технологии получения монокристаллов тугоплавких металлов методом зонной плавки с применением электронно-лучевого нагрева // ИННОВАЦИИ и ИНВЕСТИЦИИ. – 2018. – № 12. – С. 200–203.
3. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia / A.Ya. Pak, I.I. Shanenkov, G.Y. Mamontov, A.I. Kokorina // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – V. 93. – P. 105343.
4. Plasma reactor for material synthesis and waste recycling, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia / Zh. Bolatova, A.YA. Pak, A.A. Gumovskaya, P.V. Povalyaev, R.S. Martynov, K.B. Larionov // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – 2022. – C1. – P. 801–805.

## РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

**Д.О. Речкин**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А18*

Научный руководитель: Д.Ю. Ляпунов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

### Введение

Эффективность электрических приводов играет ключевую роль в современном мире, где энергосбережение и экологическая устойчивость становятся приоритетными задачами. Электрические приводы используются практически во всех областях промышленности, транспорта и бытовых устройств, и их доля в общем энергопотреблении продолжает расти.

Однако традиционные материалы, используемые при производстве электрических приводов, имеют ряд ограничений, таких как высокие потери энергии, низкая долговечность и недостаточная устойчивость к экстремальным условиям.

Инновационные материалы, такие как нанокристаллические сплавы, высокотемпературные сверхпроводники и композитные покрытия, открывают новые перспективы для повышения КПД, снижения энергопотерь и увеличения срока службы электрических приводов.

*Цель:* исследовать возможности использования новых материалов для повышения эффективности электрических приводов, определить их преимущества и перспективы внедрения в различных отраслях.

## Основная часть

### Материалы для магнитопроводов

К традиционным материалам для магнитопроводов относят кремнистую сталь и ферриты.

1. Кремнистая сталь (с содержанием кремния до 3–4 %) – это один из наиболее широко используемых материалов для магнитопроводов.

*Преимущества:* высокая магнитная проницаемость, снижение потерь на вихревые токи благодаря легированию кремнием, относительная простота производства и доступность.

*Недостатки:* удельные потери на гистерезис остаются значительными, ограниченная эффективность при высоких частотах.

2. Ферриты – это керамические магнитные материалы, содержащие оксиды железа с добавлением других элементов (например, марганца или цинка).

*Преимущества:* высокое электрическое сопротивление, что минимизирует потери на вихревые токи, эффективность в диапазоне высоких частот, устойчивость к коррозии.

*Недостатки:* низкая насыщенная магнитная индукция, хрупкость и сложность в обработке.

Помимо традиционных материалов существуют и перспективные материалы. К ним относятся Нанокристаллические и Аморфные сплавы.

Нанокристаллические материалы состоят из ультрамелких зерен (размером 10–20 нм), получаемых за счёт контролируемой кристаллизации аморфных сплавов.

*Преимущества:* исключительно высокая магнитная проницаемость (до 10 раз выше, чем у традиционных материалов), низкие удельные потери, высокая термическая стабильность.

*Недостатки:* относительно высокая стоимость производства, требуют специальных условий обработки.

Аморфные сплавы представляют собой материалы с неупорядоченной атомной структурой, получаемые методом быстрой закалки.

*Преимущества:* очень низкие удельные потери, особенно при работе на повышенных частотах, высокая прочность и устойчивость к коррозии, хорошие экологические показатели благодаря меньшему потреблению энергии в процессе эксплуатации.

*Недостатки:* ограниченная механическая обрабатываемость, сложности в массовом производстве крупных изделий.

### Материалы для обмоток

Медь – это традиционный материал для обмоток электрических машин благодаря своим выдающимся электрическим и механическим свойствам. Алюминий также широко используется в электротехнической отрасли благодаря его лёгкости и доступности.

Высокотемпературные сверхпроводники (HTS):

Высокотемпературные сверхпроводники – это материалы, которые при температурах, достигаемых с использованием жидкого азота (около  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), проявляют нулевое сопротивление.

- Потенциал:
  - полное отсутствие потерь на омическое сопротивление, что значительно увеличивает эффективность;
  - уменьшение размеров и массы обмоток за счёт более высокой плотности тока;

- возможность работы при относительно «высоких» криогенных температурах (в отличие от классических сверхпроводников).
- Ограничения:
  - высокая стоимость материалов и системы охлаждения;
  - необходимость поддержания постоянного низкотемпературного режима;
  - ограниченная механическая прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

### **Полимерные изоляционные материалы**

Изоляционные материалы играют критическую роль в обеспечении надёжной работы обмоток, предотвращая короткие замыкания и увеличивая долговечность устройств:

- *термостойкость*: полимеры, такие как полиимиды, фторопласты и полиэфирсы, способны выдерживать высокие температуры (до 200–300 °С), обеспечивая стабильность работы при перегревах.
- *долговечность*: современные полимеры имеют высокую стойкость к старению, вибрациям и воздействию агрессивных сред, что продлевает срок службы оборудования.
- *недостатки*: чувствительность к экстремальным температурам и ультрафиолетовому излучению (для некоторых типов полимеров).

Высокая стоимость некоторых специализированных изоляционных материалов.

### **Современные материалы для подшипников и корпусных элементов**

1. Использование композитов и керамики для подшипников.

Современные подшипники должны обеспечивать низкое трение, высокую износостойкость и долговечность, особенно в условиях высокой нагрузки и экстремальных температур.

1.1. Композиты.

Композитные материалы создаются путём сочетания двух или более компонентов, чтобы объединить их преимущества. В подшипниках часто используются углеродные и полимерные композиты.

*Преимущества*: низкий коэффициент трения, уменьшающий износ, устойчивость к коррозии и химическим воздействиям, возможность работы без смазки (самосмазывающиеся материалы).

*Примеры применения*: полимерные подшипники в бытовой технике и углеродные композиты в авиационной и автомобильной промышленности.

1.2. Керамические материалы.

Керамика, такая как нитрид кремния и оксид алюминия, используется для создания высокопрочных подшипников.

*Преимущества*: исключительная твёрдость и устойчивость к износу, высокая термостойкость (выдерживает температуры выше 1000 °С), устойчивость к химическим воздействиям, что делает их идеальными для работы в агрессивных средах.

*Недостатки*: хрупкость, требующая осторожного обращения. Высокая стоимость производства.

*Примеры применения*: Турбины, высокоскоростные электрические двигатели, медицинские приборы.

2. Использование композитов и керамики для корпусных элементов.

2.1. Композиты.

Композитные материалы для корпусов, например, на основе углеволокна, применяются для снижения веса и увеличения прочности.

*Преимущества*: высокая прочность при малом весе, устойчивость к коррозии и механическим повреждениям, отличные вибропоглощающие свойства.

*Примеры применения*: корпуса электрических машин в авиации и автомобилестроении, электронные приборы и оборудование, требующие лёгких и прочных корпусов.

## 2.2. Керамические материалы.

Керамика для корпусов применяется там, где важны теплоизоляция, стойкость к износу и химическая инертность.

3. Использование лёгких сплавов для подшипников и корпусных элементов таких как алюминий и титан.

### ***Нанотехнологии и инновации в материалах***

Нанотехнологии позволяют создавать материалы с уникальными свойствами, которые значительно превосходят традиционные аналоги. Эти инновационные материалы находят широкое применение в электротехнической промышленности, повышая производительность, эффективность и долговечность электрических приводов.

### ***Наноматериалы для улучшения проводимости и теплопроводности***

Наноматериалы такие, как углеродные нанотрубки (CNT), графен и наночастицы металлов, обладают высокой электрической проводимостью и отличной теплопроводностью.

### ***Покрывтия с низким коэффициентом трения для повышения износостойкости***

Износостойкость и снижение трения – ключевые факторы для увеличения срока службы подвижных частей электрических приводов. Нанопокрывтия играют важную роль в этом процессе.

## **Заключение**

Современные исследования в области материаловедения приводят к созданию новых материалов, которые существенно повышают эффективность электрических приводов. Преимущества включают: повышение энергоэффективности (снижение потерь энергии и улучшенная проводимость), увеличение срока службы оборудования (износостойкость и устойчивость к внешним воздействиям), снижение веса и габаритов, снижение эксплуатационных затрат.

При разработке и внедрении новых материалов для электрических приводов важно учитывать технические (КПД, термостойкость, прочность и вес) и экономические (себестоимость, количество потребления энергии, экологичность и увеличение сроков службы) показатели:

1. Внедрение новых материалов окажет значительное влияние на развитие всей отрасли.
2. Повышение КПД и надежности приводных систем приведет к росту производительности на предприятиях, где используются эти системы.
3. Использование более эффективных и долговечных материалов позволит снизить затраты на производство, обслуживание и ремонт, что повысит общую конкурентоспособность производителей.
4. Применение экологически чистых материалов и снижение энергопотребления будет способствовать достижению более устойчивого развития отрасли и снижению воздействия на окружающую среду.
5. Инновационные материалы откроют новые возможности для создания новых типов электрических приводов для специализированных применений, таких как электромобили, системы возобновляемой энергетики и робототехника.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванов А.В. Исследование и применение нанокристаллических сплавов в электротехнической отрасли. – М.: Наука, 2015. – 240 с.
2. Петров В.М. Аморфные сплавы в электрических машинах: Свойства и области применения. – СПб.: Энергоатомиздат, 2018. – 312 с.
3. Захаров И.К. Современные материалы для магнитопроводов: Кремнистая сталь и ферриты. – Екатеринбург: УрФУ, 2019. – 180 с.
4. Кузнецов О.Л. Высокотемпературные сверхпроводники в электротехнических системах. – М.: МЭИ, 2020. – 200 с.
5. Григорьев С.Н. Полимерные изоляционные материалы в электротехнике: Термостойкость и долговечность. – Новосибирск: СО РАН, 2017. – 150 с.

6. Смирнов А.И. Композитные материалы для подшипников и корпусных элементов электрических машин. – Казань: Казанский университет, 2021. – 180 с.
7. Михайлов Е.В. Нанотехнологии в материалах для электрических приводов: Применение и перспективы. – М.: Энергетика, 2022. – 220 с.
8. Ковалев П.Г. Технологии создания наноматериалов для улучшения проводимости и теплопроводности. – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – 250 с.
9. Александров И.В. Современные подходы к использованию наноматериалов в электрических машинах и приводах. – СПб.: Научная книга, 2019. – 180 с.
10. Федорова Л.В. Материалы и технологии для повышения энергоэффективности электрических приводов. – М.: ИТИС, 2020. – 220 с.

## ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТОРИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ К ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ НАГРУЗКАМ

**Ю.В. Мурашко**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ33*

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Электроизоляционные материалы и обмоточные провода довольно распространены в настоящее время. Одними из наиболее часто применяемых на производстве изделий являются изоляционные трубки марки Витур Т 0433-85, получаемые из термопластичного полиуретана методом экструзии. Предназначаются для изоляции контактов разъемов. Кроме того, также довольно востребованы обмоточные провода марки ПЭТ-155, предназначенные для изготовления обмоток электродвигателей, генераторов, катушек. В связи с широкой распространенностью данных материалов необходим контроль их качества с целью выявления непригодности для производства [1, 2].

Методы испытаний трубки марки Витур Т 0433-85 включают в себя несколько этапов. Сначала оценивается внешний вид изделия. Наружная и внутренняя поверхности трубки должны быть гладкими, без посторонних включений, не допускаются пузыри, трещины, надломы. Допускаются незначительная рябь и полосы, не выводящие толщину стенки за допустимые пределы. Затем измеряют внутренний диаметр трубки при помощи металлических стержней подходящих размеров, зависящих от диаметра изделия. Определяют толщину стенки при помощи штангенциркуля. Полученные в ходе измерений внутренний диаметр и толщина стенки не должны выходить за пределы, указанные в табл. 1 [1].

Для оценки электрической прочности трубки определяют пробивное напряжение и вычисляют электрическую прочность по следующей формуле:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{пр}}$  – значение пробивного напряжения, полученное в ходе испытания,  $h$  – толщина стенки изоляционной трубки.

Испытания обмоточных проводов марки ПЭТ-155 также начинаются с оценки внешнего вида. Эмалевая изоляция должна быть сплошной, поверхность провода гладкой, без пузырей и включений. Далее измеряются внешний диаметр провода и диаметр проволоки, который не должен выходить за установленные нормативным документом пределы [2].

Изоляция проводов с номинальным диаметром проволоки 0,250 мм и более должна выдерживать испытание на механическую прочность истиранием иглой диаметром 0,4 мм. Число возвратно-поступательных ходов иглы должно быть не менее 40. Число точечных повреждений в эмалевой изоляции провода с номинальным диаметром проволоки до 0,500 мм вклю-

чительно на длине  $15 \pm 0,15$  мм должна быть не более 5 для проводов с диаметром проволоки 0,060–0,140 мм и не более 4 для проводов с диаметром проволоки 0,140–0,500 мм.

*Таблица 1. Значения размеров изоляционной трубки Витур Т 0433-85*

Внутренний диаметр, мм		Толщина стенки, мм	
Номинальный	Предельные отклонения	Номинальный	Предельные отклонения
1,0	±0,2	0,3	±0,1
1,5			
2,0			
2,5			
3,0			
3,5			
4,0	±0,25	0,5	±0,1
4,5			
5,0			
6,0			
7,0			
8,0	±0,5	0,6	±0,1
9,0			
10,0			
12,0	±0,5	0,7	±0,2
14,0			
16,0	±0,8	1,0	±0,2
18,0			
20,0			
22,0			
25,0	±1,0	1,2	±0,25
30,0			
35,0			
40,0	±2,0	1,5	±0,25

Относительное удлинение при разрыве проводов должно соответствовать нормативному значению. При этом с увеличением диаметра проволоки значение относительного удлинения также возрастает.

Провода с номинальным диаметром проволоки более 0,355 мм должны быть навиты на стержень. При этом изоляция должна быть эластичной, недопустимы повреждения. Значения диаметров стержней для навива указаны в табл. 2.

*Таблица 2. Значения диаметров стержней для навива провода в зависимости от диаметра проволоки*

Диаметр проволоки, мм	Отношение диаметра стержня к диаметру проволоки			
	св. 0,355 до 0,690 вкл.	св. 0,690 до 1,250 вкл.	св. 1,250 до 1,700 вкл.	св. 1,700 до 2,500 вкл.
Отношение диаметра стержня к диаметру проволоки	4	7	10	14

Для определения пробивного напряжения требуется сделать скрутки из проводов. Отрезок провода складывается пополам. На рис. 1 изображена схема крутильного устройства для изготовления скруток [3].

Число скруток и нагрузка для крутильного устройства приведены в табл. 3.

Концы скруток зачищаются от эмалевой изоляции и подсоединяются к пробойной установке переменного тока частотой 50 Гц, состоящей из трансформатора, регулирующего устройства и измерительных приборов. Другой конец провода в виде петли разрезается по-

перек, концы разводятся друг от друга в разные стороны. Подают напряжение на зачищенные концы скрутки, напряжение плавно повышается до пробоя. Значения пробивного напряжения указано в табл. 4.

Таблица 3. Нагрузка, прикладываемая к скручиваемой паре провода и число скруток

Номинальный диаметр проволоки, мм	Нагрузка, прикладываемая к скручиваемой паре провода, Н	Число скруток на длине 125 мм
От 0,050 до 0,100 вкл.	0,400	40
Св. 0,100 до 0,250 вкл.	0,85	33
Св. 0,250 до 0,355 вкл.	1,70	23
Св. 0,355 до 0,500 вкл.	3,40	16
Св. 0,500 до 0,750 вкл.	7,00	12
Св. 0,750 до 1,060 вкл.	13,50	8
Св. 1,060 до 1,500 вкл.	27,00	6
Св. 1,500 до 2,120 вкл.	54,00	4
Св. 2,120 до 2,500 вкл.	108,00	3

Таблица 4. Значения пробивного напряжения в зависимости от диаметра проволоки

Номинальный диаметр проволоки, мм	Пробивное напряжение, В, не менее
От 0,060 до 0,071 вкл.	700
Св. 0,071 до 0,080 вкл.	800
Св. 0,080 до 0,100 вкл.	900
Св. 0,100 до 0,140 вкл.	1000
Св. 0,140 до 0,160 вкл.	1100
Св. 0,160 до 0,200 вкл.	1200
Св. 0,200 до 0,400 вкл.	1600
Св. 0,400 до 0,500 вкл.	2000
Св. 0,500 до 0,710 вкл.	2200
Св. 0,710 до 0,850 вкл.	2400
Св. 0,850 до 1,120 вкл.	2600
Св. 1,120 до 1,350 вкл.	2800
Св. 1,350 до 1,600 вкл.	3000
Св. 1,600 до 1,900 вкл.	3200
Св. 1,900 до 2,500 вкл.	3300

Данные методы испытаний позволяют оценить свойства обмоточных проводов марки ПЭТ-155 и трубки марки Витур Т 0433-85. Перед использованием на производстве довольно важно оценить описанные в статье параметры, так как некачественная изоляция может привести к короткому замыканию, и, как следствие, повреждениям оборудования и возгоранию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТУ 2249-018-32972176-2010. Трубки и жгуты из термопластичного полиуретана. Технические условия.
2. ТУ 16-502.012-82. Провода медные круглые эмалированные лаком на полиэфиримидной основе марки ПЭТ-155. Технические условия.
3. ГОСТ 14340.7-74. Провода эмалированные круглые. Метод испытания изоляции напряжением.

## ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

В.Е. Головин

Томский политехнический университет, гр. 5А18

Научный руководитель: Н.А. Воронина, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В различных областях техники широкое распространение получили вторичные химические источники тока (ХИТ). В отличие от первичных ХИТ, вторичные предназначены для многократного использования. После разряда аккумулятора его можно зарядить, пропуская электрический ток в обратном направлении. Для заряда данной установки применяются специальные зарядные устройства (ЗУ). В настоящее время используют принцип заряда аккумулятора ассиметричным током. Отличие заряда данным способом от обычного варианта ЗУ состоит в том, что режим заряда периодически сменяется разрядом, при этом импульсы зарядной емкости преобладают над импульсом разрядной, обеспечивая полный заряд аккумуляторной батареи (АБ). Этот режим благоприятно влияет на характеристики АБ, срок службы и ряд других факторов. Опытным путем установлено, что в варианте ассиметричным током следует производить при следующих параметрах: амплитуда зарядного тока должна в 1,6–2 раза превышать амплитуду разрядной, а длительность разрядного периода должна быть больше длительности зарядного в 1,3–1,6 раза [1].

При всех положительных качествах способ с использованием ассиметричного тока имеет один существенный недостаток, заключающийся в том, что энергия разряда расходуется бесполезно, снижая общий КПД устройства.

В представляемом материале указанный недостаток полностью устранен введением в схему ЗУ дополнительного элемента – зависимого инвертора (ЗИ), который преобразует энергию разряда АБ в энергию переменного тока и возвращает ее в сеть.

Структурная схема ЗУ представлена на рис. 1.

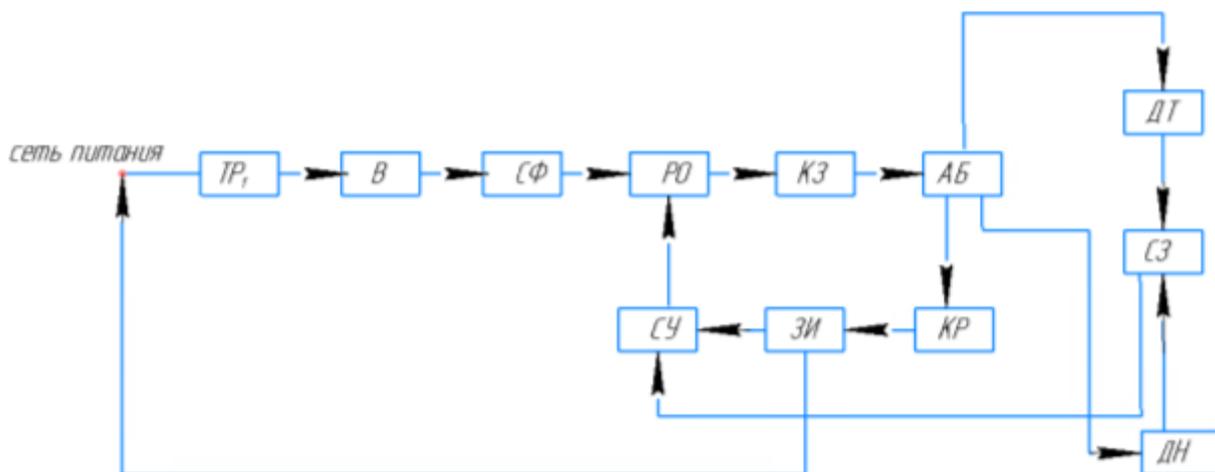


Рис. 1. Структурная схема зарядного устройства

Сетевое напряжение при помощи трансформатора ТР1 понижается до величины зарядного напряжения, выпрямляется выпрямителем В, сглаживается фильтром С1, и поступает через силовой ключ заряда КЗ и регулирующий орган РО на аккумулятор. К АБ через силовой ключ разряда КР подключается зависимый инвертор ЗИ, который возвращает энергию разряда аккумулятора в сеть. Система управления СУ обеспечивает режим заряда и разряда путем воздействия на ключи КЗ и КР, а также управление зависимым инвертором. [2]

Очевидно, что ключи КЗ и КР должны работать в противофазе с выполнением вышеуказанных условий.

Принципиальная схема ЗУ изображена на рис. 2.

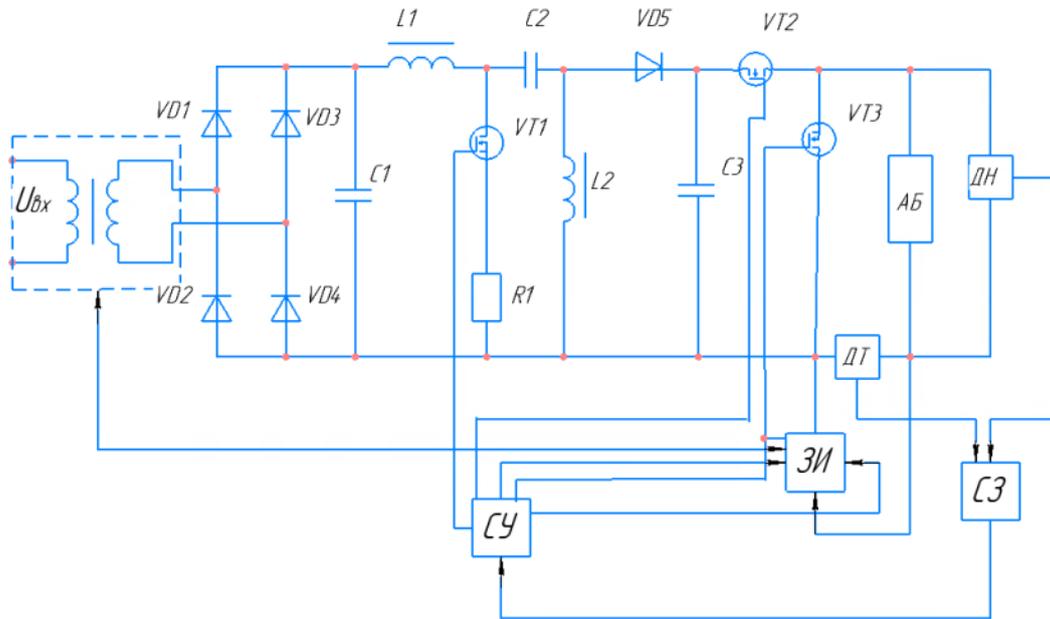


Рис. 2. Принципиальная схема ЗУ

Регулирующий орган выполнен на базе преобразователя по топологии *SEPIC*, где  $L1$  – входной дроссель,  $VT1$  – силовой ключ,  $C3$  – накопительный конденсатор;  $L2$ ,  $C2$  и  $VD5$  – элементы, обеспечивающие заряд конденсатора  $C3$ . Транзисторы  $VT2$  и  $VT3$  выполняют роль соответственно ключа заряда КЗ и разряда КР. Датчики напряжения ДН и тока ДТ необходимы для работы системы защиты (СЗ) рассматриваемого устройства при аварийных ситуациях. ЗИ – зависимый инвертор, ведомый сетью, принципиальная схема которого на рис. 3.

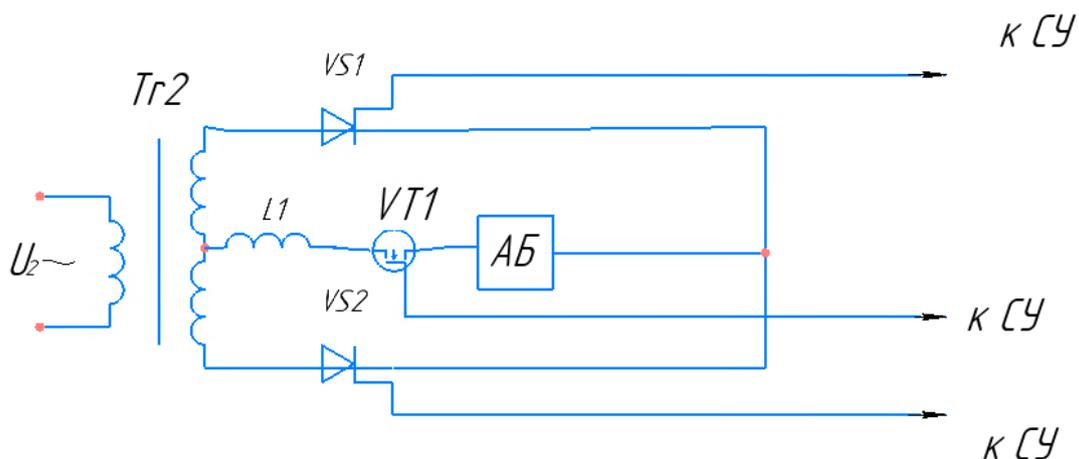


Рис. 3. Принципиальная схема зависимого инвертора

Все ключи в зависимом инверторе управляются системой управления СУ. После аналитического расчета принципиальной схемы ЗУ, после которого были выбраны следующие элементы: диоды  $VD1...VD5$  ( $I_A = 5A$ ;  $U_{обр} = 50B$ ); транзистор  $VT1$  типа *IRF3710Z* ( $I_c = 57A$ ,  $U_{обр} = 100B$ ); дроссели  $L1$ ,  $L2$  и  $L3$  типа Д13-22В ( $L1 = 60$  мкГн,

$L_2 = 47$  мкГн,  $L_3 = 146$  мкГн); конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  типа К50-29 ( $C_1 = 270$  мкФ,  $C_2 = 1000$  мкФ,  $C_3 = 12000$  мкФ); транзисторы  $VT_2$  и  $VT_3$  типа  $B5H205G2$ .

Разработана компьютерная модель зависимого инвертора в схеме зарядного устройства в программе *MATLAB*.

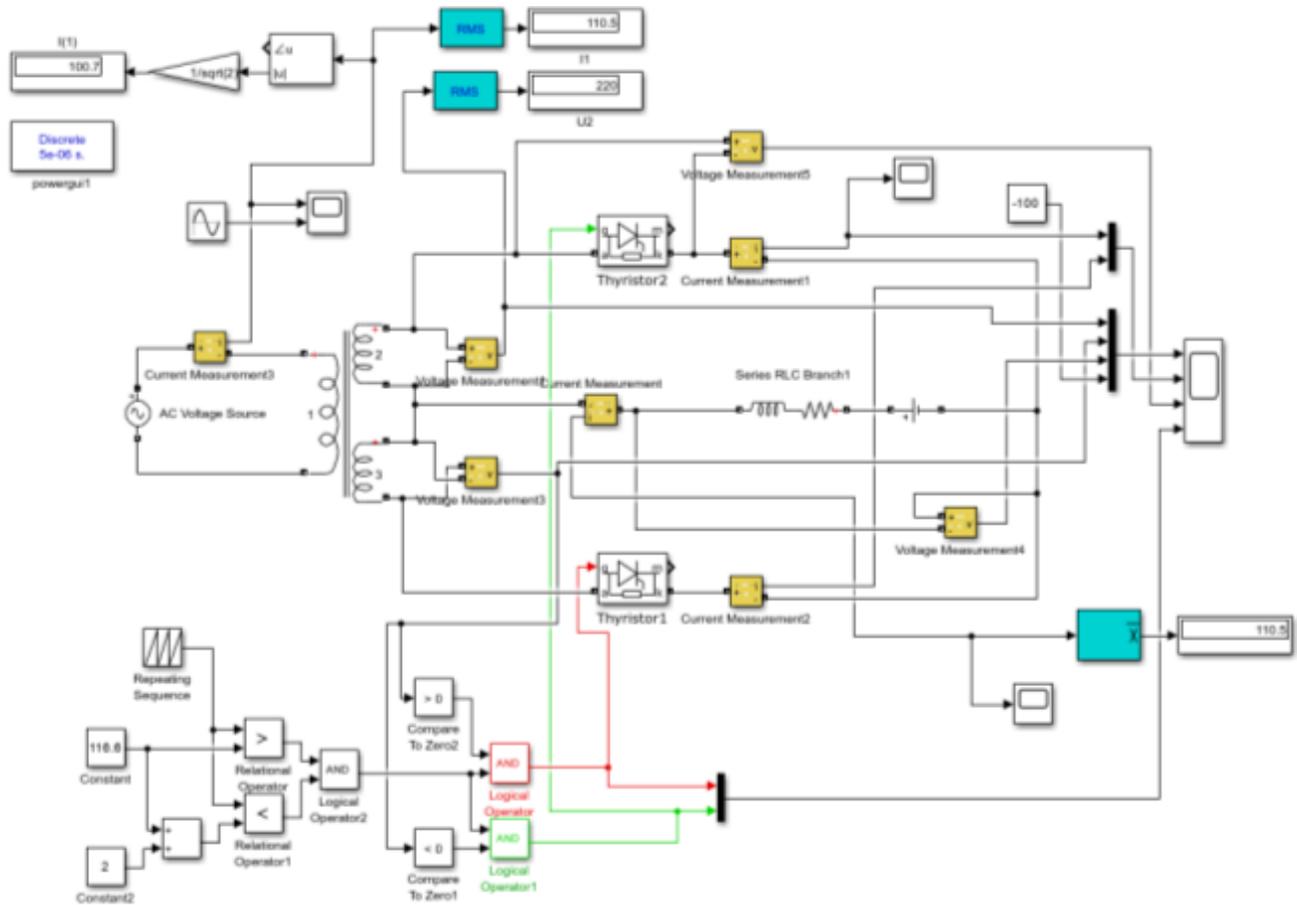


Рис. 1. Имитационная модель однофазного двухполупериодного зависимого инвертора

### Выводы

1. Усовершенствована известная схема зарядного устройства на основе преобразователя *SEPIC*, путем введения в него дополнительного узла – зависимого инвертора, который преобразует энергию разряда АБ в энергию переменного тока и возвращает ее в сеть.
2. Разработана компьютерная модель предлагаемого устройства в *MATLAB*. Анализ аналитических расчетов и расчетов с помощью модели показал их практическое совпадение.
3. В результате испытания получили, что потери в ЗУ снизились на 12,4 %. Это дает основание рекомендовать данную схему к широкому применению на практике.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калайда Т.Н. Химические источники электрической энергии для летательных аппаратов. – Ленинград: ЛВИКА. Ленингр. воен. инж. Краснознам. акад. им. А. Ф. Можайского, 1965. – С. 268.
2. Петрович В.П., Глазачев А.В. Силовая электроника: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 207.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОАКТИВАТОРОВ ДЛЯ РАЗЖИЖЕНИЯ ПРИДОННЫХ СЛОЕВ ЁМКОСТЕЙ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

А.М. Назаркин

Томский политехнический университет, гр. 5А18

Виброструйный магнитный активатор нефти – электромагнитный аппарат. При подаче напряжения на обмотки которого создается переменное магнитное поле которое заставляет активатор вибрировать с определенной частотой. При вибрации активатора создается поток нефти, который ее перемешивает не давая образовываться донным отложениям.

Данный аппарат используется в нефтяной промышленности, в частности в резервуарах с нефтью. Он устанавливается стационарно на весь срок службы резервуара. В зависимости от объема их может устанавливаться несколько штук.

Возможны два способа размыва, предотвращения накопления и удаления парафинистого осадка – раздельный и совмещенный.

Суть раздельного способа заключается в последовательном осуществлении операции заполнения резервуара через систему, когда происходит непосредственно смыв и перевод во взвешенное состояние донного осадка, и последующим опорожнением резервуара через приемораздаточный патрубок, когда производится удаление (вынос) вместе с нефтью взвеси осадка.

Суть совмещенного способа заключается в одновременном проведении операций заполнения резервуара через систему и опорожнение его через приемораздаточный патрубок. Этот способ можно осуществлять как продуктом, который поступает в резервуар извне, так и циркуляцией продукта, который хранится в самом резервуаре с одновременной откачкой части продукта в магистральный трубопровод.

Выбор того или иного способа размыва (предотвращения накопления) и удаление парафинистого осадка зависит от особенностей нефтебазы или нефтеперекачивающей станции, где используются системы.

Раздельный способ следует применять в тех случаях, когда разрыв во времени между операциями заполнения и опорожнения резервуара не превышает 4–6 часов.

Максимальный эффект в отношении постоянного объема и качества хранимой нефти достигается, если операции осуществляются в процессе каждого опорожнения резервуара. Однако этот способ требует значительных затрат энергии, потому он может быть рекомендован только в отдельных случаях.

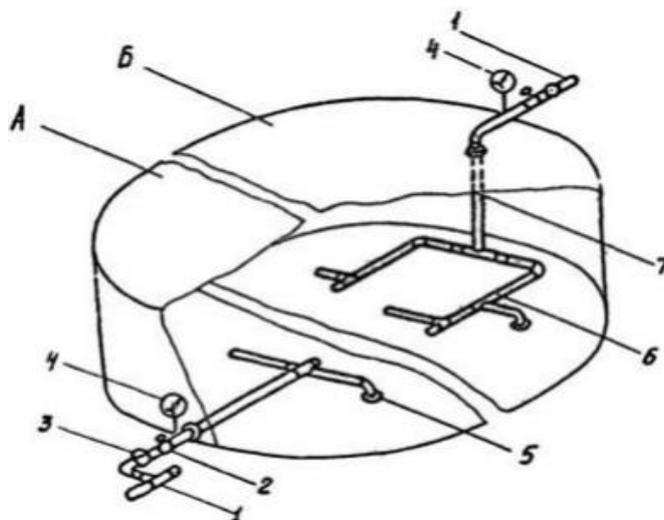


Рис. 1. Система размыва и предотвращения накопления донного парафинистого осадка в нефтяных резервуарах:

- А – наземный вертикальный стальной резервуар;  
Б – заглубленный железобетонный резервуар;  
1 – приёмный патрубок системы; 2 – задвижка;  
3 – фильтр; 4 – манометр; 5 – веерные кольцевые сопла; 6 – обвязывающие трубопроводы;  
7 – ввод стояка через световой люк перекрытия резервуара

Таблица 1. Основные параметры систем размыва нефти для резервуаров РВС5000-РВС2000

Основные показатели	РВС-5000*(3)	РВС-10000	РВС-20000
	Др=22.8 м	Др=28.5 м	Др=45.6 м
1. Расход (производительность закачки) нефти через систему, м <sup>3</sup> /ч	200–500	500–1250	1000–2500
2. Давление закачиваемой нефти (на входе в резервуар):			
при 1 м и влива нефти в резервуаре, кгс/см <sup>2</sup> *(1)	1.0–2.5	1.0–2,5	1.5–3.0
при полном вливе нефти в резервуаре, кгс/см <sup>2</sup> *(1)	2.0–3.5	2.5–4.0	2.5–4.0
3. Потребляемая мощность (на входе в резервуар):			
при 1 м влива нефти в резервуаре, кВт*(1)	5–40	15–40	50–240
при полном вливе нефти в резервуаре, кВт*(1)	15–60	35–60	80–320
4. Количество размывающих устройств (сопел при грузенных веерных кольцевых типа СГ1ВК-100М), шт.	2	5	10
5. Рабочая жидкость	нефть, закачиваемая в резервуар		
6. Скорость истечения нефти из сопел:			
рабочая, м/с	13–24	13–24	13–24
допустимая, м/с*(2)	до 67	до 46	до 40

### Вывод

Для обеспечения безопасности при работе с виброструйным магнитным активатором необходимо соблюдать все правила и ГОСТы при работах в нефтегазовой промышленности. Данная отрасль производства характеризуется высокими рисками возникновения чрезвычайных ситуаций, поэтому несоблюдение правил и стандартов безопасности могут повлечь за собой технологические потери и человеческие жертвы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы виброструйной магнитной активации жидких сред / В.А. Данекер, В.В. Доленко // Современная техника и технологии, 28 февраля – 3 марта 2000 г., Томск.
2. Прозорова И.В., Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В., Рикконен С.В., Данекер В.А. Изменение реологических свойств нефтей под воздействием виброструйной магнитной активации // Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности. – 2002. – № 2.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ СРЕДСТВАМИ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

**М.С. Кишканова**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А38*

Научный руководитель: И.А. Розаев, к.т.н., старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В современном мире технологии развиваются с невероятной скоростью, и научные исследования в области электротехники и машиностроения становятся всё более актуальными. Одним из ключевых аспектов этих исследований является моделирование электродвигателей, которое позволяет предсказать их поведение в различных условиях и оптимизировать их характеристики [1].

Моделирование электродвигателей на языке программирования Python становится всё более популярным среди учёных и инженеров благодаря своей гибкости, простоте и эффективности. В данном докладе мы рассмотрим основные преимущества использования Python для моделирования электродвигателей и его роль в современных научных исследованиях [2]. В данной работе модель будет строиться в АВС координатах, а не в более классическом виде

в dq координатах. Этот подход позволит в дальнейшем использовать данную модель при моделировании векторного управления асинхронным двигателем.

Рассмотрим общий подход к созданию такой модели:

Необходимо описать системой дифференциальных уравнений работу асинхронного электродвигателя в abc-координатах. Эти уравнения включают в себя токи, напряжения, потокосцепления и другие параметры двигателя. Систему уравнений будем использовать в нормальной форме Коши приведенную к матричному виду [3, 4].

Необходимо выбрать метод решения уравнений. Для решения системы дифференциальных уравнений можно использовать различные методы, такие как метод Эйлера, метод Рунге–Кутты, метод конечных разностей и др. Воспользуемся методом расчета Рунге–Кутты 4 порядка.

Создайте программу на Python. Используйте выбранный метод для решения уравнений асинхронного двигателя. Программа должна включать в себя определение начальных условий, расчёт токов, напряжений и других параметров двигателя, а также вывод результатов.

Добавьте дополнительные функции. В зависимости от ваших целей, вы можете добавить в программу дополнительные функции, такие как моделирование различных режимов работы двигателя, анализ его характеристик и т. д.

Протестируйте программу. Перед использованием программы для моделирования асинхронного двигателя необходимо протестировать её на простых примерах, чтобы убедиться в правильности работы программы. Необходимо подтвердить адекватность полученной модели.

Используйте программу для моделирования. После тестирования программы вы можете использовать её для моделирования различных режимов работы асинхронного двигателя и анализа его характеристик.

Для моделирования воспользуемся параметрами трехфазного асинхронного двигателя АИР63А2 [3]. Примерный код для математической модели асинхронного двигателя может выглядеть следующим образом:

```
import numpy as np
from scipy.integrate import solve_ivp
import matplotlib.pyplot as plt
Pn = 0.37 # Номинальная мощность, кВт
Un = 380 # Номинальное напряжение, В
f = 50 # Частота сети, Гц
p = 2 # Число пар полюсов
omega_syn = 2 * np.pi * f / p # Синхронная угловая скорость, рад/с
R_s = 23.9232 # Сопротивление статора, Ом
R_r = 21.1188 # Сопротивление ротора, Ом
L_s = 0.9721 # Индуктивность статора, Гн
L_R = 0.9898 # Индуктивность ротора, Гн
L_m = 0.9107 # Взаимная индуктивность, Гн
p = 1 # Число пар полюсов
J_total = 0.00069 # Суммарный момент инерции, кг·мI
omega_nominal = 1500 * (2 * np.pi / 60) # Номинальная механическая скорость, рад/с
U_phase = Un / np.sqrt(3) # Фазное напряжение, В
U_1A = U_phase
U_1B = U_phase
U_1C = U_phase
M_c = 1
L1 = np.array([
    [L_s, -L_m/2, -L_m/2, L_m, -L_m/2, -L_m/2],
    [-L_m/2, L_s, -L_m/2, -L_m/2, L_m, -L_m/2],
    [-L_m/2, -L_m/2, L_s, -L_m/2, -L_m/2, L_m],
    [L_m, -L_m/2, -L_m/2, L_R, -L_m/2, -L_m/2],
    [-L_m/2, L_m, -L_m/2, -L_m/2, L_R, -L_m/2],
    [-L_m/2, -L_m/2, L_m, -L_m/2, -L_m/2, L_R]])
L2 = np.zeros((6, 6))
R = np.diag([R_s, R_s, R_s, R_r, R_r, R_r])
```

```

def motor_dynamics(t, y):
    i_1A, i_1B, i_1C, i_1a, i_1b, i_1c, omega = y
    i1 = np.array([i_1A, i_1B, i_1C, i_1a, i_1b, i_1c])
    U_1 = np.array([
        U_1A * np.sin(2 * np.pi * f * t),
        U_1B * np.sin(2 * np.pi * f * t - 2 * np.pi / 3),
        U_1C * np.sin(2 * np.pi * f * t + 2 * np.pi / 3),
        U_1a,
        U_1b,
        U_1c ])
    L1_inv = np.linalg.inv(L1)
    di1_dt = L1_inv @ (U_1 - (R + L2 * (p * omega) / np.sqrt(3)) @ i1)
    M_1 = p * (np.sqrt(3)/2) * L_m * (
        (i_1A * i_1c + i_1B * i_1a + i_1C * i_1b) -
        (i_1A * i_1b + i_1B * i_1c + i_1C * i_1a) )
    domega_dt = (p / J_total) * (M_1 - M_c)
    return np.concatenate((di1_dt, [domega_dt]))
i_initial = np.zeros(6)
omega_initial = 0
y0 = np.concatenate((i_initial, [omega_initial]))
t_span = (0, 1)
t_eval = np.linspace(t_span[0], t_span[1], 1000)
sol = solve_ivp(motor_dynamics, t_span, y0, t_eval=t_eval, method='RK45')
i_1A_sol = sol.y[0]
i_1B_sol = sol.y[1]
i_1C_sol = sol.y[2]
i_1a_sol = sol.y[3]
i_1b_sol = sol.y[4]
i_1c_sol = sol.y[5]
M_1 = p * (np.sqrt(3)/2) * L_m * (
    (i_1A_sol * i_1c_sol + i_1B_sol * i_1a_sol + i_1C_sol * i_1b_sol) -
    (i_1A_sol * i_1b_sol + i_1B_sol * i_1c_sol + i_1C_sol * i_1a_sol))

```

Далее прописываются команды построения графиков для вывода на экран. Мы выведем зависимости токов фаз статора от времени (рис. 1), угловой скорости ротора от времени (рис. 2) и электромагнитного момента от времени (рис. 3).

Этот код представляет собой упрощённую модель асинхронного двигателя, которая может быть использована для изучения его работы. Вы можете изменить параметры двигателя и методы решения уравнений в соответствии с вашими целями.

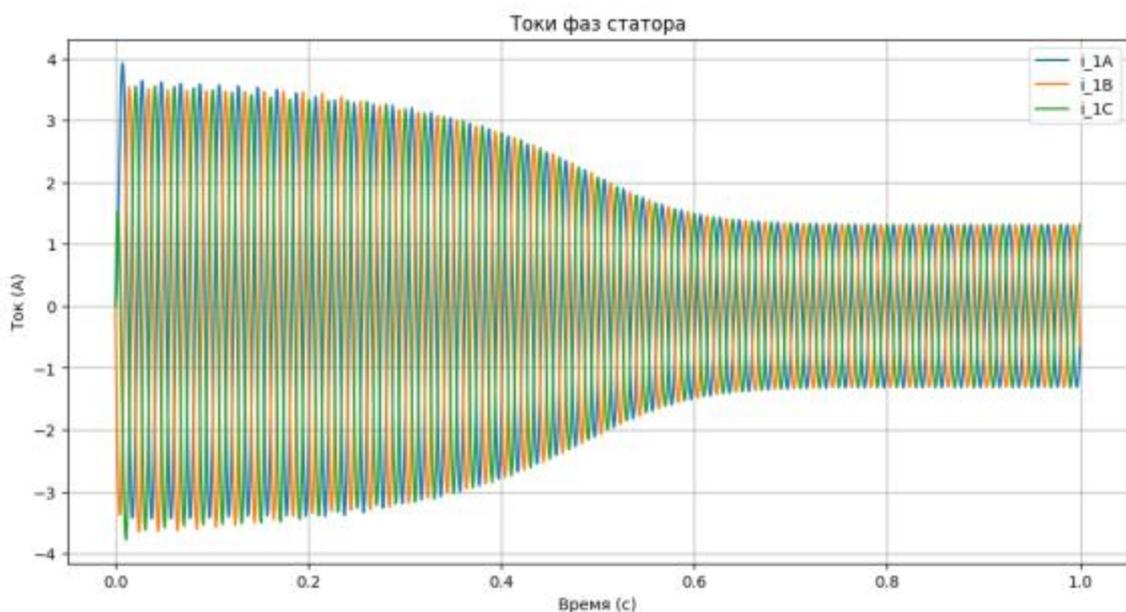


Рис. 1. Зависимость токов фаз статора асинхронного двигателя от времени

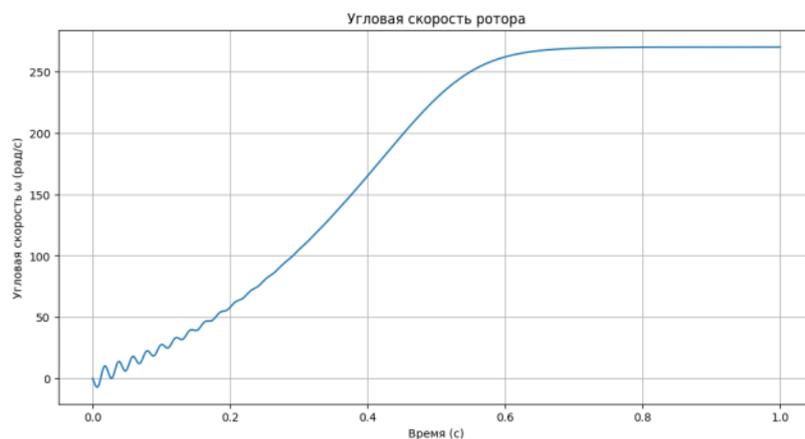


Рис. 2. Зависимость угловой скорости ротора асинхронного двигателя от времени

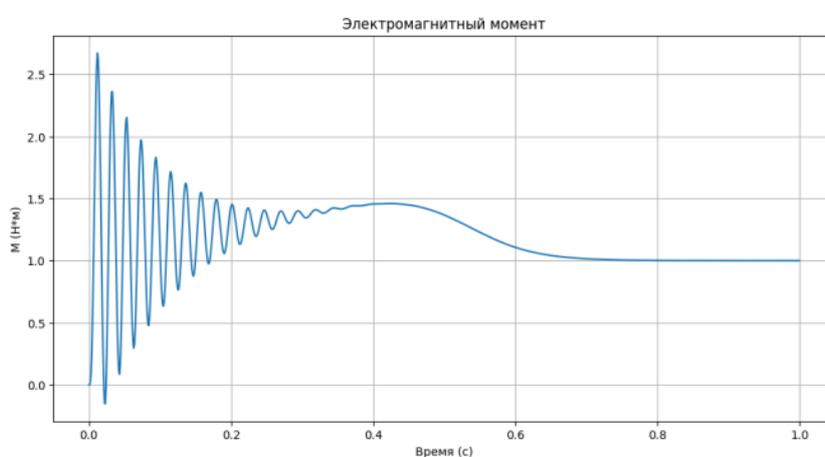


Рис. 3. Зависимость электромагнитного момента асинхронного двигателя от времени

Тем самым можно сказать, что моделирование асинхронного двигателя на Python в ABC-координатах является перспективным и удобным решением, которое имеет преимущества перед моделированием в других программах и языках программирования. Благодаря большому сообществу разработчиков, множеству библиотек и фреймворков, гибкости и удобству в работе с данными, а также возможности получения более точных и надёжных результатов. Кроме того, Python является бесплатным и открытым исходным кодом, что делает его доступным для широкого круга пользователей. Python становится мощным инструментом для проектирования и оптимизации асинхронных двигателей. Всё это делает его привлекательным выбором для широкого круга пользователей, работающих в области электротехники, машиностроения, энергетики и других смежных областях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буйначев С.К., Боклаг Н.Ю. Основы программирования на языке : учебное пособие. – Электрон. текстовые данные. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 92 с.
2. Однокопылов Г.И., Розаев И.А., Брагин А.Д. и др. Сравнительный анализ отказоустойчивого управления асинхронного и вентильно-индукторного электропривода // Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума, 10–14 октября 2016 г., Томск: в 3 т. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – С. 89–93. Дата обращения: 15.11.2024.
3. Однокопылов Г.И., Брагин А.Д. Математическая модель асинхронного двигателя в неполнофазном режиме работы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 133–137.
4. Однокопылов Г.И. Методы и алгоритмы отказоустойчивого управления электроприводами опасных производственных объектов: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: спец. 05.09.03 / науч. конс. В.Г. Букреев. – Томск: 2017.

## РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПРОКЛАДКИ НА НАГРЕВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ

**А.В. Селяев, А.Н. Шишкина, Д.В. Масленков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, Группа 5АМ33/5АМ43*

Научный руководитель: В.Н. Дмитриенко, к.т.н. доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В процессе эксплуатации изоляция кабеля стареет под влиянием тепловых и электрических полей. Средний срок службы изоляции 25 лет, однако, из-за различных условий эксплуатации степень старения изоляции не одинакова. В связи с этим возникает вопрос периодичности замены кабельных линий.

Силовые кабели широко используются в электроэнергетике для передачи электрической энергии. При работе силовых кабелей возникает нагрев, который может привести к перегреву и повреждению кабелей. Для изучения влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей необходимо разработать учебный лабораторный стенд.

В настоящее время нет четко прописанных рекомендаций по проведению профилактических испытаний в процессе эксплуатации кабелей. Тем не менее, в каталогах и инструкциях по эксплуатации отечественных и зарубежных предприятий-изготовителей даются рекомендации по испытанию кабельных линий после их монтажа. Так же существуют стандарты, описывающие обобщенные методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических кабелей.

Объект исследования: силовые кабели с изоляцией из ПВХ, СПЭ, ЭПР.

Цель работы – проектирование и монтаж учебного лабораторного стенда, а также создание методических указаний исследования влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей.

Для достижения поставленной цели будут выполнены следующие задачи:

- 1) сбор информации о температурных режимах нагрева силовых кабелей;
- 2) проектирование общего вида и электрических схем УЛ стенда для проведения экспериментов;
- 3) закупка оборудования и комплектующих для УЛ стенда;
- 4) монтаж стенда по проекту;
- 4) разработка методических указаний для выполнения исследований;
- 5) проведение экспериментов по изучению влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей с различными типами изоляции;
- 6) анализ полученных результатов и их сравнение с теоретическими данными.

Внешняя среда, условия прокладки и тип изоляции влияют на условия теплопередачи и определяют величину максимальной токовой нагрузки кабеля. На практике применяются следующие способы прокладки кабеля:

- 1) в воде;
- 2) в воздухе;
- 3) в земле.

При подводной прокладке происходит конвективный теплоотвод от поверхности кабеля. Тепловое поле в воде, из-за наличия течения и конвективных токов, практически отсутствует и термическое сопротивление среды ничтожно мало. В этом случае при расчете допустимой нагрузки на кабель термическое сопротивление среды принимается равное нулю.

Кабель, проложенный в воздухе, охлаждается благодаря конвекции воздуха и термического излучения с поверхности кабеля. Теплопередача с поверхности кабеля зависит от размеров, цвета и состояния поверхности кабеля, типа изоляции.

Наиболее распространенным способом прокладки кабелей, является прокладка в земле. Прокладка ведется в траншеях, глубиной до 1 м (для кабелей до 35 кВ). При работе кабель нагревается и тепловой поток за счет теплопередачи почвы распространяется только к поверхности земли, которая принимается за изотермическую.

При эксплуатации кабелей в них выделяется значительное количество тепла. Основными источниками тепла в многожильных низковольтных кабелях является теплота, выделяющаяся в токопроводящих жилах (ТПЖ) при протекании по ним электрического тока, в одножильных кабелях появляются дополнительные источники тепла – потери в металлических защитных оболочках и покровах, а в высоковольтных кабелях большое значение имеют диэлектрические потери в изоляции.

Соотношение между теплом, затраченным на нагрев кабеля и отведенным от его поверхности определяет максимальную температуру ( $t_{max}$ ), до которой нагревается кабель при данной нагрузке. Эта температура влияет на величину тока нагрузки, срок службы и надежность работы кабеля. Значение максимальной температуры для кабелей с различными видами изоляции и величиной напряжения приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения максимальных рабочих температур силовых кабелей

№ п/п	Тип кабеля	Номинальное напряжение	Максимальная длительно-допустимая температура, °С
1	Кабели с бумажной изоляции с вязкой пропиткой на напряжение, кВ	1–3	80
		6	65
		10	60
		20–35	50
2	Маслонаполненный кабель	110–200	85
		330–500	75
3	Газонаполненный кабель	35–110	80
4	Кабели с полиэтиленовой изоляцией	1–35	60
5	Кабель с изоляцией из вулканизированного сшитого ПЭ	1–220	90
6	Кабель с поливинилхлоридной изоляцией	1–35	70
7	Кабель с резиновой изоляцией	1–10	65

Для выполнения работы необходимо замерять изменения температуры в кабелях и на основании этих данных построить кривые нагрева для каждого типа кабеля определив по ним термическое сопротивление воздуха, земли и воды. На основании полученных результатов сделать выводы.

В связи с вышеизложенным, была начата работа по созданию учебно-лабораторного стенда, для возможности проведения на нем лабораторных работ.

Были сформулированы образовательные задачи, которые должны решаться с помощью нового учебного лабораторного стенда:

- 1) получение знаний о способе влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей;
- 2) изучение тепловых характеристик кабеля;
- 3) определение максимальный токов нагрузки и перегрузки.

Так же был сформулирован перечень лабораторных работ, проводимых на стенде:

- 1) влияние условий прокладки на нагрев силовых кабелей;
- 2) тепловые характеристики силового кабеля.

Планируемое применение стенда:

1) проведение лабораторных работ на направлении: высоковольтная энергетика, электроизоляционная и кабельная техника;

2) осуществление подготовки и переподготовки специалистов в данной области;

На данный момент в отделении электроэнергетики и электротехники было произведено проектирование общего вида и электрических схем УЛ стенда. (рис. 1)

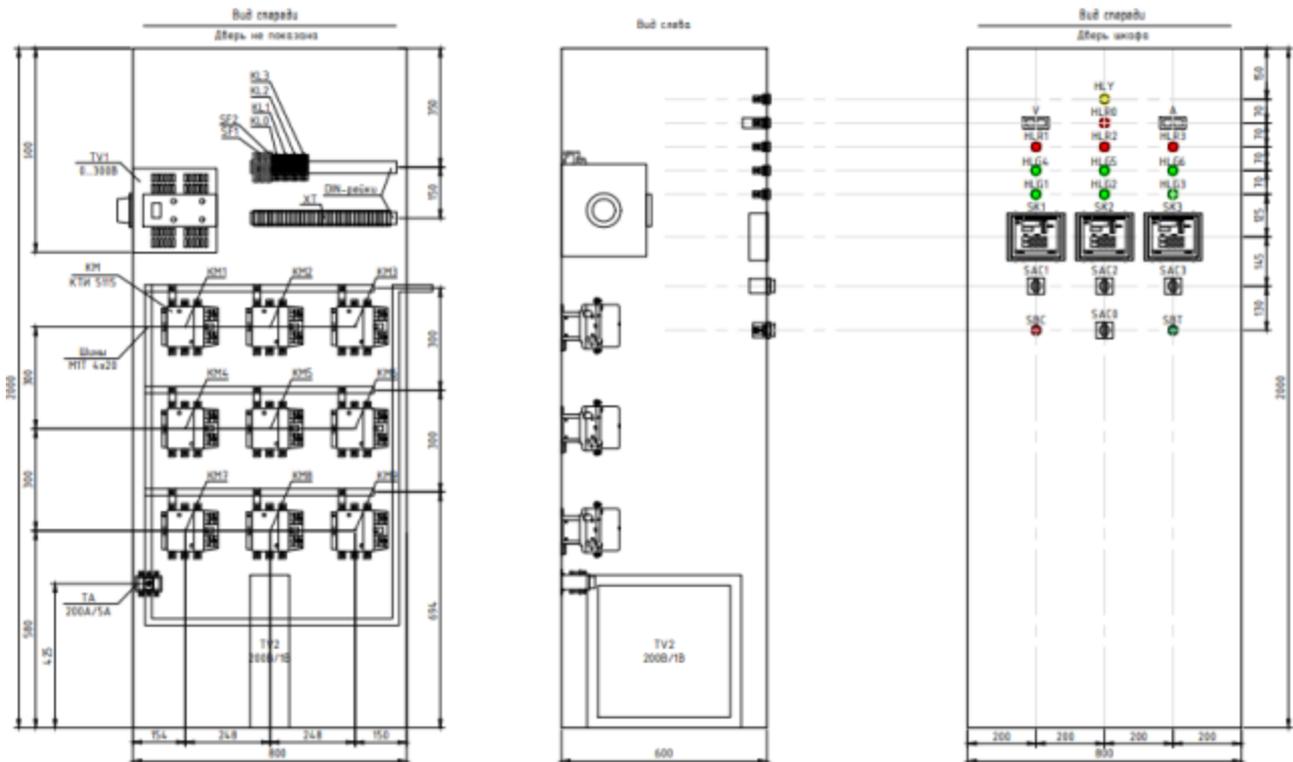


Рис. 12. Схема общего вида

Монтаж УЛ стенда находится в работе. В корпусе было установлено все оборудование, без электрического соединения между аппаратурой (рис. 2, 3).



Рис. 13. Дверь лабораторного учебного стенда



Рис. 14. Оборудование внутри лабораторного учебного стенда

Ожидается, что разработанный стенд позволит провести эксперименты с различными условиями прокладки силовых кабелей и изучить их влияние на нагрев кабелей. Полученные результаты помогут оптимизировать условия прокладки для предотвращения перегрева и повреждения кабелей.

Разработка учебного лабораторного стенда для исследования влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей является важным шагом в области электротехники. Полученные в ходе экспериментов данные помогут улучшить эксплуатационные характеристики силовых кабелей и повысить их надежность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18667–85. Кабели связи, контроля и сигнализации
2. Иванина Н.Ю., Нефедов В.М., Полянчико О.В. Особенности проектирования стендов для исследования нагрева силовых кабелей // Материалы V Международной научно-практической конференции «Инструменты новой экономики». – 2017
3. Полянский О.В., Степанов В.А. Особенности расчета электрической нагрузки силовых кабелей при различных условиях прокладки // Электротехника и энергетика. – 2016.
4. Власенко А.С., Брагин С.В. Методика исследования влияния условий прокладки на нагрев силовых кабелей // Научно-технический вестник Единой энергетика. – 2015.

## ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

**Ф.Т. Измайлов, А.А. Лебедева**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ33*

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ;  
М.М. Попов, старший преподаватель ОЭЭ ИШЭ ТПУ

В настоящее время энергетические сети играют ключевую роль в обеспечении электрообеспечения различных отраслей промышленности и повседневной жизни. Силовые кабели, являющиеся основным элементом инфраструктуры электросетей, должны обладать высокой надежностью и безопасностью в эксплуатации. Для обеспечения соответствия этих требований необходимо проводить тщательные испытания силовых кабелей.

Разработка лабораторной установки для электротепловых испытаний силовых кабелей имеет высокую актуальность в свете необходимости обеспечения надежности и безопасности работы электрических сетей. Данная лабораторная установка позволит проводить комплексные проверки кабелей на различных режимах и условиях эксплуатации, что в свою очередь способствует выявлению потенциальных проблем и дефектов, путем ускоренного старения за счет нагрева

Кроме того, учитывая постоянное развитие технологий и появление новых материалов для производства силовых кабелей, разработка лабораторной установки позволит адаптировать испытания под новые материалы и конструкции кабелей, обеспечивая их соответствие современным стандартам безопасности и надежности.

Таким образом, данная работа направлена на повышение безопасности и эффективности работы электрических сетей, а также соответствие современным стандартам и требованиям к силовым кабелям.

Актуальность работы по разработке лабораторной установки для электротепловых испытаний силовых кабелей обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и эффективности работы электрических сетей и оборудования. Силовые кабели играют ключевую роль в передаче электрической энергии, поэтому необходимо проводить испытания, чтобы убедиться в их надежности и соответствии стандартам безопасности.

### **Лабораторная установка**

Установка на которой проводились эксперименты называется – стенд для электротепловых испытаний силовых кабелей

Стенд предназначен для проведения электротепловых испытаний силовых кабелей при номинальных эксплуатационных режимах.

Установка работает на принципе электромагнитной индукции, создает магнитное поле благодаря которому появляются вихревые токи в кабеле и тем самым происходит нагрев жил и изоляции.

Технические параметры:

- диапазон регулирования токов – до 1000 А (возможно увеличение до 2 кА);
- плавность регулирования;
- вид испытательного напряжения: постоянное, переменное, импульсное, модулированное;
- длительность испытаний – не ограничено;
- тип кабелей – силовые кабели с изоляцией из ПВХ-пластиката, резины, ПЭ, СПЭ, БСЭП, ТЭП, фторполимеры;
- виды испытуемых конструкций – одно- и многожильные кабели, в том числе бронированные.

Преимущества по сравнению с аналогами:

- реализация синтетической схемы испытаний (совмещенная проверка токовых нагрузок и электрические испытания изоляции любым видом напряжения);
- применимость методики с учетом потребностей заказчика;
- отсутствие прямых аналогов;
- безопасность работы, так как испытуемые кабель не подключен на прямую к установке;
- можно испытывать кабели большого сечения и различных форм.

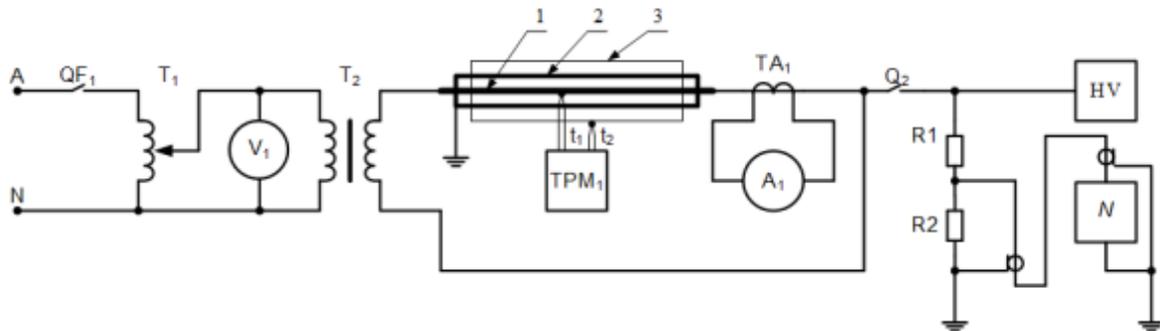


Рис. 15. Схема лабораторной установки:  
 1 – токоведущая жила кабеля; 2 – экран; 3 – оболочка кабеля

Отслеживание температуры жил кабеля происходит через термодатчик, ток регулируется через ЛАТР и понижающий трансформатор. К испытуемому кабелю подключен трансформатор тока, через который можно наблюдать изменение тока, а также при помощи него регулировать ток.

В качестве испытательного кабеля были взяты ВВГнг(А)-LS 5х10 – 0,66кВ, КПпБП-125 3х10-3,3.

Результаты опытов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 9. Результаты проведенных испытаний кабеля КПпБП-125 3х10-3,3

	исходные данные			
$t$ изоляции жилы	20,9	24,1	26,1	27
$t$ наружной изоляции	19,6	25,5	28,3	29,1
ток	0	45	50	55

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Специально созданная установка для оценки теплового состояния элементов конструкции кабеля, позволяет осуществлять замеры быстро и эффективно.
2. Нагрев наружной изоляции КПпБП-125 3х10-3,3 больше из-за наружной брони, которая состоит из стальной ленты. Так как нагрев происходит за счет электромагнитного поля, то большая часть поля распространяется по ней и нагрев во внешней изоляции должен быть больше что подтверждается результатами эксперимента.

Таблица 2. Результаты проведенных испытаний кабеля КГ-ХЛ 1х185

Марка КИ	I <sub>н</sub> , А/I <sub>ТПЖ</sub> , А	№ эксперимента	Температура, °С	
			ТПЖ	внешняя поверхность оболочки кабеля
КГ-ХЛ 1х185	600/600	1	73,5	63,2
		2	72,8	65,2
		3	73,2	64,1
		Ср. значение	73,2	64,7
	800/800	1	111,2	89,2
		2	116,1	98,2
		3	114,5	90,7
		Ср. значение	113,9	92,7
	1000/1000	1	160,2	118,2
		2	156	125
		3	157,2	121,3
		Ср. значение	157,8	121,5

3. По данным кабеля КГ-ХЛ 1х185 можно сделать вывод что установка работает в установленном диапазоне

4. На данном этапе можно с уверенностью сказать, что установка работает и можно продолжать эксперименты с другими силовыми кабелями с различной изоляцией и в дальнейшем изучать ее свойства

5. Разработанная методика испытаний позволяет комплексно оценить тепловое состояние, сопротивление, влияние высокого напряжения и диэлектрические потери в кабелях в условиях, приближенных к эксплуатационным.

6. Экспериментальная установка также позволяет проводить высоковольтные испытания в условиях, максимально близких к реальным, используя аппарат для испытания диэлектриков АИД-70.

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**В.П. Здорникова**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ33*

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Криогенные системы играют важную роль в различных областях науки и техники. Охлаждение до экстремально низких температур позволяет исследовать свойства материалов, а также обеспечивать эффективную работу различных чувствительных приборов. В таких системах происходит значительное уменьшение теплового шума, что позволяет достичь высокой чувствительности в различных приборах, используемых для научных исследований [2].

Однако с преимуществами, которые предоставляют криогенные технологии, также возникают и определенные вызовы, связанные с надежностью работы систем и их компонентов. Надежность криогенных систем напрямую зависит от качества используемых материалов и конструкций, способных выдерживать экстремальные условия. При стабильной работе на низких температурах критически важным становится обеспечение долговечности и надежности всех элементов системы. Это включает как сами криогенные установки, так и кабельные изделия (КИ), соединяющие их с остальным оборудованием.

В связи с этим особое внимание стоит уделить надежности КИ, используемых в криогенных системах. Они должны сохранять свои электрические и механические характеристики в условиях низких температур.

Важно, чтобы электрическое сопротивление КИ изменялось предсказуемым образом при переходе к криогенным температурам, чтобы избежать негативного влияния на функционировании системы. Одной из основных сложностей является то, что изменение сопротивления не всегда подчиняется линейным закономерностям, и это может привести к сложно предсказуемым аномалиям, особенно при температурах, близких к температурам жидкого гелия [6].

Теплоотвод в вакууме, особенно при криогенных температурах, представляет собой сложное явление, которое зависит от множества факторов, включая условия вакуума, свойства материала и геометрию поверхности теплоотводящего элемента. При высоких уровнях вакуума значительное количество воздушных молекул отсутствует, что исключает конвективные и проводящие механизмы теплопередачи. Таким образом, теплоотвод в данных условиях осуществляется за счет теплового излучения. Это означает, что при эффективном теплоотводе можно добиться более низких температур нагрева элементов системы, что в свою очередь повышает долговечность оборудования в целом [4].

Таким образом, для получения более полных результатов при измерении сопротивления токопроводящих жил (ТПЖ) КИ важно учитывать влияние как криогенных температур, так и вакуума как внешних факторов.

Сопротивление ТПЖ при низких температурах и высокой степени вакуума можно определить как экспериментально, так и с применением методов цифрового моделирования. В качестве образцов были использованы провода с медными и стальными токопроводящими жилами калибра AWG 30.

Экспериментальный подход реализован с использованием термовакуумной установки. При помощи вакуумно-откачной системы создается давление не более  $1,3 \cdot 10^{-9}$  атм, что соответствует высокой степени вакуума. Далее для достижения пониженной температуры порядка 7 К в камеру подается жидкий гелий. В процессе охлаждения образца необходимо контролировать температуру каждые 30 минут. Температурный режим считается достигнутым в случае изменения температуры на образце (охлаждения) менее 0,5 К в течение двух часов по каждому температурному датчику на образце.

Измерение сопротивления ТПЖ осуществлено при помощи омметра GOM-802 по четырехпроводной схеме. Разделение токовых и измерительных цепей в данной схеме позволяет устранить ошибку, вызванную сопротивлением самой проводки, поскольку это сопротивление не влияет на измеряемое значение. Процесс измерения устойчив к изменениям температуры и другим внешним условиям, благодаря чему обеспечивается высокая стабильность и повторяемость результатов [3].

Данное измерение основано на законе Ома, согласно которому ток ( $I$ ) через проводник между двумя точками пропорционален напряжению ( $V$ ) на этих двух точках согласно выражению [1]:

$$R_{exp} = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Как было сказано ранее, для достижения криогенной температуры используется жидкий гелий, который обладает отличными теплофизическими свойствами и способен эффективно охлаждать образцы до необходимого значения.

Однако следует учитывать, что жидкий гелий является очень дорогим ресурсом, и затраты на его приобретение могут существенно увеличивать общую стоимость экспериментальных исследований. Это создает потребность в поиске альтернативных методов, которые позволили бы сократить расходы и ускорить процесс эксперимента.

В связи с вышеизложенным, возникает необходимость в использовании компьютерного моделирования как эффективного инструмента для исследования физики проводников при

низких температурах. Одним из таких инструментов является программное обеспечение *COMSOL Multiphysics*, которое позволяет моделировать различные физические процессы, включая теплопередачу и электрическое сопротивление. Применение моделирования в *COMSOL* дает возможность исследовать зависимости сопротивления проводника от температуры и других параметров без необходимости фактического использования дорогих ресурсов, таких как жидкий гелий.

С помощью моделей кабельных изделий в среде *COMSOL Multiphysics* получены значения сопротивлений испытуемых образцов в условиях вакуума и криогенных температур.

С учетом результатов эксперимента произведен расчет сопротивления ТПЖ по выражению [1]:

$$R_{teor} = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала ТПЖ (Ом·м);  $l$  – длина образца (м);  $S$  – площадь поперечного сечения ТПЖ (м<sup>2</sup>).

Выражение (2) остается актуальной и для криогенных температур, при условии, что значения удельного сопротивления корректно адаптированы к текущим условиям. Такой подход обеспечивает высокую точность расчетов, что особенно важно для применения в высокоэффективных и чувствительных электрических системах, работающих при низких температурах.

Результаты определения сопротивления ТПЖ из различных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная оценка сопротивления токопроводящих жил, выполненных из различных материалов

Материал ТПЖ	Внешние условия	Сопротивление, Ом		
		$R_{teor}$	$R_{model}$	$R_{exp}$
Cu	$T_{ext} = 295$ К; $P_{ext} = 1$ атм	0,23379	0,22870	0,25
	$T_{ext} = 7$ К; $P_{ext} = 1,3 \cdot 10^{-9}$ атм	0,002475	0,002491	0,019
Сталь	$T_{ext} = 295$ К; $P_{ext} = 1$ атм	10,3143	10,283	11,52
	$T_{ext} = 7$ К; $P_{ext} = 1,3 \cdot 10^{-9}$ атм	6,8762	6,8586	7,75

*COMSOL Multiphysics*, как и многие другие программные продукты для численного моделирования, может определять электрическое сопротивление проводника, исходя из его удельной проводимости, что является частью общего подхода к анализу электрических свойств материалов.

Удельная проводимость в свою очередь является обратной величиной удельного сопротивления [1].

У большинства металлов, включая медь, при нормальных условиях сопротивление увеличивается с повышением температуры в соответствии с выражением [1]:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (1/К).

При нормальных условиях зависимость (3) является линейной что означает, что изменение температуры приводит к пропорциональному изменению сопротивления. Однако, при криогенных температурах зависимость между сопротивлением и температурой, в частности для меди, перестает быть линейной, в результате чего закон Ома перестает выполняться. Это объясняет некоторое расхождение экспериментальных значений и результатов моделирования.

Для стали подобного расхождения не наблюдается, поскольку для данного материала линейность зависимости (3) не нарушается вплоть до достижения криогенных температур [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика. Ч. II. Основы электродинамики. Электромагнитные колебания и волны: учебное пособие / С.И. Кузнецов. – 3-е изд., перераб. доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 253 с.
2. Ekin J. Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing. – Oxford university press, 2006.
3. Instruments K. Low Level Measurements Handbook // Precision DC Current, Voltage and Resistance Measurements. – 7th ed. – Keithley Instruments Inc.: Cleveland, OH, USA. – 2013. – С. 245.
4. McCarty R.D., Arp V.D. A new wide range equation of state for helium //Advances in Cryogenic Engineering: Part A & B. – Boston, MA : Springer US, 1990. – С. 1465–1475.
5. Simon N.J. Properties of copper and copper alloys at cryogenic temperatures //NIST monograph. – 1992. – Т. 177. – С. “8-6” –“ 8-22” .
6. White G.K., Meeson P.J. Experimental techniques in low-temperature physics. – Oxford University Press, 2002.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КУРСОВОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Е.В. Бейерлейн<sup>1</sup>, М.А. Проскуряков<sup>2</sup>**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ,  
<sup>1</sup> к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ; <sup>2</sup> группа 5А26*

Научный руководитель: Е.В. Бейерлейн, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Современное развитие электроэнергетики невозможно представить без асинхронных двигателей, которые играют ключевую роль в промышленной и бытовой деятельности. Эти машины являются основой для большей части электрических приводов благодаря своей надежности, простоте конструкции и экономичности. В настоящее время один из высокоэффективных методов проектирования является имитационное моделирование.

Имитационное моделирование является важным инструментом при проектировании и исследовании различных систем, включая асинхронные двигатели. Оно позволяет создать виртуальную модель объекта, на основе которой можно проводить анализ, тестирование и оптимизацию без необходимости реализовывать физический прототип.

В процессе моделирования можно реализовать статическое и динамическое моделирование, которое позволяет анализировать работу двигателя как в стационарных, так и в переходных режимах. Системный анализ оценивает взаимодействие между различными элементами системы, такими как контроллеры, преобразователи частоты и электрические нагрузки, а оптимизация позволяет находить наилучшие проектные решения, сокращая затраты и повышая эффективность.

В рамках курсового проектирования студенты могут использовать имитационные модели для выполнения следующих задач:

- Разработка модели асинхронного двигателя на основе заданных параметров.
- Исследование влияния различных факторов на работу двигателя (нагрузка, частота, питание).
- Анализ результатов моделирования с целью оптимизации проектных решений.
- Визуализация процессов, что способствует лучшему пониманию принципов работы асинхронных двигателей.

Использование имитационного моделирования в курсах проектирования асинхронных двигателей имеет целый ряд преимуществ, а именно моделирование позволяет избежать необходимости в создании физических прототипов, что значительно снижает расходы на ма-

териалы и оборудование. Помимо этого, есть возможность быстрого получения результатов анализа при изменении параметров модели ускоряет циклы проектирования и позволяет быстрее реагировать на изменения требований.

Один из самых важных преимуществ, является то, что студенты могут экспериментировать с различными параметрами и сценариями работы без каких-либо последствий для реального оборудования, что способствует их профессиональному росту и пониманию процессов. А также с помощью имитации можно выявлять скрытые проблемы и оптимизировать характеристики асинхронного двигателя, что впоследствии приводит к созданию более эффективных и надежных машин.

Пусковой момент асинхронного двигателя – это один из ключевых параметров, которые определяют его способность к запуску при нагрузке. Низкий пусковой момент может привести к неудовлетворительной работе оборудования, а в некоторых случаях и к повреждению узлов двигателя. Часто проблема заключается в том, что при пуске двигателя происходит значительное падение напряжения, что негативно сказывается на его характеристиках. Классические методы решения данной проблемы включают в себя увеличение ваттности двигателя, использование пусковых реле и различных схем подключения. Однако эти подходы могут не всегда быть экономически оправданными или допустимыми для конкретного применения. Поэтому использование имитационного моделирования представляется как один из наиболее перспективных инструментов для решения данной задачи.

Существует несколько способов анализа повышения пускового момента, которые позволяют понять механизмы, влияющие на пусковой момент, и разработать стратегии для его оптимизации:

- Использование математических моделей для оценки динамики пускового момента в зависимости от различных параметров, таких как нагрузка, скорость вращения и характеристики привода.
- Проведение экспериментальных испытаний на стендах для измерения реального пускового момента и его зависимости от различных условий работы.
- Сравнение спектров пускового момента различных конструкций или типов двигателей для выявления оптимальных решений.
- Применение датчиков и трансмиттеров для непосредственного измерения пускового момента в реальных условиях.
- Изучение изменений тока и напряжения на стадии запуска для определения эффективности и изменений пускового момента.

Имитационное моделирование позволяет исследовать поведение асинхронного двигателя в различных режимах работы ещё до его реального изготовления. С помощью специализированных программных средств можно провести анализ динамических процессов, возникающих в момент запуска, и оценить влияние различных факторов на пусковой момент.

Благодаря имитационному моделированию, инженеры имеют возможность экспериментировать с конфигурациями: проводить исследования, изменяя параметры конструкции, такие как число полюсов, геометрия статора и ротора, а также материалы, оптимизировать системы управления: разработать более эффективные методы управления, которые смогут улучшить пусковой момент без необходимости значительных затрат на доработку физической модели, моделировать нестандартные ситуации: исследовать поведение двигателя при различных условиях эксплуатации, например, при изменении нагрузки или сбоях в электропитании и сокращать время и затраты на разработку: позволяя избежать дорогостоящих экспериментов с готовыми образцами, имитационное моделирование дает возможность быстро находить оптимальные решения.

Использование имитационного моделирования при курсовом проектировании асинхронного двигателя может стать важным шагом к улучшению его пускового момента и других

ключевых характеристик. Это позволит не только повысить эффективность работы двигателей, но и существенно сократить время и затраты на их разработку и внедрение. На этапе проектирования, когда все изменения еще легко вносятся, имитационное моделирование предстаёт как мощный инструмент, способный помочь в решении актуальных проблем современного машиностроения. В настоящее время один из самых распространенных инструментов для проектирования электродвигателей является программное обеспечение Ansys Motor-CAD.

Программное обеспечение Ansys Motor-CAD, предназначена для проектирования электродвигателей и оценки электромагнитных, тепловых и прочностных характеристик электродвигателей во всех режимах эксплуатации с учётом различной топологии. Особенности данного программного продукта заключается в том, что все расчеты производится очень быстро, т. к. в нем вложены шаблоны в это программное обеспечение, они основаны на 2D моделировании, и они сочетают аналитических уравнений с методами конечных элементов, это позволит нам очень сильно сократить время расчета. Данный программный продукт не является заменой других продуктов, он является дополнительным инструментом, который позволяет перейти от предварительного расчета конструкции сразу к моделированию конструкции двигателя. Специфика данного продукта заключается в том, что есть шаблоны моделей, а именно набор предустановленных шаблонов типовых машин, которые позволяют быстро собрать нужную конструкцию электрической машины, помимо этого есть свой модуль программы, к которому соответствует свой набор шаблонов.

Процесс электромагнитного моделирования, заключается в том, что есть набор шаблонов типовых машин. Данный продукт имеет перечень электрических машин. Тем самым данный набор предустановленных шаблонов типовых машин позволяет быстро собрать нужную конструкцию электрической машины. Каждому модулю программы соответствует свой набор шаблонов.

Задание геометрии происходит по предварительным расчетным и справочным параметрами. Параметры типовой геометрии электрической машины, которая изображена на рис. 1: 4-полюсная, частота питания составляет – 50 Гц, 48 пазов статора и 56 пазов ротора.

Таким образом, использование имитационного моделирования в курсовом проектировании асинхронного двигателя открывает новые перспективы для повышения качества и эффективности образовательного процесса, а также способствует созданию более совершенных электрических машин.

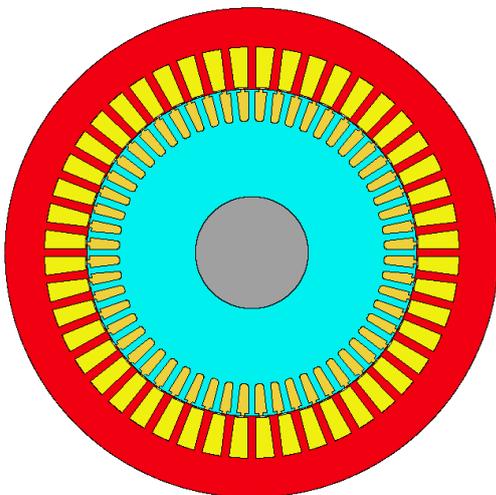


Рис. 1. Радиальный вид типовой геометрии электрической машины

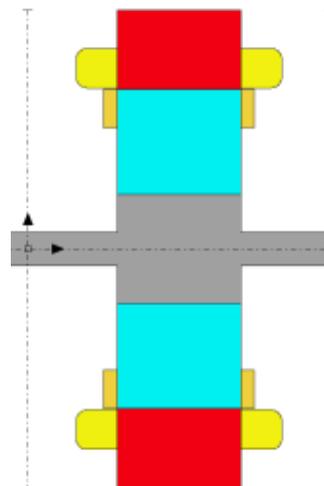


Рис. 2. Осевой вид типовой геометрии электрической машины

Помимо этого, имитационное моделирование представляет собой мощный инструмент в процессе курсового проектирования асинхронных двигателей, которое позволяет выполнять углубленный анализ работы двигателя, а именно исследовать динамические процессы и характеристики различных режимах работы. Также можно оптимизировать конструктивные и эксплуатационные параметры двигателя, что приводит к повышению его эффективности и надежности.

Одним из важных аспектов является то, что имитационное моделирование позволяет сократить время и ресурсы на физические испытания, что делает процесс разработки более экономичным, однако еще одним важным аспектом может служить то, что модели могут быть быстро изменены для учета новых данных или при внесении модификаций, что делает имитационное моделирование гибким инструментом в случае изменений в проекте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копырин В.А., Смирнов О.В. Имитационное моделирование режимов работы погружного асинхронного электродвигателя // ОНВ. – 2018. – № 1 (157). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-rezhimov-raboty-pogruzhnogo-asinhronnogo-elektrodvigatelya> (дата обращения: 13.11.2024).
2. Петров А.В., Котельников А.П., Плохов И.В. Динамическое имитационное моделирование асинхронной электрической машины с использованием выражений для мгновенных значений величин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 8 (50). – URL: <https://research-journal.org/archive/8-50-2016-august/dinamicheskoe-imitatsionnoe-modelirovanie-asinhronnoj-elektricheskoy-mashiny-s-ispolzovaniem-vyrazhenij-dlya-mgnovennykh-znachenij-velichin> (дата обращения: 13.11.2024). – doi: 10.18454/IRJ.2016.50.158
3. Захаренко В.С., Дорошенко И.В. Особенности имитационного моделирования асинхронного двигателя для составления модели с учетом коммутации и при несимметричных схемах включения // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого: научно – практический журнал. – 2011. – № 3. – С. 66–73 (дата обращения: 24.11.2024).
4. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Стародубцев Д.А. Моделирование оптимального управления асинхронным приводом. Современные технологии. Системный анализ. // Моделирование. – 2023. – № 1(77). – С 83–93. – URL: <https://ojs.irgups.ru/index.php/stsam/article/view/1070> (дата обращения 24.11.2024).
5. Волков А.В., Крикота С.М. Имитационная модель двухзвенного непосредственного преобразователя частоты, нагруженного на асинхронный двигатель // Электротехника і електроенергетика. – 2007. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-dvuhzvennogo-neposredstvennogo-preobrazovatelya-chastoty-nagruzhennogo-na-asinhronnyy-dvigatel> (дата обращения: 24.11.2024).
6. Дорошенко И.В., Погуляев М.Н. Имитационная модель асинхронной машины с фазным ротором в MATLAB SIMULINK // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2021. – № 2 (85). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-asinhronnoy-mashiny-s-faznym-rotorom-v-matlab-simulink> (дата обращения: 24.11.2024).
7. Шандарова Е.Б., Букреев В.Г., Быстров Е.А. Имитационное моделирование асинхронного электропривода насоса погружного технологического оборудования // ЭС и К. – 2021. – № 4 (53). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-asinhronnogo-elektroprivoda-nasosa-pogruzhnogo-tehnologicheskogo-oborudovaniya> (дата обращения: 24.11.2024).

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

**К.М. Сыздыков, Фам Чонг Хай**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ35; студент-аспирант*

Научный руководитель: А.А. Шилин, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Рассмотрена проблематика оптимизации работы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в частности квадрокоптеров, путем улучшения методик записи и анализа переходных процессов. Разработано устройство, которое позволит с высокой точностью записывать и анализировать данные о переходных процессах БПЛА в условиях реального времени, с применением фильтра Калмана. Значительно улучшены настройки систем управления, минимизировано влияние внешних и внутренних помех. Исследование направлено на повышение надежности и безопасности беспилотных летательных аппаратов, на расширение их функциональных возможностей.

**Ключевые слова:** квадрокоптер, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, переходные процессы, полётный контроллер, ESP32, гироскопы.

The problems of optimizing the operation of unmanned aerial vehicle (UAVs), in particular quadcopters, by improving the methods of recording and analyzing transients are considered. A device has been developed that will allow recording and analyzing data on the transients of a quadcopter in real time with high accuracy. Control system settings have been significantly improved, and the influence of external and internal interference has been minimized. The study has shown a significant increase in the reliability and safety of unmanned aerial vehicles, providing the expansion of their functionality.

**Keywords:** quadcopter, unmanned aerial vehicles, UAVs, transients, flight controller, ESP32, gyroscope.

## Введение

В данной работе предлагается новый алгоритм управления для БПЛА, направленный на решение проблемы записи переходных процессов в условиях ограниченных вычислительных ресурсов стандартных полётных контроллеров. Этот алгоритм использует микроконтроллер ESP32 [2] и позволяет записывать временные изменения состояния аппарата (переходные процессы), что обеспечивает глубокий анализ поведения БПЛА в динамических условиях.

Основное назначение нового алгоритма – эффективное использование оперативной памяти микроконтроллера ESP32 для записи переходных процессов в режиме реального времени. В отличие от стандартных контроллеров, не способных сохранять данные из-за ограничения памяти, предложенный алгоритм позволяет выделить 140–200 килобайт из 500 доступных на ESP32, что достаточно для хранения данных с частотой до тысячи раз в секунду.

Алгоритм также включает гибкий механизм управления записью данных через свободные каналы, что позволяет оператору вручную запускать и останавливать запись переходных процессов по мере необходимости. Этот подход позволяет сохранить важные данные о реакциях БПЛА на внешние воздействия, такие как порывы ветра и манёвры, для последующего анализа и оптимизации управления.

На сегодняшний день микроконтроллер ESP32 широко используется для разработки полётных контроллеров, применяемых в БПЛА и других летательных аппаратах [3]. Благодаря своей высокой производительности и относительно большому объёму оперативной памяти, этот микроконтроллер позволяет выполнять стандартные задачи управления и стабилизации, что делает его популярным выбором среди разработчиков.

## Основные возможности стандартных решений [1]

Полётные контроллеры на базе ESP32 обеспечивают базовые функции управления БПЛА, такие как:

- поддержание устойчивости и стабилизация аппарата [6];
- контроль углов крена, тангажа и рысканья [7];
- выполнение простых манёвров для корректного выполнения полётных заданий [8].

Тем не менее, несмотря на широкий спектр функциональных возможностей, ни одно из существующих решений на базе ESP32 не поддерживает запись переходных процессов. Эти системы в основном разрабатываются для решения бытовых и прикладных задач, где сохранение временных изменений состояния летательного аппарата не является обязательным.

Ключевой недостаток текущих решений заключается в их неспособности записывать переходные процессы из-за ограничения объёма оперативной памяти. Для записи данных, фиксирующих мельчайшие изменения состояния аппарата (переходные процессы), требуется высокая частота сохранения (до тысячи раз в секунду), что требует значительных ресурсов памяти и вычислительных мощностей. Однако большинство контроллеров для БПЛА, вклю-

чая решения на базе ESP32, не располагают достаточным объёмом оперативной памяти для записи переходных процессов в режиме реального времени.

Отсутствие возможности записи переходных процессов ограничивает применение этих контроллеров в научных и исследовательских задачах, где данные о поведении БПЛА в условиях полёта могут использоваться для глубокого анализа и оптимизации алгоритмов управления.

Предложенное решение представляет собой комплексную систему управления БПЛА, в которой микроконтроллер ESP32 интегрируется с тремя типами гироскопов, обеспечивая точное измерение и анализ переходных процессов. Основная идея заключается в том, чтобы создать систему, которая не только управляет БПЛА, но и предоставляет возможность гибкого сбора данных о переходных процессах, что особенно важно для исследовательских задач.

### **Многокомпонентная система датчиков и микроконтроллера**

В данном проекте используется комбинация из трёх различных типов гироскопов, что позволяет повысить точность считывания данных и расширить диапазон параметров, фиксируемых в полёте. Эти гироскопы обеспечивают измерение отклонений по различным осям, регистрируют колебания и нестабильности, возникающие в полёте, и передают данные на микроконтроллер ESP32. Это позволяет фиксировать переходные процессы с высокой точностью, что делает систему пригодной для анализа тонких отклонений, таких как реакция на порывы ветра или выполнение маневров.

ESP32 в данной системе выполняет двойную задачу: управляет БПЛА и записывает переходные процессы. Этот микроконтроллер способен обрабатывать и синхронизировать данные от трёх типов гироскопов и, благодаря специальному алгоритму управления, эффективно распределять ресурсы для записи важных параметров полёта. Система поддерживает высокую частоту сбора данных, что позволяет сохранить детальную картину поведения аппарата в динамических условиях.

### **Использование дополнительных каналов управления**

Уникальная функция данного контроллера – использование дополнительных каналов управления для управления процессом записи данных. Классические полётные контроллеры используют до восьми каналов, тогда как данное решение позволяет задействовать только четыре канала (тяга, крен, тангаж и рысканье). Данные каналы предназначены для запуска и остановки записи переходных процессов, что даёт оператору полный контроль над процессом сбора данных и позволяет гибко управлять записью, выбирая только ключевые моменты для сохранения.

Данная система позволяет оператору выбирать, какие типы переходных процессов должны фиксироваться в памяти, что важно для оптимизации ресурсоёмкости записи и фокусирования на наиболее значимых для анализа параметрах. Этот подход обеспечивает точное документирование реакций БПЛА на различные внешние воздействия, адаптируя систему под задачи конкретных исследований и экспериментов.

В предложенной системе используется интеграция микроконтроллера ESP32 с тремя типами гироскопов и системой управления, что обеспечивает высокую точность данных и гибкость управления БПЛА в условиях полёта. Реализация данного решения требует синхронной работы аппаратного и программного обеспечения для записи и анализа переходных процессов.

Аппаратная часть системы основана на ESP32 как центральном элементе управления, к которому подключены три различных гироскопа, каждый из которых фиксирует данные по различным осям движения. Такая комбинация позволяет получить полное представление о положении и перемещении БПЛА, а также о его реакции на внешние факторы. Каждый гироскоп может измерять отклонения и передавать данные в реальном времени, что особенно важно для анализа переходных процессов в условиях динамичного полёта.

Кроме того, в систему включены модули управления, которые поддерживают до восьми каналов. Четыре из этих каналов используются для стандартных параметров управления (тяга, крен, тангаж, рысканье), а остальные каналы отведены под контроль записи данных, выбора типов переходных процессов и их остановки. Эта система каналов обеспечивает простоту в управлении и высокую функциональность для оператора.

На программном уровне система работает с алгоритмом, который позволяет контролировать одновременно как управление БПЛА, так и сбор данных. Специальные процедуры на основе алгоритма обеспечивают синхронизацию данных от разных гироскопов и их запись с высокой частотой. Программное обеспечение также поддерживает настройку на разные условия эксперимента, давая возможность выбирать конкретные переходные процессы для анализа, что позволяет избежать избыточной записи и сэкономить ресурсы.

Ключевая особенность программного обеспечения – алгоритм распределения памяти и обработки данных. Он позволяет одновременно фиксировать переходные процессы и управлять БПЛА, минимизируем нагрузку на процессор ESP32. Данные от гироскопов в каждом переходном процессе сохраняются с привязкой к временным меткам, что позволяет получить более полное и детализированное представление о динамике полёта.

Система контроллера включает несколько этапов:

1. *Инициализация и настройка:* Подключение к гироскопам и каналам управления.
2. *Запуск режима полёта:* Вход в состояние управления с возможностью выбора записи данных.
3. *Запись переходных процессов:* При активации записи система начинает фиксировать временные изменения, полученные от гироскопов, и сохранять их с высокой частотой.
4. *Завершение записи:* Оператор может остановить процесс записи по команде, после чего данные остаются в памяти для дальнейшего анализа.

Эта последовательность обеспечивает точное выполнение всех задач контроллера и позволяет исследовать переходные процессы в разных условиях, что крайне важно для научных экспериментов.

В данной работе предложена концепция новой системы управления квадрокоптером на базе микроконтроллера ESP32, которая позволяет не только выполнять стандартные функции управления, но и записывать переходные процессы в условиях полёта. Эта система интегрирует три типа гироскопов и использует дополнительные каналы управления для гибкой настройки записи, что делает её уникальной по сравнению с существующими решениями.

Ключевым отличием предложенной системы является возможность собирать и анализировать данные о переходных процессах, что даёт исследователям более полное представление о поведении квадрокоптера при различных условиях полёта. Это особенно важно для научных и прикладных задач, связанных с оптимизацией систем управления летательными аппаратами. Возможность выбора типов переходных процессов и управления записью с помощью дополнительных каналов делает систему удобной и адаптируемой под конкретные исследовательские задачи.

## Заключение

Данная идея открывает перспективы для дальнейших исследований и разработки усовершенствованных алгоритмов управления, способных адаптироваться к динамичным условиям окружающей среды. В будущем предполагается расширение функциональности системы, интеграция дополнительных сенсоров и улучшение алгоритмов для ещё более точного управления и анализа данных.

Таким образом, предложенная концепция не только решает текущие ограничения стандартных полётных контроллеров, но и создаёт основу для создания исследовательских установок, которые могут существенно продвинуть исследования в области управления мультикоптерами и их применения в сложных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенд для исследования фильтра калмана в системе управления мультикоптером, смоделированным в среде Matlab / Фам Чонг Хай, А.М. Гунько, Б.И. Батомункуев, А.И. Салмин ; науч. рук. А.А. Шилин // Бутаковские чтения : сборник статей III Всероссийской с международным участием молодежной конференции, 12–14 декабря 2023 г., Томск. – Томск : Изд-во ТПУ, 2023. – С. 549–552.
2. ESP32 NodeMCU: руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Версия от 29.06.2021. – Доступно по: <https://joy-it.net/files/files/Produkte/SBC-NodeMCU-ESP32/SBC-NodeMCU-ESP32-Manual-2021-06-29.pdf> (дата обращения: 13.11.2024).
3. ESP32: проекты [Электронный ресурс]. – URL: <https://microkontroller.ru/esp32-projects/> (дата обращения: 13.11.2024).
4. Осциллограф на ESP32 [Электронный ресурс]. – URL: <https://microkontroller.ru/esp32-projects/oscillograf-na-esp32/> (дата обращения: 13.11.2024).
5. Как я разработал квадрокоптер на ESP32 с нуля – ушло 4 года [Электронный ресурс]. – URL: [https://pcnews.ru/blogs/kak\\_a\\_razrabotal\\_kvadrokoopter\\_na\\_esp32\\_s\\_nula\\_uslo\\_4\\_goda-1444579.html](https://pcnews.ru/blogs/kak_a_razrabotal_kvadrokoopter_na_esp32_s_nula_uslo_4_goda-1444579.html) (дата обращения: 13.11.2024).
6. Perks K., Theys B. A Control Approach for Transitioning VTOL UAVs with Continuously Varying Transition Angle and Controlled by Differential Thrust [Электронный ресурс] // Semantic Scholar. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/85d6/8372c8c81096c875f9fcc8eb6a0f4d030ca.pdf> (дата обращения: 13.11.2024).
7. Theys B., et al. A Control Approach for Transitioning VTOL UAVs with Continuously Varying Transition Angle and Controlled by Differential Thrust [Электронный ресурс] // ResearchGate. – URL: [https://www.researchgate.net/profile/Bart-Theys/publication/304802673\\_A\\_control\\_approach\\_for\\_transitioning\\_VTOL\\_UAVs\\_with\\_continuously\\_varying\\_transition\\_angle\\_and\\_controlled\\_by\\_differential\\_thrust/links/5aaa3b370f7e9b88266fd058/A-control-approach-for-transitioning-VTOL-UAVs-with-continuously-varying-transition-angle-and-controlled-by-differential-thrust.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Bart-Theys/publication/304802673_A_control_approach_for_transitioning_VTOL_UAVs_with_continuously_varying_transition_angle_and_controlled_by_differential_thrust/links/5aaa3b370f7e9b88266fd058/A-control-approach-for-transitioning-VTOL-UAVs-with-continuously-varying-transition-angle-and-controlled-by-differential-thrust.pdf) (дата обращения: 13.11.2024).
8. Marmol L.G. et al. Autonomous UAV Systems for Remote Sensing and Environmental Monitoring // MDPI. – 2023. – Т. 11, № 8. – С. 654. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.mdpi.com/2226-4310/11/8/654> (дата обращения: 13.11.2024).

## ГАШЕНИЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**В.С. Фёдоров**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, Группа 5A15*

Научные руководители: В.В. Шестакова, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ;  
А.Ю. Юшков, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ

В настоящее время потребности общества в электроэнергии возрастают ежегодно. Также можно отметить, что постоянно увеличиваются объемы передачи электрической энергии на значительные расстояния, сотни километров. Как известно, потери при передаче энергии на переменном токе значительны. Кроме того, включение линий переменного тока требует соблюдения условий синхронизма. Передача энергии по линиям постоянного тока сопровождается значительно меньшими потерями (энергия теряется только за счет активного сопротивления проводов) и не требует синхронизации.

Однако внедрение систем электропередачи на постоянном токе приводит к другой проблеме – неспособности известных коммутационных аппаратов отключать цепи с постоянным током. Для сравнения приведем следующие значения. Предельный отключаемый ток короткого замыкания на переменном токе равен 250 кА, а предельное значение для постоянного тока – всего 5 кА, в 50 раз меньше [1]. В связи с этим проблема конструирования надежных и сравнительно дешевых выключателей постоянного тока является актуальной.

Одно из известных решений гашения дуги постоянного тока заключается в применении магнитного поля [2]. При нахождении электрической дуги в силовых линиях магнитной индукции на заряженные частицы, в большей части на электроны, оказывает действие сила Лоренца. Это приводит к движению плазмы, увеличению ее сопротивления из-за увеличения длины плазменного шнура и, как следствие, его последующему погасанию.

Известные принципы гашения дуги в выключателях многогранны и включают в себя разные подходы к созданию магнитного поля, как продольного, так и поперечного. В данной работе предлагается усовершенствование конструкции выключателя постоянного тока для надежного гашения дуги.

В качестве исходной идеи был принят опыт Де-Ля-Риво, заключающийся в зажигании электрического разряда в продольном магнитном поле [3]. Как показал опыт Де-Ля-Риво, электрический разряд (дуга) вращается вокруг стального сердечника электромагнита под действием силы Лоренца. В результате действия магнитного поля, электрический разряд двигается вокруг стержня, что приводит к удлинению токопроводящего канала и, в результате, его разрыву. Именно этот опыт послужил основой разработки конструкции комбинированного принципа гашения электрического разряда в магнитном поле и поглощением тепла.

Предлагается осуществлять гашение дуги за две стадии:

1. Включение поля и придания углового момента плазменному шнуру.
2. Создание условий для закручивания плазменного шнура вокруг диэлектрического стержня с канавкой.

Важным отличием от известных систем дугогашения является наличие в конструкции выключателя диэлектрического стержня. Внутри этого стержня, проходящего вдоль всей камеры, располагаются магнитопроводы электромагнитов. Необходимо отметить, что на диэлектрическом стержне имеются канавки, которые играют также 2 роли:

1. В канавки «укладывается» плазменный шнур.
2. Увеличение длины поверхности приводит к усложнению зажигания поверхностного разряда.

Именно внедрение канавок и действие поля не позволяет возникать поверхностному заряду. Даже в случае его возникновения сила Ампера приведет к отделению стримера от поверхности и дальнейшему погасанию, предотвращая тем самым переход в дуговое замыкание.

На рис. 1 приведен чертеж прототипа вакуумного выключателя с магнитными катушками.

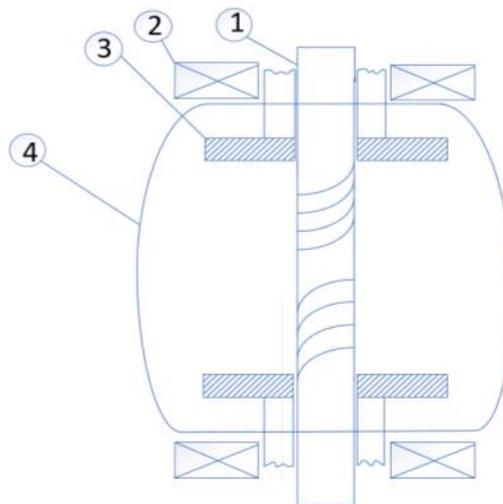


Рис. 1. Конструкция выключателя: 1 – диэлектрический стержень; 2 – магнитные катушки; 3 – контактная поверхность; 4 – корпус аппарата

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum.2008. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/224349717\\_DC\\_vacuum\\_circuit-breaker](https://www.researchgate.net/publication/224349717_DC_vacuum_circuit-breaker) (дата обращения 03.10.2024)
2. International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED) DC vacuum circuit breaker.
3. 2017. – URL: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/oap-cired.2017.0229> (Дата обращения 12.09.2024)
4. Plasma diffusion across a magnetic field.1986. Los Alamos. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167278986900473> (Дата обращения 01.11.2024)

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

**Р.А. Миронов, Т.В. Усачева**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ43*

Научный руководитель: Т.В. Усачева, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Современным подходом к проектированию трансформаторов является принятие новых расчетных и конструктивных решений, направленных на обеспечение требований по повышению ресурсосбережения. На сегодняшний день у электротехнических организаций имеется обширный арсенал материалов и технических решений, позволяющих эффективно выполнять оптимальное проектирование электротехнических устройств. Поэтому в качестве цели исследования модернизации силового трансформатора была поставлена задача определения возможности замены материала обмоток силового трансформатора на этапе оптимального проектирования.

Метод оптимального проектирования позволяет вести предварительный расчет силового трансформатора в обобщенном виде, без углубления в особенности технологии изготовления, но с оценкой результатов с разных точек зрения, в том числе и с экономической. С учетом оптимального проектирования силового трансформатора можно обеспечить его ресурсосбережение при соответствующей мощности, т. е. среди альтернативных вариантов выбрать оптимальную геометрию силового трансформатора при минимальных затратах активных материалов выполнив оценку стоимости активной части [1].

При модернизации и совершенствовании линейки распределительных силовых трансформаторов для изготовления обмоток используется медь или алюминий. Разрыв между производством меди и ростом ее потребления, а также выявленными при эксплуатации недостатками алюминия привели к поиску конструктивного решения обмоточного провода, сочетающего лучшие свойства обоих материалов. Перспективным решением становится – алюмомедь, материал, который благодаря своему строению (сердечник из алюминия, покрытый медной лентой) сочетает в себе свойства высокой электропроводности от меди и малого удельного веса от алюминия [2].

Таким образом становятся очевидным возможность модернизации трансформаторов, изготовленных из алюмомедного обмоточного провода. Для количественной оценки нужно определить стоимость активной части, выполнить сравнение экономических и электротехнических показателей обмоток, сделанных из меди, алюминия, алюмомеди, в чем и может помочь оптимальное проектирование.

Оценка возможностей модернизации трансформаторов при проектировании с целью определения замены материала обмоток выполнено на примере трехфазного силового трансформатора марки ТМ номинальной мощностью  $S_N = 160$  кВА, с соотношением напряжений  $U_{ВН}/U_{НН} = 35/0,4$  кВ, потерями  $P_{ХХ} = 0,46$  кВт и током  $I_{ХХ} = 1,7$  % холостого хода.

Свойства алюмомедного провода отличаются от медного и от алюминиевого, из-за чего проектирование трансформаторов по принятым для них эмпирическим коэффициентам при определении коэффициента экономичности требует корректировки. Примем проводимость меди 100 %, тогда алюминиевый проводник будет иметь проводимость 62 %, а алюмомедный соответственно 68 %. При расчете механических напряжений используются пределы прочностей данных материалов, а эмпирические коэффициенты подбираются с помощью пропорций.

Принятые основные эмпирические коэффициенты, используемые при проектировании силовых трансформаторов с обмотками на основе медных, алюминиевых и алюмомедных проводов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение эмпирических коэффициентов при проектировании

Обозначение коэффициента	Расшифровка коэффициента	Материал обмоток		
		Медная	Алюминиевая	Алюмомедная
$K_j$	Коэффициент определения плотности тока	0,746	0,463	0,508
$K$	Коэффициент предельного значения $x$ для плотности тока	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$12,75 \cdot 10^{-12}$	$5,79 \cdot 10^{-12}$
$K(M)$	Коэффициент определения механического растягивающего напряжения в проводе	$0,244 \cdot 10^{-6}$	$0,152 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$

В результаты проектирования силового трансформатора с разными материалами обмоток представлены в табл. 2. Сравнение силовых трансформаторов в зависимости от материала обмоточного провода проводилось по: коэффициенту экономичности ( $\beta$ ), средней плотности токов, механической прочности, геометрии окна магнитной системы (диаметр, длина и расстояние между стержнями), геометрии обмоток (диаметр провода, внешние и внутренние диаметры обмоток), массе стали и металла обмоток, параметрами, регламентированными ГОСТ 11677-85 [3].

Таблица 2. Параметры трансформатора ТМ-160  
в зависимости от материала обмоточного провода

Обозначение параметра, ед. измерения	Расшифровка параметра	Материал обмоток		
		Медь $\beta=1,681$	Алюминий $\beta=1,073$	Алюмомедь $\beta=1,152$
$d$ , м	Диаметр стержня	0,14	0,13	0,13
$P_c$ , м <sup>2</sup>	Активное сечение стержня	0,0135	0,0120	0,0120
$d_{12}$ , м	Диаметр осевого канала между обмотками	0,196	0,193	0,185
$l$ , м	Высота обмотки	0,366	0,565	0,505
$l_c$ , м	Высота стержня	0,516	0,715	0,595
$c$ , м	Расстояние между осями соседних стержней	0,303	0,313	0,297
$C_{a.ч.}$ , о.е.	Стоимость активной части	518,7	463,8	468,2
$P_{xx}$ , Вт	Потери холостого хода	422,3	428,9	402,6
$I_{xx}$ , %	Ток холостого хода	1,596	1,273	1,278
$G_c$ , кг	Масса стали в стержнях	140,7	174,0	158,3
$G_y$ , кг	Масса стали двух ярм	169,2	148,1	141,6
$G_v$ , кг	Масса стали угла плоской магнитной системы	13,3	10,7	10,7
$G_{ст}$ , кг	Общая масса стали магнитной системы	309,9	322,1	299,8
$G_o$ , кг	Масса металла обмоток	108,7	69,1	85,2
$G_{пр}$ , кг	Действительная масса провода для обмотки	115,4	78,3	93,0

Поиск оптимального варианта для определения минимальной стоимости активной части ведется графически (рис. 1–3). Заштрихованные зоны определяют параметры, являющиеся ограничениями. Выбор значения коэффициента экономичности ( $\beta$ ) предусматривается только в незаштрихованных зонах [4].

Так анализ графического представления результатов расчета силового трансформатора с обмотками из меди показывает предельное значение  $\beta = 2,09$  для заданного значения потерь холостого хода  $P_{xx} = 0,46$  кВт. Для значения тока холостого хода  $I_{xx} = 1,7$  % предельное значение  $\beta = 1,89$ . Предельные значения для плотности тока, при допустимой плотности тока  $J = 4,5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, и механической прочности, с допустимым значением  $\sigma_p = 60$  МПа, ны  $\beta = 5,42$  и  $\beta = 47,64$  соответственно. Окончательное решение по выбору параметра  $\beta$  принимаем с учетом нормализованных диаметров стержня. Выбираем диаметр стержня магнитной системы  $d = 0,14$  м при  $\beta = 1,681$ . Все рассматриваемые параметры оказываются в пределах допустимых значений. Проведя аналогично анализ результатов расчета для обмоток из алюминия и алюмомеди выбираем диаметры стержня магнитной системы  $d = 0,13$  м при  $\beta = 1,073$  и  $d = 0,13$  м при  $\beta = 1,152$  соответственно.

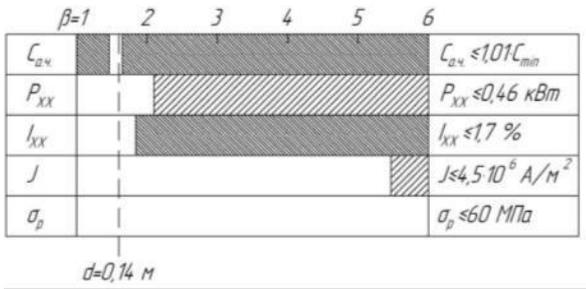


Рис. 1. Определение оптимального значения  $\beta$  и диаметра стержня  $d$  для варианта с медными обмотками

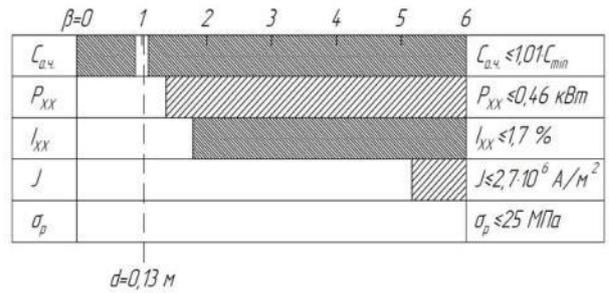


Рис. 2. Определение оптимального значения  $\beta$  и диаметра стержня  $d$  для варианта с алюминиевыми обмотками

Для наглядной оценки возможностей модернизации по результатам оптимального проектирования были построены гистограммы (рис. 4–7), показывающие сравнение основных параметров трансформатора в зависимости от материала обмоток.

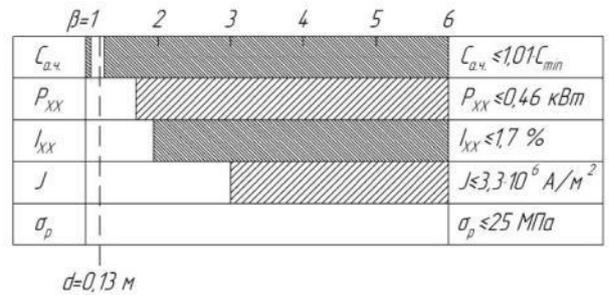


Рис. 3. Определение оптимального значения  $\beta$  и диаметра стержня  $d$  для варианта с алюмомедными обмотками

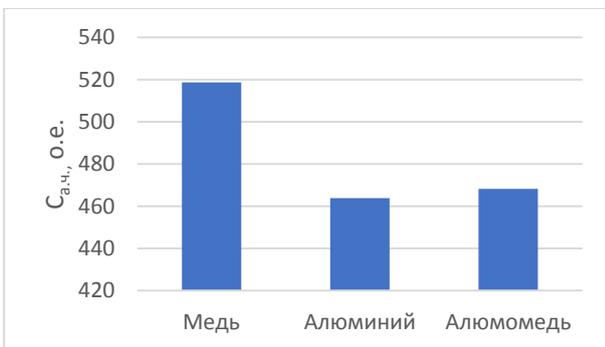


Рис. 4. Стоимость активной части трансформатора

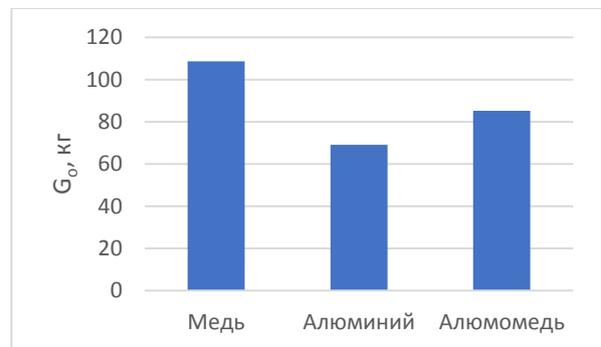


Рис. 5. Масса обмоток трансформатора

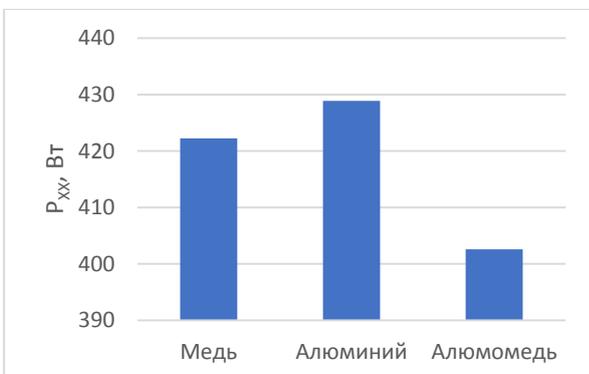


Рис. 6. Потери холостого хода

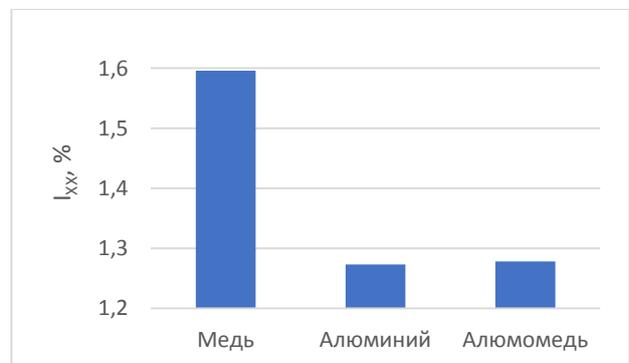


Рис. 7. Ток холостого хода

В процессе расчетов, анализа и оценки таблиц и графических зависимостей было выявлено, что вариант трансформатора ТМ-160/35 с алюмомедными обмотками, в силу меньшего значения массы активной части и равных электротехнических характеристиках, является наиболее выгодным решением. Так минимальная стоимость активной части с алюмомедными обмотками будет ниже и составит 468.2 о.е., с медными 518.7 о.е. и с алюминиевыми 463.8 о.е. соответственно. При этом стоимость материалов обмоток составляет: для провода из алюмомеди АМ-120 1366 руб/кг; для провода из меди М-120 709 руб/кг; для провода из алюминия А-120 1147 руб/кг [5].

При применении обмоток силового трансформатора на основе алюмомедных проводов так же наглядно видно уменьшение уровня потерь и тока холостого хода.

Результаты проектирования силовых трансформаторов показывали, что переход с медных обмоток на алюминиевые при изменении основных размеров магнитопровода приводит к тому, что потери в сердечнике практически не изменяются. Но разница по плотности тока между медью и алюминием при изменении основных размеров магнитопровода позволяет увеличить поперечное сечение алюминиевого проводника, что уменьшает затраты на материалы и снижает стоимость активной части. Алюмомедные провода, в этом случае, являются оптимальным решением, поскольку стоимость алюмомедного проводника сопоставима со стоимостью алюминиевого, а электротехнические свойства близки к проводу из меди, поэтому затраты, необходимые на алюмомедный материал, будут окупаться его электротехническими параметрами, что с учетом постоянно повышающейся стоимостью электроэнергии принципиально.

Следовательно, при дальнейшей оценке возможностей модернизации трансформаторов при проектировании оптимальный вариант нужно искать при соотношении толщины слоя меди относительно алюминия в алюмомедном обмоточном проводе и учете особенностей технологии изготовления биметаллического провода, что в свою очередь отразится на значениях эмпирических коэффициентов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учебное пособие. – Изд. 7-е. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 528 с.
2. Елшибек А.А. Исследование возможности модернизаций силового трансформатора с обмотками из алюминия // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы III российской молодежной научной школы-конференции, г. Томск, 21–23 октября 2015 г. – Томск: СКАН, 2015. – С. 25–27.
3. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – ИПК издательство стандартов. – 39 с.
4. Сунь Хунбо, Ши Си Обоснование выбора основных размеров силовых трансформаторов / науч. рук. Т.В. Усачёва // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: труды IX региональной научно-практической студенческой конференции, 2–5 июня 2009 г., Томск / Томский политехнический университет (ТПУ), Электротехнический институт (ЭЛТИ). – 2009. – Т. 1: Секция 1–2. Электроизоляционная и кабельная техника. Электротехническое материаловедение и электротехнологии. Секции 8–9. Электрические машины. Электрические и электронные аппараты. Секция 10. Инженерная и компьютерная графика. – С. 125–128. – Библиогр.: 1 назв.
5. Повный А. Алюмомедные провода [Электронный ресурс] // Электрик Инфо: сайт для электриков. – URL: <https://elektrik.info/main/news/538-alyumomednye-provoda.html> (дата обращения 31.10.2024).

## ТОРМОЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА ДЛЯ САМОЛЁТА

Х.С. Юнусов

*Томский политехнический университет*

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ.

Цель работы – разработка тормозного устройства самолета на базе электрической машины.

Есть определенный опыт в грузоподъемном машиностроении: при торможении электродвигатель переводится в режим электромагнитного тормоза, при снижении частоты вращения до 40–15 % от номинального значения накладывается механический тормоз [1]. В связи с этим снижается время и стоимость технического обслуживания. Значительно упрощается система управления такого торможения с развитием цифровой электроники.

Если использовать аналогичное техническое решение при посадке самолета, то вместо дискового тормоза можно применить электрическую машину, работающую в режиме электромагнитного тормоза. В конце посадки для фиксации вала ходовой части шасси, в соответствии с требованиями техники безопасности, необходимо использовать стояночный тормоз. В качестве привода тормоза можно использовать электромагнитное устройство.

Разработка конструкции электрической машины торможения связана с жесткими ограничениями, вызванная конструкцией самолета. Важнейшим требованием к конструкции тормозной машины является полная унификация деталей и узлов корпуса и шасси самолета. После разгона и набора высоты шасси убирается в фюзеляж. Габариты машины не должны препятствовать выполнению данной опции. В данной ситуации, оптимальным решением является размещение активной части машины в пространстве обода колеса шасси. При этом отсутствуют дополнительные элементы конструкции, которые изменяют конфигурацию шасси. Недостатком данного решения является ограниченный объем обода колеса.

Известно, что энергетические показатели и мощность электрической машины зависят от массы активных материалов. При ограниченном объеме развить достаточно высокий момент тормозной машины можно, лишь применяя форсированный режим работы: используя повышенную плотность тока, поддерживая в воздушном зазоре повышенную индукцию. В таком режиме можно использовать электротехническое изделие только ограниченное время не вызывая недопустимый перегрев. К положительным качествам торможения при посадке нужно отнести следующее – процесс торможения при посадке длится не более одной минуты, аварийное воздействие оказывается кратковременно. То есть наш электропривод можно отнести по классификации к кратковременному режиму работы. В этом режиме работы температура нагрева обмоток электрической машины не достигает установившегося значения, а в паузах – обмотка охлаждается до температуры окружающей среды [3]. Чтобы решить поставленную задачу необходимо использовать лучшие современные материалы: высокоэнергетические постоянные магниты, электротехническую сталь, материалы магнитопровода с высокой магнитной проницаемостью, обмотка статора с высоким температурным индексом изоляции, высокопрочные и легкие конструкционные материалы.

Для проектирования электрической машины торможения необходима конструкторская проработка шасси самолета. Необходимо создать такую конструкцию электрической машины, которая не внесет существенных изменений в конструкции шасси, не повлечет снижение надежности самолета.

Электрическая машина для передачи момента торможения  $M_t$  ротора 2 (рис. 1) должна быть жестко связана с валом шасси. Поэтому используем вал шасси также в качестве вала электрической машины (так называемая встраиваемая конструкция машины).

Диаметр вала шасси самолета составляет 85 мм. Этот размер великоват для машины, но этот вариант исключает вал и муфту машины, имеющие внушительную массу. Роторная не магнитная втулка 3 (рис. 1) будет размещена (горячая посадка) на валу шасси. Для фиксации втулки могут быть использованы четыре штифта, забиты и зафиксированы сваркой для исключения проворачивания втулки в аварийных ситуациях (на рисунке не показаны). На втулку 3 устанавливаются постоянные магниты тангенциально намагниченные 4 и полюса 5 из ферромагнетиков с высокой магнитной проницаемостью. Полюса имеют наконечники 6 из магнитомягкой стали. Наконечники сварены с немагнитными прокладками 7 для фиксации положения полюсов.

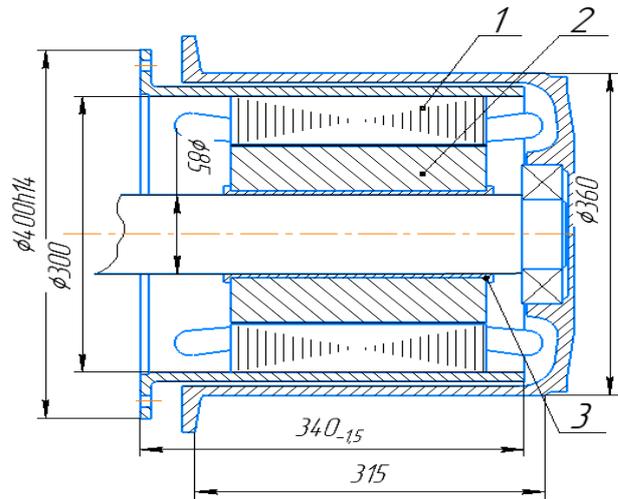


Рис. 1. Общий вид СГПМ

При выборе конструкции самой электрической машины отдано предпочтение синхронной машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами с редкоземельными металлами. Одним из важнейших достоинств такой машины является низкая магнитная проницаемость материала магнита (близкая к воздуху) при токах реакции якоря близких к величине короткого замыкания [4]. Наиболее предпочтительным материалом является NdFeB (ниодим железо бор), обладающий выдающимися энергетическими свойствами и имеющий точку Кюри 180 °С.

Статор – классическая трехфазная многополюсная синхронная машина. Постоянные магниты размещены на роторе. При выборе конструкции ротора отдано предпочтение ротору коллекторного типа с тангенциальным намагничиванием. Данный тип конструкции при наличии многополюсной обмотки обладает наибольшей величиной развиваемого момента по сравнению с известными конструкциями [4].

На рис. 2 представлена разработанная конструкция магнитоэлектрической тормозной машины с ротором коллекторного типа. Станина из прочного алюминиевого сплава 8 крепится болтами к неподвижной конструкции шасси. На внутренней поверхности у торца имеются замки для жесткой посадки и фиксации станины. Наружный диаметр станины обработан и обеспечивает равномерный зазор между вращающимся ободом и корпусом электрической машины.

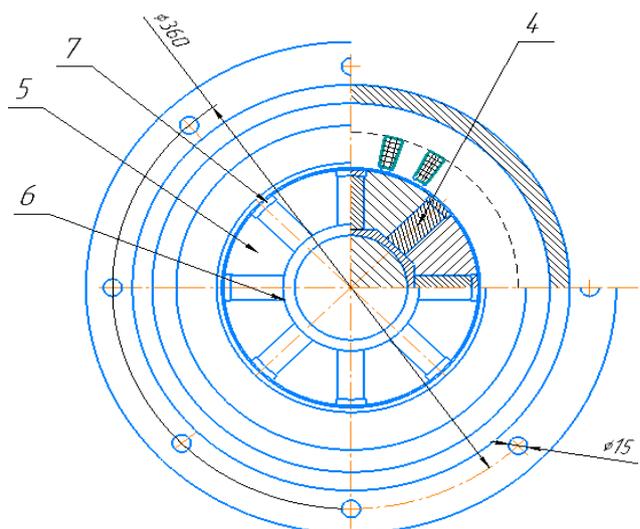


Рис. 2. Вид спереди СГПМ

Следует отметить, что тормозную электрическую машину можно использовать в режиме «двигатель» (мотор-колесо) от бортовой сети аккумуляторов посредством преобразователя частоты. Таким образом, можно транспортировать самолет до взлетно-посадочной полосы, снизить расход топлива, разгонять колесо самолёта до посадочной скорости при посадке. Это сокращает время использования маршевых двигателей самолета на земле на 30–40 мин за один вылет и существенно снижает расход топлива в среднем до 200 л за каждый взлёт и посадку [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование, конструирование и расчет механизмов мостовых кранов: учебное пособие / В.П. Жегульский, О.А. Лукашук; под ред. Г. Г. Кожушко. – Екатеринбург: Урал, 2016 – 184 с.
2. Технодинамика. [Электронный ресурс]. – URL: <https://technodinamika.ru/> (дата обращения: 23.04.2023).
3. ГОСТ ИЕС 60034-1–2014. Машины электрические вращающиеся. Номинальные значения параметров и эксплуатационных характеристик.
4. Ледовский А.И. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЕКТИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ТОРМОЖЕНИЯ САМОЛЁТА

**Х.С. Юнусов**

*Томский политехнический университет*

Научный руководитель: А.Г. Гарганеев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Разработка тормозной машины связана с определением исходных энергетических показателей электрической машины [1]. Важнейшими из этих показателей являются средняя величина тормозного момента, обеспечивающая остановку и длину пробега самолета. К числу исходных данных относятся также частота вращения вала шасси, время работы машины и средняя мощность за период посадки.

Горизонтальная составляющая кинетической энергии самолета определяется по формуле:

$$W = \frac{mv_0^2}{2}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса самолета, идущего на посадку;  $v_0$  – начальная скорость самолета при посадке.

Эта механическая энергия самолета при посадке, в конечном счете, необратимо преобразуется в тепловую энергию. Преобразования совершают тормозные устройства колес самолета для остановки его при посадке. Электрические машины в составе тормозных устройств работают в режиме генератора. Они преобразуют механическую энергию в электрическую, а затем в тепловую на внешних реостатах. При этом, ротор электрической машины создает тормозной момент на валу шасси самолета. В качестве тормозных устройств применяются также воздушные тормоза (закрылки, аэродинамические тормозные щитки), т. е. устройства увеличивающие парусность самолета. Существенный вклад в снижении посадочной скорости оказывает турбовинтовые двигатели, осуществляющие реверс в начальной фазе посадки. Однако основную долю горизонтальной составляющей кинетической энергии самолета  $W$  превращают в тепловую энергию и рассеивают в окружающем пространстве тормозные устройства колес. Вклад тормозных устройств в погашение кинетической энергии самолета по оценке специалистов составляет приблизительно 70 % [2].

Тормозной момент в устройствах создается электрическими машинами, выполняющих роль электромагнитного тормоза. Достоинствами таких тормозов является возможность изменения величины тормозного момента в широком диапазоне с помощью регулирования параметров схемы. Кроме того, принцип работы этих тормозов исключает юза колес при посадке. Механическая энергия тормозов за период посадки самолета описывается формулой:

$$W_T = M_T \omega_{cp} \cdot t, \quad (2)$$

где  $M_T$  – суммарный тормозной момент тормозов;  $\omega_{cp}$  – средняя угловая частота вращения колес за период торможения;  $t$  – время торможения (период посадки).

Условием завершения посадки является равенство горизонтальной кинетической энергии самолета и механической энергии тормозов:

$$W \cdot k_T = W_T, \quad (3)$$

где  $k_T$  – коэффициент, учитывающий гашение кинетической энергии тормозными устройствами колес.

Принимаем допущение: торможение самолета происходит равноускорено, т. е. на период посадки тормозные устройства обеспечивают одинаковую величину ускорения (замедления) и, приблизительно, одинаковый средний тормозной момент  $M_T$ . Это допущение не внесет значительных погрешностей при стабилизации тормозного момента и значительно упростит расчет. Если скорость самолета снизится до величины руления  $v_1$ , тогда ускорение определится по формуле:

$$a = (v_1 - v_0)/t, \quad (4)$$

где  $v_0$  – начальная скорость самолета при посадке.

Расстояние, которое пройдет самолет в процессе посадки, описывается известной формулой:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (5)$$

Принимая во внимание выражение (4) после преобразования получим формулу для определения времени посадки самолета:

$$t = (2 \cdot S)/(v_0 + v_1). \quad (6)$$

Учитывая формулы (1) и (2) получим выражение для определения суммарного тормозного момента, который необходимо приложить чтобы остановить самолет за время  $t$  и расстояние  $S$ :

$$M_T = \frac{m(v_0 - v_1)^2 k_T}{2\omega_{\text{ср}} \cdot t}. \quad (7)$$

Формируем исходные данные для расчета по техническим характеристикам самолета. Считаем, что нет необходимости снижать скорость самолета при посадке до нуля, необходима определенная скорость для рулежки. Кроме того, при посадке, когда колеса шасси коснулись земли, включается реверс.

При пробеге изменяется также и сила сцепления колес с поверхностью ВПП (тормозная сила трения)

$$F_{\text{тр}} = G \cdot \mu = m \cdot g \cdot \mu \text{ Н}; \quad (8)$$

$$F_{\text{тр1тор}} = \frac{F_{\text{тр}}}{4} \text{ Н}, \quad (9)$$

$\mu$  – коэффициент сцепления ВПП

С помощью сила трения найдем момент сцепления колеса.

$$M = F_{\text{тр1тор}} \cdot r, \quad (10)$$

$r$  – радиус колеса, м.

Методика расчета исходных данных могут быть использованы при разработке тормозной машины для различных типов самолетов: военных, гражданских, больших, малых и т. д.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система управления самолета: учеб. пособие / О.Н. Корольков, Г.А. Резниченко. – Самара: Самар, гос. аэрокосм, ун-т, 2007. – 120 с.
2. Коконин С.С., Крамаренко Е.И., Матвеев А.М.. Основы проектирования авиационных колёс и тормозных систем. – М.: МАИ, 2007. – 263 с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИИ ПРОВОДА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

**К.А. Харитонов, Д.С. Теляшкин**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ООЭ, группа А2-27*

Научный руководитель: А.П. Леонов, к т.н., доцент, ТПУ

Температурное воздействие на заготовку провода в кабельном производстве представляется наиболее часто применяемой операцией технологического процесса. Термообработка, выступает как основной, так и вспомогательной операцией. С помощью теплового воздействия решаются различные инженерные задачи: уплотнение изоляционных слоев, полученное в результате усадки, повышение термомеханических свойств, получение сплошных покрытий из ленточных материалов, изменение структуры и объема изоляционных или защитных покрытий кабельных изделий.

Для производства бортовых проводов с пленочной изоляцией из фторпласта-4Д в качестве оборудования для термической обработки традиционно применяются печи с конвективной передачей тепла, соляные печи [1].

В последнее время требуются оптимизация и унификация технологических процессов, которые проходят по многим маршрутам производств одновременно. В качестве примера можно отметить выполнение монтажных работ при изготовлении бортовой сети самолета, самолетостроительные производства запрашивают партии кабельной техники большими длинами. Получение кабельного изделия «бесконечной» длины – одна из основных задач кабельных производств, что как следствие влечет необходимость осуществлять поставку проводов увеличенными длинами, кратно превышающими строительные.

Для выполнения такой задачи неизбежен пересмотр имеющихся технологических циклов с целью прироста объема выработки полученной продукции и наращивания скорости производства.

В качестве одного из таких инструментов рассматривается возможность проведения операции термообработки на оборудовании с инфракрасным (ИК) способом передачи тепла. Известно, что такие печи более высокоскоростные и производительные, поскольку воздействуют на поверхность материала, с уменьшенной побочной передачей тепла токопроводящей жиле провода. Дополнительным фактором повышения производительности можно назвать отсутствие зоны преднагрева, где в случае конвекционной передачи тепла вихревой воздушный поток снижает температуру до момента перехода в ламинарный режим [1].

Для проведения работ по внедрению и контролю качества термообрабатываемых проводов первоначально был произведен оценочный расчет операции термообработки провода, позволяющий оценить распределение температурного поля.

Далее была произведена термообработка в печах с конвекционной и ИК передачей тепла с оценкой ряда параметров проводов:

- контроль геометрических параметров и внешнего вида проводов, определение количества дефектов на единицу длины;
- фактическое пробивное напряжение;
- термостабилизация, с последующим определением продольной усадки изоляционного материала;
- стойкость к воздействию экстремально низкой температуры ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), с определением фактического значения электрической прочности изоляции после выдержки образцов в нормальных климатических условиях;

- испытание напряжением 1500 В частоты 50 Гц в течение 1 мин (из состава приемосдаточных испытаний по ТУ на марку провода);
- спектральный анализ термообработанного изоляционного материала на инфракрасном спектрометре FT-801.

Полученные данные представлены в табл. 1.

*Таблица 1. Параметры качества фторопластовой изоляции черного и белого цвета после термообработки в печах с ИК излучением*

№ п/п	Наименование параметра	Линейная скорость термообработки провода, м/мин									
		7,0		9,0		11,0		13,0		15,0	
		Черн.	Бел.	Черн.	Бел.	Черн.	Бел.	Черн.	Бел.	Черн.	Бел.
1	Стойкость к испытательному напряжению	–	+	–	+	+	+	+	+	+	+
2	Значение электрической прочности изоляции, кВ	13–16	12	16–17	14	14–17	14	15–16	10	15–17	7
3	Значение электрической прочности изоляции после испытаний на теплоустойчивость, кВ	14–15	11	13–16	14	14–16	13	14–15	9	10–15	7
4	Фактическое значение электрической прочности изоляции, кВ	10	10	12	12	12	12	9,5	9,5	7	7

Из данных, полученных после испытаний образцов проводов, запеченных инфракрасным методом термообработки, можно сделать следующие выводы:

Внешний вид изоляции проводов белого цвета на низких скоростях термообработки имеют желтоватый оттенок, который объясняется наличием «перегоревшего» фтора.

Инфракрасная технология термообработки обеспечивает качество спеченной изоляции, сравнимой с конвекционной технологией.

Образцы проводов черного цвета на низких скоростях термообработки не выдержали испытание испытательным напряжением по причине более высокой поглощательной способности черного материала, что привело к разрушению полимерной цепочки фторопласта.

Физико-механические свойства термообработанной изоляции ИК-методом обеспечивает качество, соответствующее требованиям ТУ на марку провода.

Фактическое значение электрической прочности оптимально на медианной температуре, при этом значение приложенного напряжения превышает требуемое по техническим условиям в 7–8 раз.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боев М.А., Китов А.М., Теляшкин Д.С., Харитоновна К.А. Особенности термообработки пленочной изоляции бортовых проводов в печи вертикального типа // Кабели и провода. – 2023. – № 6 (404). – С. 28–34.

## **УСТОЙЧИВОСТЬ ОПОР ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ ВЕТРОВЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**А.А. Скворцов**

*Казанский государственный энергетический университет, студент*

Научный руководитель: И.Н. Маслов, доцент, к.т.н., КГЭУ

### **Введение**

Устойчивость опор линий электропередач (ЛЭП) является важной задачей в области проектирования и эксплуатации энергетических систем. Поскольку линии электропередач обеспечивают передачу электроэнергии от источников к потребителям, их надежность критически важна для обеспечения стабильности энергетической сети. Ветровые и климатические воздействия, такие как сильные ветры, снеговые нагрузки и температурные колебания, могут оказывать значительное влияние на устойчивость опор, что, в свою очередь, влияет на работу всей системы. Как отмечается в работе [1, с. 15], оценка устойчивости опор требует комплексного подхода и учета множества факторов.

### **Ветровые нагрузки на опоры ЛЭП**

Ветровые нагрузки представляют собой один из основных факторов, влияющих на устойчивость опор ЛЭП. Сила ветра может варьироваться в зависимости от географического положения, времени года и климатических условий. Наиболее интенсивные ветровые нагрузки наблюдаются в районах с высоким уровнем атмосферных явлений, таких как ураганы и торнадо. Для оценки ветровых нагрузок на опоры ЛЭП используются специальные методы расчета, основанные на теории аэродинамики. Важно учитывать как статические, так и динамические нагрузки, поскольку при сильном ветре возникают колебания опор, которые могут привести к их деформации или даже разрушению.

Одним из методов оценки ветровых нагрузок является использование коэффициентов аэродинамического сопротивления, которые зависят от формы и размеров опор. Как указано в [2, с. 45], эти коэффициенты помогают определить, как форма опоры взаимодействует с потоками воздуха, что позволяет проводить более точные расчеты ветровых нагрузок. Кроме того, следует учитывать, что влияние ветра может усиливаться при наличии препятствий, таких как деревья или здания, которые могут создавать вихревые потоки и увеличивать нагрузки на конструкции.

### **Климатические воздействия**

Климатические факторы, такие как снеговые нагрузки и температурные колебания, также играют важную роль в обеспечении устойчивости опор ЛЭП. Снеговые нагрузки могут значительно увеличивать вес проводов и опор, что требует дополнительных расчетов для определения прочности и устойчивости конструкции. Как подчеркивает [3, с. 78], в условиях длительных снегопадов опоры могут подвергаться значительным нагрузкам, что делает необходимым применение дополнительных расчетов и усилений.

Температурные колебания могут вызывать тепловое расширение материалов, из которых изготовлены опоры, что также необходимо учитывать при проектировании. Например, при резких перепадах температур может произойти деформация материала, что может привести к изменению углов наклона опор и, как следствие, к увеличению ветровых нагрузок. Сложные климатические условия, включая заморозки и оттепели, могут приводить к образованию льда на проводах, что увеличивает нагрузку на опоры и снижает их устойчивость [4, с. 89].

Важным аспектом проектирования опор ЛЭП является учет изменений климата. Изменение среднегодовых температур, увеличение числа экстремальных погодных явлений требуют пересмотра действующих норм проектирования. В связи с этим, проектировщики должны постоянно следить за изменениями климата и адаптировать проектные решения под новые условия.

### **Методы анализа устойчивости**

Для обеспечения устойчивости опор ЛЭП используются различные методы анализа. Один из таких методов – это численное моделирование, которое позволяет оценить поведение конструкции под воздействием различных нагрузок. Модели могут учитывать влияние как ветровых, так и климатических факторов, а также взаимодействие между ними. По данным [5, с. 102], современные программные комплексы для численного моделирования позволяют учитывать нелинейные свойства материалов и сложные геометрические формы, что повышает точность расчетов.

Существует также ряд нормативных документов и стандартов, регулирующих проектирование опор ЛЭП с учетом различных нагрузок. Например, в России используются нормы проектирования, разработанные в соответствии с СНиП (Строительные Нормы и Правила), которые определяют требования к расчету устойчивости опор в зависимости от региона и климатических условий [6, с. 134]. Кроме того, существуют международные стандарты, такие как ISO и EN, которые также могут быть применены при проектировании опор.

Важно отметить, что наряду с традиционными методами анализа, активное развитие технологий, таких как автоматизация проектирования и использование беспилотных летательных аппаратов для мониторинга состояния опор, также могут значительно повысить надежность ЛЭП. Использование датчиков и систем мониторинга позволяет оперативно выявлять потенциальные проблемы, такие как коррозия или деформация, что в свою очередь способствует предотвращению аварийных ситуаций. Эти системы особенно эффективны в условиях частых ураганов и других экстремальных погодных явлений, когда риск разрушений конструкций значительно возрастает.

Кроме того, в условиях частых ураганов целесообразно применять системы автоматического мониторинга состояния опор с использованием датчиков, которые могут сигнализировать о начале деформации или повреждений. Такие системы позволяют оперативно реагировать на изменения и предотвращать аварийные ситуации, что особенно актуально в условиях, когда погодные условия становятся все более непредсказуемыми из-за изменения климата. Например, применение датчиков нагрузки и деформации позволяет в реальном времени отслеживать состояние опор и оперативно выявлять отклонения от нормальной работы системы. Важно, чтобы такие системы были интегрированы в единое решение по мониторингу всех элементов ЛЭП, что позволит сократить вероятность аварий и повысить общую устойчивость сети.

### **Примеры реализации решений**

Одним из ярких примеров эффективного применения технологий для повышения устойчивости опор ЛЭП является проект в северных регионах России, где зимние условия и сильные ветра создают постоянные нагрузки на инфраструктуру. В данном проекте использовались металлические опоры с высокой степенью устойчивости к коррозии, которые, как показала практика, значительно увеличивают срок службы конструкции. Дополнительно были внедрены системы автоматического контроля состояния проводов и опор, позволяющие снимать показатели в режиме реального времени и передавать их на центральный диспетчерский пункт [8, с. 56].

Другой пример – опоры, установленные в районе с повышенной сейсмической активностью, где основное внимание уделяется не только ветровым и климатическим воздействиям, но и возможным землетрясениям. Для повышения устойчивости таких опор используются специальные анкерные системы, которые обеспечивают их более надежное закрепление в грунте, а также амортизационные устройства, позволяющие компенсировать вибрационные

воздействия [9, с. 91]. Эти конструкции способны выдерживать одновременно и землетрясения, и экстремальные погодные условия.

### **Заключение**

Устойчивость опор линий электропередач при ветровых и климатических воздействиях является сложной задачей, требующей использования современных методов анализа и проектирования. Важно учитывать множество факторов, таких как ветровые и снеговые нагрузки, температурные колебания, а также возможные изменения климатических условий. Применение численного моделирования, автоматизированных систем мониторинга и использование современных материалов позволяет значительно повысить надежность опор ЛЭП и предотвратить аварийные ситуации. В условиях изменений климата и увеличения частоты экстремальных погодных явлений эти меры будут становиться все более актуальными для обеспечения стабильной работы энергетической инфраструктуры.

Регулярный мониторинг состояния опор, своевременное проведение ремонтных и профилактических работ, а также адаптация проектных решений к изменяющимся условиям окружающей среды – это ключевые шаги к повышению долговечности и безопасности энергетической сети. Использование систем автоматического контроля позволяет оперативно реагировать на любые отклонения и предупреждать аварии, что особенно важно в условиях нестабильных погодных условий. В будущем важно продолжать развивать и совершенствовать технологии, направленные на повышение устойчивости и долговечности конструкций, чтобы минимизировать риск повреждений и сбоев в работе ЛЭП.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Григорьев А.С. Ветровые нагрузки на опоры линий электропередач. – М.: Строительная книга, 2020. – 234 с.
2. Петров В.Н. Климатические факторы и их влияние на конструкции. – М.: Энергия, 2019. – 310 с.
3. Сидоров П.И. Материалы для строительства опор ЛЭП. – СПб.: Издательство Политеха, 2021. – 150 с.
4. Кузнецов Л.М. Геометрические параметры опор и их устойчивость. – Омск: Стройиздат, 2018. – 198 с.
5. Михайлов А.К. Методы анализа конструкций под воздействием внешних нагрузок. – Новосибирск: Наука, 2022. – 276 с.
6. Власов И.Г. Численные методы в инженерных расчетах. – Казань: Научное издательство, 2021. – 322 с.
7. Федоров Е.В. Испытания конструкций: подходы и методы. – Екатеринбург: Уральский университет, 2023. – 211 с.
8. Романов К.А. Автоматизация контроля линий электропередач в северных регионах // Энергия и Прогресс. – 2020. – № 3. – С. 56–64.
9. Захаров Л.М. Методы защиты опор ЛЭП в сейсмоопасных регионах // Строительные конструкции. – 2021. – № 2. – С. 91–103.

## **ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ ВЕТРЯНЫХ ТУРБИН**

**А.А. Скворцов**

*Казанский государственный энергетический университет, студент*

Научный руководитель: И.Н. Маслов, доцент, к.т.н., КГЭУ

### **Введение**

В последние десятилетия ветряные турбины становятся важным элементом устойчивого энергетического перехода, обеспечивая чистый и возобновляемый источник энергии. Однако с ростом их популярности возникают новые проблемы, касающиеся надежности и безопасности эксплуатации этих сооружений. Устойчивость ветряных турбин является ключевым аспектом их эффективности и долговечности, зависящим от множества факторов, включая ветровые нагрузки, материалы конструкции, особенности фундамента и метеорологические условия.

### **Ветровая нагрузка**

Одним из основных факторов, влияющих на устойчивость ветряных турбин, является ветровая нагрузка. Эта нагрузка включает как статические, так и динамические компоненты, влияющие на конструкцию в процессе эксплуатации. Различия в силе и направлении ветра создают различные нагрузки на лопасти и башню турбины. В условиях сильных порывов ветер может вызывать колебания, увеличивающие напряжение конструкции и приводящие к её деформации или повреждению.

При проектировании ветряных турбин важно учитывать не только среднегодовые значения скорости ветра, но и экстремальные погодные условия, характерные для региона установки. Это требует использования математических моделей и симуляций для предсказания поведения турбины при различных ветровых режимах. Регулярный мониторинг и анализ погодных условий необходимы для корректировки управления эксплуатацией турбины, что значительно повышает безопасность и надежность ветряных установок [1, с. 45; 2, с. 12].

### **Материалы конструкции**

Выбор материалов, используемых в строительстве ветряных турбин, определяет их устойчивость и долговечность. Конструкции должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать высокие ветровые нагрузки, оставаясь при этом легкими для минимизации давления на фундамент. Современные ветряные турбины чаще всего изготавливаются из композитных материалов, таких как углеродное и стеклянное волокно, обладающих высокой прочностью и легкостью.

Использование высококачественных материалов не только увеличивает срок службы турбины, но и снижает её вес, что уменьшает нагрузку на конструкцию. Однако выбор материалов не ограничивается их прочностью. Важно учитывать коррозионную стойкость, особенно для турбин, установленных в прибрежных или морских условиях [3, с. 23].

Проведение тестирования и сертификации материалов перед их использованием критически важно. Это включает проверки на прочность, устойчивость к коррозии и другие параметры. Регулярные инспекции и мониторинг состояния материалов позволяют своевременно выявлять проблемы, такие как трещины или коррозия, и принимать меры по их устранению [4, с. 30].

### **Фундамент**

Фундамент является основой устойчивости турбины. Проект фундамента должен учитывать множество факторов, таких как тип почвы, уровень грунтовых вод и ветровые нагрузки. В зависимости от условий местности фундаменты могут быть выполнены в различных формах, от плитных до свайных, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Правильное проектирование фундамента гарантирует достаточную прочность и жесткость для противостояния силам, действующим на турбину. При неверном проектировании существует риск осадки или обрушения конструкции, что может привести к серьезным последствиям. Необходимо учитывать термические расширения и сжатия материалов, влияющие на стабильность фундамента в процессе эксплуатации [5, с. 19].

Геотехнические исследования перед началом строительства помогают определить характеристики почвы и выбрать оптимальный тип фундамента. Регулярный мониторинг состояния фундамента, включая визуальные осмотры и использование датчиков для контроля деформаций, позволяет своевременно выявлять потенциальные проблемы [6, с. 27].

### **Центр тяжести**

Центр тяжести ветряной турбины играет важную роль в её устойчивости. Он определяется распределением массы конструкции, включая башню, лопасти и генератор. Чем ниже центр тяжести, тем более устойчивой является турбина, что особенно важно в условиях сильных ветров и неблагоприятной погоды. Ветряные турбины с низким центром тяжести лучше справляются с динамическими нагрузками [7, с. 14].

При проектировании турбины важно продумать расположение компонентов, чтобы снизить центр тяжести. Размещение генератора ближе к основанию и учёт влияния размещения лопастей на распределение массы помогут оптимизировать конструкцию [8, с. 22].

### **Обслуживание и мониторинг**

Регулярное обслуживание и мониторинг состояния ветряных турбин являются критически важными для обеспечения их устойчивости и долгосрочной эксплуатации. Современные технологии позволяют проводить дистанционное наблюдение за ключевыми параметрами, такими как вибрации и нагрузки. Эти данные помогают инженерам выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях, предотвращая серьезные повреждения [9, с. 11].

Плановое техническое обслуживание включает осмотры, проверку соединений и замену изношенных компонентов. Регулярные проверки состояния фундамента и конструктивных элементов помогают выявлять изменения, указывающие на проблемы с устойчивостью [10, с. 35].

### **Заключение**

Устойчивость ветряных турбин является ключевым аспектом их проектирования и эксплуатации, влияющим на эффективность и безопасность этих возобновляемых источников энергии. В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на устойчивость, такие как ветровые нагрузки, материалы конструкции, фундамент, центр тяжести и важность регулярного обслуживания и мониторинга. Каждый из этих аспектов играет свою роль в обеспечении надежности ветряных установок.

С учётом растущего интереса к возобновляемым источникам энергии, дальнейшие исследования и разработки в области устойчивости ветряных турбин способствуют их интеграции в энергетические системы и снижению воздействия на окружающую среду.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иванов И.И. Устойчивость конструкций ветряных турбин. – М.: Энергия, 2020. – С. 45.
2. Петров П.П. Моделирование ветровых нагрузок на ветряные турбины. – СПб.: Научное издательство, 2021. – С. 12.
3. Сидоров С.С. Материалы и технологии в строительстве ветряных установок. – Екатеринбург: УралГАУ, 2019. – С. 23.
4. Кузнецов А.А. Коррозия и её влияние на устойчивость конструкций. – Казань: Казанский университет, 2022. – С. 30.
5. Орлов О.О. Геотехнические аспекты фундамента ветряных турбин. – Челябинск: ЧелГУ, 2023. – С. 19.
6. Фролова Е.Е. Современные технологии мониторинга состояния конструкций. – Новосибирск: Сибирское издательство, 2022. – С. 27.
7. Смирнов Д.Д. Центр тяжести и его роль в устойчивости. – Волгоград: ВГГУ, 2021. – С. 14.
8. Зайцева А.А. Проектирование и оптимизация ветряных турбин. – Ростов-на-Дону: РГЭУ, 2020. – С. 22.
9. Назарова Л.Л. Проблемы и перспективы обслуживания ветряных турбин. – Ярославль: ЯГУ, 2023. – С. 11.
10. Романов В.В. Динамика и устойчивость ветряных установок. – Омск: ОГПУ, 2019. – С. 35.

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ**

**Т.С. Козлова**

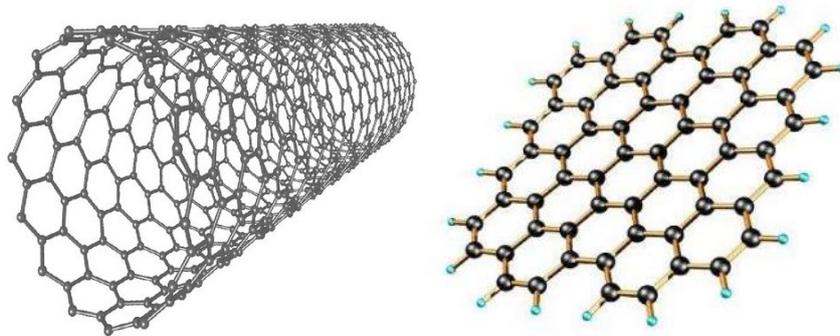
*АО «Авиационная электроника и коммуникационные системы»,  
инженер-электроник 3 категории,  
Московский авиационный институт, Институт № 12 «АНТИП», кафедра 1205 «ТИЭ»*

Научный руководитель: М.Ю. Горожеев, к.т.н., доцент кафедры 1203 «ТППСУЛА», МАИ

Электротехника сегодня играет ключевую роль в нашем обществе, обеспечивая энергией все сферы человеческой деятельности: от гигантских промышленных комплексов и скорост-

ных транспортных систем до уютных домов и сложнейшей инфраструктуры глобальной связи. Однако, растущие потребности в энергии, угроза изменения климата и непрерывно повышающиеся стандарты безопасности и энергоэффективности предъявляют к электротехнике всё более жесткие требования. Это вызывает бурный рост инноваций в области материалов, технологий и методов проектирования, формируя новую эру в развитии отрасли.

В первую очередь, революционный прорыв в электротехнике связан с углеродными нанотрубками (УНТ) и графеном (рис. 1). Эти аллотропные модификации углерода обладают феноменальными свойствами: невероятной электропроводностью, превосходящей медь, исключительной прочностью, сравнимой с прочностью стали, и высокой теплопроводностью [1]. Это позволяет создавать высокоэффективные проводники, обладающие при этом малым весом и гибкостью. УНТ и графен используются для разработки новых типов кабелей, высокочастотных компонентов, суперконденсаторов с огромной емкостью и быстрой зарядкой, а также элементов гибкой электроники. Изучаются возможности их применения в создании «умных» материалов, изменяющих свои электрические свойства под воздействием внешних факторов. Активно ведутся исследования по созданию композитных материалов, где УНТ и графен используются в качестве наполнителя для усиления механических и электрических характеристик полимеров и керамики.



*Рис. 1. Углеродная нанотрубка (слева) и графен (справа)*

Кроме углеродных наноматериалов, значительные перспективы демонстрируют полимерные материалы. Современные полимеры обладают уникальным сочетанием свойств: высокой диэлектрической прочностью (способностью выдерживать высокое напряжение без пробоя), термостойкостью и гибкостью [2]. Это делает их незаменимыми для изготовления изоляционных материалов, оболочек кабелей, защитных покрытий и компонентов электронных схем. Разработки в области полимерной химии направлены на создание полимеров с улучшенными диэлектрическими характеристиками, повышенной устойчивостью к воздействию агрессивных сред и расширенным температурным диапазоном работы. Особое внимание уделяется разработке самовосстанавливающихся полимеров, способных к регенерации после повреждения, что существенно повышает надежность электротехнических систем.

Важным аспектом современного развития электротехники является стремление к экологической чистоте, что стимулирует исследования в области биоразлагаемых электротехнических материалов. Разработка таких материалов, основанных на природных полимерах, например, крахмале или целлюлозе, позволит значительно снизить негативное воздействие электротехнической промышленности на окружающую среду. Однако, перед разработчиками стоят значительные вызовы, связанные с достижением необходимых электрических и механических свойств биоразлагаемых материалов, а также с обеспечением их долговечности и стабильности работы. Актуальные исследования направлены на создание биоразлагаемых изоляционных материалов, упаковок для электронных компонентов и элементов «зеленой» энергетики.

Инновационные технологии играют ключевую роль в трансформации электротехники. Цифровые технологии коренным образом трансформируют электротехнику. Определяющим фактором становится цифровизация всех этапов жизненного цикла электротехнических систем – от проектирования до эксплуатации.

Применение программного обеспечения для автоматизированного проектирования (САПР) позволяет создавать более эффективные и сложные электротехнические системы.

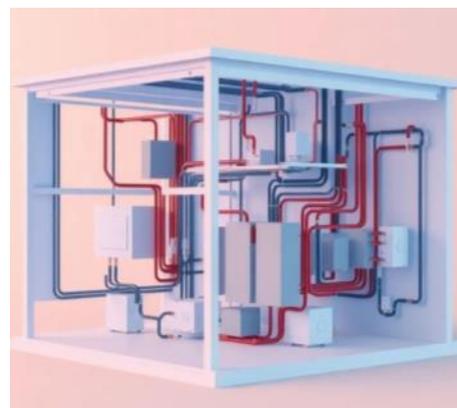
Цифровое моделирование позволяет проводить виртуальные испытания и оптимизировать параметры работы электрооборудования еще на этапе проектирования, снижая затраты и время разработки.

Одним из революционных подходов в проектировании электротехнических систем является BIM-моделирование (Building Information Modeling). Оно позволяет создавать трехмерные модели электротехнических систем (рис. 2), включая кабельные трассы, распределительные устройства и освещение. Это значительно упрощает координацию работы различных специалистов, минимизирует ошибки на этапе проектирования и монтажа, и улучшает качество сдачи объекта в эксплуатацию. BIM позволяет интегрировать данные о работе электротехнических систем с данными других инженерных систем здания, обеспечивая комплексный мониторинг и управление [3].

Всемирно известный искусственный интеллект (ИИ), также открывает новые горизонты в электротехнике. Он используется для автоматизации проектирования, анализа больших данных, предсказания отказов оборудования и оптимизации работы электросетей. Нейронные сети позволяют анализировать работу сложных систем, выявлять аномалии и предотвращать аварийные ситуации. ИИ ускоряет процессы разработки новых материалов и технологий, анализируя огромные объемы экспериментальных данных. Разработка «умных» сетей с применением ИИ позволяет более эффективно распределять энергию [4], учитывая изменения потребления и производства.

Добавление аддитивных технологий (3D-печать) в арсенал электротехники позволяет создавать сложные и индивидуальные компоненты с высокой точностью и минимальными отходами материала. Это особенно актуально для производства небольших партий специализированных устройств и прототипов. Технология 3D-печати позволяет создавать индивидуальные решения, оптимизированные под конкретные задачи, а также изготавливать детали сложной геометрии, недоступные для традиционных методов производства [5]. 3D-печать используется для создания печатных плат, корпусов электронных устройств, сенсоров, а также для быстрого прототипирования новых электротехнических компонентов. Исследование новых материалов, пригодных для 3D-печати, является одним из наиболее актуальных направлений. Например, разрабатываются специальные токопроводящие полимерные чернила для печати функциональных электронных компонентов.

В заключение, следует отметить, что будущее электротехники тесно связано с интеграцией всех перечисленных инноваций. Сочетание новых материалов, передовых технологий и эффективных методов проектирования позволит создавать устойчивые, надежные и энергоэффективные электротехнические системы, способные удовлетворить растущие потребности современного мира и решить глобальные вызовы, связанные с изменением климата и обеспечением энергетической безопасности.



*Рис. 2. Пример трехмерной модели электротехнической системы, спроектированной с помощью BIM-моделирования*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Набиев Н.Ф., Алексеев А.В., Пионтковская С.А. Потенциал углеродных нанотрубок в электротехнике: тенденции и применение // Вестник науки. – 2024. – № 9 (78). – С. 179–188.
2. Мельникова М.А. Полимерные материалы: свойства, практическое применение. Учебное пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. – 86 с.
3. Вирцев М.Ю., Власова А.Ю. BIM-технологии – принципиально новый подход в проектировании зданий и сооружений // Российское предпринимательство. – 2017. – № 23. – С. 3828–3835.
4. Ерсайынов Е.Е., Пионтковская С.А. Инновационные технологии в области электрооборудования: текущие тенденции и перспективы развития // Вестник науки. – 2024. – № 7(76). – С. 422–426.
5. 3D-печать: инновации GPT в производстве печатных плат // Highleap Ectronic – URL: <https://hilelectronic.com/ru/3d-print-circuit-boards/> (дата обращения: 10.11.2024).

## КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

У.И. Иванова, О.М. Ярославцева

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Аэрокосмический, 602, группа М60-405С-21*

Научный руководитель: М.Ю. Калягин, к.т.н., ассистент каф. 602

Проблема лесных пожаров становится все более актуальной с каждым годом. Одной из ключевых трудностей остается недостаточная скорость реагирования на возникновение возгораний. Количество пожаров увеличивается, в то время как численность сотрудников лесного хозяйства либо остается на прежнем уровне, либо сокращается. Это создает необходимость в автоматизации мониторинга территорий.

В настоящее время активно применяются беспилотные летательные аппараты, которые предназначены для наблюдения за лесами. Однако такие системы часто не отличаются высокой эффективностью и автономностью, и не все из них способны функционировать в густых и труднодоступных местностях с суровыми климатическими условиями.

Научная оригинальность данной работы заключается в разработке полностью автономной модульной системы для мониторинга пожаров.

Основная цель исследования состоит в создании комплекса, который будет осуществлять наблюдение за возгораниями в лесных массивах, принимая во внимание погодные условия и ландшафтные особенности выбранной территории.

Предлагаемый комплекс состоит из беспилотного летательного аппарата и зарядной станции. Дрон «Аракоптер» обладает модульной конструкцией, что обеспечивает быструю замену поврежденных компонентов в условиях эксплуатации на местности. В его дизайне предусмотрены съемные лучи с закрывающимся отверстием для установки регулятора скорости (рис. 1).



Рис. 1. Беспилотный летательный аппарат для мониторинга возгораний

Кроме того, «Аракоптер» оборудован трехслойным теплозащитным корпусом, который обеспечивает оптимальные условия для работы внутреннего оборудования при любых температурных режимах. Еще одним достоинством является замена готового покупного аккумулятора на батарею собственной сборки с необходимыми характеристиками, что способствует увеличению времени полета с 20 минут до 60-75 минут в идеальных условиях и 30–40 мин в условиях сильного ветра, а также увеличению дальности полета с 15 до 40–45 км. Благодаря такой конструкции, блок АКБ не соударяется при посадке на площадку станции, а удлиненные демпферами лучи испытывают минимальные вибрационные нагрузки на корпус БЛА. На БВС применяется GNSS модуль с возможным подключением к спутникам ГЛОНАСС. Для анализа территории на предмет возгораний используется тепловизионная камера.

Зарядная станция в разрабатываемом комплексе функционирует на основе возобновляемых источников энергии, обладает автономностью и устойчивостью к различным погодным условиям, имеет системы подогрева, которые обеспечивают оптимальные условия для работы оборудования внутри сооружения, а также предотвращают обледенение и накопление снега на крышке люка (рис. 2).

Благодаря широкой площадке для технического обслуживания дронов и электронной составляющей комплекса – 16 м<sup>2</sup> – обслуживающий персонал сможет в удобных условиях производить анализ повреждений, ремонт, а также замену комплектующих. Преимуществом башни является возможность ее установки на любой бетонный или фонарный столб, а также возможность ее работы не только от альтернативных источников энергии, но и от общей сети. Кроме того, станцию можно использовать в качестве интернет-вышки или базовой станции мобильной связи при добавлении дополнительных модулей, что позволит увеличить зону покрытия мобильного интернета и сотовой связи, обеспечивая жителей отдаленных районов постоянным доступом к связи. Для избежания снижения вырабатываемой электроэнергии за счет засыпания панели снегом был смоделирован кронштейн с функцией автоматической очистки от снега.

Таким образом, был спроектирован комплекс для регистрации пожаров, состоящий из БПЛА и зарядной станции, где дрон производит полет от станции к станции, расстояние между которыми составляет 45 км, и осуществляет сканирование местности на предмет возгораний и задымлений с помощью инфракрасных камер и датчика дыма. При выявлении источника или зоны пожара, координаты его местоположения передаются по радиоканалам на ближайшую башню, которая затем отправляет сигнал в региональную диспетчерскую службу лесного хозяйства или в пункт МЧС.



Рис. 2. Зарядная станция

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петушкова В.Б., Потапова С.О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – № 9.
2. Юнсон Э.В. // Мониторинг лесного хозяйства с помощью беспилотных летательных систем // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 5 (143).
3. Учеб. пособие / С.Г. Парафесь, В.С. Сафронов, И.К. Туркин // Задачи оптимального проектирования конструкций беспилотных летательных аппаратов; М-во образования Рос. Федерации. Моск. авиац. ин-т (гос. техн. ун-т). – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 145 с. : ил., табл.; 20 см.; ISBN 5-7035-1269-7 (в обл.).
4. Полтавский А. В. и др. Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. – М.: Ин-т проблем упр., 2010. – 101 с.
5. Белов С.Г., Верба В.С., Глаголев В.А. и др. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами: [монография : в 2 кн.]. – Москва : Радиотехника, 2016. – 25 с..
6. Фетисов В.С., Артемьев А.Е., Муфаззалов Д.Ф. Автоматические сервисные станции для обслуживания электрических беспилотных летательных аппаратов – М.: Инновационное машиностроение, 2017. – 252 с.
7. Шайгура С.В., Шайгура Н.С., Байгутлина И.А., Замятин П.А. Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов. – Бургас: Институт гуманитарных наук, экономики и информационных наук, 2022. – 260 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ БОРЬБЫ С ЯВЛЕНИЕМ ЛОЖНОЙ ЗЕМЛИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ НАПРЯЖЕНИЯ

**А.В. Ермолаев**

*Вятский государственный университет, ЭТФ, ЭСС, группа ЭиЭб-1805-06-00*

Научный руководитель: А.С. Соловьева, старший преподаватель каф. ЭСС ВятГУ

Ложная земля – это явление, вызванное феррорезонансом в трансформаторах напряжения, при котором фазные напряжения в сети с изолированной нейтралью становятся искаженными, а напряжение нулевой последовательности возникает даже без замыканий на землю. Такое смещение нейтрали чаще всего появляется при подключении ненагруженных шин или коротких сетей 6–10 кВ, когда ток одной или нескольких фаз трансформатора напряжения компенсируется емкостным током этой же фазы.

В сетях с изолированной нейтралью напряжением 6–35 кВ ложная земля наблюдается реже, чем устойчивый феррорезонанс, который часто возникает при однофазных замыканиях на землю. Однако почти все современные трансформаторы напряжения, включая антирезонансные, могут быть подвержены этому явлению [1].

Ложная земля вызывает искажения напряжений, из-за чего релейная защита может ошибочно срабатывать, принимая их за сигналы аварии. Это снижает надежность сети и требует дополнительных затрат на устранение таких срабатываний.

Для снижения влияния ложной земли и феррорезонанса в заземляющую цепь добавляют резистор. Это помогает уменьшить паразитные токи, стабилизировать систему и снизить вероятность ложных срабатываний релейной защиты. В этой работе рассматривается добавление сопротивления на 25 Ом, которое оказалось оптимальным для ограничения паразитных токов и обеспечения корректной работы релейной защиты в условиях феррорезонанса [2].

Для оценки эффективности данного подхода была создана модель трансформатора напряжения в среде MATLAB/Simulink [3]. Модель включает трансформатор напряжения с первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками, а также дополнительную вторичную обмотку, соединенными по разным схемам. Первая вторичная обмотка соединена в разомкнутый треугольник для контроля напряжения нулевой последовательности, возникающих из-за ложной земли, а вторая используется для измерения фазных напряжений.

Рис. 1 демонстрирует конфигурацию модели, где трансформатор подключен к источнику трёхфазного напряжения, а в дополнительную вторичную обмотку соединенную в треугольник добавлено сопротивление в 25 Ом. Благодаря такому построению схемы можно оценить влияние добавленного сопротивления на паразитные токи и напряжения.

Для каждой из фаз фиксируются осциллограммы напряжений, которые позволяют проанализировать поведение системы до и после добавления сопротивления в контур заземления. Полученные результаты позволяют выявить уровень паразитных токов и асимметрию фазных напряжений в системе, что позволяет определить влияние сопротивления на устранение ложных сигналов замыкания на землю.

Результаты моделирования показывают значительное влияние добавленного сопротивления на устранение паразитных сигналов. До добавления сопротивления наблюдается асимметрия фазных напряжений, что свидетельствует о присутствии паразитных токов и напряжений. Это видно на осциллограмме фазных напряжений, где наблюдаются отклонения и неравномерность в фазах (рис. 2). Без добавленного сопротивления система чувствительна к незначительным изменениям, и релейная защита может воспринимать искажения как аварийный сигнал.

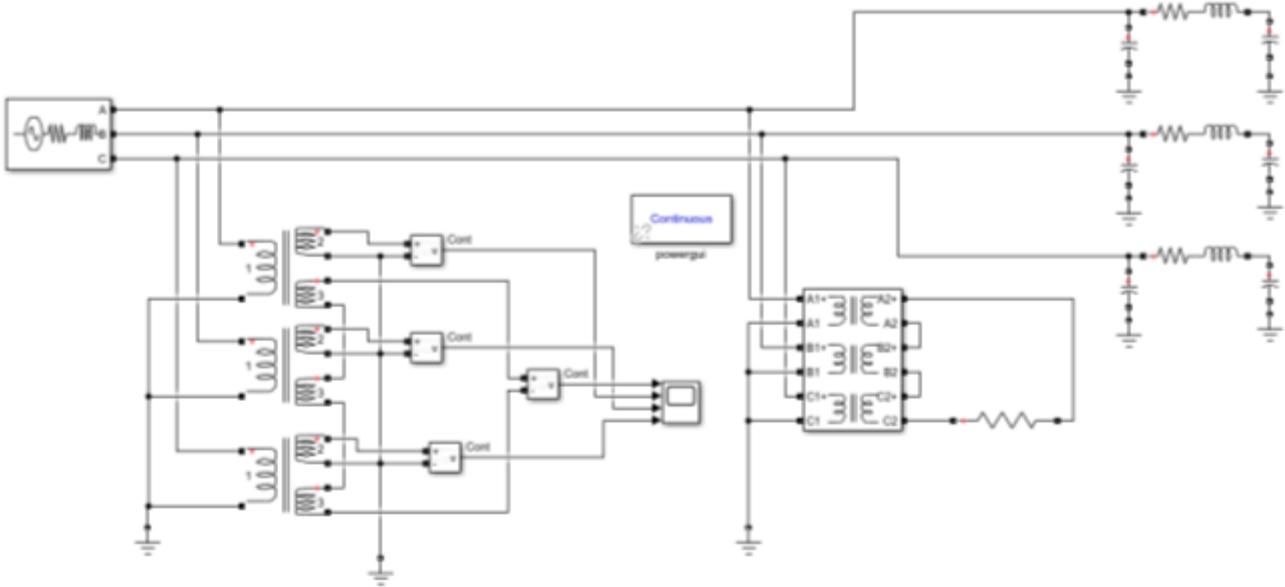


Рис. 1. Схема модели трансформатора напряжения в MATLAB/Simulink

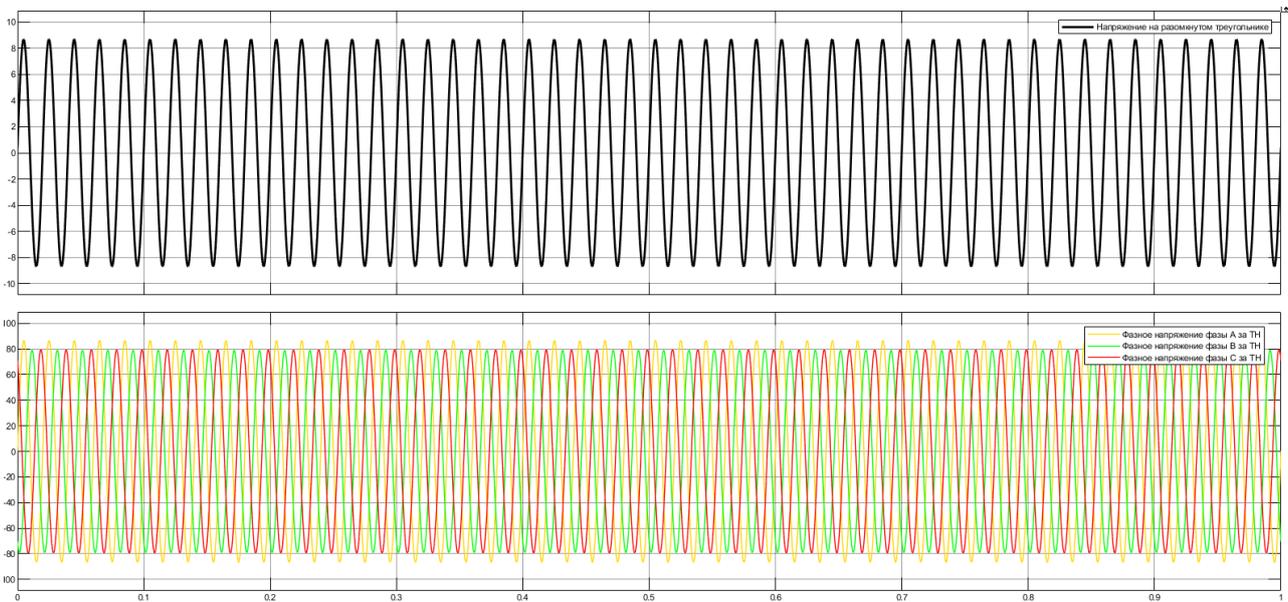


Рис. 2. Осциллограмма фазных напряжений и напряжения на разомкнутом треугольнике до добавления сопротивления

Осциллограмма напряжений на разомкнутом треугольнике до добавления сопротивления показывает напряжение, вызванное несимметрией фазных напряжений. Напряжение нулевой последовательности создают ложные сигналы, на которые реагирует релейная защита, что может привести к ненужному отключению участков сети [4].

После добавления сопротивления в заземляющий контур наблюдаются значительные улучшения. Осциллограмма фазных напряжений, представленная на рис. 3, показывает снижение асимметрии и стабилизацию фазных напряжений. Это свидетельствует о том, что добавленное сопротивление эффективно ограничивает паразитные токи и устраняет условия, способные вызвать ложное срабатывание релейной защиты. Напряжение на разомкнутом треугольнике также заметно снижается, и его амплитуда практически исчезает, что свидетельствует об устранении паразитных сигналов.

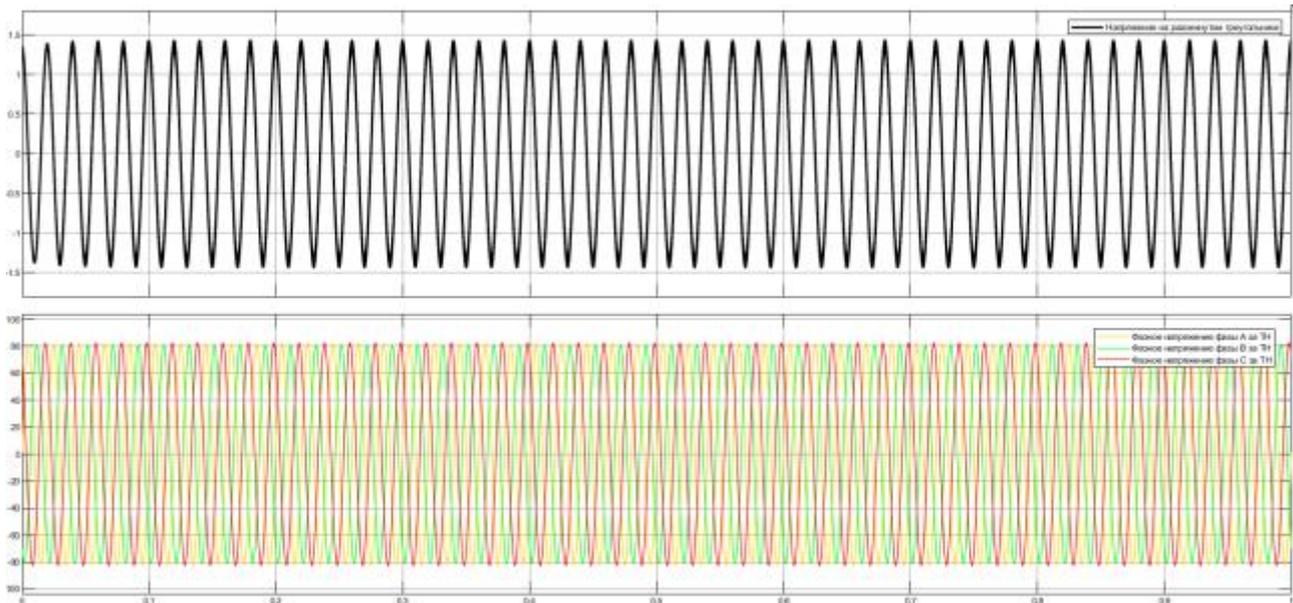


Рис. 3. Осциллограмма фазных напряжений и напряжения на разомкнутом треугольнике после добавления сопротивления 25 Ом

Для релейной защиты, зависящей от точных данных о фазных напряжениях, добавление сопротивления в контур заземления является важным шагом для правильности работы. Когда релейная защита регистрирует на ложные сигналы, система может совершать ненужные отключения. Добавление сопротивления в заземляющий контур трансформатора напряжения помогает предотвратить ложные срабатывания, поскольку оно минимизирует существование устойчивого феррорезонанса и позволяет системе отслеживать реальные изменения, не реагируя на ложные сигналы.

Моделирование системы в MATLAB/Simulink показывает, что добавление сопротивления в дополнительную вторичную обмотку ТН позволяет значительно снизить влияние ложной земли и уменьшить асимметрию фазных напряжений. Это решение помогает релейной защите избежать ложных срабатываний и обеспечивает точные измерения. Использование сопротивления 25 Ом подтвердило свою эффективность, демонстрируя, что фазные напряжения становятся симметричными, а паразитные напряжения исчезают.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянцеv А.Ю. Феррорезонансные процессы без замыкания на землю» описаны случаи появления в электрических сетях 6–35 кВ так называемого явления «ложной земли // *Новости Электротехники*. – 2009. – № 4(58).
2. СТО 56947007-29.240.10.191-2014. Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6–750 кВ, ОАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс] : утв. и введ. приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 19 нояб. 2014 г. No 522. URL:[http://www.fsk-ees.ru/about/management\\_and\\_control/test/STO\\_56947007-29.240.10.191-2014.pdf](http://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/STO_56947007-29.240.10.191-2014.pdf) (дата обращения: 06.11.2024).
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с. – ISBN 5-94074-395-1. – Текст : электронный.
4. Лавров Ю.А. Современные антирезонансные трансформаторы напряжения/ Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев // *Новости электротехники*. – 2009. – № 5 (59).

## ДИАГНОСТИКА ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПО КОЭФФИЦИЕНТУ СМЕЩЕНИЯ ПОЛЯ

И.А. Грачев

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
ЭМФ, ЭМ, аспирант

Научный руководитель: Н.А. Морозов, к.т.н., доцент ЭМ ЭМФ ИГЭУ им. В.И. Ленина

Вследствие длительной работы электрических машин некоторые из основных узлов приходят в негодность и приводят к авариям, а значит и к большим расходам. Одной из самых распространённых поломок является износ подшипникового узла, который влечет за собой появление эксцентриситета и значительную вибрацию машины [7].

В последние годы перспективным направлением в диагностике электрических машин является метод выявления повреждений по внешнему магнитному полю (ВМП). Основная методика исследования влияния эксцентриситета на изменения ВМП заключается в фиксации поля с помощью трёхкоординатного датчика (рис. 1) и последующем анализе полученных результатов [1, 5, 6]. Эксперимент проводился со статическим эксцентриситетом. Три датчика Холла посажены на шуп 2, напечатанный на 3D принтере. В корпусе 1 собрана схема с тремя резисторами и потенциометрами для выставления нулевого сигнала. Датчики питаются от батарейки типа крона. Выводы 4 для измерения её напряжения также помещены в корпус. Они нужны для определения чувствительности датчиков. Также сделаны выводы датчиков 3 для подключения к коннектору на лабораторной установке.

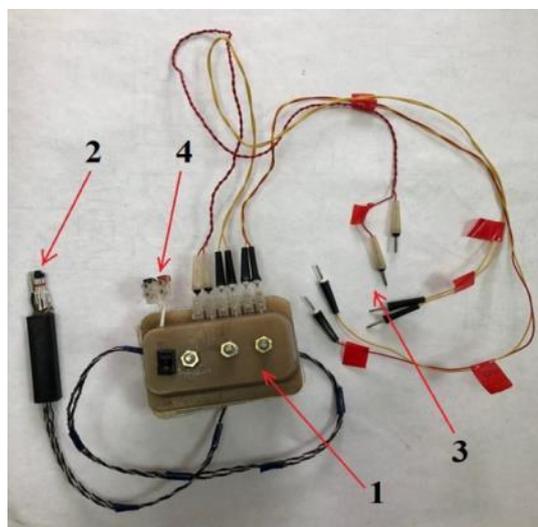


Рис. 1. Трёхкоординатный датчик измерения ВМП

Датчик был усовершенствован при помощи программной платы. Выводы 3 заменены на USB разъём, в который вставляется кабель и подключается к компьютеру или ноутбуку. Корпус 1 с потенциометрами также заменён на новый напечатанный на 3D принтере, а приведение к нулевому сигналу осуществляется при нажатии специальной кнопки на плате. Вывод 4 для измерения напряжения батарейки убран, так как питание датчика осуществляется с помощью подключения его к ноутбуку.

Метод оказывается эффективным лишь в том случае, если известно, как проявляется контролируемое повреждение в ВМП машины. Проведён эксперимент со статическим эксцентриситетом. На кафедре электромеханики была собрана лабораторная установка (рис. 2) для исследования влияния статического эксцентриситета ротора синхронного генератора на ВМП, которая включает в себя модель турбогенератора 1 на базе асинхронного двигателя с новым ротором, имитирующим реальный ротор турбогенератора.

Для подготовки модели турбогенератора к эксперименту, с неё были сняты щиты подшипниковые для удобства фиксации ротора и изменения значения эксцентриситета. Катушки обмотки возбуждения спаяны последовательно. Модель турбогенератора устанавливается на основании 7. Вал ротора закреплялся с помощью напечатанных на 3D принтере фиксаторов 2, которые показаны на рис. 3.

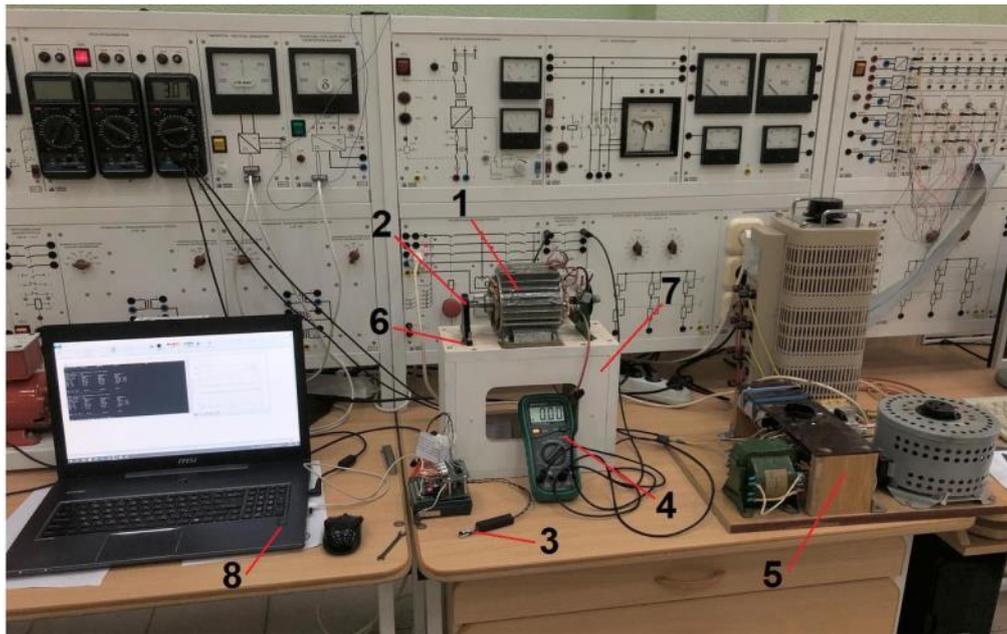


Рис. 2. Лабораторная установка для исследования влияния статического эксцентриситета ротора на ВМП

Магнитное поле измерялось с помощью трёхкоординатного датчика 3, который был подключен к ноутбуку 8. Изменение значения эксцентриситета проводилось при вложении под фиксаторы вала стальных щупов 6 различных номиналов.

Возбуждение модели осуществлялось от независимого регулируемого источника питания 5. Параметры модели контролировались измерительными приборами 4.

Угол поворота ротора контролировался с помощью стрелки, закрепленной на валу ротора и указателя угла, приклеенного к одному из фиксаторов.

В начале эксперимента следует запустить на ноутбуке программу для трёхкоординатного датчика и подключить датчик с помощью USB к ноутбуку. Далее следует откалибровать датчик нажатием кнопки на плате, которая сводит значения индукции к нулю, чтобы избавиться от влияния магнитного поля Земли. В первом положении ротор лежит на расточке статора, фиксаторы вала висят в воздухе. При подаче на обмотку возбуждения постоянного тока номиналом в 1 А, снимаются показания значения магнитного поля с помощью трёхкоординатного датчика. Подавать постоянный ток следует для каждой новой точки, чтобы избежать шумов и наводок. Первая точка находится сверху машины, вторая и четвертая с боков, а третья снизу. Точки расположены также и по длине машины, по центральному сечению и над торцами сердечника статора. Подставляя датчик в указанные точки его положение в пространстве относительно оси машины остаётся одно и то же. Ось датчика всегда вертикальна и направлена по радиусу к оси машины. Щуп надо прижимать к станине статора.

Далее следует нажать кнопку на плате для выставления нулевого сигнала. Помещая датчик в указанные точки при нажатии клавиши Enter, программа выводит на экран графики



Рис. 3. Фиксатор вала

индукций и их максимальное, минимальное и среднее значение. Затем ротор поворачивается на 90 градусов, точный угол поворота регулируется с помощью стрелки и указателя, и повторно снимаются показания поля во всех двенадцати точках. После снятия показаний при начальном значении эксцентриситета, под фиксаторы подкладываются стальные шупы нужного номинала, чтобы поднять ротор до следующего положения и изменить значение эксцентриситета. Фиксаторы крепятся болтами для избегания смещения оси ротора относительно оси статора по длине машины.

В эксперименте должно участвовать как минимум два человека, так как следует подставлять датчик к контрольным точкам очень точно и одновременно фиксировать полученные сигналы на ноутбуке.

В результате эксперимента были получены графики значений индукции при разных значениях эксцентриситета. В табл. 1 даны зафиксированные радиальные значения индукции в положении ротора, при котором северный полюс смотрит вверх по вертикальной оси.

Таблица 1. Экспериментальные значения радиальной индукции при эксцентриситете ротора

Ном. граф.	1	2	3	4	5	6	7
	Эксцентриситет $\epsilon$ , мм						
$\phi$ , град.	-0,15	-0,1	-0,05	0	0,05	0,1	0,15
0	0,384	0,38243	0,38414	0,38532	0,42064	0,45227	0,49812
90	0,04217	0,03034	0,06097	0,0085	-0,03532	-0,0533	-0,08381
180	-0,502	-0,45456	-0,42093	-0,39692	-0,39059	-0,36424	-0,34157
270	0,02039	0,03512	0,05342	0,00949	-0,03215	-0,05482	-0,09594
360	0,384	0,38243	0,38414	0,38532	0,42064	0,45227	0,49812

Полученные данные занесены в программу Excel, где строились графики (рис. 4).

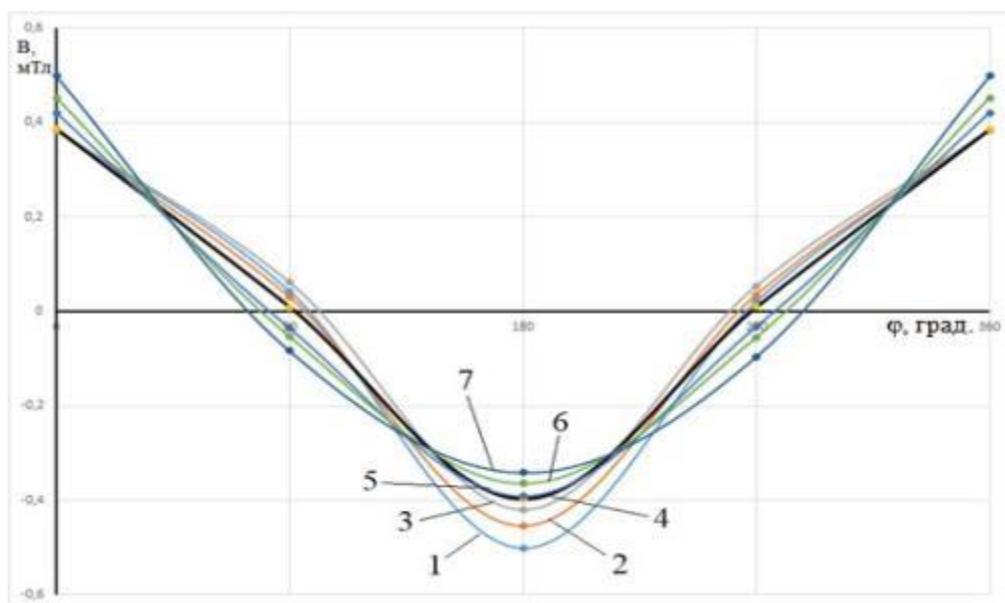


Рис. 4. Значения радиальной индукции при эксперименте

Нумерация графиков соответствует данным таблицы по столбцам. Было замечено, что при поднятии ротора с расточки статора до нулевого значения эксцентриситета, значения индукции снизу машины, которым соответствует строка таблицы 180°, имеют заметные различия по значениям для разных эксцентриситетов. Это можно увидеть по графикам 1, 2, 3 и 4. В то же время при дальнейшем поднятии ротора вверх, различия между значениями индукции снизу машины имеют меньшую разницу, графики 5, 6 и 7.

Сверху машины картина противоположная. Только при приближении ротора от нулевого значения эксцентриситета до верхней точки, значения индукции начинают изменяться сильнее. Это объясняется перераспределением магнитного поля в ярме машины и изменением его магнитного насыщения. При приближении ротора к расточке статора, воздушный зазор уменьшается, что вызывает увеличения магнитного поля. Со стороны большего зазора магнитное сопротивление изменяется в меньшей степени, что ведёт к уменьшению значений магнитной индукции и меньшему изменению их при увеличении эксцентриситета.

На кафедре электромеханики ИГЭУ проводились исследования модели турбогенератора на предмет выявления повреждения обмотки возбуждения, где оценкой влияния полочки на внешнее магнитное поле осуществлялось с помощью коэффициента несимметрии поля [2]. Аналогично оценку влияния эксцентриситета ротора на внешнее магнитное поле предлагается проводить с помощью коэффициента смещения поля (КСП) (рис. 5), равном отношению разности индукции  $\Delta B$  при наличии эксцентриситета и его отсутствию на значение индукции  $B$  при отсутствии эксцентриситета.

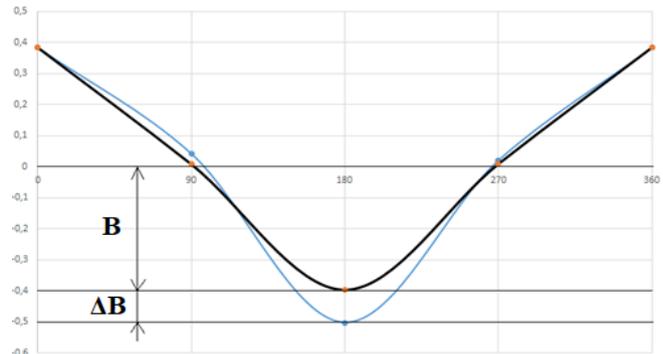


Рис. 5. Определение коэффициента смещения поля (КСП)

Для радиальной и тангенциальной составляющей проведён расчёт КСП, полученные данные внесены в табл. 2.

Таблица 2. КСП радиальной и тангенциальной составляющих индукции

Пары датчиков	Эксцентриситет $\epsilon$ , мм						
	-0,15	-0,1	-0,05	0	0,05	0,1	0,15
А	0,2647	0,1452	0,0604	0	-0,0159	-0,0823	-0,1394
	-0,0034	-0,0075	-0,003	0	0,0916	0,1737	0,2927
Б	0,09	0,083	0,021	0	0,0404	0,036	0,0333
	0,086	0,071	0,031896	0	-0,014	-0,0186	0,0159

На рис. 6 показан КСП сразу для двух пар датчиков: А – пара датчиков по вертикальной оси, которые показывают КСП радиальной составляющей индукции, и Б – пара датчиков по горизонтальной оси, соответствующие КСП тангенциальной составляющей индукции.

Следует отметить, что при эксперименте присутствуют так называемые выбросы, которые происходят из-за человеческого фактора, а именно возможном наклоне датчика к станине машины или любое отклонение плоскости от перпендикулярного положения относительно направления магнитного потока приводит к уменьшению тангенциальной и радиальной составляющей.

Таким образом по КСП можно определять наличие эксцентриситета и его величину.

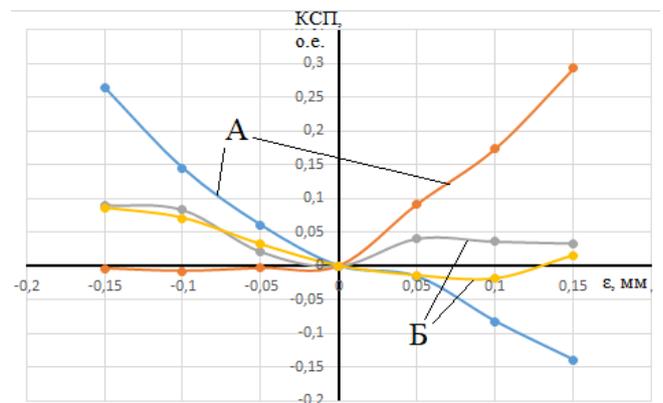


Рис. 6. КСП радиальной и тангенциальной составляющих индукции

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Ю.Б., Морозов А.Н., Океанский А.П. Диагностика электромагнитных несимметрий по внешнему полю электрических машин. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – С. 376–380.
2. Морозов А.Н. Коэффициент несимметрии поля при повреждениях обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины. Т. 3. Электротехника. – Иваново, 2021. – С. 196–198.
3. Волохов С.А., Добродеев П.Н. Проявление статического эксцентриситета ротора во внешнем магнитном поле электрических машин / Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 28–32.
4. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учеб. для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 352 с.: ил.
5. Гаджиев Г.А. и др. Исследование магнитных полей рассеяния в электрических машинах для их диагностики в условиях работы // Электротехника. – 2000. – № 6. – С. 23–27.
6. Хайруллин И.Х., Пашали Д.Ю. Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю // Вестник УГАТУ, – 2006. – №1(14). – С. 165–170.
7. Алексеев Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов: Обзор отечественного и зарубежного опыта. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.

## СЛОЖНОСТИ УСТАНОВКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В АЛТАЙСКОМ КРАЕ

**И.К. Фаст**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-11*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент, ЭФ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

Существует много проектов по развитию альтернативной энергетики в Алтайском крае. Эти проекты основываются на факторы, относящихся к развитию отрасли по всей России. Алтайский край имеет много запретов, которые замедляют развитие солнечной энергетики.

Одна из распространенных проблем альтернативной энергетики заключается в том, что не принимаются во внимание факторы и особенности, усложняющие дальнейшую эксплуатацию, из-за ограничения строительства объектов альтернативной энергетики [1].

Алтайский край представляет собой перспективный регион для внедрения солнечной энергетики. Данный вывод основан на данных, представленных на рис. 1, который показывает уровень солнечной инсоляции в регионе.

Чтобы продолжить исследование мы наложим график солнечной инсоляции в Алтайском крае на карту территориального планирования этого региона. Результаты можно увидеть на рис. 2.

Чтобы построить солнечные электростанции в регионе, необходимы большие площади. Постройка электростанций лишь частично будет покрывать недостаток энергии в регионе.

Анализируя карту, приходим к заключению, что наиболее многообещающим регионом является юго-запад Алтайского края. Остальные территории также имеют потенциал, однако характеризуются низким уровнем солнечной инсоляции.

Возьмем во внимание фактор сезонности. В Алтайском крае, как и в других регионах, наблюдается смена времён года, что может влиять на интенсивность солнечного излучения и, соответственно, на эффективность солнечных батарей.

Так же отметим что, постройка солнечных электростанций затрудняется наличием в Алтайском крае лесов [2].

Алтайский край располагается в зоне умеренно-континентального климата. Безморозный период здесь длится примерно 130 дней в году. Данный фактор значительно усложняет постройку солнечных электростанций в регионе.

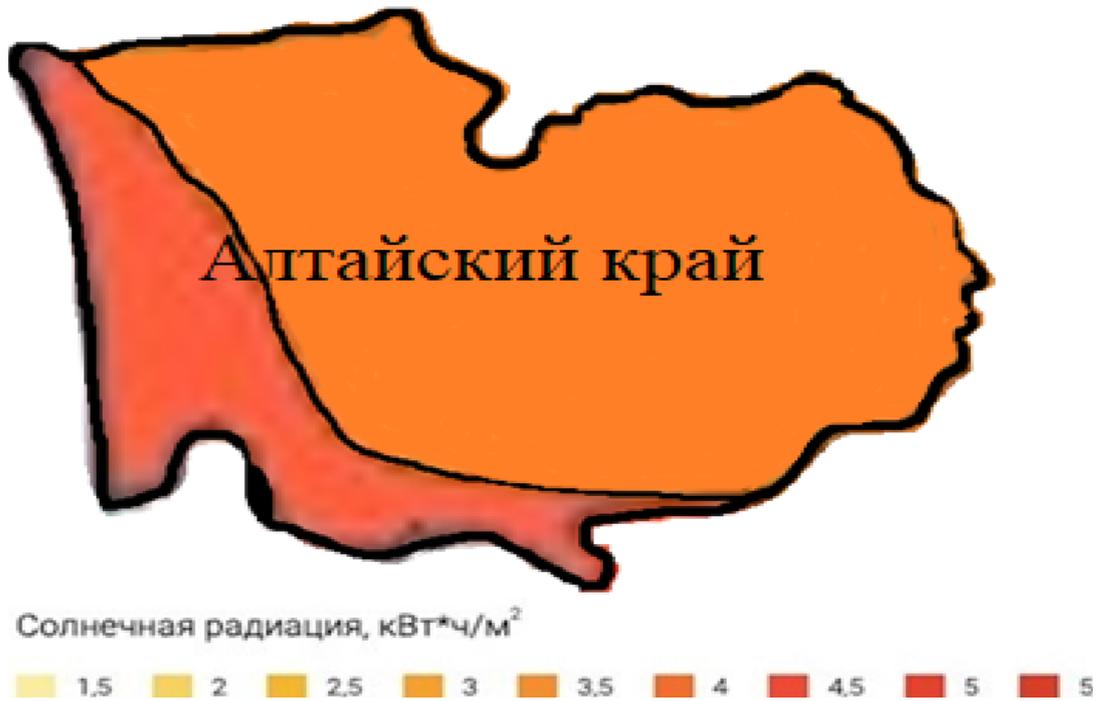


Рис. 1. График солнечной инсоляции

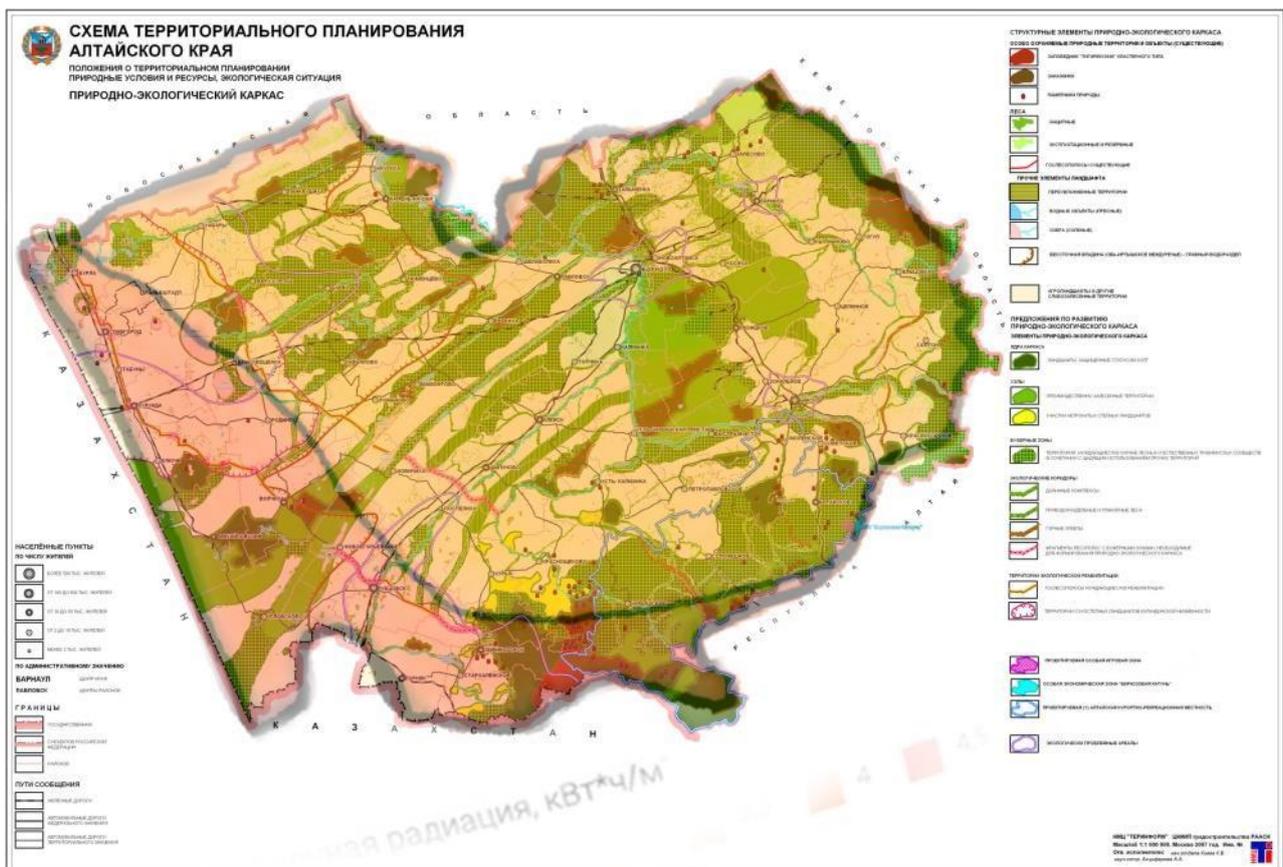


Рис. 2. График солнечной инсоляции, наложенная на схему территориального планирования

Ключевой фактор, который указывает на нецелесообразность возведения солнечных электростанций, служит развитая электросеть Алтайского края, которая изображена на рис. 3.



## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ИМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОГРАФИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТОК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**И.А. Кавун**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-42*

Научный руководитель: А.В. Мытников, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Метод низковольтных импульсов (НВИ) или технология импульсного дефектографирования практически с момента создания стал основным для диагностики обмоток силовых высоковольтных трансформаторов [1–3]. Деструкция высоковольтной изоляции в обмотках силовых трансформаторов и электрических машин часто становится причиной аварий с серьезными последствиями [4–6]. Существующие методы диагностики обмоток, не смотря на их большое многообразие, далеко не всегда позволяют своевременно обнаружить дефект, и поэтому количество аварий увеличивается. Срок службы многих высоковольтных аппаратов не достигает проектного срока службы именно из-за несвоевременного обнаружения дефектов изоляции обмоток как в следствие механического смещения, так и в результате образования короткозамкнутых витков. Несмотря на большое количество методов диагностики обмоток силовых высоковольтных трансформаторов, каждый способ имеет недостатки, связанные с большой погрешностью, неспособностью выявить дефект на ранней стадии развития [7]. Даже усовершенствованный и признанный в мире классический метод НВИ, названный метод частотного анализа требует отключения обследуемого трансформатора от высоковольтной сети и наличия специальных данных – нормограмм, которые отсутствуют для подавляющего числа трансформаторов. Поэтому, разработка технологии контроля состояния обмоток трансформаторного оборудования в эксплуатации в режиме on-line является актуальной задачей.

Одним из путей решения проблемы является исследование и разработка метода одноступенчатого импульсного дефектографирования. Суть метода состоит в применении только первой ступени классического импульсного дефектографирования, а именно, зондирующего импульса подача и регистрация которого позволяет обнаружить дефект в обмотке. Нами были выполнены эксперименты направленные на выяснение возможности одноступенчатого дефектографирования, результаты которых позволяют рассматривать предложенный нами метод как путь радикального совершенствования процесса диагностики трансформаторного оборудования [8–10].

Одной из проблем технического свойства является необходимость искусственного создания различных дефектов обмотки. Поскольку дефектов с учетом степени развития каждого дефекта и большого числа их возможных взаимных комбинаций необходимо множество, то этот факт делает эксперименты сложными. В каждом случае необходимо изготавливать искусственные дефекты в различных частях обмотки. При работе на реальных трансформаторах данный факт сильно усложняет задачу, так как обмотка не может быть восстановлена до первоначального штатного рабочего состояния. Математическая модель, воплощенная в программной среде, позволила бы при каждом этапе экспериментов, моделировать практически неограниченное число дефектов, в самых различных комбинациях между собой, что достаточно часто встречается на практике.

С целью оптимизации задачи, нами была подготовлена модель процесса диагностики обмоток трансформатора, включающая генератор зондирующих импульсов наносекундного диапазона и собственно обмотки трансформатора. Внешний вид модели, выполненной с программной среде Microcap, приведен на рис. 1.

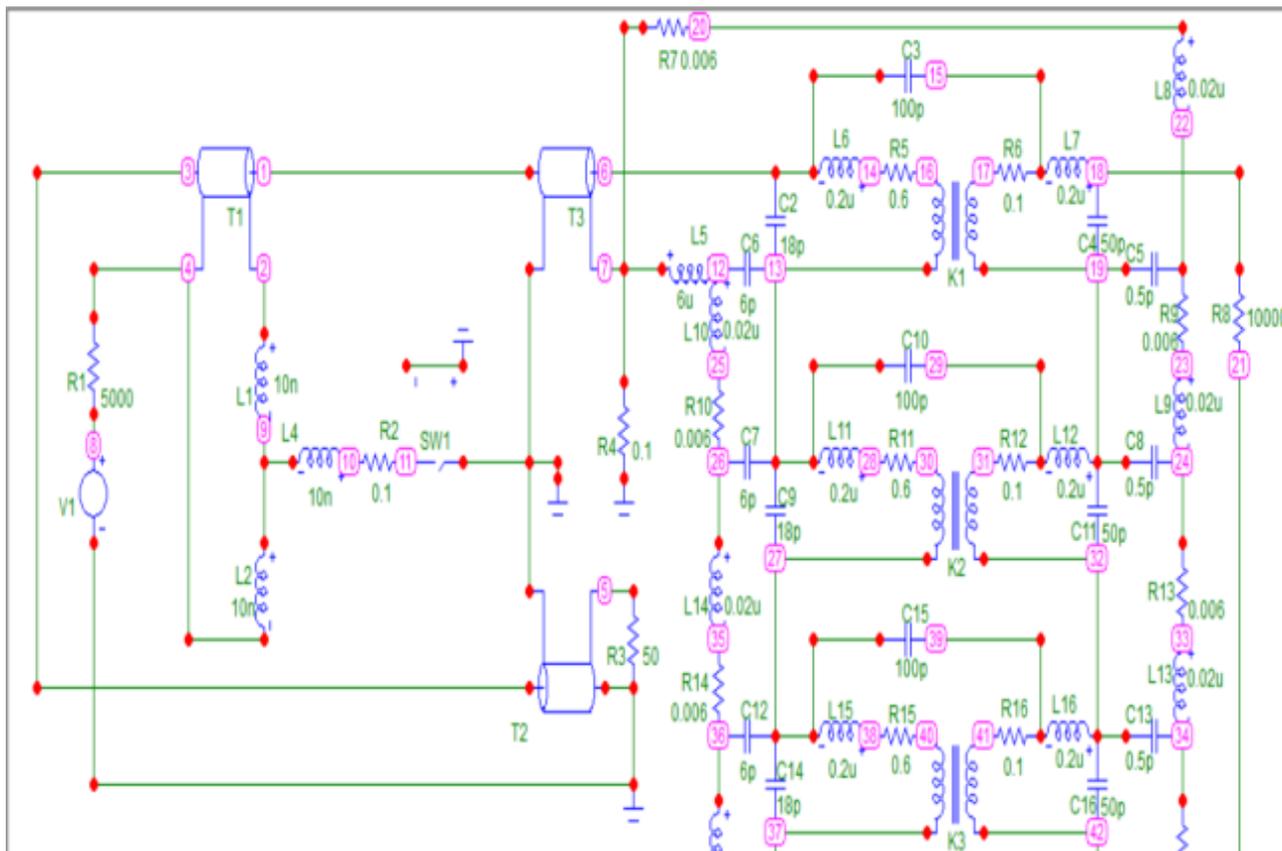


Рис. 1. Вид модели процесса диагностики обмотки высоковольтного силового трансформатора для исследования одноступенчатого режима дефектографирования.

Левая часть модели содержит схему генератора зондирующих импульсов. В состав генератора на модели входят трансформаторы Т 1-3, резисторы, индуктивности L1-4. Правая часть – модель обмотки трансформатора, причем слева представлена высоковольтная обмотка. Справа находится обмотка низкого напряжения. Составные части модели собственно обмотки, это конденсаторы С6, С7 и С12, изменение емкости которых позволяет имитировать радиальное смещение витки обмотки, а конденсаторы С2, С9 и С14 изменение емкости которых позволяет имитировать аксиальное смещение витки обмотки. Если аксиальное смещение витки обмотки очевидно, то есть соседние витки постепенно сближаются, то в конце возможно образование короткозамкнутых витков, что также может быть реализовано на модели путем подстановки сопротивлений равными 0.

В процессе моделирования осциллограф подключается между точками модели 6 и 7 и можем наблюдать форму сигнала входного импульса. Другое подключение выполняется между точками схемы 23 и 24, и можно наблюдаем за сигналом, имеющим место только в данной точке схемы. На рис. 2 показана форма зондирующего импульса, полученная при моделировании исправного состояния трансформатора. На рис. 3 продемонстрирована ситуация, при которой в обмотке высокого напряжения создан дефект типа «радиальное смещение витков обмотки». Указанный дефект был реализован путем изменения значения емкостей С6, С7 и С12 в сторону увеличения, что соответствует при смещении витков обмотки в направлении перпендикулярном оси симметрии обмотки. Необходимо отметить, что данный дефект достаточно часто формируется в начале обмотки высокого напряжения, и его своевременный контроль необходим для предотвращения полной потери механической устойчивости обмотки. Разница в формах импульса позволяет обнаружить характерные изменения в формах сигнала зондирующего импульса визуально. При необходимости возможно разложение полу-

ченных сигналов в частотный спектр для более тщательного и детального анализа ситуации в обмотке. Однако, как видно из сравнения сигналов на рис. 2 и 3, можно совершенно четко визуалью зафиксировать разницу между дефектным и исправным состоянием.

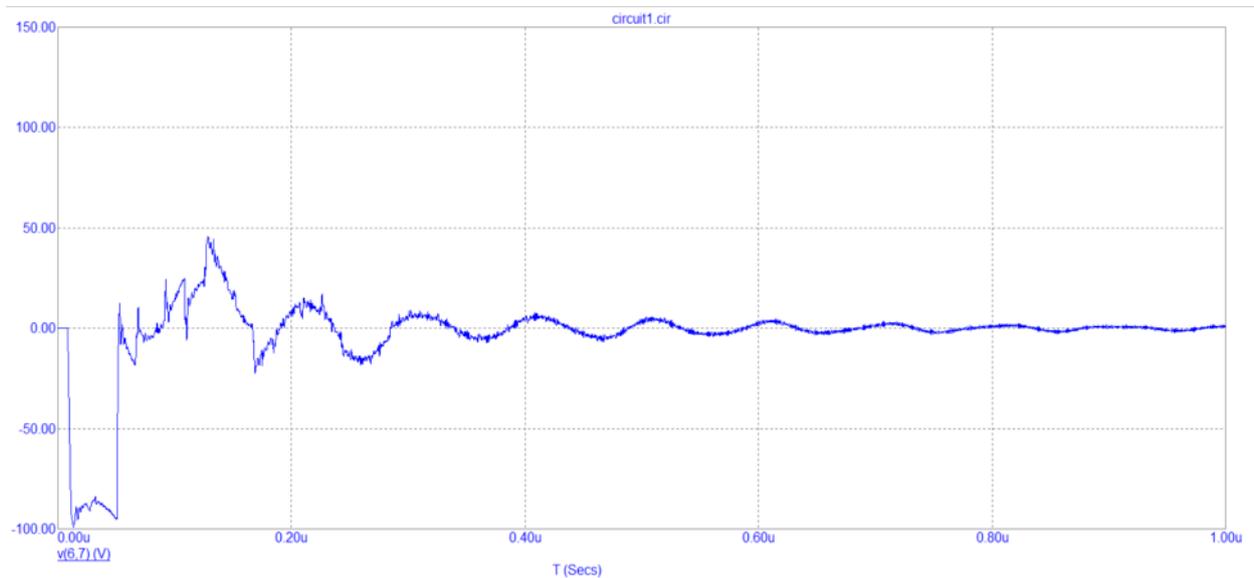


Рис. 2. Форма зондирующего импульса, полученная исправной обмотке. Дефектов нет

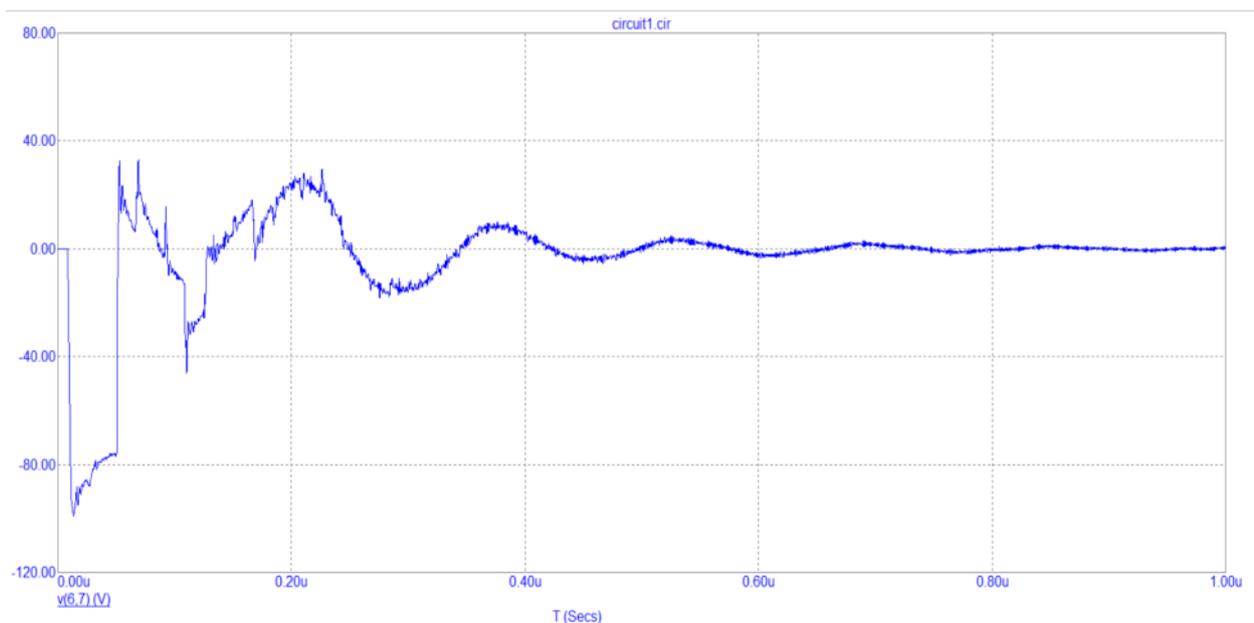


Рис. 3. Форма зондирующего импульса, полученная при дефекте типа «радиальное смещение обмотки»

Дальнейшее исследование предполагает детальное исследование процесса обнаружения дефектов обмотки – радиальное и аксиальное смещение витков в различных частях обмотки с разной степенью смещения, короткозамкнутые витки обмотки и различные взаимные комбинации дефектов. На основе пробных модельных экспериментов можно сделать следующие выводы: импульсное зондирование обмотки трансформаторов используя только первую ступень – собственно зондирующий импульс – позволяет обнаруживать дефект обмотки типа радиальное смещение витков обмотки только за счет визуального контроля степени дефор-

мации формы зондирующего импульса. Деформация формы импульса происходит от начальной формы под воздействием формирующегося дефекта.

Таким образом, модель диагностической процедуры, предложенная в данной работе, позволяет проводить всесторонние исследования импульсного дефектографирования в одноступенчатом режиме, не привлекая сложное и дорогостоящее оборудование, которое неизбежно приходится задействовать при проведении исследования подобного рода. Модель, включающая как генератор зондирующих импульсов, так и собственно обследуемую обмотку, позволяет моделировать самые различные дефекты обмотки в любых вариациях и взаимных комбинациях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лех В., Тымински Л. Новый метод индикации повреждений при испытании трансформаторов на динамическую прочность // *Электричество* – 1966. – Т. 1. – № 1. – С. 77–81.
2. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов в Самаразэнерго методом низковольтных импульсов // *Электрические станции* – 2003. – № 11. – С. 49–51.
1. Аликин С.В., Дробышевский А.А., Левицкая Е.И., Филатова М.А. Диагностика обмоток силовых трансформаторов методом низковольтных импульсов // *Электротехника* – 1991. – № 12. – С. 30–35.
3. Анализ причин повреждений и результаты обследования технического состояния трансформаторного оборудования / В.С. Богомолов, Т. Е. Касаткина, С.С. Кустов // *Вестник ВНИИЭ*. – 1997. – С. 25–32.
6. Повреждаемость маслонаполненного оборудования электрических сетей и качество контроля его состояния / М.И. Чичинский // *Энергетик*. – 2000. – № 11. – С. 29–31.
7. Оценка технического состояния электрооборудования энергосистем и определение перспектив надежной работы ЭЭС России / А.Ю. Хренников // *Электрические станции* – 1999. – № 8. – С. 67–70.
8. Цурпал С.В. Причины повреждаемости и меры по повышению надежности мощных силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов // *Материалы X Международной научно – технической конференции*. – Запорожье: Запорожский трансформаторный завод, 2000. – С. 122–126.
9. Кавун И.А., Мытников А.В. Инновационная методика диагностики трансформаторов на основе импульсного дефектографирования // *Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XVI Международной научно-технической конференции*. – Вологда: Вологодский государственный университет. – Вологда: ВоГУ, 8 декабря, 2021. – С. 137–142. ISBN 978-5-907606-00-5
10. Кавун И.А., Мытников А.В. Исследование путей повышения эффективности диагностики обмоток высоковольтных силовых трансформаторов зондированием низковольтными импульсами в одноступенчатом режиме // *IV Всероссийская с международным участием молодежная конференция*. – Томск: Томский политехнический университет. – 2022. С. 574–576.
11. Кавун И.А., Мытников А.В. О совершенствовании технологии импульсного дефектографирования обмоток высоковольтных силовых трансформаторов // *Электротехника* – 2023. – № 2. – С. 51–54.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАГРЕВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НА ЁМКОСТНЫЙ ДАТЧИК В СИСТЕМЕ НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ МАСЛОНАПОЛНЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Е.М. Конев**

*Алтайский Государственный Технический Университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПБ, группа 8Э-32*

Научный руководитель: Б.С. Компанеец, к.т.н., зав. кафедры ЭПБ АГТУ

В настоящее время энергетический комплекс России ведет активную модернизацию оборудования на всех классах напряжений. Задачи по цифровизации и автоматизации работы всей единой энергосистемы четко отражены в энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года [1]. Разработка новых технических решений, на базе отечественных приборов и оборудования, направленных на автоматизацию, диспетчеризацию, цифровизацию является приоритетной задачей. Технологические возможности 21-ого века

позволяют организовать защиту и диагностику оборудования на высочайшем уровне. Построение SCADA систем с применением новейших технологий диагностики и цифровых защит существенно повышает надёжность объектов энергетики, но имеют большую себестоимость, поэтому количество таких объектов не велико. Исходя из этого существует необходимость разработки новых методов диагностики и автоматизации электроустановок, но в той ценовой категории, чтобы модернизация существующих объектов была не только технически, но и экономически возможна.

Наиболее распространённой электроустановкой можно считать силовой маслонаполненный трансформатор, в котором масло выступает в роли диэлектрика, а также среды для переноса тепла от обмоток к корпусу/радиатору. На данный момент существуют два основных метода диагностики трансформаторного масла: химический и хроматографический. Данные методы позволяют узнать о состоянии трансформаторного масла, а также о неисправностях, дефектах и поломках в самом трансформаторе, но имеют существенный недостаток – на классе напряжения 6–35 кВ с их помощью невозможно организовать непрерывную дистанционную диагностику оборудования, поскольку необходим сбор проб масла. На базе Алтайского Государственного Технического университета была разработана система непрерывного контроля состояния маслонаполненного оборудования на основе ёмкостного датчика приближения. Новая система контроля состояния трансформаторного масла позволит реализовать дистанционный, непрерывный контроль, так как нет необходимости взятия проб масла, датчик монтируется в крышку трансформатора и работает непрерывно. Трансформаторное масло, как уже говорилось ранее, – диэлектрик, поэтому оценивать его состояние можно, измеряя его диэлектрическую проницаемость. Диэлектрическая проницаемость пропорционально влияет на электрическую ёмкость конденсатора, значит оценивать изменение диэлектрической проницаемости можно, измеряя электрическую ёмкость плоского конденсатора. Ёмкостный датчик приближения – это развёрнутый конденсатор, в котором чувствительная поверхность – это обкладки, развёрнутые на одной плоскости, а вещество между ними является диэлектриком [2]. При внесении объекта в зону контроля, изменяется ёмкость, создаваемая данным конденсатором, что приводит к срабатыванию датчика. Таким образом, при помощи ёмкостного датчика приближения можно измерить диэлектрическую проницаемость масла, а значит и его состояние.

В Алтайском Государственном Техническом университете опытным путём было установлено, что диэлектрическая проницаемость, а значит и ёмкость, измеряемая датчиком, зависит от степени его состояния (загрязнения, старения, окисления, увлажнения и т. д.) [3]. Вторым этапом разработки системы стал эксперимент, который должен был показать, зависит ли диэлектрическая проницаемость масла и ёмкость, воспринимаемая датчиком, от степени нагрева масла. Для этого был проведён опыт.

Целью эксперимента было наглядно увидеть влияет ли температура трансформаторного масла, на электрическую ёмкость, создаваемую и измеряемую датчиком. На данном этапе работы рассматривается применение дискретного ёмкостного датчика. Так как датчик не аналоговый, то не было возможности получить кривую зависимости измеряемого параметра от температуры. Поэтому было принято решение фиксировать пороговые значения переключения датчика, при изменении чувствительности. Эксперимент строился следующим образом:

1. Датчик был погружён в трансформаторное масло, при его температуре равной 35 °С. Изменяя его чувствительность, был зафиксирован переход из состояния «Включено» – ON в состояние «Отключено» – OFF. Таким образом было получено нулевое значение чувствительности датчика.

2. Далее масло, в котором находился датчик было нагрето.

3. При температуре масла равной 60 °С было произведено измерение точки перехода датчика при верхнем значении температуры. Так как датчик остался в состоянии OFF, то чув-

ствительность увеличивалась, до перехода в состояние ON. Таким образом, было зафиксировано, что в одном и том же масле, но при разной температуре нагрева, для срабатывания датчика необходима большая чувствительность.

4. Дальнейшие замеры пороговых значений проходили, при остывании масла на 5 градусов. Было зафиксировано, что по в процессе уменьшения температуры масла, при неизменной чувствительности, датчик переходил в состояние ON. Поэтому при измерении фиксировался переход датчика из состояния ON в состояние OFF.

5. Данные измерения повторялись каждые 5 °С до установления маслом исходной температуры.

6. При снижении температуры до исходного значения, чувствительность датчика для порогового перехода стала такой же, как и в начале опыта, что свидетельствует о том, что датчик не утратил свою работоспособность и сохранил исходную точность измерений.

Данный эксперимент был повторён для 5 образцов масла разной степени загрязнённости, старения, окисления и т. д. Образцы масла были предоставлены ПАО «Россети-Сибирь» филиалом Алтайэнерго. Четыре из пяти образцов – это масло, которое было в эксплуатации в действующих трансформаторах, а пятый образец «Бочка» – это масло, которое никогда не было в эксплуатации. Результаты эксперимента сведены в единую табл. 1. Значения в таблице – это градусы поворота регулировки чувствительности, для фиксации порогового перехода состояния датчика.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Наименование образца	Температура масла, °С					
	35	40	45	50	55	60
Бочка	0	45	60	120	160	190
ТРДН-40000/110	0	25	40	100	140	180
ТМ-25/10 (обр. 1)	0	30	90	130	170	210
ТМ-160/10	0	20	60	135	170	200
ТМ-25/10 (обр.2)	0	25	75	110	160	200

Результаты эксперимента приведены на рис. 1.

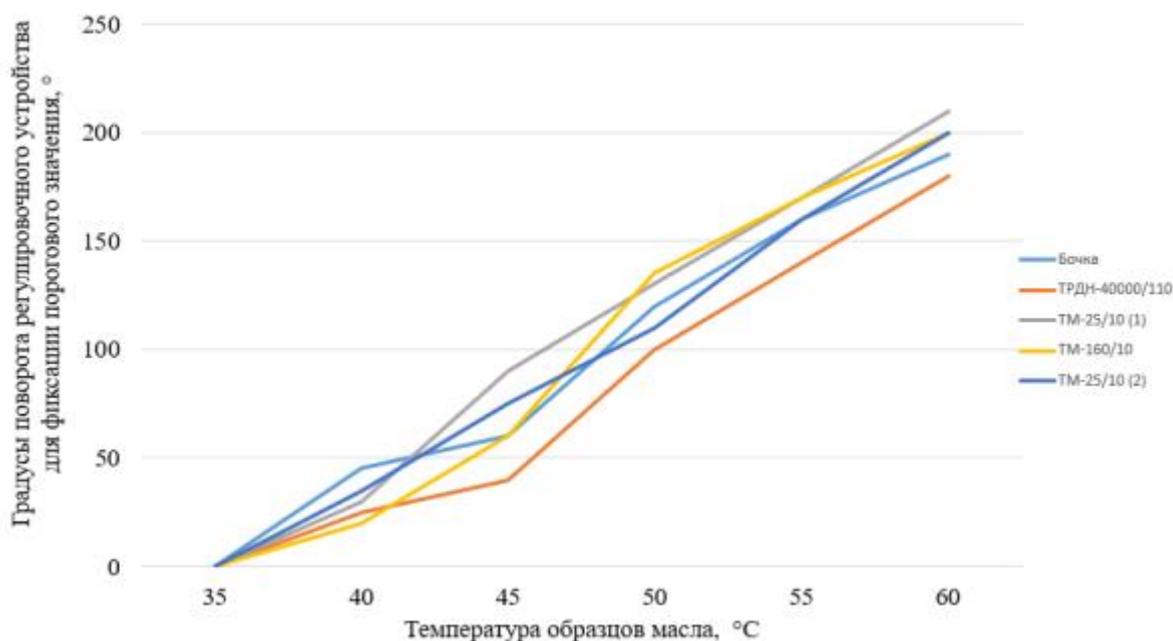


Рис. 1. График зависимости чувствительности ёмкостного датчика приближения от температуры трансформаторного масла

Исходя из результатов эксперимента, можно сделать вывод, что чувствительность ёмкостного датчика приближения зависит от степени нагрева трансформаторного масла. По графикам видно, что при повышении температуры масла, диэлектрическая проницаемость снижается, соответственно, снижается и электрическая ёмкость, воспринимаемая датчиком. При практическом применении датчика это может привести к ложным срабатываниям при низких и не срабатыванию датчика при высоких температурах масла. Таким образом, в системе контроля состояния трансформаторного масла необходимо использовать дополнительно датчик температуры, чтобы анализировать степень нагрева. Так как графики зависимости чувствительности от температуры всех 5 образцов масла имеют схожий вид – линейный график, при этом имея небольшую разницу в полученных результатах, то можно рассчитать поправочный коэффициент, который будет при срабатывании/не срабатывании датчика учитывать температуру трансформатора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. об утверждении энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года // Министерство энергетики РФ. – URL: [https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uwl0o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document\\_119047.pdf](https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uwl0o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document_119047.pdf) (дата обращения 04.11.2024).
2. Принцип работы емкостных датчиков // LEUZE RUS. 2024. – URL: <https://leuze.ru/emkostnye-datchiki> (дата обращения 04.11.2024).
3. Конев Е.М., Компанеев Б.С. Непрерывный контроль состояния маслonaполненного оборудования // Ползуновский альманах. – 2023. – № 2-2. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54101789> (дата обращения: 04.11.24).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

**Б.Е. Ордабаев**

*Торайгыров университет, КЭиА, ЭФ, группа ДАиУ-12н*

Научный руководитель: Ж.Б. Исабеков, Phd, асоц.профессор КЭиА ЭФ ТоУ

В настоящее время одной из ключевых проблем в энергетике является обеспечение бесперебойной подачи электроэнергии необходимого качества [1–5]. Это вызвано ухудшающимся техническим состоянием основного силового оборудования, значительная часть которого выработала свой ресурс в условиях перехода к рыночной экономике. В результате резко возросли вероятность и частота аварийных ситуаций, что особенно актуально для воздушных и кабельных сетей.

Распределение электроэнергии в сетях напряжением 6–35 кВ промышленных предприятий выполняется по различным схемам, из которых магистральные схемы являются наиболее экономичными. Одним из важных аспектов работы таких сетей является режим работы нейтрали, который может быть изолированным или заземленным различными способами [6–8]. Электрические сети с изолированной нейтралью получили широкое распространение в системах электроснабжения промышленных предприятий, городов и районов сельского хозяйства.

При длительных замыканиях фазы на землю нельзя допускать ошибочной недооценки опасности однофазных замыканий, основной из которых является возможность возникновения перемежающихся дуговых замыканий фазы на землю, которая сопровождается большой кратностью перенапряжений на элементах сети [8–10]. Совместное воздействие заземляющей дуги и перенапряжений создаёт весьма тяжелые условия для работы изоляции. После чего термическое действие дуги и перенапряжения зачастую однофазные замыкания на зем-

лю переводят в многофазные короткие замыкания или многоместные пробой изоляции на поврежденной фазе с групповым выходом из строя электрооборудования. По данным опыта эксплуатации 60–80 % однофазных замыканий в сетях 6–10 кВ развиваются в междуфазные короткие замыкания или в многоместные пробой изоляции. Причем в пределах до 40 % из них происходят по причине термического действия дуги в сетях с повышенным током замыкания на землю и более 60 % обусловлены пробоем изоляции при воздействии дуговых перенапряжений, чаще всего в сетях с током замыкания до 10 А, характерного для сетей собственных нужд электростанций. Причем при однофазных замыканиях происходит повышение напряжения на здоровых фазах до величины линейного, все это способствует ускоренному старению и без того исчерпавшей свой ресурс изоляции.

Для этого в целях безопасности персонала корпуса электрических машинах и аппаратах заземляют. Поэтому основным видом повреждений в них занимают однофазные замыкания обмотки на корпус (ОЗК). Таким образом, по [9] именно к ним приводит большая часть повреждений обмоток статора и первичной обмотки трансформаторов. В результате воздействия тока замыкания на корпус может повредиться сталь сердечников, а однофазное замыкание перейти в витковое или многофазное короткое замыкание.

Как правило, замыкание фазы на корпус происходит через перемежающуюся или постоянную дугу. На первом этапе существования однофазного замыкания дуга перемежающаяся. Что, при определенных условиях это способно спровоцировать возникновения значительно перенапряжения.

После чего по мере разогрева места повреждения и появления в проводящем канале значительного числа вкраплений меди и стали дуговое замыкание переходит в металлическое, и дуга становится устойчивой. Что сопровождается дальнейшим плавлением железа сердечника и обмоток.

В отношении конкретного значения опасного тока в мировой практике нет единого мнения. Так за минимальный, при котором не происходит сваривания двух листов стали шихтованного сердечника, в [10] предлагают считать ток в 1–1,5 А. К сильному оплавлению листов стали с образованием капли металла по [11] приводит ток в 20 А. В других источниках считают, что этот ток приводит к настолько незначительному повреждению стали сердечников, что они легко устраняется зачисткой и подкраской. В СССР было принято считать опасным для электродвигателей ток больше 5 А. Считалось, что при меньших значениях тока плавление листов железа сердечника за время 0,4–4 с невозможно.

В тоже время протекание в месте замыкания токов до 5 А в течении 30–40 мин способно вызвать такой местный разогрев железа в пазу, при котором начинает, происходит обугливание и разрушение изоляции обмотки статора. Что, как правило, приводит к переходу от ОЗК к витковому замыканию проводников, находящихся в том же пазу. Распределение токов и напряжений в установившемся режиме сети с изолированной нейтралью показано на схеме рис. 1, где  $E_A, E_B$  и  $E_C$  – ЭДС источника питания;  $Z_r$  и  $Z_n$  – полное сопротивление источника питания и нагрузки;  $I_A, I_B$  и  $I_C$  – токи нагрузки;  $I_{A(c)}, I_{B(c)}$  и  $I_{C(c)}$  – токи на землю через емкости  $C_A, C_B$  и  $C_C$  проводников сети относительно земли;  $U_0$  – напряжение смещения нейтрали.

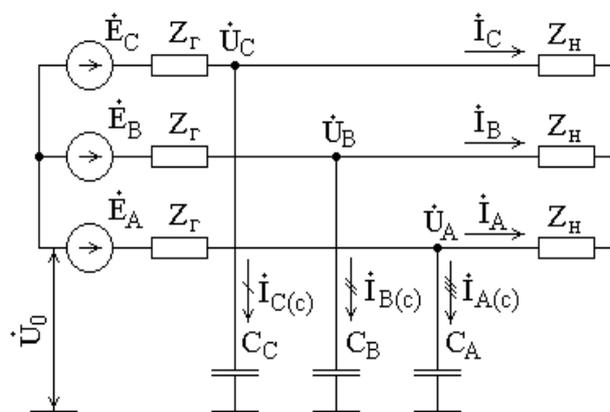


Рис. 1. Распределение токов и напряжений трехфазной сети с изолированной нейтралью в нормальном режиме

В симметричном режиме такой сети токи  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  нагрузки равны по величине, но сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . Емкостные токи  $\dot{I}_{A(c)}$ ,  $\dot{I}_{B(c)}$  и  $\dot{I}_{C(c)}$  также равны по величине, но сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . При этом угол между векторов  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_{A(c)}$  равен  $90^\circ$ , а напряжение  $\dot{U}_0$  смещения нейтрали равно нулю.

При ОЗК на корпус асинхронного двигателя (АД) или трансформатора одной из фаз, например фазы А, распределение токов и напряжений изменится, и будет соответствовать тому, которое изображено на схеме рис. 2, где  $\dot{I}_{AK}$  и  $\dot{I}_A$  – токи в поврежденной фазе на входе нагрузки и со стороны нулевых выводов;  $\dot{I}_0$  – ток замыкания на землю.

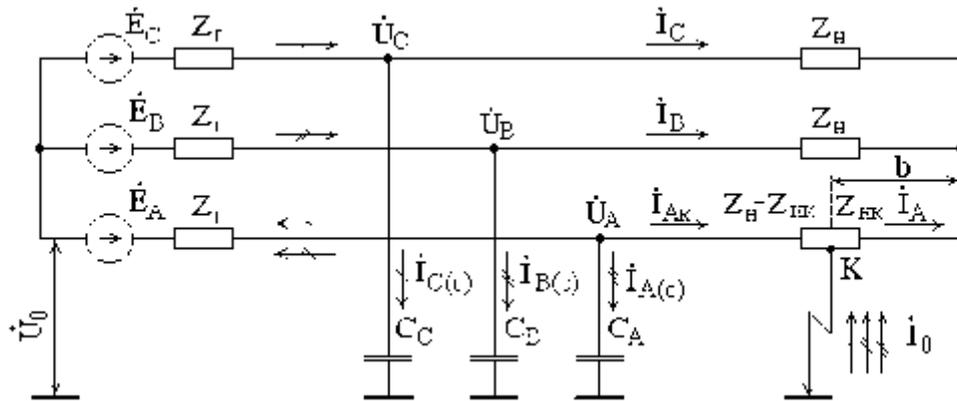


Рис. 2. Распределение токов и напряжений при ОЗК в сети с изолированной нейтралью

Если допустим, что замыкание произошло в точке К, находящейся на относительном расстоянии  $b$  от нейтрали фазных обмоток, то это точка до замыкания имела относительно земли напряжение  $b\dot{U}_A$ . При замыкании она приобретает потенциал земли, а напряжения фаз линии относительно земли станут равными

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_A - b\dot{U}_A, \quad \dot{U}_{B0} = \dot{U}_B - b\dot{U}_A \quad \text{и} \quad \dot{U}_{C0} = \dot{U}_C - b\dot{U}_A. \quad (1)$$

Напряжения  $\dot{U}_{A0}$ ,  $\dot{U}_{B0}$  и  $\dot{U}_{C0}$  вызывают емкостные токи

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A(c)} &= (\dot{U}_A - b\dot{U}_A)j\omega C_A, \\ \dot{I}_{B(c)} &= (\dot{U}_B - b\dot{U}_A)j\omega C_B, \\ \dot{I}_{C(c)} &= (\dot{U}_C - b\dot{U}_A)j\omega C_C. \end{aligned} \quad (2)$$

В месте замыкания токи  $\dot{I}_{A(c)}$ ,  $\dot{I}_{B(c)}$  и  $\dot{I}_{C(c)}$ . С учетом этого ток замыкания на землю

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{A(c)} + \dot{I}_{B(c)} + \dot{I}_{C(c)} = 3j\omega C_A b\dot{U}_A. \quad (3)$$

В сети осуществляется компенсация емкостного тока, то ток замыкания на корпус помимо емкостной будет содержать и индуктивную, обусловленную включением между нейтралью сети и землей дугогасящего реактора  $L$ . В результате

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{A(c)} + \dot{I}_{B(c)} + \dot{I}_{C(c)} = 3b\dot{U}_A \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{\omega L} - j\omega C_A \right). \quad (4)$$

Таким образом, опыт эксплуатации сетей с изолированной нейтралью показывает, что основным видом электрического повреждения в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ является однофазное замыкание на землю, на которое приходится более 70 % от всех замыканий. Токи замыкания на землю, необходимые для определения параметров релейной защиты, могут быть получены как расчетным, так и экспериментальным путем. Однако расчетные методы часто не удовлетворяют по точности, а экспериментальные методы могут быть сложны в применении без нарушения технологического процесса или из-за ложной работы защит от однофазных замыканий на землю.

*Исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23486411).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Identifying the Influence of the System and Mode Characteristics on the Power Loss Mode Based in 110 kV Power Grids / T. Akimzhanov, Y. Sarsikeev, A. Zhantlessova, A. Mekhtiyev, Y. Neshina, Z. Issabekov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. – V. 6(8–126). – P. 6–14.
2. Instrumental Research on the Voltage Harmonic Distortion Coefficient in the Modern 110 kV Urban Electric Network / A. Zhantlessova, S. Zhumazhanov, T. Akimzhanov, A.D. Mekhtiyev, Y.G. Neshina, Z. Issabekov // International Journal on Energy Conversion. – 2023. – V. 11(2). – P. 56–63.
3. Protection of a two-cable line from single phase-to-earth fault with absolute selectivity / Z.B. Issabekov A.N. Novozhilov, T.A. Novozhilov, B.B. Issabekova // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2018. – V. 5(431). – P. 128–132
4. Method to protect lines of two cables from single phase-to-earth fault/ A. Novozhilov, Zh. Issabekov T. Novozhilov // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM. – 2016. – P. 7911418.
5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение». – Москва: Высш. шк., 1991. – 496 с.
6. Боровиков В.А., Косарев В.К., Ходот Г.А. Электрические сети энергетических систем: учебник для техникумов. – Л.: Энергия, 1977. – 393 с.
7. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем: учеб. для вузов. – Москва: Энергия, 1976. – 560 с.
8. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 января 2013 г. – М. : КНОРУС, 2013. – 488 с.
9. Корогодский В.И., Кужиков С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
10. Берман И., Крипски А., Скалка М. Защита мощных генераторов, работающих в блоке с трансформаторами, от замыканий на землю в обмотке статора // Релейная защита и противоаварийная автоматика: междунар. конф. по большим электрическим системам (СИГРЭ-72) / под ред. В.М. Ермоленко, Е.Д. Зейлидзона, А.М. Федосеева. – М. : Энергия, 1975. – С. 19–26.
11. Кулаковский В.Б. Профилактические испытания и дефекты изоляции крупных электрических машин. – Москва : Энергия, 1970. – 184 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЛЕНТЫ ТРАНСПОРТЕРА

**Н.Д. Сарбасова<sup>1</sup>, В.С. Майстров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Торайгыров университет, Факультет компьютерных наук*

<sup>2</sup> *Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А17*

Научный руководитель: Н.Д. Сарбасова, Торайгыров университет,  
Факультет компьютерных наук

Сортировка круглого леса на современных лесных складах – один из основных видов работ, при этом наиболее широко используются транспортеры [1]. Важнейшим источником роста эффективности производства на деревообрабатывающих предприятиях является постоянное повышение технического уровня и внедрение средств автоматизации, а практической реализацией этих систем являются надежные измерительные приборы [2]. Рациональное и более полное использование лесного потенциала, полное удовлетворение потребностей внутреннего и внешнего рынков в конкурентоспособной лесной продукции невозможно без постоянного совершенствования технологических процессов и систем машин, обеспечивающих более эффективную переработку древесины с меньшими затратами трудовых и энергетических ресурсов [3].

В современном мире анализ информации является чрезвычайно важной задачей и фактором успеха для многих промышленных компаний. Методы исследования включают моделирование функционирования машинных систем, сравнительный анализ и моделирование по-

казателей эффективности лесозаготовок в ассортиментной технологии, системный подход, а также абстрактно-логические методы обоснования рекомендаций по выбору технологических вариантов. Проблема повышения доступности древесных ресурсов решается путем определения оптимальных маршрутов доставки и рассредоточения лесозаготовителей по территории. Под последним понимается не только экономический, но и транспортный, так и экологический аспекты [4–6].

При сортировке бревен на продольных цепных конвейерах значительной длины возникает ошибка при перемещении отобранного сортимента круглого леса к месту выгрузки в накопитель, которая увеличивается пропорционально длине сортировочной линии. В настоящее время используются конвейеры ограниченной длины. В работе предложено описание математической модели конвейерной ленты транспортера с устройством управления сортировкой бревен на продольных цепных конвейерах большой нестандартной длины, что позволяет снизить погрешность отслеживания движения сортиментов леса вдоль конвейера [7].

Математическая модель движения ленты транспортера составлена на основе расчетной схемы движения транспортера для перемещения сортимента круглого леса, состоящей из системы нескольких масс. Эти элементы соединены между собой упругими связями с учетом инерционных элементов, всех связей между ними и сил, действующих на эти массы.

Полученная математическая модель, возникающие процессы в динамике описываются уравнениями в частных производных.

Расчетная схема конвейерной ленты рассматриваемого транспортера составлена методом кусочно-линейной аппроксимации распределения массы цепи транспортера.

Для рассматриваемого объекта исследования масса грузовой части транспортера представлена 4-мя сосредоточенными массами  $m_1, m_2, m_3, m_4$ , при этом  $m_4$  – это масса ненагруженной или порожней части ленты транспортера.  $m_5$  – масса натяжного устройства.

Расчетная схема модели движения ленты транспортера представлена на рис. 1.

$M_1$  – привод ведомого барабана,  $M_{\text{НУ}}$  – привод устройства натяжения (НУ) в конечной части транспортера.

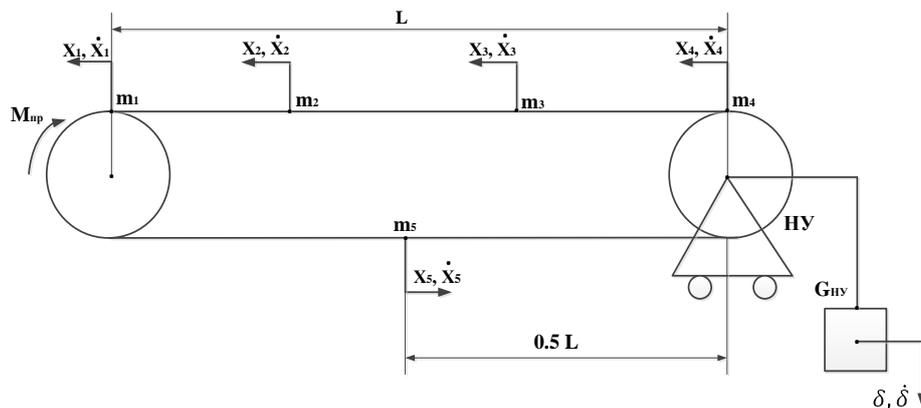


Рис. 1. Расчетная схема транспортера с пятью сосредоточенными массами

$S_i(t), \dot{S}_i(t), i = \overline{1,6}$  – это перемещение и скорость соответствующей массы, которые приняты в качестве переменных координат для расчетной схемы.

Метод Лагранжа второго рода был принят за основу для описания математической модели ленты транспортера для поставленной задачи.  $x_i(t) = S_i(t), \dot{x}_i(t) = \dot{S}_i(t), i = \overline{1,6}$  – обобщенные координаты перемещения и скорости перемещения сосредоточенных масс.

Кинетическая энергия представлена функцией обобщенных скоростей.

Метод Лагранжа был использован с применением следующих уравнений

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial}{\partial \dot{x}_i} T(\dot{x}_i) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \Pi(x_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} A(x_i) = 0, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (1)$$

где  $T(x_i)$  – кинетическая энергия  $i$ -го участка;  $\Pi(x_i)$  – потенциальная энергия этого участка;  $A(x_i)$  – работа внешних сил на этом участке.

Кинетическая энергия ленты транспортера и груза, равномерно распределенного на соответствующем участке между точками  $i$  и  $j$ , представлена выражением

$$T(\dot{x}_i, \dot{x}_j) = \frac{G_{ij} l_{ij}}{6g} (\dot{x}_i^2 + \dot{x}_i \dot{x}_j + \dot{x}_j^2). \quad (2)$$

Потенциальная энергия  $ij$  участка длиной  $l_{ij}$  складывается из энергии упругих деформаций и потенциальной энергии замкнутого контура ленты с распределенной массой

$$\Pi(x_i, x_j) = c_{ij} \frac{(x_i - x_j)^2}{2} + G_{ij} \frac{x_i + x_j}{2} \sin \beta, \quad (3)$$

где  $c_{ij}$  – жесткость участка;  $\beta$  – угол наклона конвейера к горизонту, в нашем случае  $\beta=0$ , поэтому  $\Pi(x_i, x_j) = c_{ij} \frac{(x_i - x_j)^2}{2}$ .

Введя обозначения  $\frac{G_1 l}{6g} = m_r$ ,  $\frac{G_n l}{6g} = m_n$ ,  $\frac{G_{np} l}{6g} = m_m$ , получим математическую модель ленты транспортера, представляющую собой систему из шести нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка:

1. 
$$m_z (2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_m (2\ddot{x}_1 + \ddot{x}_2) + m_{np} \ddot{x}_1 + C(2x_1 - x_2 - x_5) + \frac{1}{2} (G_2 l + G_n l_{np}) w \operatorname{sgn} \dot{x}_1 + \eta (2x_1 - x_2 - x_5) = \frac{M_{np}}{R_0} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{c1} - \dot{x}_1);$$
2. 
$$m_z (4\ddot{x}_2 + \ddot{x}_1 + \ddot{x}_3) + C(2x_2 - x_1 - x_3) + \frac{1}{16} (2x_3 + x_2 - 2x_4 - 4x_6) C_\kappa + G_2 l w \operatorname{sgn} \dot{x}_2 + \eta (2\dot{x}_2 - \dot{x}_3 - \dot{x}_1) \eta = 0;$$
3. 
$$m_z (4\ddot{x}_3 + \ddot{x}_2 + \ddot{x}_4) + C(2x_3 - x_1 - x_4) + \frac{1}{8} (2x_3 + x_2 - 2x_4 - 4x_6) C_\kappa + G_2 l w \operatorname{sgn} \dot{x}_3 + (\dot{x}_3 - \dot{x}_4) \eta + (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \eta = 0;$$
4. 
$$m_z (2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_3) + m_n (2\ddot{x}_4 + \ddot{x}_5) + C(2x_4 - x_3 - x_5) - \frac{1}{8} (2x_3 + x_2 - 2x_4 - 8x_6) C_\kappa + \frac{1}{2} (G_2 + G_n) l w \operatorname{sgn} \dot{x}_4 + \eta (2\dot{x}_4 - \dot{x}_3 - \dot{x}_5) = 0;$$
5. 
$$m_z (2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_4) + m_M (2\ddot{x}_5 + \ddot{x}_1) + C(2x_4 - x_3 - x_5) - \frac{1}{8} (2x_3 + x_2 - 2x_4 - 8x_6) C_\kappa + \frac{1}{2} G_n (l + l_{np}) w \operatorname{sgn} \dot{x}_5 + \eta (2\dot{x}_5 - \dot{x}_1 - \dot{x}_4) = 0;$$
6. 
$$\frac{G_{ny} l}{g} \ddot{x}_6 + G_{ny} - \frac{1}{8} (4x_3 + 2x_2 - 4x_4 - 8x_6) C_\kappa + G_{ny} f w \operatorname{sgn} \dot{x}_6 = 0.$$

Полученная математическая модель применяется для устройства сортировки круглого леса. Может быть использована при сортировке древесных стволов по породам. Система имеет возможность снизить погрешность отслеживания перемещения круглого леса в соответствующий бункер-накопитель; позволяет повысить точность формирования управляющих команд на сброс круглого леса в резервуары хранения за счет синхронизации движения информации о его перемещении относительно накопителей в устройстве управления сортировкой; обеспечивает возможность масштабирования движения информации о движении круглого леса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dong J. et al. Analysis and Test of Clamp Conveying Type Residual Film Recycling and Film Impurity Separation Mechanism // Processes. – Sep. 2022. – Vol. 10, no. 9. – P. 1816. – DOI: 10.3390/pr10091816.
2. Fight R.D., Pinjuv G.L., Daugherty P.J. Small-diameter wood processing in the southwestern United States: An economic case study and decision analysis tool // Forest Products Journal. – 2004. – Vol. 54, no. 5. – P. 85–89.
3. Achatz J., Lukovic M., Hilt S., Lädach T., Schubert M. Convolutional neural networks for quality and species sorting of roundwood with image and numerical data // Expert Systems with Applications. – Jul. 2024. – Vol. 246. – P. 123117. – DOI: 10.1016/j.eswa.2023.123117.
4. Kruglov V. Development of the rounded objects automatic detection method for the log deck volume measurement // First International Workshop on Pattern Recognition. – 2016. – Vol. 10011. – P. 1001104. – DOI: 10.1117/12.2242172.
5. Kruglov V. The Algorithm of the Roundwood Volume Measurement via Photogrammetry // 2016 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA). – Nov. 2016. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/DICTA.2016.7797088.
6. Medvedev S., Mokhiev A., Rjabova T. Improvement of timber industry logistics using information systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Mar. 2020. – Vol. 817, no. 1. – P. 012021. – DOI: 10.1088/1757-899X/817/1/012021
7. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). – December 2024. – Vol. 15, no. 4. – P. 2068–2079. ISSN: 2088-8694. – DOI: 10.11591/ijpeds.v15.i4.pp2068-2079

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

**А.В. Копьёв, О.А. Пичугова**

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
УралЭНИН, кафедра АЭС, группа ЭМ-230101*

Научный руководитель: А.О. Егоров, к.т.н., доцент АЭС, УралЭНИН, УрФУ

Задача определения состава высоковольтного коммутационного оборудования, установленного на распределительных устройствах (РУ) электрических станций и подстанций часто связана с управлением производственными активами, но в большей степени востребована при предпроектных обследованиях для формирования общих технических решений в области развития электроэнергетических систем. Как правило необходимые для этого данные являются закрытыми (схемы, паспорта, инструкции), либо срок запроса и получения таких данных может быть длительным. В отдельных случаях необходимые данные могут быть вовсе утрачены.

Установленные на площадках трансформаторы и высоковольтные выключатели на класс напряжения 110 кВ и выше являются основным силовым оборудованием электроэнергетических систем и из-за их высоких технологичности и стоимости представляют особую важность, т. к. определяют нормальное функционирование энергосистемы.

Также при решении проектных и эксплуатационных задач функционирования и развития энергосистем, доступ к технологической информации может быть вовсе закрыт и возникают обратные задачи, когда в условиях отсутствия данных, необходимо определить входные параметры энергообъекта, достаточные для принятия дальнейших решений. К таким параметрам относятся адрес, геометрия землеотвода, компоновка, количество и тип РУ, количество и

мощность силовых трансформаторов, количество и тип выключателей и т. д. Эта же задача в равной степени актуальна при составлении первичных (экспертных) карт-схем и электрических схем энергосистем. Для решения указанных задач хорошо подходят современные общедоступные интернет-сервисы Яндекс и Google Карты, в которых хранятся спутниковые и панорамные фотографии энергообъектов планеты [1].

Пример решения описанной задачи рассмотрен для системы внешнего электроснабжения г. Екатеринбург, функционирующей в составе региональной энергосистемы Свердловской области. В г. Екатеринбург с численностью населения ~1,5 млн человек, рассматриваются энергообъекты, имеющих в своём составе распределительные устройства 110, 220 и 500 кВ находящиеся в пределах кадастровых границ, выключатели 35 кВ и ниже не рассматриваются.

Основным источником данных о составе энергообъектов являются Схемы и программы развития региональных энергосистем, подготовленные Системным оператором (АО «СО ЕЭС»). Первичное изучение состава энергообъектов, находящихся в г.Екатеринбург по [2], показало, что в Екатеринбурге функционируют: 1 ПС 500 кВ, 4 ПС 220 кВ и более 70 ПС 110 кВ. Состав энергообъектов определён по [2, 3], проверка и подтверждение информации выполнены по [4, 5]. Далее по [6–7] выполнена актуализация состава информации. Так, по состоянию на 01.01.2024 внутри кадастровой границы г. Екатеринбурга функционируют:

- электростанции (7 шт.): Академическая ТЭЦ, Ново-Свердловская ТЭЦ, Свердловская ТЭЦ, ТЭЦ ВИЗа, ТЭЦ Завода РТИ, ТЭЦ ТМЗ, ТЭЦ-19;
- подстанции 500 кВ (1 шт.): 500/220/110 кВ Южная; ПС 220 кВ (3 шт): 220/110 кВ Искра, 220/110 кВ Калининская, 220/110 кВ Рябина; ПС 110 кВ – более 70 шт.

Также по [2, 8] установлено, что в Екатеринбурге находится 3 района электрических сетей (РЭС): Восточный, Северный и Юго-Западный. Использование [2] совместно с [3–8] позволило установить структуру состава энергообъектов по РЭСам, которая приведена в табл. 1.

Таблица 1. Структура состава энергообъектов по районам электрических сетей в г. Екатеринбург

№	Энергообъект	Ед. изм.	Количество в РЭС			Итого
			Юго-Западный	Северный	Восточный	
<b>1</b>	<b>Электростанции</b>	шт	4	2	1	<b>7+1*</b>
		МВт	334	60	557	<b>951</b>
<b>2</b>	<b>Подстанции</b>	шт	36	27	16	<b>79</b>
2.1	ПС 500 кВ	шт	1	–	–	<b>1</b>
2.2	ПС 220 кВ	шт	2	1	–	<b>3</b>
2.3	ПС 110 кВ	шт	33	26	16	<b>75</b>

\*Среднеуральская ГРЭС (1578,5 МВт) находится за пределами г. Екатеринбурга, но осуществляет внешнее электроснабжение городов Екатеринбург, Первоуральск, Пышма, Среднеуральск и др.

По итогам осмотра [3, 7] и уточнения данных по [4, 5] установлено, что на территории г. Екатеринбург функционируют 7 электростанций и 79 электрических подстанций классом напряжения 110–500 кВ, итого 86 энергообъектов классом напряжения 110 кВ и выше.

С точки зрения исследования состава и численности выключателей 110 кВ и выше, целесообразно вести поиск выключателей не на энергообъекте, а на его распределительном устройстве высшего напряжения (РУ, РУВН). При этом на каждом энергообъекте могут быть реализованы различные варианты компоновки и реализации РУ, которые не всегда является типовыми и требует отдельного рассмотрения, т. к. в составе энергообъекта с РУВН 500 кВ, могут также быть РУ 220 и 110 кВ одновременно или по отдельности. Также при осмотрах снимков установлено, что в составе каждого энергообъекта присутствует РУ 110 кВ. Структура состава РУ на энергообъектах г. Екатеринбурга, определённая по итогам осмотра спутниковых снимков и проверенная с использованием [9, 10], приведена в табл. 2.

Секция 5  
Электротехнические комплексы и системы

Таблица 2. Структура состава распределительных устройств по энергообъектам г. Екатеринбург

№	Распредустройство, класс напряжения	Ед. изм	Количество РУ в РЭС			Итого
			Юго-Западный	Северный	Восточный	
<b>1</b>	<b>На электростанциях</b>	шт	4	2	2	<b>8</b>
1.1	РУ 500 кВ	шт	–	–	–	–
1.2	РУ 220 кВ	шт	–	–	1	1
1.3	РУ 110 кВ	шт	4	2	1	7
<b>2</b>	<b>На подстанциях</b>	шт	40	28	16	<b>84</b>
2.1	РУ 500 кВ	шт	1	–	–	1
2.2	РУ 220 кВ	шт	2+1*	1	–	3+1*
2.3	РУ 110 кВ	шт	33+3**	26+1**	16	75+4**
<b>3</b>	<b>Итого РУ</b>	шт	44	30	18	<b>92</b>
3.1	РУ 500 кВ	шт	1	–	–	<b>1</b>
3.2	РУ 220 кВ	шт	3	1	1	<b>5</b>
3.3	РУ 110 кВ	шт	40	29	17	<b>86</b>

\*С учётом РУ 220 кВ на ПС 500 кВ; \*\*С учётом РУ 110 кВ на ПС 500 и 220 кВ

По итогам осмотра технологических площадок энергообъектов по спутниковым снимкам установлено, что по состоянию на 01.01.2024, на площадках 86-ти энергообъектов в эксплуатации находятся всего 92 РУ, в т. ч. 500 кВ – 1 РУ, 220 кВ – 5 РУ и 110 кВ – 86 РУ. В т. ч. из числа РУ 110 кВ, на ПС 110 кВ – 75 РУ, на ПС 220 кВ – 3 РУ 110 кВ, на ПС 500 кВ – 1 РУ 110 кВ и на электростанциях – ещё 7 РУ 110 кВ, итого 75+3+1+7= 86 РУ 110 кВ.

По технологическому исполнению РУ 110 кВ и выше может быть открытым или закрытым. При этом среди вариантов реализации РУ встречаются 5 комбинаций (вариантов):

1. Открытое РУ с установленным на своей площадке обычным оборудованием наружного исполнения. Открытые РУ являются наиболее распространёнными и хорошо идентифицируются на спутниковых снимках (Вариант ОРУ).

2. Открытое РУ с установленным на площадке КРУЭ наружного исполнения, выполненного РАСС-ячейками (КРУЭ наружной установки). Встречается редко (Вариант ОРУ-2).

3. Закрытое РУ, оснащено обычным оборудованием для наружной установки (Вариант ЗРУ).

4. Закрытое РУ, оснащено полноценным КРУЭ для закрытых РУ (Вариант КРУЭ).

5. Комбинированное (временное) РУ, установленные на платформе автопоезда (Вариант ВРУ).

При осмотре спутниковых снимков установлено, что РУ 500 и 220 кВ на энергообъектах в Екатеринбурге выполнены только открытыми, по варианту ОРУ. Но для ПС 110 кВ встречаются все описанные 5 вариантов реализации РУ. При этом 1 ВРУ присутствует, но из работы выведено, припарковано вблизи ПС. Систематизированные результаты изучения состава РУ на энергообъектах г. Екатеринбург на предмет вариантов исполнения, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Структура РУ 110 кВ по типам в районах электрических сетей г.Екатеринбург

№	РЭС	Электростанции			Подстанции				
		Всего	ОРУ	КРУЭ	Всего	ОРУ	ОРУ2	ЗРУ	КРУЭ
1	Восточный	1	1	–	16	12	1	2	1
2	Северный	2	2	–	26+1	26	–	1	–
3	Юго-Западный	4	3	*1	33+3	29	–	4	3
	<b>Итого</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>*1</b>	<b>75+4</b>	<b>67</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>4</b>

\*На Академической ТЭЦ, введённой в 2015 г. построено КРУЭ 110 кВ.

По итогам исследований установлено, что в Екатеринбурге на 7-ми электростанциях и 79 ПС 110, 220 и 500 кВ, всего эксплуатируется 7+75+4=86 РУ 110 кВ, в т. ч. 6+67=73 РУ 110 кВ выполнены открытыми. Также на 7 ПС 110 кВ ЗРУ выполнены закрытыми с обычным

оборудованием наружной установки (идентифицированные ПС 110 кВ построены до 2000 г., когда КРУЭ в Екатеринбурге отсутствовали в эксплуатации). Также на 1-м ОРУ 110 кВ эксплуатируется КРУЭ 110 кВ наружного исполнения и ещё на 4-х ПС эксплуатируется КРУЭ.

Идентификация типов РУ и их компоновки позволяет далее перейти к задаче определения количества выключателей, установленных на площадках РУ. При этом целесообразно выделить любые варианты выключателей, установленных в КРУЭ от остальных вариантов РУ, т. к. оборудование КРУЭ всегда является уникальным и не унифицированным. Поэтому при дальнейшей возможной постановке задачи исследования парка выключателей 110 кВ, подсчёт выключателей, установленных в КРУЭ, должен вестись отдельно. Так, количество выключателей в варианте ОРУ2 (PASS-ячейки) однозначно можно посчитать по спутниковым снимкам с учётом [9, 10]. В варианте КРУЭ, установленном в ЗРУ ВН количество выключателей может быть оценено по принципу минимального количества подходящих ЛЭП на основе [3, 9]. Аналогичный принцип можно использовать в отношении ПС с ЗРУ 110 кВ. На всех остальных ПС 110 кВ и выше установлены унифицированные выключатели наружной установки.

Для возможности подтверждения данных о типах РУ, количестве и типе выключателей, установленных на РУ, а также для дальнейшей идентификации наименования выключателей энергообъекта, имеется возможность использования панорамных снимков, доступных в сервисах Яндекс или Google-карты. Пример таких фотоснимков приведён на рис. 1.



Рис. 1. Панорамные снимки технологических площадок ПС 110 кВ в Яндекс Карты:  
а – ПС 110 кВ Техноград; б – ПС 110 кВ Свердловская

На рис. 1, а приведена ПС 110 кВ с выполненным РУ 110 кВ по блочной схеме с 2-мя баковыми элегазовыми выключателями ВЭБ-110. На рисунке 1б на ОРУ ПС 110 кВ с двумя рабочими и обходной системами шин установлены 12 баковых масляных выключателей У-110. Очевидно, что для такого достаточно корректного определения типов выключателей по геометрии (внешнему виду), необходимо иметь панорамные фотоснимки РУ ПС в высоком разрешении. Также в такой задаче необходимо учесть все выключатели 110 кВ и выше, которые эксплуатируются в России. Такое исследование далее позволит разработать методологию, позволяющую однозначно идентифицировать выключатели на основе открытых данных по принципу баковый/колонковый, масляный/элегазовый, отечественный/зарубежный и т. д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров А.О., Николаев П.В., Поповцев В.В., Шендер С.Е. Идентификация энергообъектов на спутниковых снимках и инфографика для их визуализации. // Электроэнергетика глазами молодежи-2019. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 114-117.
2. Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2024-2029 годы. Обосновывающие материалы. Энергосистема Свердловской области. – 82 с.

Секция 5  
*Электротехнические комплексы и системы*

---

3. Карта-схема ЕЭС России. – URL: <https://frexosm.ru/power/#4/55/40> (дата обращения 10.11.24).
4. Яндекс-карты. – URL: <https://yandex.ru/maps/54/yekaterinburg/> (дата обращения 10.11.24).
5. Google-карты. – URL: <https://www.google.ru/maps> (дата обращения 10.11.24).
6. Карта центров питания. Портал ТП. – URL: [https://портал-тп.рф/platform/portal /tehprisEE\\_centry\\_pitania](https://портал-тп.рф/platform/portal /tehprisEE_centry_pitania) (дата обращения 11.11.24).
7. OpenStreetMap. Онлайн-карты. – URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=13/56.83292 /60.61466> (дата обращения 12.11.24).
8. АО «ЕЭСК». Россети Урал. Екатеринбург. – URL: <https://www.eesk.ru/> (дата обрац. 11.11.24).
9. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения. 2007. – 132 с.
10. Типовые материалы для проектирования 407-03-593.90. Компонировочные чертежи подстанций 110–500 кВ. Альбомы. СЕВЗАПЭнергосетьпроект от 03.06.91. 1991 – 44 с.

# Секция 6

## Энергосбережение и энергоэффективность

### СВЧ-ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИЙ ГАЗ: ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ДОБАВЛЕНИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

И. Калинич<sup>1</sup>, Р.Б. Табакаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Томский политехнический университет. ИЯТШ,*

<sup>2</sup> *Тюменский государственный университет. Х-БИО*

Научный руководитель: А.В. Мостовщиков, д.т.н., профессор, ОХИ ТПУ

В последние годы в связи с опасениями, связанными с загрязнением окружающей среды и растущим дефицитом энергии, особое внимание уделяется вопросу рационального использования природных ресурсов. Одним из наиболее актуальных материалов в рамках данной концепции является древесина. В первую очередь это связано с большими запасами древесины на территории России. По информации открытых источников площадь лесов России составляет 20–25 % от общемировых, при этом доля древесных отходов, образующихся в процессе лесозаготовки и деревообработки, в среднем составляет от 32 до 75 % от общего объема перерабатываемой древесины [1, 2]. Как правило, эти отходы накапливаются в отвалах без использования заложенного в них энергетического потенциала. Вследствие этого поиск путей переработки древесных отходов является актуальной задачей. Одним из возможных путей переработки таких отходов является термическое разложение с получением высококалорийных жидких [3] и газообразных продуктов [4].

Термическая СВЧ-переработка твердых органических топлив на сегодняшний день рассматривается как один из возможных путей преобразования отходов в полезные продукты. Несмотря на то, что данная технология находится на стадии разработки, выделяют ряд преимуществ нагрева материалов в электромагнитном поле СВЧ-диапазона. Зачастую к ним относят высокую удельную производительность и высокую энергетическую эффективность процесса [5]. Помимо этого, можно отметить экологичность процесса СВЧ-пиролиза, поскольку такой нагрев не требует специального нагревательного элемента, а само излучение распространяется в закрытых камерах, что позволяет минимизировать выброс вредных газов в атмосферу, снизить загрязнение нагреваемого материала и исключить образование вторичных отходов. Таким образом актуальным на сегодняшний день является расширение имеющихся знаний в области применения технологии и повышения эффективности СВЧ-пиролиза. В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза древесных опилок и их смесей с микроволновыми поглотителями в виде разноразмерных добавок на основе железа.

Экспериментальные результаты, представленные в данной работе, были получены на лабораторном стенде СВЧ-пиролиза (рис. 1), размещенном в НИЛ СВЧ-технологии ТПУ. Подробное описание данного стенда приведено в работе [6]. В качестве объекта исследования рассмотрены древесные отходы (сосновые опилки) (табл. 1), и их смеси с добавлением дисперсных металлических порошков на основе железа (доля добавок – 10 мас. %).

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исходного сырья

Сырье	Влажность, $W^a$ , %	Зольность на сухую массу, $A^d$ , %	Выход летучих веществ, $V^{daf}$ , %	Низшая теплота сгорания, $Q_i^r$ , МДж/кг	Элементный состав на сухую массу вещества, % мас.				
					$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$
Древесные опилки	7,2	0,9	83,6	17,1	51,9	6,1	0,1	0,0	41,9

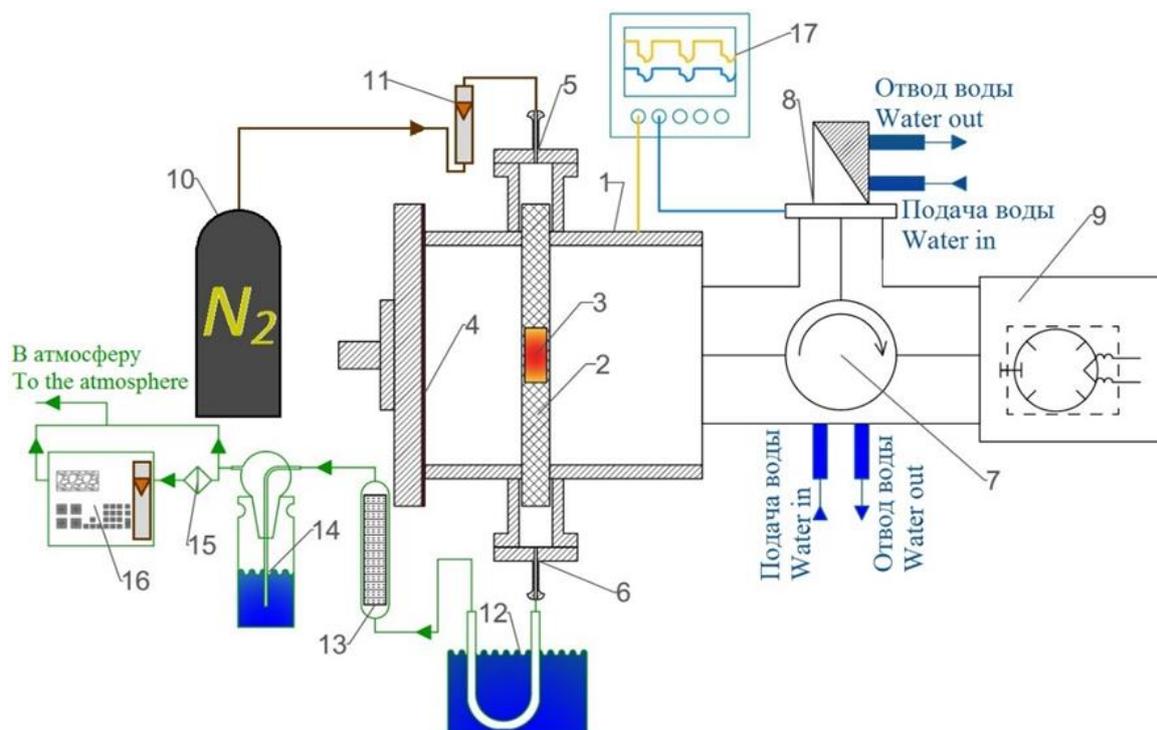


Рис. 1. Экспериментальный стенд СВЧ-пиролиза:

- 1 – реактор; 2 – кварцевая трубка; 3 – цилиндрический образец; 4 – подвижная мембрана с механизмом регулировки; 5 – штуцер подачи азота; 6 – штуцер отвода газа;
- 7 – микроволновый циркулятор; 8 – нагрузка; 9 – магнетронный СВЧ генератор;
- 10 – бак с азотом; 11 – ротаметр; 12 – теплообменник; 13 – стеклянный фильтр;
- 14 – гидравлический затвор; 15 – фильтр очистки пробы (PTFE, пористость 0,2 мкм);
- 16 – газоанализатор; 17 – осциллограф

Для проведения эксперимента выполнена подготовка проб. С целью исключения влияния влажности материала на результат пробы предварительно выдерживали до воздушно-сухого состояния. Далее выполняли измельчение до фракции менее 0,5 мм и прессовку в цилиндрические пеллеты с массой 3 г и диаметром 12 мм. Для проведения экспериментальных исследований возможности повышения эффективности за счет добавления микроволновых поглотителей на основе железа после измельчения материал смешивался с добавкой в количестве 10 % от общей массы образца. Полученные образцы помещали внутрь реактора в центр кварцевой трубки, что обеспечивало одинаковые условия для каждого эксперимента. Источником СВЧ-излучения являлся магнетронный генератор с частотой 2,45 ГГц и номинальной

мощностью 850 Вт. В результате взаимодействия исследуемого материала с электромагнитным излучением происходил нагрев образца, что приводило к термической деструкции вещества с выделением пирогенетической воды, газообразных продуктов и смол. Полученные летучие продукты удалялись из реактора через штуцер отвода газа за счет продувки азотом (расход 1 л/мин) и направлялись в систему очистки, где происходило осаждение паров смолопродуктов. Газообразные продукты поступали в газоанализатор Тест-1 (Бонэр, Россия) для определения состава генерируемого пиролизного газа. Исходя из компонентного состава согласно рекомендациям [7] рассчитывали теплоту сгорания газа. После извлечения из реактора твердый углеродистый остаток взвешивали для составления материального баланса. Для обеспечения сходимости результатов каждый эксперимент повторяли не менее 3 раз.

Результаты СВЧ-переработки исходных древесных опилок (рис. 2, табл. 2) показали, что в процессе пиролиза образуется 14,6 % твердого углеродистого остатка, остальная часть переходит в летучие продукты (газ и пары пирогенетической воды). Основными компонентами генерируемого при этом газа является метан (43,7 об. %) и монооксид углерода (36,8 об. %). Однако стоит отметить довольно высокую для пиролитической переработки долю водорода – 18,2 об. %.

Таблица 2. Времена иницирования процесса СВЧ-пиролиза в зависимости от перерабатываемого сырья

Материал добавки	Выход твердого остатка, %	Время инициации, с	Длительность, с	Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>
Без добавок	14,6	>600	144	22,3
Нанопорошок железа	15,9	63	81	17,6
Микropорошок железа	14,3	66	88	20,1
Микropорошок Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,5	56	91	15,3

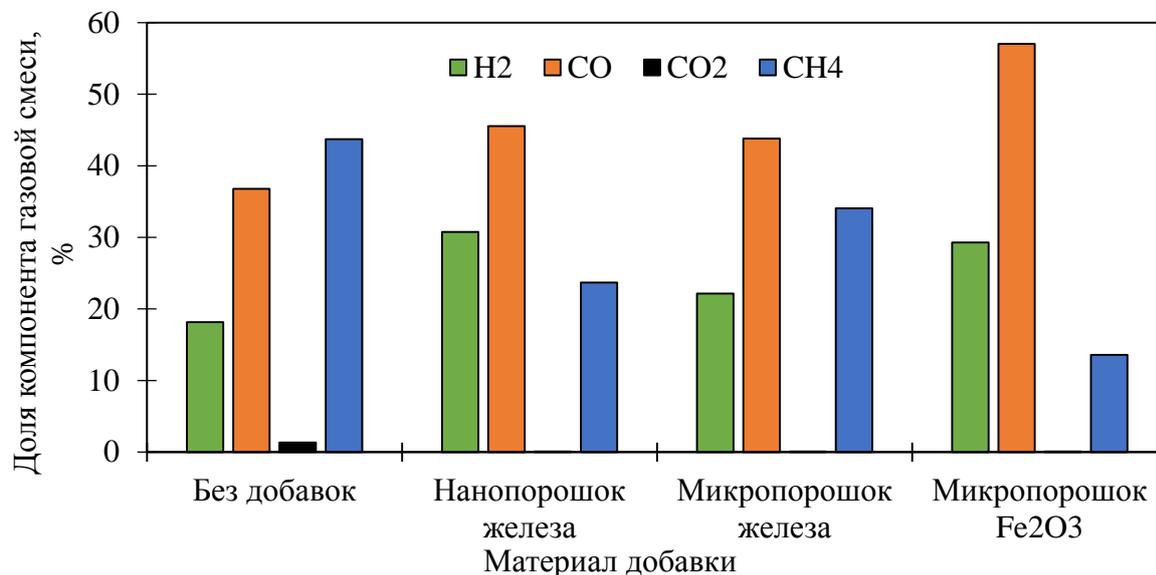
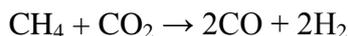
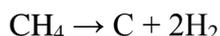


Рис. 2. Состав генерируемого газа, полученного в процессе СВЧ-пиролиза исходных опилок и при добавлении разноразмерных микроволновых поглотителей на основе железа

Использование добавок на основе железа (разноразмерные порошки железа и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), в количестве 10 % от общей массы образца позволило снизить время инициации процесса практически в 10 раз, при этом сократилась и длительность протекания процесса (в 1,6–1,7 раз). Временные показатели протекания процесса очень важны, поскольку в процессе СВЧ-пиролиза энергия затрачивается только на работу магнетрона, затраты энергии сокращаются пропор-

ционально общему времени осуществления процесса и, как следствие, возрастает эффективность переработки.

Наличие микроволновых поглотителей сказывается на составе генерируемого газа. Более интенсивный нагрев приводит к повышению доли водорода (на 4–13 %) и монооксида углерода (на 7–20 %), однако при этом доля метана снижается. Кроме того, практически полностью отсутствует диоксид углерода. Происходящие изменения можно объяснить ростом температуры процесса за счет более эффективного поглощения СВЧ-излучения, что приводит к протеканию реакций разложения метана и его взаимодействия с диоксидом углерода [8]:



Таким образом, можно прийти к выводу, что использование микроволновых поглотителей на основе железа в количестве 10 % от общей массы образца позволяет повысить эффективность процесса СВЧ-пиролиза, а также увеличить долю водорода в составе газообразных продуктов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект РНФ № 24-79-10113 «Разработка CO<sub>2</sub>-нейтральной технологии получения полифункциональных катализаторов на основе металлов с разной электроотрицательностью для СВЧ-пиролиза твердого органического сырья»).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесникова А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук. – 2013. – № 33. – С. 116–120.
2. Дитрих В.И., Андрияс А.А., Пережилин А.И., Корпачев В.П. Оценка объемов и возможные пути использования отходов лесозаготовок на примере Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. – 2010. – Т. 27. – № 3–4. – С. 346–351.
3. Тунцев Д.В., Хисматов Р.Г., Касимов А.М., Романчева И.С., Савельев А.С. Схема контактного пиролиза отходов лесозаготовки // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – № 2–3. – С. 146–149.
4. Тунцев Д.В., Сафин Р.Г., Касимов А.М., Хайруллина Э.К., Мусин Х.Г., Савельев А.С. Промышленная установка двух-этапной термической переработки отходов лесного комплекса // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 15. – С. 132–134.
5. Arpia A.A., Chen W.H., Lam S.S., Rousset P., de Luna M.D.G. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 403. – Art. no 126233. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126233>
6. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив / Р.Б. Табакаев, И.Д. Димитрюк, И.К. Калинич, А.В. Астафьев, А.В. Гиль, К.Т. Ибраева, П.Ю. Чумерин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 190–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789
7. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.
8. Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Разложение CO<sub>2</sub> в тлеющем разряде (аналитический обзор) // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10. – № 4. – С. 323. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-323-342

## ВЛИЯНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ БИОУГОЛЬНЫХ ГРАНУЛ

И.Д. Димитрюк<sup>1,2</sup>, К.Т. Ибраева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет

<sup>2</sup> Томский политехнический университет, ИШЭ, ТПТ, группа АЗ-44

Использование биоугля в энергетике становится все более важным в условиях глобальных изменений климата и ограниченности традиционных источников энергии. Биоуголь, получа-

емый из органических отходов растительной биомассы через процесс пиролиза, представляет устойчивую альтернативу традиционным топливам. Его преимущества заключаются не только в высокой теплотворной способности, которая составляет свыше 26,1 МДж/кг [1], но и в экологических аспектах, связанных с его получением и использованием.

Одним из основных факторов внедрения биоугля в энергетический сектор является его способность снижать выбросы углекислого газа. В отличие от сжигания, процесс которого приводит к быстрому возврату углерода в атмосферу, при этом использование биоуголь в качестве мелиоранта позволяет сохранить углерод в почве на протяжении сотен и тысяч лет, что способствует секвестрации углерода и представляет собой эффективный инструмент борьбы с изменением климата. Кроме того, свойства биоугля позволяют эффективно адсорбировать загрязняющие вещества, включая тяжелые металлы и органические соединения, что делает его полезным для очистки промышленных сточных вод и газов.

Прочность гранул является одним из ключевых параметров, определяющих их функциональность и устойчивость в различных условиях эксплуатации. Гранулирование биоугля представляет собой дополнительное преимущество, поскольку значительно улучшается транспортные характеристики и компактность хранения топлива. Тем самым снижая затраты на логистику. Более того, брикетирование позволяет добиться однородности топливной массы, что способствует стабильности характеристик сжигания и повышает общую эффективность использования биоугля как источника энергии.

Одним из важных параметров, оказывающих влияние на прочностные характеристики биоугольных гранул, является влажность смеси. На этапе гранулирования количество воды влияет на взаимодействие между частицами, а также на процессы связывания и уплотнения. Неправильный выбор доли влажности может привести к образованию слабых гранул, которые легко разрушаются при механических воздействиях или в процессе транспортировки и хранения. С другой стороны, чрезмерная влажность может препятствовать полимеризации связующего вещества, которое отвечает за прочность гранул.

Целью данной работы является исследование влияния влажности на прочность гранул из биоугля скорлупы кедрового ореха, а именно экспериментальные исследования, направленные на выявление оптимальных условий гранулирования, которые обеспечивают максимальную прочность гранул.

### **Методика исследования**

В качестве объектов исследования рассмотрены пробы скорлупы кедрового ореха (СКО) и крахмал. Согласно схеме (рис. 1), пробу СКО термически перерабатывали с помощью метода пиролиза при температуре 600 °С и после охлаждения измельчали до фракции 0,2–0,5 мм. Далее приготавливали смесь твердого углеродистого остатка с раствором связующего вещества (5 и 7 % в соотношении к углеродистому остатку) с различной влажностью – 10, 20, 30, 40, 50 %. Из полученной смеси формировали гранулы с дальнейшей сушкой при температуре 80 °С. Для оценки механической прочности полученных гранул проводили испытания на истирание согласно ГОСТ 34090.1-2017 «Биотопливо твердое. Определение механической прочности пеллет и брикетов».

В соответствии с описанной методикой (рис. 2), полученные биоугольные гранулы 2 взвешивали и помещали во вращающийся контейнер 1, который за счет привода 3 вращался и достигнув 500 оборотов останавливался. В процессе испытания происходило опрокидывание и перемещение гранул с истиранием. По истечению испытания содержимое контейнера высыпали и просеивали, при этом исключая частицы с размером менее 3,15 мм. Массу гранул измеряли на высокоточных весах с дискретностью 0,1 мг (ГОСМЕТР, Россия) до начала и после завершения испытания.

Обработку результатов осуществляли следующим образом:

$$DU^r = \frac{m_a}{m_0} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где  $m_a$  – масса образца после испытания и просеивания, г;  $m_0$  – масса образца до испытания (начальная масса), г.



Рис. 1. Схема получения биоугольных гранул

### Результаты и анализ

Характеристики углеродистого остатка SCO представлены в табл. 1. Можно отметить, что это биоуголь имеет низкое содержание золы ( $A^d=1,5\%$ ), высокую теплотворную способность ( $Q_i^r = 28,3$  МДж/кг) и значительное содержание углерода ( $C^{daf} = 89,3\%$ ) по сравнению с углеродными остатками различных видов растительной биомассы и близкие к каменному углю [1]. Эти параметры делают его перспективным сырьем для гранулирования конкурентоспособного топлива в энергетике, а также при рассмотрении в сельском хозяйстве.

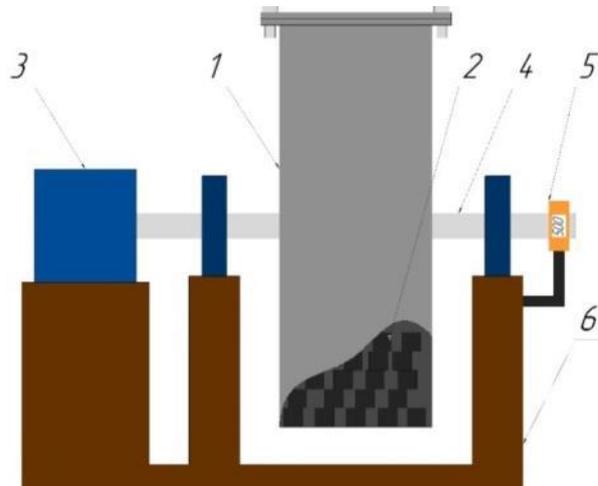


Рис. 2. Лабораторный стенд для проведения испытаний на механическую прочность гранул: 1 – вращающийся короб; 2 – гранулы; 3 – привод; 4 – вал; 5 – счетчик оборотов; 6 – рама

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав углеродистого остатка SCO

Характеристика	Значение
Зольность $A^d$ , %	1,5
Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , МДж/кг	28,3
$C^{daf}$	89,3
$H^{daf}$	2,7
$N^{daf}$	0,6
$S^{daf}$	0,0
$O^{daf}$	7,4

Анализ прочностных характеристик изготовленных гранул позволил сделать следующие выводы (рис. 3). Наблюдается, что с увеличением влажности для гранул с 5 % содержанием связующего механическая прочность возрастает до достижения 30 % влажности, после чего прочность начинает снижаться, при этом примечательно, что гранула не формируется при 50 % влажности. Для гранул с 7 % содержанием связующего наблюдается аналогичная тенденция, однако максимальный рост прочности фиксируется до 40 % влажности. Это связано с тем, что более высокое содержание связующего делает смесь гуще, что позволяет использовать более высокий уровень влажности для достижения большей прочности брикетов.

Кроме того, гранулы с 5 % содержанием связующего и влажностью в диапазоне от 20 до 40 %, а также гранулы с 7 % содержанием связующего и влажностью от 20 до 50 %, демонстрируют механическую прочность, соответствующую требованиям ( $\Delta U_r > 80\%$ ) для применения в качестве топлива для энергетических и коммунально-бытовых нужд [4].

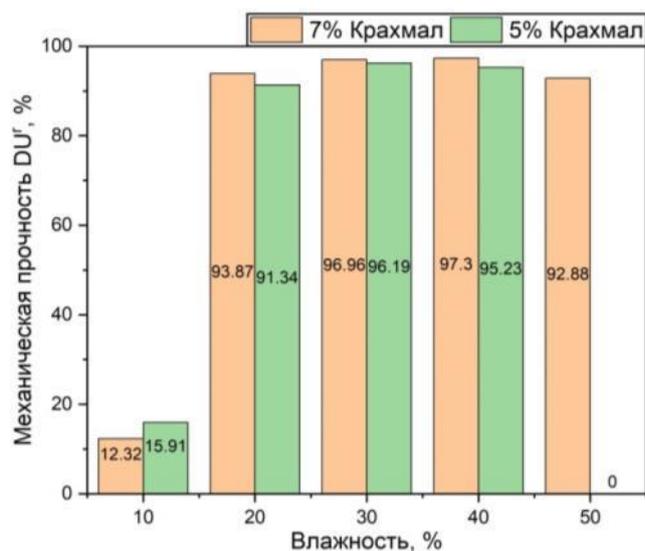


Рис. 3. Механические характеристики гранул

### Заключение

Биоуголь из скорлупы кедрового ореха и связующее в виде крахмала могут быть использованы для производства прочных биоугольных гранул. Исследования показали, что влажность смеси для формования гранул существенно влияет на механическую прочность этих гранул. Например, оптимальные условия влажности способствуют улучшению прочности, что позволяет получить гранулированное топливо, соответствующее требованиям для использования в различных целях. Установлено, что недостаток влаги приводит к образованию хрупких гранул, а избыток влаги может негативно сказаться на формировании гранул.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 23-79-01296.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Comparative analysis of conventional and microwave pyrolysis of raw materials with different degree of metamorphism / K. Ibraeva, A. Astafev, I. Dimitryuk, R. Tabakaev, I. Kalinich, I. Shanenkov // Energy conversion and management. – 2024. – V. 301. – P. 118067.
2. Influence of biochar amendment obtained from organic wastes typical for Western Siberia on morphometric characteristics of plants and soil properties / K. Ponomarev, A. Pervushina, K. Korotaeva et al. // Biomass Conv. Bioref. – 2023. – V. 14. – P. 28849–28860.
3. Биоуголь продукт быстрого пиролиза // ЭЛП Групп. – URL: <https://energolesprom.ru/poleznye-stati/biougol/> (дата обращения 05.11.2024).
4. ГОСТ 57016–2016. Брикеты каменноугольные для энергетических и коммунально-бытовых нужд. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 7 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГОРЮЧИХ ДОБАВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ КЕРОСИНА

А.С. Зайцева

*Томский политехнический университет, ИШЭ, группа 5Б23*

Научный руководитель: К.К. Паушкина, инженер-исследователь ИШФВП

### Введение

Керосин ТС-1 – жидкое топливо, которое используется в авиации благодаря своим уникальным свойствам. Широкое применение керосина ТС-1 в современной авиации обеспечивает надежную работу двигателей, так как данное топливо обладает низкой температурой замерзания, высокой энергетической плотностью, стабильными физико-химическими характеристиками [1], что делает его идеальным топливом для реактивных двигателей. Несмотря на то, что ТС-1 является высококачественным топливом, он всё же имеет ряд проблем, которые могут затруднять его использование. Одна из главных – негативное влияние на окружающую среду. Сжигание керосина приводит к выбросам парниковых газов, включая углекислый газ и метан, способствующих глобальному потеплению [1]. Другая существенная проблема связана с изменением свойств керосина под воздействием высоких температур, что влияет на работу двигателей. Кроме того, воздействие факторов внешней среды на топливо увеличивает риск его окисления и уменьшает длительность хранения. Для решения проблемы использования чистого керосина, необходимо исследовать изменения его характеристик при применении различных добавок.

В ходе изучения данной темы, было проанализировано несколько научных статей, посвященных возможности использования керосина ТС-1 с различными добавками при низких температурах [2] и влиянию влажности на качество реактивного топлива [3]. В литературе рассматривается влияние условий хранения на стабильность топлива, поэтому можно сделать вывод, что в рамках рассмотренной тематики нет достоверных данных о влиянии горючих добавок на механизмы и характеристики горения авиационного керосина ТС-1. В работе будут рассмотрены основные аспекты, связанные с введением в керосин различных горючих добавок, которые могут влиять на характеристики его выгорания.

Целью работы является экспериментальное определение характеристик выгорания капель составов на основе керосина ТС-1 с различными горючими добавками в условиях нагрева в муфельной печи.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи: приготовить составы на основе керосина ТС-1 с различными горючими добавками; провести эксперименты по зажиганию и горению составов в условиях лучистого нагрева и избытка кислорода на примере одиночных капель; обработать полученные данные, проанализировать результаты; сформулировать выводы по проделанной работе.

### Методика проведения исследования

Исследования проводились в рамках хорошо апробированной методики [4] на экспериментальном стенде (рис. 1). Стенд состоит из перчаточного бокса, в котором создаются необходимые условия для проведения экспериментов. Бокс содержит следующее оборудование: газоанализатор, который контролирует содержание кислорода; муфельную печь, которая моделирует условия нагрева в камере сгорания ( $T_g=800$  °С); координатный механизм для введения капли в муфельную печь; высокоскоростная видеокамера для регистрации параметров горения капли топлива; ПК с программным обеспечением для управления основным оборудованием и регистрации параметров горения.

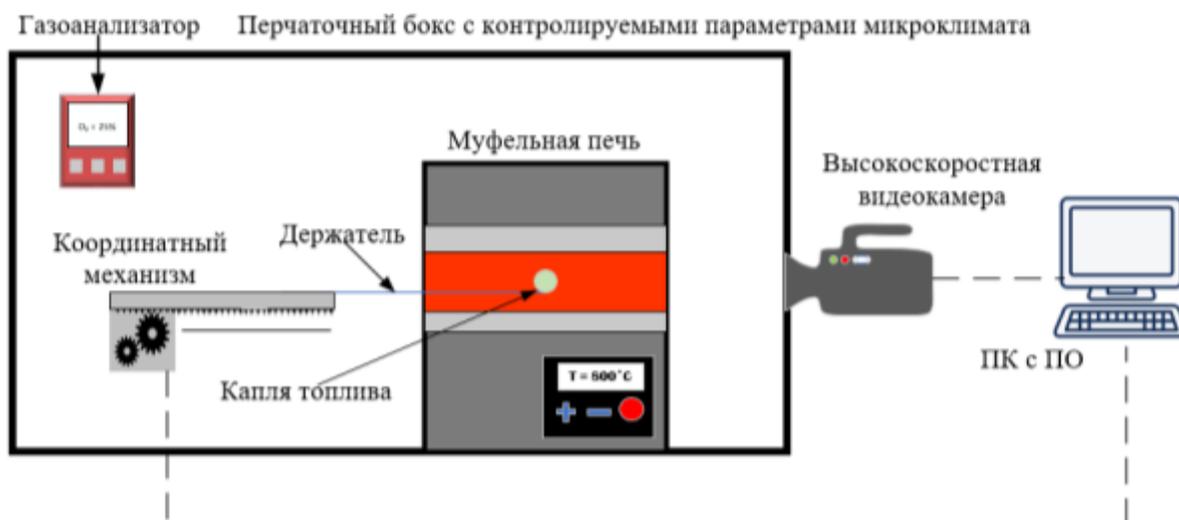


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Приготовление топливных составов осуществлялось с применением группы дополнительных (горючих) компонентов: изобутиловый спирт (массовая доля основного вещества не менее 99,5 %, CAS: 78-33-1), далее – спирт; ацетилдиметиламин (массовая доля основного вещества не менее 99,8 %, CAS: 127-19-5), далее – полимер; о-карборан (CAS: 16872-09-6), далее – борсодержащая добавка; Span 80 (CAS: 1338-43-8), далее – ПАВ.

Топливные составы на основе керосина ТС-1, представленные в табл. 1, получали путем смешивания в ультразвуковой ванне (ПСБ-Галс, Россия) мощностью 150 Вт с частотой 35 кГц в течение 1 ч. В процессе гомогенизации температура ультразвуковой ванны не превышала 50 °С. Для приготовления топливных составов использовались закрытые емкости и аналитические весы ViBRA HT 84RCE 2 (Vibra, Япония) с дискретностью 0,00001 г.

Таблица 1. Составы, участвующие в экспериментальном исследовании

№	Состав
1	Керосин ТС-1 100 %
2	Керосин ТС-1 95 % + борсодержащая добавка 5 %
3	Керосин ТС-1 95 % + полимер 5 %
4	Керосин ТС-1 95 % + изобутиловый спирт 5 %

Для проведения эксперимента в рабочей камере перчаточного бокса поддерживалась концентрация кислорода 25 %. Далее муфельная печь нагревалась до температуры равной 800 °С. С помощью высокоточного электронного одноканального дозатора, капля объемом 5 мкл помещалась на держатель, который в свою очередь на координатном механизме вводился в предварительно разогретую муфельную печь.

Проведена серия из 5 экспериментов, по результатам которых регистрировалась группа характеристик для каждого топливного состава: время задержки зажигания; время выгорания; площадь выгорания. Обработка полученных видеозаписей проводилась в программном обеспечении «ТЕМА Automotive». Алгоритм обработки видеозаписи измерял значения оттенков серого (от 0 до 255 – от черного до белого соответственно) покaдрово, в каждой точке (пикселе) области видеорегистрации. На видео покaдрово отслеживалась область горения топлива, далее количество пикселей в отслеживаемой области автоматически пересчитывалась в значение площади, используя масштабный коэффициент.

## Результаты

На рис. 2 приведены видеogramмы зажигания и горения одиночных капель, рассматриваемых в работе жидких топлив (табл. 1) в высокотемпературной неподвижной среде при 800 °С в муфельной печи при концентрации кислорода 25 %.

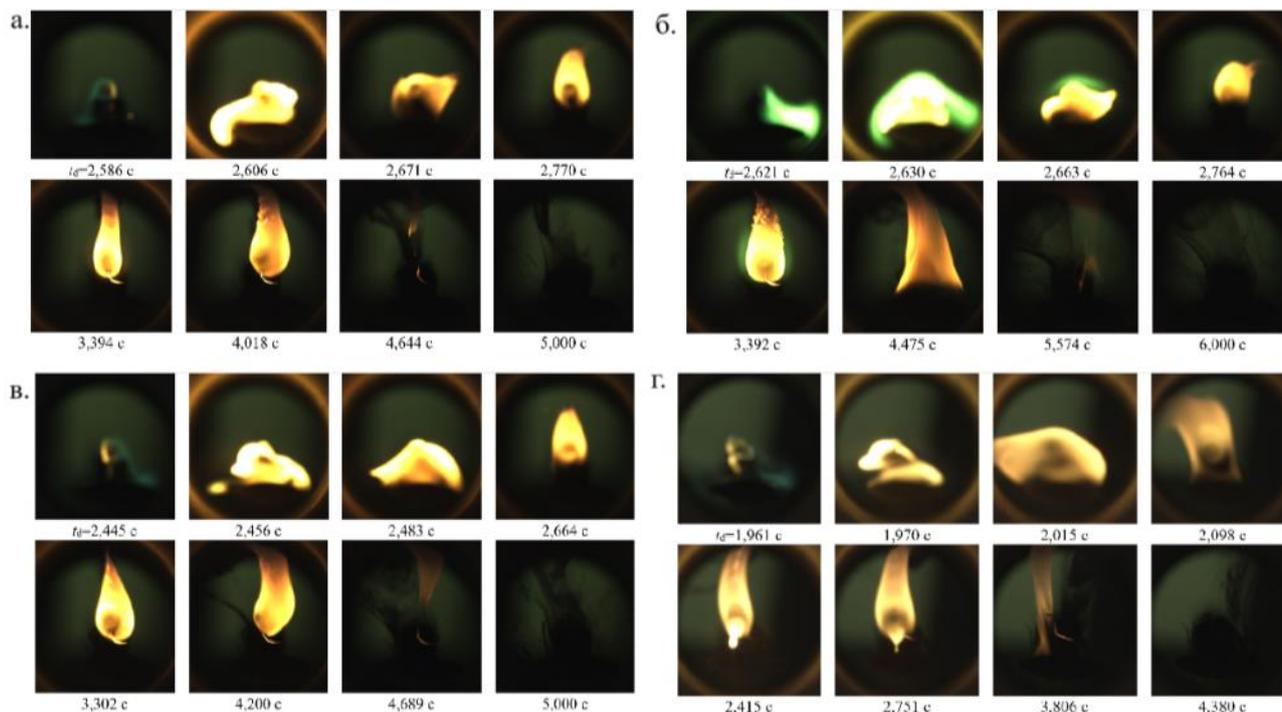


Рис. 2. кадры зажигания и горения капли топлива:  
а – керосин ТС-1 100 %; б – керосин ТС-1 100 % + борсодержащая добавка 5 %;  
в – керосин ТС-1 100 % + спирт 5 %; г – керосин ТС-1 100 % + полимер 5 %

Выгорание капли керосина ТС-1 без добавок происходит монотонно (рис. 2, а). При добавлении 5 % борсодержащей добавки к ТС-1 цвет пламени приобретает зеленый оттенок (рис. 2, б). Добавление 5 % изобутилового спирта к керосину не вносит существенных изменений в механизмы зажигания и горения капли топлива (рис. 2, в). При горении капли топлива, содержащей ТС-1 и горючий полимер, происходит процесс паффинга (рис. 2, г) за счет возникновения разности температур на границе раздела двух жидкостей. Стоит отметить, что при выгорании топлив в полости муфельной печи образуется сажа (рис. 2).

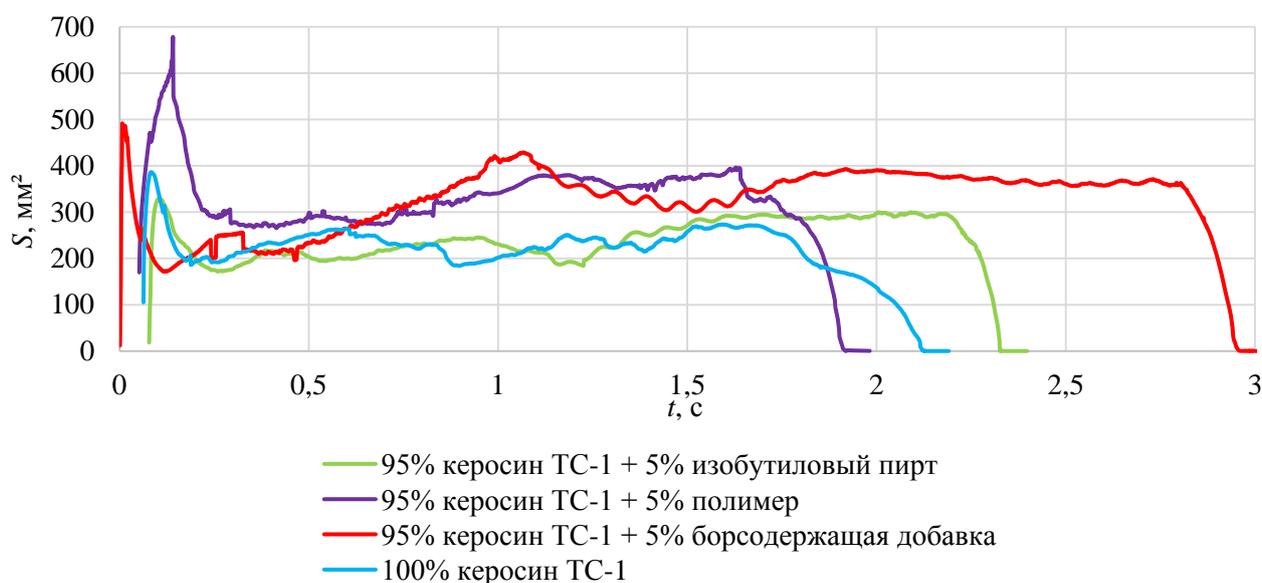


Рис. 3. Зависимость площади области выгорания капель исследованных топливных составов от времени

На рис. 3 изображен график изменения площади выгорания от времени. С его помощью можно провести анализ, как исследуемые добавки влияют на длительность горения и размер области выгорания одиночной капли топлива по сравнению с керосином ТС-1 без дополнительных компонентов.

Длительность горения: добавка 5 % изобутилового спирта к керосину ТС-1 увеличивает длительность горения на 18,8 %; борсодержащая добавка – на 49,2 %; горючий полимер уменьшает на 1,8 %.

Площадь выгорания составов: борсодержащая добавка к керосину ТС-1 увеличила площадь выгорания на 49,5 %; горючий полимер – на 48,9 %; изобутиловый спирт – на 9,5 %. Все добавки показали увеличение средней площади области выгорания по сравнению с исходным керосином без добавок. Наибольшего относительного увеличения площади удалось добиться при добавлении борсодержащей добавки и добавки горючего полимера.

### **Заключение**

Экспериментально определены характеристики выгорания капель составов на основе керосина ТС-1 с различными горючими добавками в условиях нагрева в муфельной печи. Использование ряда горючих добавок значительно влияет на характеристики выгорания керосина ТС-1. В зависимости от типа использованной добавки была отмечена интенсификация процессов выгорания керосина ТС-1. Борсодержащая добавка к керосину ТС-1 увеличивает площадь выгорания капли топлива на 49,5 %. Добавка горючего полимера демонстрирует значительное увеличение площади выгорания (на 48,9 %) и уменьшение длительности горения (на 1,8 %) одиночной капли топлива. Добавка изобутилового спирта в сравнении с борсодержащей добавкой и добавкой горючего полимера улучшает энергетические характеристики топлива (площадь выгорания и длительность горения) незначительно.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Попов М.В. Путь авиационного керосина до самолета // Молодой ученый. – 2021. – Т. 374. – № 32. – С. 10–12.
2. Арчакова Р.Д., Ужахова Л.Я., Китиева Л.И. Влияние влажности на качество реактивного топлива // Endless light in science. – 2022. – № 3. – С. 120–124.
3. Лозинский Е.Н., Лозинский Н.С. Об улучшении низкотемпературных свойств топлива дизельного топливом ТС-1, бензином или коммерческими депрессорно-диспергирующими присадками // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – № 3. – С. 64–71.
4. Глушков Д.О., Паушкина К.К., Плешко А.О., Яновский В.А. Воспламенение и горение частиц гелевого топлива с металлическими и неметаллическими добавками // Acta Astronautica. – 2023 – Т. 202. – С. 637–652.

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ МАЛЫХ И СРЕДНИХ ГОРОДОВ**

**Е.М. Иванова**

*Новосибирский государственный технический университет, ФЭН, каф. АЭЭС*

Научный руководитель: Ф.Л. Бык, к.т.н., доцент, каф. АЭЭС НГТУ

### **Введение**

По данным Росстат в 2024 году в России насчитывается 1119 муниципальных образований со статусом города, из них 72 и 13 % относятся к малым и средним городам (МСГ), где проживает четверть населения страны. При этом уровень жизни в МСГ значительно уступает уровню в крупных и крупнейших городах. Во многом это обуславливается недостатками

энергетической инфраструктуры МСГ, где доминирует раздельное производство энергии и существует высокий износ основных фондов, обуславливающий сверхнормативные потери энергии и низкую бесперебойность энергоснабжения. Особенно, указанные проблемы проявляются в системе централизованного теплоснабжения, где из-за коммунальных аварий наблюдаются частые прерывания отопления и горячего водоснабжения.

В МСГ электроснабжение внешнее, а основными источниками тепловой энергии часто являются промышленно-отопительные котельные, которые создавались для производства пара и характеризуются низкой эффективностью при использовании в качестве отопительных. Отсутствие теплофикации в МСГ обусловлено низкой концентрацией тепловой и электрической нагрузки, необходимой для обоснования ТЭЦ на основе паросиловых и парогазовых технологий.

Процесс повышения роли теплофикации соответствует технической политике, принятой для крупнейших, крупных и больших городов, где основными источниками тепловой энергии коммунального назначения являются ТЭЦ, что и придает этим городам преимущества в сфере надежности и экономической доступности коммунальных услуг. В табл. 1 приведены характеристики некоторых МСГ. Выявлено, что тарифы на энергию в МСГ зачастую превышают тарифы в крупных и больших городах с ТЭЦ (рис. 1).

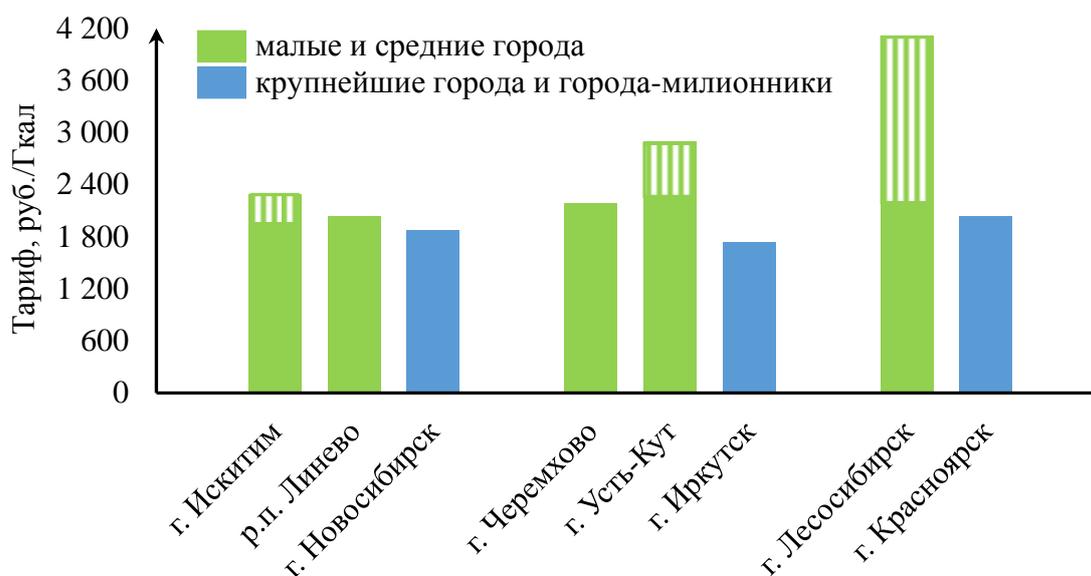


Рис. 1. Тарифы на тепло в различных городах Сибири

Отсутствие ощутимых преимуществ у МСГ ведет к оттоку населения и снижению деловой активности. Возникает задача повышения энергоэффективности и энергосбережения в энергетической инфраструктуре малых и средних городов с применением инновационных технических средств, что одновременно обеспечит повышение технической надежности и экономической доступности энергоснабжения.

## Результаты

Обычно для повышения энергоэффективности производства энергии применяется генерация, использующая возобновляемые источники энергии и современные когенерационные технологии [1–3]. Направление развития энергетической инфраструктуры определяется ресурсной достаточностью, экономической доступностью и технологической допустимостью. В России достигнутый уровень газификации, отечественное производство и поставки когенерационных установок из дружественных стран и срок окупаемости мини-ТЭЦ менее

5 лет – указывают на высокий потенциал перехода на малую когенерацию в малых и средних городах, где приоритет имеют газопоршневые установки (ГПУ) [4].

Экономическая эффективность когенерации определяется ее двойственной ролью как источника двух видов энергии – тепла и электричества. Топливная эффективность производства энергии на ГПУ зависит от объема полезного отпуска тепловой энергии в систему централизованного теплоснабжения (СЦТ). При отсутствии отпуска тепла в СЦТ коэффициент полезного использования топлива (КПИТ) снижается более, чем в 2 раза. Поэтому для повышения эффективности ГПУ целесообразно обратить внимание на вопросы повышения тепловой нагрузки в межотопительный период [2]. Обычно в этот период тепловая нагрузка на отопление и горячее водоснабжение снижается, но возрастает спрос на кондиционирование и вентиляцию, что формирует дополнительный спрос на тепло при использовании холодильных машин [5] (рис. 2).

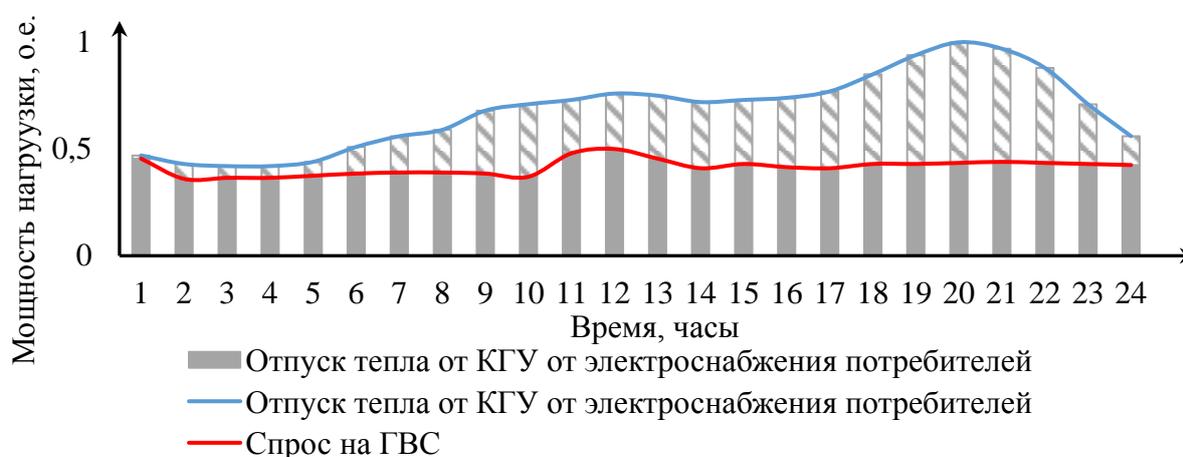


Рис. 2. Суточный график спроса на тепловую энергию в межотопительный период

Сочетание системы накопления тепловой энергии (СНТЭ) и ГПУ позволит согласовать спрос и отпуск тепла от когенерации, работающей по электрическому графику нагрузки, за счет переноса энергии во времени. Благодаря СНТЭ снижается необходимость установки котельного оборудования на мини-ТЭЦ для компенсации неравномерности выработки тепла на ГПУ.

Следует также отметить, что необходимость включения котельных на углеводородном топливе в СЦТ обусловлена превышением спроса на тепловую мощность над электрической в период минимальных температур. Однако наличие источника недорогой электроэнергии создает предпосылки для использования в СЦТ электрических котельных и бойлеров. Их роль сводится к покрытию пиковых нагрузок и выполнению резервных функций в системе теплоснабжения. С появлением в малых и средних городах современных когенерационных технологий малой мощности станет возможным отказаться от технической политики, направленной на расширение «котельнизации».

### Обсуждение

Сочетание мини-ТЭЦ с различными инновационными техническими средствами позволит не только максимизировать энергоэффективность производства энергии, но и повысить надежность и экономичность теплоснабжения в сочетании с получаемыми экологическими эффектами. В мировой практике системы централизованного теплоснабжения принято делить на поколения, отличающиеся уровнем энергоэффективности и энергосбережения. Во многих странах основное внимание в системах централизованного теплоснабжения уделяет-

ся снижению температуры теплоносителя в подающем трубопроводе как минимум до 70 °С, что указывает на переход с третьего на четвертое поколение систем централизованного теплоснабжения [6].

Отличительной особенностью современных СЦТ является отказ от качественного регулирования отпуска теплоносителя на источнике [7] в сторону качественного регулирования теплоносителя на стороне потребителей. Для этого они оснащаются тепловыми насосами, электрокотлами и чиллерами. Распределение качественного регулирования позволяет обеспечить увеличение долговечности теплопроводов, повышение бесперебойности теплоснабжения и снижение затрат электроэнергии на транспорт теплоносителя за счет обеспечения «облегченного» режима работы тепловой сети.

В России с учетом технологической допустимости, квалификации персонала и климатических условий приоритет следует отдавать установке электрокотлов в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП) жилых и общественных зданий. Электрокотел обеспечит подогрев теплоносителя до требуемых параметров, что, по существу, позволит обеспечить управление спросом. Оснащение ИТП активным элементом и системой автоматического управления позволяет говорить о его трансформации в активный индивидуальный тепловой пункт [8]. Активный ИТП обеспечивает количественное и качественное регулирование теплоснабжения у потребителя. Реконструкция ИТП в активный расширяет количество выполняемых индивидуальным тепловым пунктом функций, а возможность автономной работы повышает бесперебойность теплоснабжения потребителей. Таким образом, СЦТ дополняется преимуществами систем индивидуального теплоснабжения, но критическим фактором является техническая и экономическая доступность электроэнергии.

Помимо активного ИТП одним из технических средств для распределения качественного регулирования являются тепловые накопители, выполняющие функции теплового регулятора. Включение в состав СЦТ регулятора тепловой нагрузки обеспечит уплотнение режима работы источника, что позволит снизить долю пиковых котлов в структуре тепловых источников и сформировать облегченный режим работы квартальных и магистральных тепловых сетей, за счет распределения качественного регулирования отпуска тепла и переход на пониженный температурный график.

### **Выводы**

Низкая эффективность энергетической инфраструктуры малых и средних городов (МСГ), вызванная раздельным производством энергии и высоким износом основных фондов, обуславливает их экономическую и социальную стагнацию. В этих муниципальных образованиях наблюдаются сверхнормативные потери электрической и тепловой энергии, низкая надежность и экономичность тепло- и электроснабжения. Для повышения энергоэффективности производства энергии в МСГ целесообразно включение в состав энергетической инфраструктуры мини-ТЭЦ с газопоршневыми установками.

Наличие когенерационных источников позволяет получить дополнительную электрическую энергию и использовать ее для повышения бесперебойности и доступности теплоснабжения за счет включения в состав системы централизованного теплоснабжения инновационных технических средств и осуществить переход на третье поколение систем централизованного теплоснабжения.

Приоритетным является создание тепловых регуляторов в непосредственной близости от центральных тепловых пунктов и трансформация индивидуальных тепловых пунктов в жилых, общественных, административных и прочих зданиях в активные индивидуальные тепловые пункты. Указанное позволит обеспечить распределенное качественное регулирование теплоносителя и снизить влияние температуры окружающей среды на режим работы источника.

В малых и средних городах, где техническое состояние объектов системы теплоснабжения находится в критическом состоянии модернизация ИТП с последующей трансформацией в активный ИТП позволит снизить существующую социальную напряженность, обусловленную прерываниями отопления и ГВС, что становится возможным с появлением когенерации.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20057, <https://rscf.ru/project/24-29-20057/> и гранта № р-75 Правительства Новосибирской области.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The energy transition between desideratum and challenge: are cogeneration and trigeneration the best solution? / A. Neacşa, M. Panait, J.D. Mureşan, M.C. Voica, O. Manta // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – Т. 19. – № 5. – С. 3039.
2. Approach to modernizing residential-dominated district heating systems to enhance their flexibility, energy efficiency, and environmental friendliness / E. Boyko, F. Byk, P. Ilyushin, L. Myshkina, S. Filippov // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – № 22. – С. 12133.
3. Rasoulinezhad E., Taghizadeh-Hesary F. Role of green finance in improving energy efficiency and renewable energy development // Energy Efficiency. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 14.
4. Илюшин П.В. Обеспечение надежного электроснабжения электроприемников потребителей от собственной распределенной генерации: проблемные вопросы и способы их решения // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26, № 4 (165). – С. 640–656. – URL: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-640-656>.
5. Ganesh N.S., Omprakash M. Comprehensive review on cogeneration systems for low and medium temperature heat recoveries // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2022. – Т. 44. – № 3. – С. 6404–6432.
6. Method for assessing heat loss in a district heating network with a focus on the state of insulation and actual demand for useful energy / S. Chicherin, V. Mašatin, A. Siirde, A. Volkova // Energies. – 2020. – Т. 13. – № 17. – С. 4505.
7. Hydrothermal challenges in low-temperature networks with distributed heat pumps / T. Sommer et al. // Energy. – 2022. – Т. 257. – С. 124527.
8. Бойко Е.Е., Мышкина Л.С. Активный тепловой пункт как средство повышения надежности системы теплоснабжения // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 75 Надежность систем энергетики: устойчивое развитие и функционирование. Отв. ред. академик РАН В.А. Стенников. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2024. – 876 с.

## ВЛИЯНИЕ МАЙНИНГА НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И НАДЕЖНОСТЬ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**К.С. Кузьмина**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5AM23*

Научный руководитель: Г.Н. Климова, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Объектом исследования при написании работы послужил потребитель со специфической нелинейной и несинусоидальной нагрузкой – майнинг.

Предметом исследования работы стала специфическая нелинейная и несинусоидальная нагрузка потребителя и ее влияние на надежность электроснабжения потребителя, показатели качества электрической энергии, фактическую загрузку оборудования и структуру потерь активной мощности нем.

Новизна исследования: оценка мощности искажения, оценка величины полной мощности, выявление структуры дополнительных потерь для оборудования схемы электроснабжения майнинга.

В работе представлены однолинейная схема электроснабжения предприятия, замеры показателей качества электрической энергии, полученные в результате энергетического обследования (график напряжения, график тока, график активной, реактивной, полной мощности,

график гармоник по напряжению и току, график коэффициента гармонического искажения по напряжению и току, график формы коэффициента искажений).

Анализируя суточный график нагрузок и расчетные коэффициенты графика нагрузки, можно сказать, что он равномерный и не имеет пиков. Для полученного графика определены: максимальные и минимальные значения активной, реактивной и полной мощностей, число часов использования максимальной нагрузки и число часов максимальных потерь энергии, а также расчетные коэффициенты графика. По характерным суточным графикам нагрузки определено, что фаза В по активной, реактивной и как следствие по полной мощности загружена больше, чем фазы А и С, отсюда можно говорить о несущественной неравномерности загрузки фаз.

Рассчитаны показатели качества электроэнергии и проведена оценка их влияния на надежность схемы электроснабжения и потери в ней. Отклонение напряжения в течение дня находятся в пределах от 0,026 до 4,356 %, что соответствует ГОСТ 32144-2013. При оценке неравномерности распределения нагрузки по фазам установлено, что загрузка В фазы отличается от А и С примерно в 1,2 раза, А и С фаза загружены примерно одинаково. Нормально и предельно допускаемые значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения, значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения не выходят за пределы допустимых (ГОСТ 32144–2013). Провели расчет дополнительных потерь мощности от несинусоидальности в элементах схемы электроснабжения, получили суммарное годовое значение потерь ЭЭ трех фаз равное 10 818 кВт·ч, что составляет 0,85 % от годового потребления ЭЭ. За одни сутки коэффициент нелинейных искажений максимально достигает значения 11,5 %.

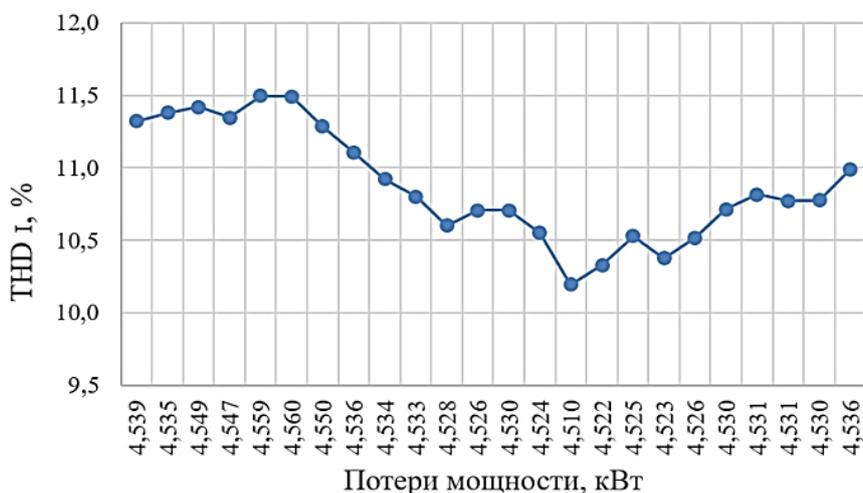


Рис. 1. График зависимости потерь мощности от коэффициента нелинейных искажений по току

В гармоническом спектре преобладают гармоники нулевой последовательности, а также гармоники обратной последовательности по отношению к основной частоте, прослеживается несимметрия токов нагрузки фаз, которая приводит к появлению скрытого тока в нейтрали и к скрытым потерям мощности и электрической энергии.

Построен параллелепипед мощности в сетях с высшими гармониками, генерируемыми нелинейной нагрузкой в соответствии со стандартом IEEE 1459 о балансе мощности в силовых сетях.

По результатам расчета потерь симметричного, несимметричного и несинусоидального режима нагрузки построена диаграмма потерь активной мощности в процентном соотношении.

Проведена замена автоматического выключателя, трансформатора тока, сечения кабельной линии.

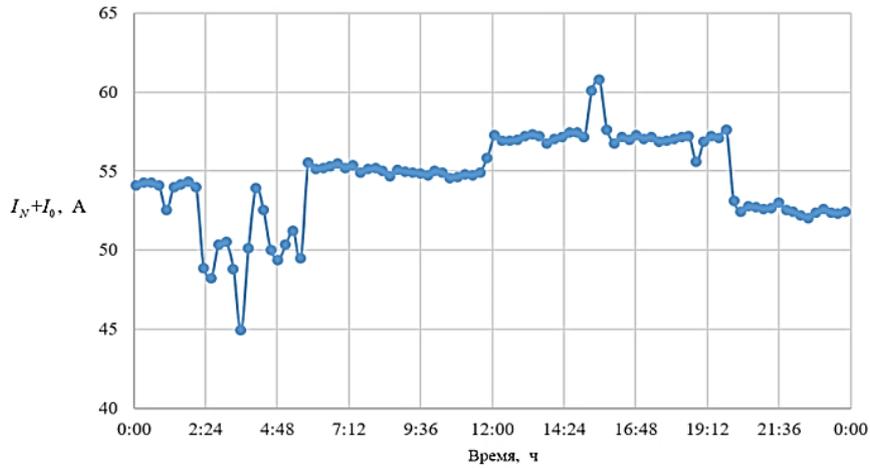


Рис. 2. Суточный график тока нейтрали с учетом гармоник нулевой последовательности по фазам А, В, С



Рис. 3. Параллелепипед мощности в сетях с высшими гармониками, генерируемыми нелинейной нагрузкой

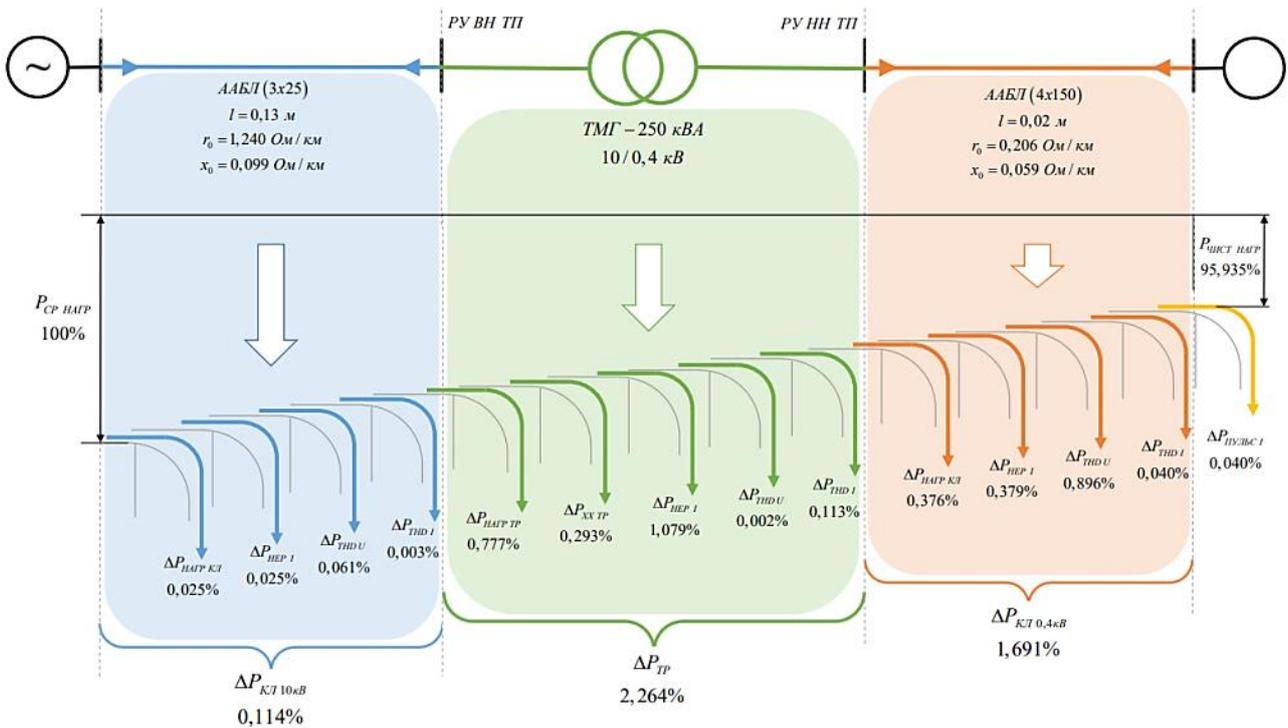


Рис. 4. Диаграмма потерь активной мощности

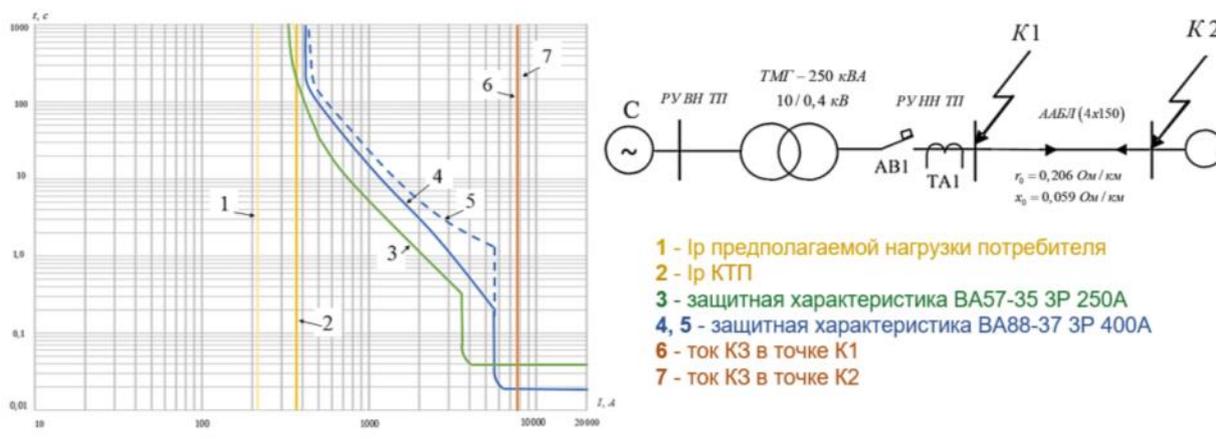


Рис. 5. Карта селективности действия аппарата защиты

Выявлено незаконное обогащение в связи с бездоговорным потреблением ЭЭ, поэтому в соответствии с Постановлением правительства № 442 от 01.01.2012 г. выбрана ценовая категория потребителя и произведен экономический расчет платы за электрическую энергию и мощность, также рассмотрены способы снижения платы за ЭЭ и выбран оптимальный вариант регулирования потребления ЭЭ для майнинга.

Провели экономическое планирование и оценку ресурсоэффективности добычи криптовалюты частным майнингом. Оценка ресурсоэффективности и окупаемости проекта показала, что выбор установки майнинг-фермы на Асике Auradine Teraflux AI3680 наиболее экономически оправдан и ресурсоэффективен. Также провели оценку коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, планирование научно-исследовательских работ, технико-экономическое обоснование технических решений, определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, производственная и экологическая безопасность, проведен анализ опасных и вредных производственных факторов.

Проект имеет практическую значимость, т. к. совершенствование системы электроснабжения отвечает требованиям надежности, безопасности электроснабжения, экономичности и обеспечивает потребителей электроэнергией, соответствующего качества. Реализация данного технического проекта позволяет увеличить эффективность производства, как социальную, путем улучшения безопасности, так и ресурсосберегающую, путем внедрения более универсального, требующего меньших затрат в эксплуатации оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савина Н.В. Надежность электроэнергетических систем: учеб. пособие – Благовещенск: АмГУ, 2014. – 194 с.
2. Тихомиров В.А. Методика расчета энергетических показателей преобразовательных устройств: учеб. пособие. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3 (122).
3. ГОСТ 32144–2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
4. Приказ № 6-643 от 29.12.2023 г. Департамент тарифного регулирования Томской области.
5. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая) от 26.01.1996 N 14-ФЗ (ред. от 24.07.2023). ГК РФ Статья 1102. Обязанность возратить неосновательное обогащение.
6. Сумарокова Л.П. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
7. Постановление от 4 мая 2012 года N 442. О функционировании розничных рынков электрической энергии.
8. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 N 442 (ред. от 29.03.2024) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (вместе с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии», «Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии»).
9. ГОСТ 29322–2014. Напряжения стандартные.
10. Савина Н.В. Качество электроэнергии: учеб. пособие – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2014. – 182 с.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ ШАХТЫ

**Д.И. Чернышев, Е.А. Масалина**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А13, АО «НПЦ «Полюс»*

Научный руководитель: Т.А. Чернышева, старший преподаватель, ОМ, ИШНПТ, ТПУ

Шахтное производство представляет собой в основном добычу полезных ископаемых, что, в свою очередь, определяется как извлечение минералов, руды, геологических материалов из земной коры (рудное тело, пласт). В результате проведения работ в горных выработках возникают выбросы угольной пыли и, что более опасно, газов (метан, угарный газ, сероводород, сернистый ангидрид и др.), способных привести к серьезным последствиям. Работа в шахте может привести к ухудшению здоровья, а часто и к серьезным болезням, таким как пневмокониоз, силикоз, пылевой бронхит и другие заболевания легких. Помимо влияния на организм работающего человека посредством угольной пыли, грязи, различных газов и других факторов, присутствует опасность аварийных ситуаций, которые могут повлечь за собой гибель работающего персонала.

Для уменьшения пагубного влияния газов, пыли и других загрязнений воздуха необходима вентиляция шахт. Шахтная вентиляционная установка способствует установлению благоприятных (на сколько это возможно) условий для работы персонала внутри шахты разбавляя загрязненный воздух до необходимых правильных концентраций, а также может обеспечить регулирование температурного режима внутри шахты.

Метан, который еще называют «рудничный газ», является одним из природных газов. По своей природе метан не имеет запаха и цвета, что делает его еще опаснее.

Чаще всего метан в больших объемах встречается в угольдобывающем производстве, так как газ находится в свободном состоянии и сорбированном состоянии в пластах угля.

Метановая смесь, которая является очень опасной как по токсичности, так и по взрыв потенциалу, может возникать в пустотах пород, под кровлей выработок. Концентрация метана в воздухе рабочего пространства – один из важных критериев, который должен всегда быть под наблюдением и контролем. Когда метан достигает концентрации в 16 %, то он просто горит (при условии, что поступает кислород), 9,5 % – считается самой опасной по взрыв потенциалу концентрацией, а при 5–6 % метан горит от источника тепла. Когда концентрация менее 5 % взрывоопасность меньше, однако если в воздухе имеется, например, угольная пыль, то метан может взорваться и при концентрации 4 %.

Для уменьшения воздействия вредных газов и примесей, обеспечения необходимой рабочей температуры и чистого воздуха предназначена шахтная вентиляция. Вентиляционные установки шахт в основном делятся на два типа – главного и вспомогательного проветривания. Вентилятор главного проветривания обеспечивает подачу воздуха всей шахте и задает вид проветривания. Вспомогательная вентиляция, чаще всего, используется для обеспечения подачи воздуха отдельным частям шахты (очистный забой, тупиковая выработка).

Главная вентиляционная установка чаще всего представляет собой два вентилятора, один из которых основной, а второй – резервный, к которым подключены электродвигатели.

В данной работе разработана автоматическая система управления вентиляцией горных выработок (шахт) для предотвращения пагубного влияния метана, одного из самых распространенных газов в угольных шахтах.

Для автоматической системы проветривания необходимо подобрать сигнализационное оборудование. Для данных целей выбран газоанализатор Сигма – 03. Многоканальный блок газоанализатора предназначен для определения (измерения) концентраций газов, обеспечения цветовой и звуковой сигнализации, передачи полученных данных на внешнее оборудо-

вание. Газоанализатор Сигма – 03 может включать в себя от 2 до 8 входов для датчиков и состоит из информационного блока (рис. 2) и датчика (датчиков) газа (в рамках данной работы – датчик метана (рис. 1)) [1, 2].

Датчик Сигма – 03 непрерывно преобразует измеряемый параметр и передает его на информационный блок в виде аналогового сигнала (4–20 мА). Данные датчики могут устанавливаться в взрывоопасных помещениях, что соответствует шахте, и имеют уровень взрывозащиты 1ExibdIIВТ4.



Рис. 1. Информационный блок и датчик Сигма-03

Если концентрация газов нулевая – на выходе датчика токовый сигнал соответствует 4 мА, сигнал 20 мА указывает на концентрацию газов в воздухе равной 50 % от нижнего концентрированного предела.

Схема автоматической системы вентиляции представлена на рис. 2 и состоит из диспетчерского места, преобразователя частоты (ПЧ), основного и резервного двигателя и вентиляторов, системы сигнализации.

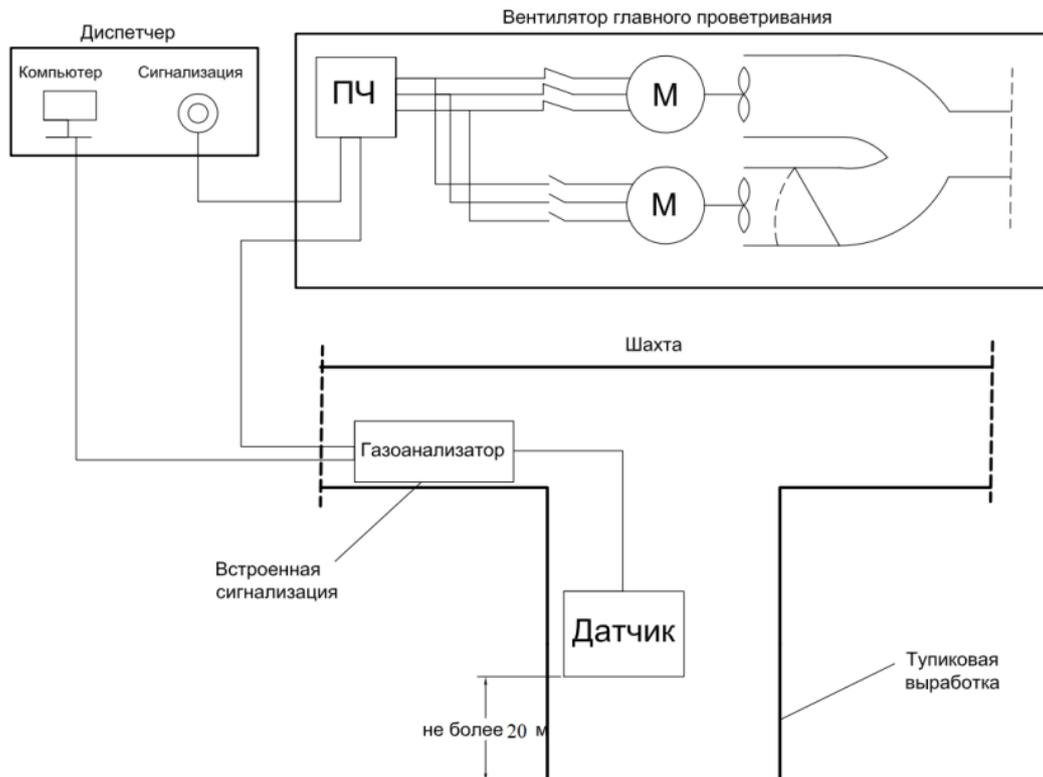


Рис. 2. Схема автоматической системы вентиляции

Частота вращения двигателя вентилятора главного проветривания в шахте зависит от концентрации метана в выработках. Таким образом при нулевой концентрации метана выходной токовый сигнал датчика, подаваемый в блок газоанализатора, соответствует 4 мА, и преобразователь частоты поддерживает частоту 10 Гц. При увеличении концентрации метана до 50 % от максимально допустимой концентрации выходной токовый сигнал датчика соответствует 20 мА, в результате чего преобразователь частоты повышает частоту до 50 Гц.

На рис. 3–6 приведены переходные процессы электромагнитного момента и скорости при различных концентрациях метана, а, следовательно, и частотах задания.

На рис. 3, 4 выполняется разгон с минимальной скорости 15 рад/с, что соответствует заданию 10 Гц, до максимальной скорости 150 рад/с ( $f_{\text{зад}} = 50$  Гц) и торможение.

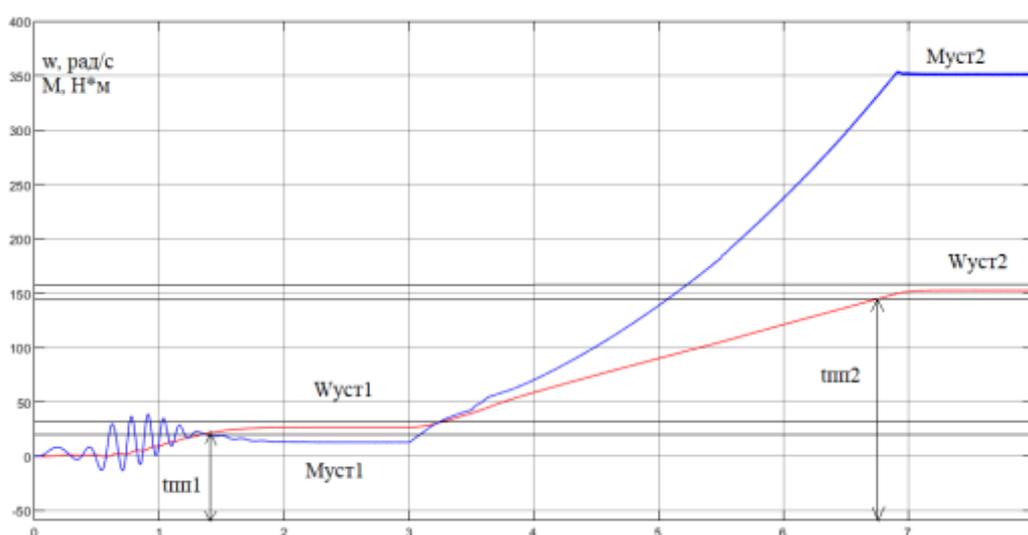


Рис. 3. Переходный процесс при изменении частоты с 10 Гц до 50 Гц

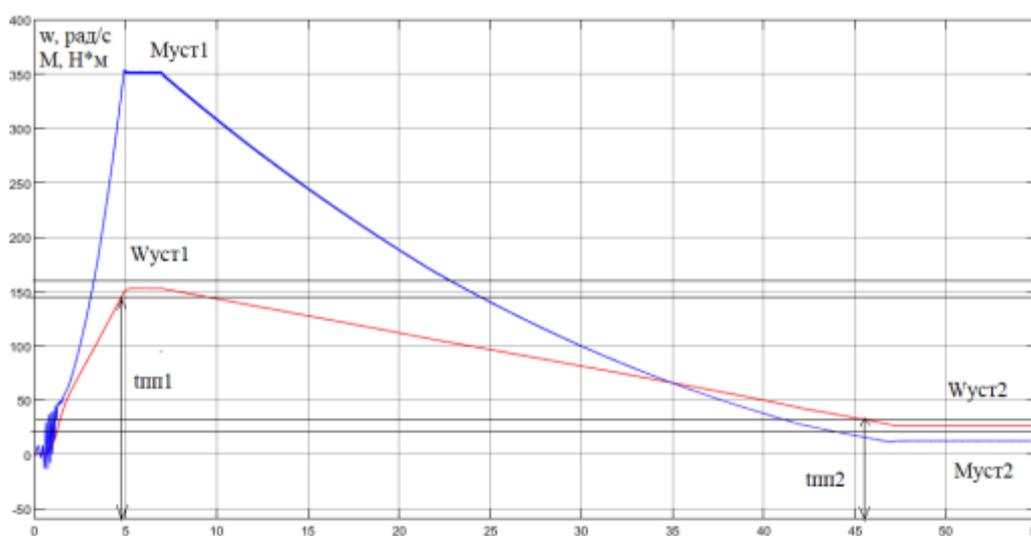


Рис. 4. Переходный процесс с изменением частоты с 50 до 10 Гц

На рис. 5, 6 выполняется разгон со скорости 105 рад/с ( $f_{\text{зад}} = 35$  Гц) до максимальной скорости 150 рад/с ( $f_{\text{зад}} = 50$  Гц) и торможение.

В переходных процессах наблюдаются небольшие колебания момента, что никак не сказывается на механизмах (вентиляторах). Также можно сказать, что при различных режимах разгона и торможения система работает устойчиво.

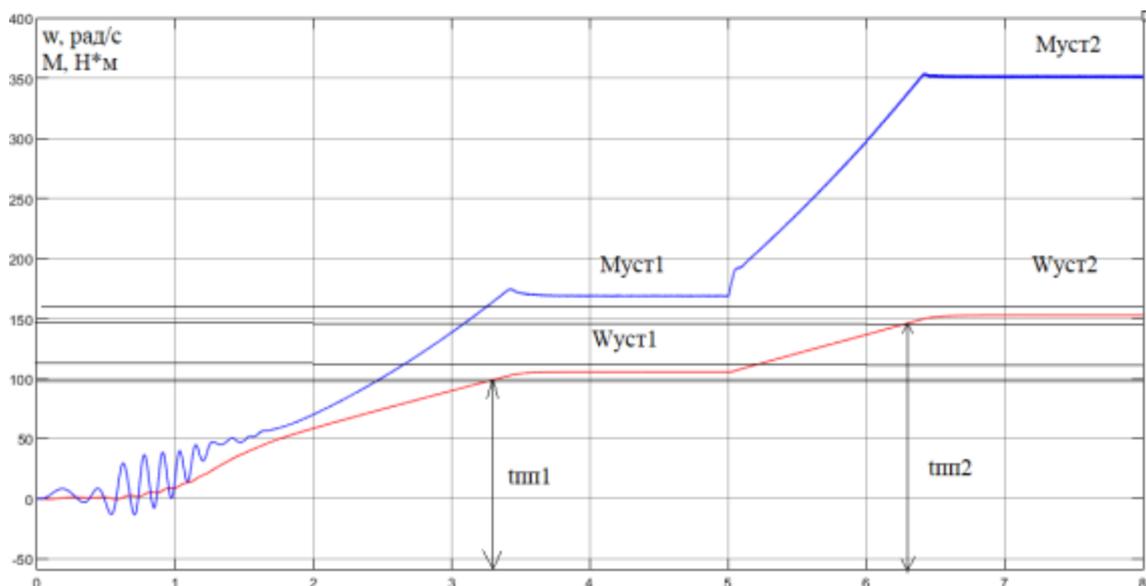


Рис. 5. Переходный процесс с изменением частоты с 35 до 50 Гц

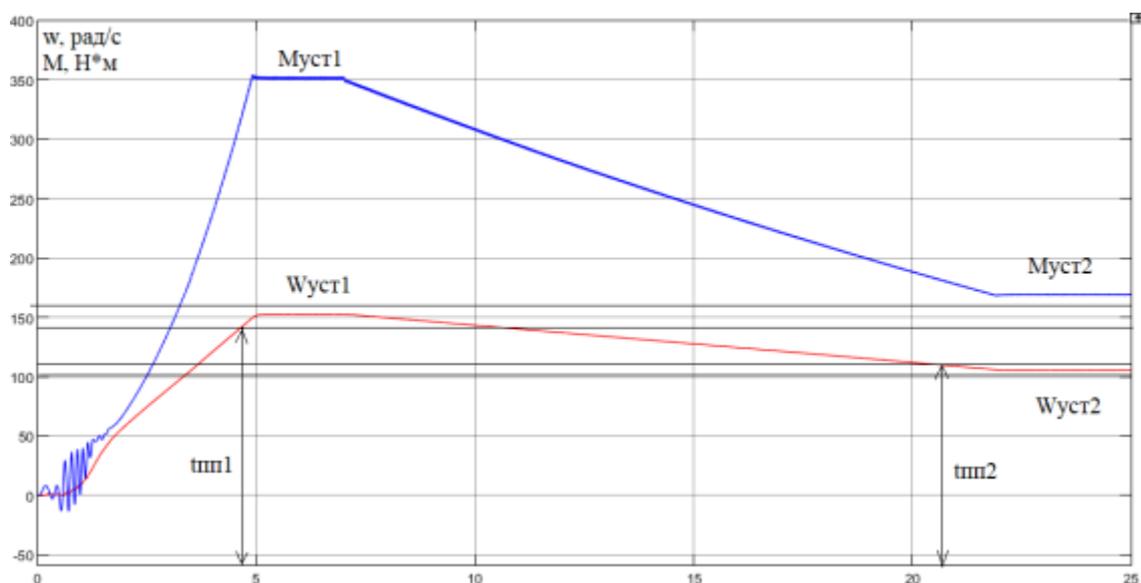


Рис. 6. Переходный процесс с изменением частоты с 50 до 35 Гц

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по эксплуатации газоанализатора универсального СИГМА-03 – URL: <https://www.gasdetecto.ru/files/330/sigms-03-24v-re.pdf>
2. Руководство по эксплуатации датчика ВОГ СИГМА-03.ДВ — URL: <https://www.gasdetecto.ru/files/330/sigma-03-dv-re.pdf>
3. Шахтстрой. Горно-шахтное оборудование: Вентилятор шахтный ВМЭ-5 – URL: <https://rudf.ru/>
4. Электропривод переменного тока : учебное пособие для вузов / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев. – Москва : Юрайт, 2022. – 214 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ОПИЛОК ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ УТЕПЛИТЕЛЯ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

**А.В. Апарина, Е.Д. Новикова, Е.О. Брагин**

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
ТЭФ, ПТЭ, группа 2-4М*

Научные руководители: О.Б. Колибаба, заведующий кафедрой, к.т.н., ЭТГ ИФФ ИГЭУ;  
Е.В. Гусев, к.т.н., доцент, ЭТГ ИФФ ИГЭУ

Использование засыпки опилок в качестве конструкционного материала довольно распространено в строительстве и мебельном производстве. Опилки являются отходами деревообрабатывающей промышленности и могут быть использованы как дешевый и экологически чистый материал для утепления и звукоизоляции стен, полов, потолков, а также для создания мебели и декоративных элементов.

Использование опилок как конструкционного материала имеет множество преимуществ, включая дешевизну, удобство обработки, экологическую чистоту и хорошую теплоизоляцию.

В качестве основных сырьевых материалов используются хвойные опилки разной фракции:

Толщина фракции	0,5–1 мм	1–2 мм	2–3 мм
-----------------	----------	--------	--------

Для защиты древесины от разбухания, гниения, плесени и насекомых используются различные гидрофобизаторы, в том числе кремнийорганический жидкий на водной основе «гидроэффект 2.1.» ТУВУ 291201828.001-2014.

Гидрофобизаторы – это химические вещества, которые используются для снижения влагопроницаемости материалов, таких как древесина, бетон, кирпич и другие строительные материалы. Их применение направлено на предотвращение набиранья влаги, что особенно важно для увеличения долговечности конструкций и предотвращения разрушительных последствий, связанных с избыточной влажностью.

Пропитка опилок поливинилацетатом (ПВА) является одним из популярных методов для улучшения характеристик исследуемого сырья. В наших исследованиях в качестве гидрофобизатора был использован кремний органический жидкий на водной основе.

Преимущества пропитки ПВА:

- Улучшение влагостойкости: ПВА создает пленку, которая защищает опилки от проникновения влаги.
- Повышение прочности: Пропитанные опилки становятся более прочными и устойчивыми к механическим повреждениям.
- Устойчивость к грибкам и плесени: благодаря своим антисептическим свойствам, ПВА помогает предотвратить развитие микробов.

Экспериментальное исследование было проведено для опилок разного фракционного состава, взятых с предприятия деревопереработки. Эксперимент проводили в следующей последовательности.

1. Исходный материал до начала пропитки высушивали. 300 грамм образца опилок помещали в сито и просеивали с разделением на пять разных фракций, представленных в табл. 1.
2. Просеянные опилки разной фракции помещали в бюксы с соответствующим номером, взвешивали и отправляли в сушильную печь, для испарения из них влаги.
3. После сушки, опилки разной фракции извлекались из печи и взвешивались для нахождения процента влагосодержания.

4. Далее опилки разной фракции замачивали в дистиллированной воде на 48 часов, затем из них удаляли лишнюю влагу с помощью бумажных фильтров. Влажные опилки взвешивали по фракциям и снова помещали в бьюксы для дальнейшей их сушки.

5. После 4-го этапа подготовки, опилки разной фракции взвешивали и пропитывали в гидрофобном растворе в течение 48 часов, затем взвешивали и отправляли на сушку.

6. После 5-го этапа, подготовленные опилки разной фракции пропитывали в поливинилацетате в течение 48 часов. Далее, снова отправляли в сушильную печь, после сушки взвешивали.

7. Этапы 1–6 повторяли еще 2 раза.

Расчет влагосодержания опилок разной фракции при пропитке их в дистиллированной воде и гидрофобизаторе осуществляли по следующим формулам.

Абсолютная влажность материала:

$$\omega_a = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $m_{вл}$  и  $m_{сух}$  – массы влажных и сухих опилок, г.

Относительная влажность материала:

$$\omega = \frac{\omega_a}{1 + \omega_a} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

Результаты расчета приведены в табл. 1.

*Таблица 1. Результаты исследования влагосодержания опилок*

Толщина фракции	0,5–1 мм	1–2 мм	2–3 мм
Масса влажных опилок, г	84,91	86,69	128,4
Номер Бьюксы	3	2	1
Относительная влажность пропитки в дистил.воде, %	212,4	211,1	230,5
Относительная влажность пропитки в гидрофобизаторе, %	165,7	178,5	170,9

Анализ полученных данных позволяет говорить об эффекте снижения влагопоглощения за счет пропитки опилок гидрофобизатором.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Гидроэффект 2.1». ТУВУ 291201828.001-2014.
2. СНИП II-A.7-62 «Строительная теплотехника. Нормы проектирования», 1962.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСБАЛАНСИРОВАННОСТИ ФАЗНЫХ НАГРУЗОК ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ НИЗКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ И ОЦЕНИВАНИИ СОСТОЯНИЯ

А.Ю. Юдин

Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева СО РАН, отдел ЭЭС

Научный руководитель: Е.В. Болоев, к.т.н., с.н.с.

Низковольтная распределительная электрическая сеть – это последнее звено на пути передачи электроэнергии от электростанций до конечного потребителя. Низковольтные сети подключаются к силовым двухобмоточным трансформаторам напряжением 6–35 кВ/380 В мощностью от 25–6300 кВА со схемами соединения обмоток звезда или треугольник / звезда с выведенной нулевой точкой. Распределение электроэнергии по потребителям в низковольтных сетях выполняется трехфазными четырехпроводными кабельными или воздушными линиями с применением магистрально-радиальных схем, слабозамкнутых кольцевых схем и схем многостороннего питания, разомкнутых в узле токораздела. К низковольтным сетям подключаются однофазные и трехфазные потребители. Из-за неравномерного подключения однофазных электроприемников к линиям, различия их мощностей, а так же несовпадения спроса у потребителей в низковольтных сетях возникает несбалансированность фазных нагрузок в ее узлах и на участках. В работе исследуется влияние дисбаланса этих фазных нагрузок на режимы сетей на основе реальных измерений интеллектуальных счетчиков. Не измеряемые счетчиками параметры режима сети были рассчитаны методом простых итераций [1].

Для потребителей в технических условиях на подключения к электрическим сетям [2] установлены нормы максимальной мощности устройств, и отсутствуют какие-либо нормы в отношении: пропорций распределения этих мощностей между фазами для трехфазных потребителей; выбора фаз подключения однофазных и трехфазных потребителей к сети. Трехфазные потребители без привлечения эксплуатационного персонала сетевых компаний, самостоятельно определяют фазу подключения к сети однофазных электроприемников по возможности равномерно распределяя их мощности между фазами. Фазные нагрузки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в узле сети на рис. 1, определенные как сумма соответствующих реальному подключению к сети фазных нагрузок  $A$ ,  $B$ ,  $C$  однофазных и трехфазных потребителей, являются несбалансированными и в некоторые моменты времени могут многократно превышать среднесуточную нагрузку фазы.

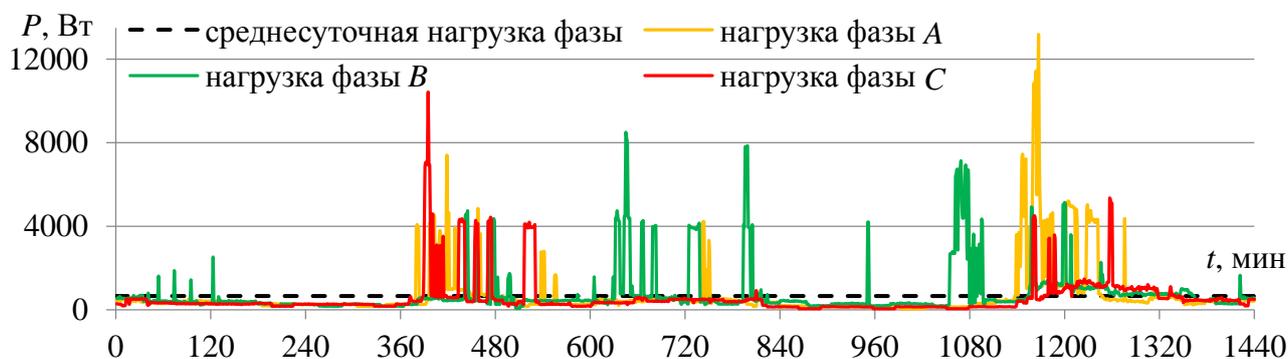


Рис. 1. Суточные графики фазных  $A$ ,  $B$ ,  $C$  нагрузок потребителей узла сети

Дисбаланс фазных нагрузок в узлах сети приводит к несбалансированности фазных токов, протекающих по участкам сети. Фазные токи на участках фидера на рис. 2 могут отличаться друг от друга в несколько раз. Повышенная токовая нагрузка в одной из фаз, в соответствии с законом Ленца–Джоуля, увеличит нагревание провода этой фазы по сравнению с другими фазами и как следствие локальное нагревание изоляции токоведущей части, что в свою очередь приведет к ее локальному повышенному износу. Таким образом, дисбаланс фазных нагрузок приводит к неравномерному износу изоляции кабельных линий и трансформаторов. Эти устройства необходимо будет заменить во избежание термического разрушения, как только износ изоляции в фазе с повышенной токовой нагрузкой превысит нормативное значение. При этом в менее загруженных фазах изоляция не исчерпает свой ресурс, т. е. ненагруженные провода других фаз за период эксплуатации будут недоиспользованы. В результате дисбаланс фазных нагрузок снижает экономические показатели низковольтной сети из-за более частой замены ее элементов.

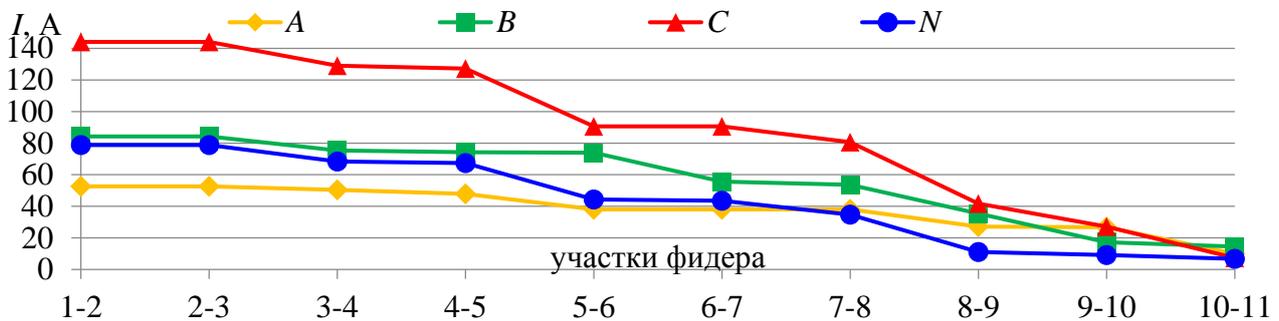


Рис. 2. Фазные токи  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и токи в совмещенном нулевом и защитном PEN-проводнике на участках 11-узлового фидера

При проектировании электрических сетей считается, что нагрузка равномерно распределена между фазами. При превышении током наиболее загруженной фазы тока теплового расцепителя головного защитного аппарата произойдет отключение от сети. Потребители испытают дискомфорт от перерыва в электроснабжении, а электросетевые и сбытовые компании недополучат прибыль от не оказанных услуг соответственно передачи и продажи электроэнергии во время перерыва электроснабжения.

Токи нулевого провода в несбалансированных режимах могут превышать токи недогруженных фазных проводов (рис. 2). Сечение нулевого провода в сети может быть выбрано на один номинал ниже сечения фазных проводников. Нулевой провод не защищается от перегрузки коммутационным аппаратом. При протекании тока в нулевом проводе выше допустимого значения длительного тока этот провод может перегореть в местах соединения провода к аварийному режиму.

На рис. 3 построены потенциальные диаграммы для трех фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и нулевого провода  $N$  и векторная диаграмма фазных напряжений  $U_8^{(AN)}$ ,  $U_8^{(BN)}$ ,  $U_8^{(CN)}$  для 8 узла фидера сети для одного из режимов. Несимметрия напряжения наблюдается на шинах низкого напряжения подстанции. Из-за несбалансированности фазных нагрузок в этом режиме потенциал нулевого провода  $V^{(N)}$  от первого узла (нейтрали трансформатора) к 11 узлу возрастает от 0 до 8 В (рис. 4), а его угол изменяется от  $120^\circ$  до  $90^\circ$ . Фазные напряжения  $U^{(AN)}$ ,  $U^{(BN)}$ ,  $U^{(CN)}$  – векторная разность между потенциалами соответственно  $V^{(A)}$ ,  $V^{(B)}$ ,  $V^{(C)}$  и  $V^{(N)}$ . Поэтому чем ближе угол между потенциалом фазы и потенциалом нулевого провода, тем выше потеря напряжения в фазе (на рис. 5 напряжение в фазе  $C$  снизилось на 15,9 В). Напряжение в ненагруженной фазе может возрастать и в конце фидера превышать значение на одноименных зажимах трансформатора, как в фазе  $B$  см. рис. 5 на 4,3 В. Дисбаланс фазных нагрузок приводит к несимметрии напряжения, ухудшая режимы работы трехфазных электроприемников.

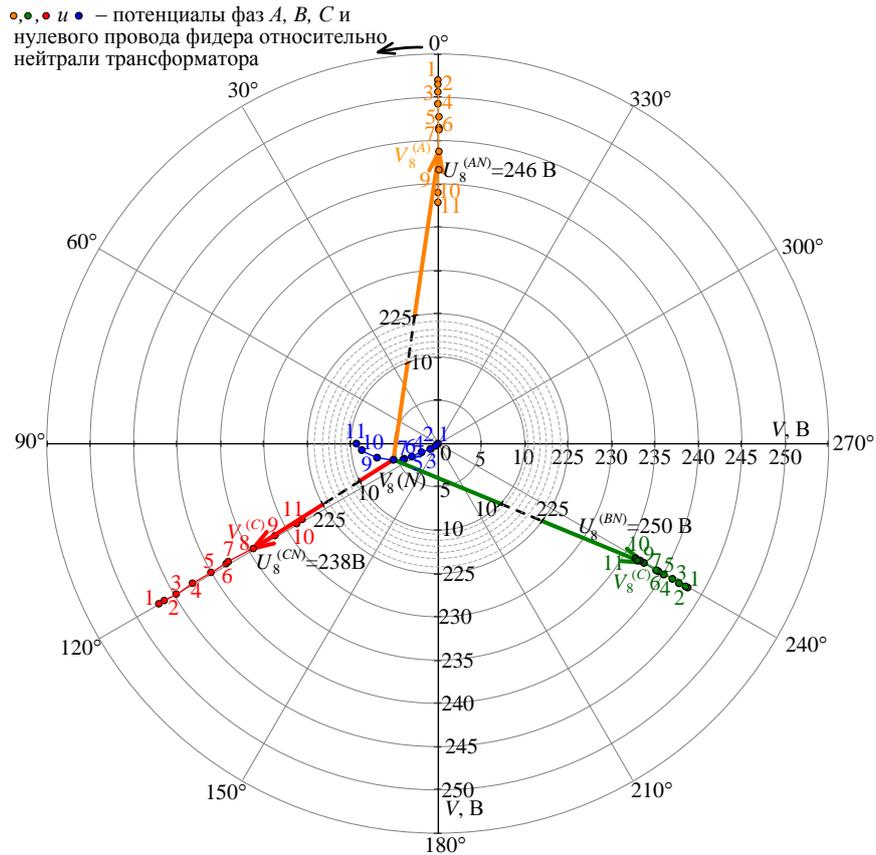


Рис. 3. Потенциальные диаграммы 11 узлового фидера и векторы фазных напряжений в 8 узле

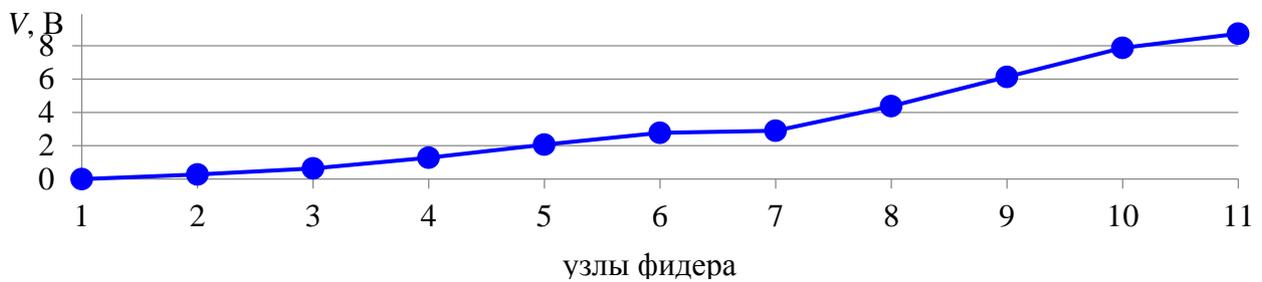


Рис. 4. Профиль потенциала нулевого провода вдоль 11 узлового фидера

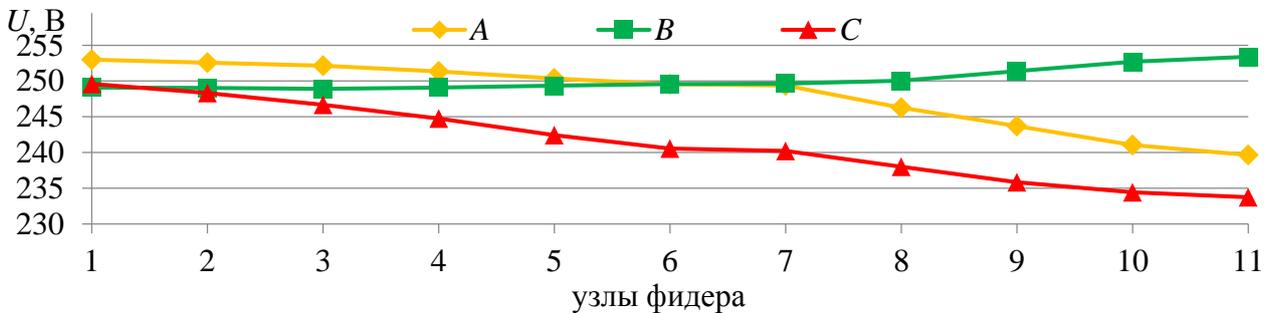


Рис. 5. Профили напряжений вдоль 11 узлового фидера

Фактические фазные потери мощностей определяемые как разность между фазными мощностям измеренной счетчиком трансформаторной подстанции и счетчиками потребителей в несбалансированных режимах могут быть отрицательными. Обусловлено это

особенностями передачи мощности в трехфазных четырехпроводных сетях в несбалансированных режимах (см. потокораспределение для 8 узла фидера на рис. 6). Потребитель 8 узла сети фазы *B* получает мощность из фазы подключения *B* 5760 Вт и из других фаз сети 86 Вт через нулевой провод. Такие режимы трехфазных четырехпроводных сетей плохо изучены и требуют проведения дополнительных исследований.

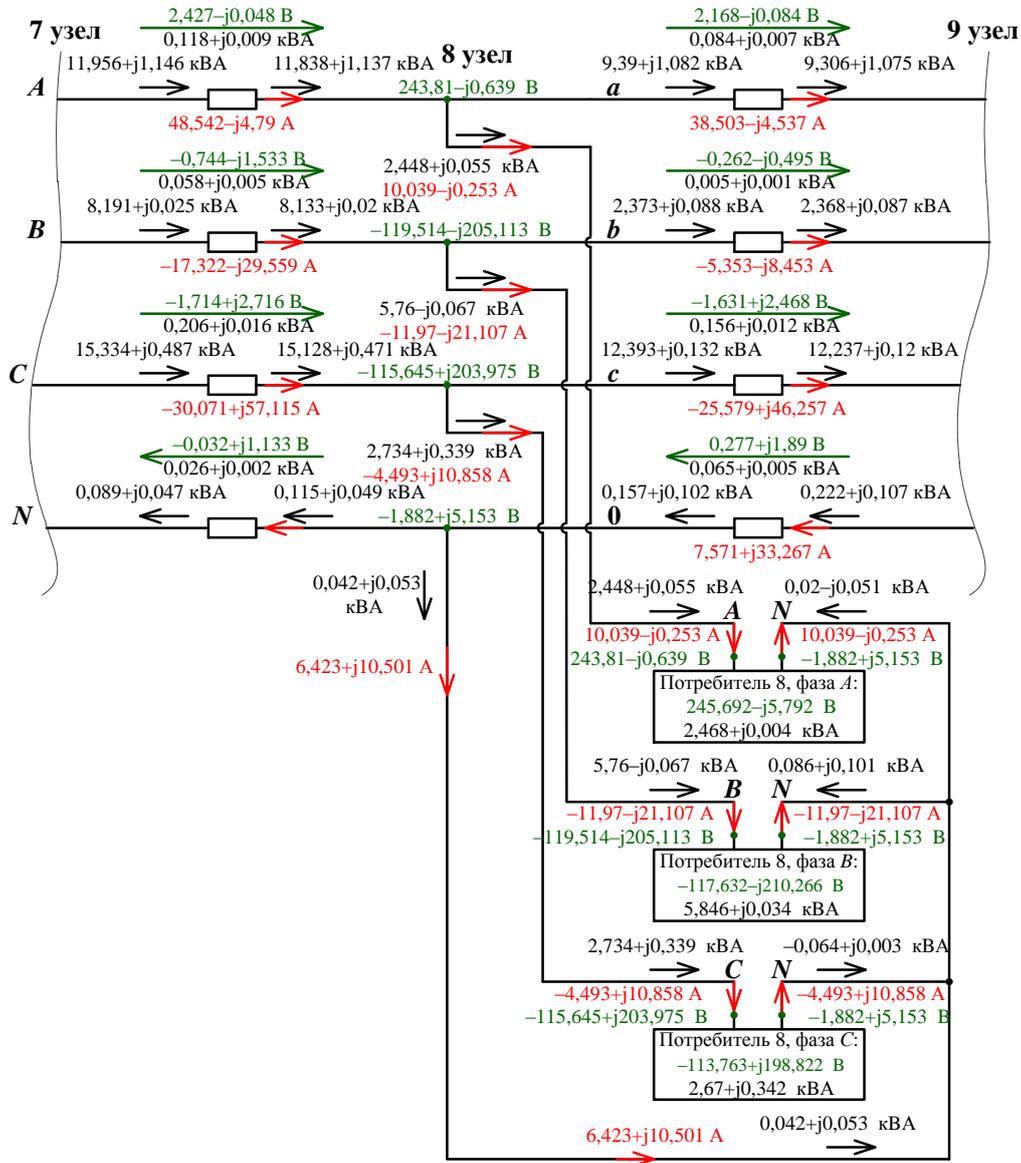


Рис. 6. Потокораспределение в 8 узле фидера

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0001) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценивание состояния трехфазной четырехпроводной вторичной распределительной сети / Я.И. Кузькина, И.И. Голуб, Е.В. Болоев // Вестник ИрГТУ. – 2020. – 24 (3). – С. 649–662.
2. Правила технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям. Утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 27.12.2004 г. № 861 // Документы – Правительство России. – URL: <http://government.ru/docs/all/50967/> (дата обращения 14.11.2024 г.).

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Е.М. Антонова

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПБ, группа Э-12

Научный руководитель: Б.С. Компанеец, к.т.н., доцент,  
зав. кафедры ЭПБ, ЭФ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

Электрические потери в сетях оказывают значительное влияние на эффективность, качество и надежность энергоснабжения потребителей. Условно среди всех потерь электроэнергии выделяют коммерческие, обусловленные проблемами в сфере контроля потребления, и технические, которые являются следствием протекающих физических процессах в оборудовании при передаче, распределении и преобразовании электроэнергии [1].

Изучив структуру технических потерь, приведенную на рис. 1, можно сделать вывод о том, что наибольшая доля потерь электроэнергии приходится на нагрузочные потери в линиях электропередач и трансформаторах, а также на потери холостого хода трансформаторов.

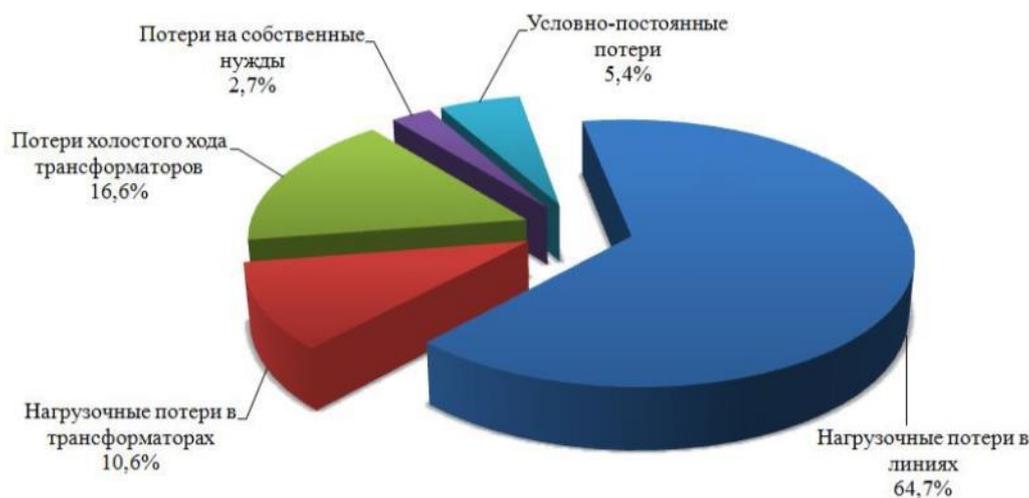


Рис. 1. Структура технических потерь в сети электроснабжения

Нагрузочные потери – это вид электрических потерь, которые зависят от передаваемой мощности. Для нагрузочных потерь в линии при неизменной нагрузке справедливо уравнение:

$$\Delta P_{н л} = \frac{S^2}{3U^2} R, \quad (1)$$

где  $S$  – потребляемая мощность;  $U$  – фактическое напряжение в линии;  $R$  – активное сопротивление.

Для нагрузочных потерь в трансформаторах в свою очередь справедливо следующее уравнение:

$$P_{н т} = \Delta P'_{кз} \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \left(\frac{U_n}{U}\right)^2, \quad (2)$$

где  $\Delta P'_{кз}$  – потери короткого замыкания, полученные опытным путем;  $S$  – потребляемая мощность;  $S_n$  – номинальная мощность;  $U_n$  – номинальное напряжение;  $U$  – фактическое напряжение в линии.

Потери холостого хода в трансформаторе зависят от напряжения в сети, поэтому имеют следующий вид:

$$P_{xx} = \Delta P'_{xx} \left( \frac{U}{U_H} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\Delta P'_{xx}$  – потери холостого хода, полученные опытным путем;  $U_H$  – номинальное напряжение;  $U$  – фактическое напряжение в линии.

Совокупность данных уравнений является уравнением для суммарных потерь в линии:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{нл} + \Delta P_{нт} + \Delta P_{xx} = \frac{S^2}{3U^2} R + \Delta P'_{кз} \left( \frac{S}{S_H} \right)^2 \left( \frac{U_H}{U} \right)^2 + \Delta P'_{xx} \left( \frac{U}{U_H} \right)^2. \quad (4)$$

Видно, что суммарные потери электроэнергии зависят от фактического напряжения в сети при условии, что нагрузка неизменна. Из этого можно сделать вывод о том, что существует некоторое значение напряжения, при котором суммарное значение потерь будет минимально.

Рассмотрим пример магистральной линии электропередач, представленный на рис. 2. Точка  $a$  расположено в начале линии. Напряжение в данной точке соответствует регулируемому напряжению на шинах питающего трансформатора. Точка  $b$  является узловой, в этом месте происходит подключение трансформатора  $T_1$ . Нагрузка  $S_2$  характеризует совокупную нагрузку линии, которая идет от узловой точки  $b$  и включает в себя потребляемую мощность потребителей и самой линии.

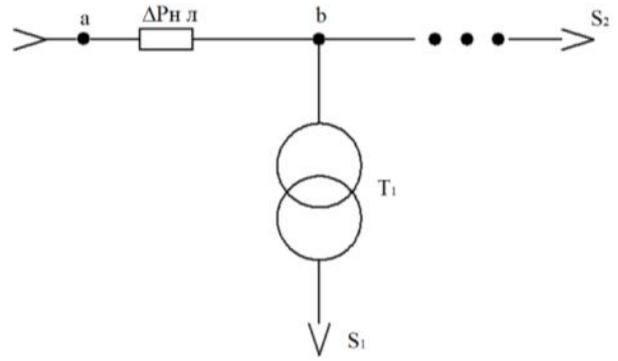


Рис. 2. Магистральная схема электроснабжения

Для данной схемы уравнение суммарных потерь будет иметь вид:

$$\Delta P_0 = \Delta P'_{кз1} \left( \frac{S_1}{S_H} \right)^2 \left( \frac{U_H}{U_b} \right)^2 + \Delta P'_{xx1} \left( \frac{U_b}{U_H} \right)^2 + (S_1 + S_2)^2 \frac{r_1}{U_b^2}, \quad (5)$$

где  $r_1$  – активное сопротивление линии,  $U_b$  – фактическое напряжение в точке  $b$ ,  $S_1$  – нагрузка потребителей, подключенных к трансформатору  $T_1$ ,  $S_2$  – нагрузка отходящей линии.

Для того, чтобы найти оптимальное значение напряжения необходимо продифференцировать полученное уравнение относительно фактического напряжения:

$$\begin{aligned} & \left( \Delta P'_{кз1} \left( \frac{S_1}{S_H} \right)^2 \left( \frac{U_H}{U_b} \right)^2 + \Delta P'_{xx1} \left( \frac{U_b}{U_H} \right)^2 + (S_1 + S_2)^2 \frac{r_1}{U_b^2} \right)' = \\ & = -2\Delta P'_{кз1} \left( \frac{S_1}{S_H} \right)^2 \frac{U_H^2}{U_b^3} + \frac{2\Delta P'_{xx1} U_b}{U_H^2} - \frac{2(S_1 + S_2)^2 r_1}{U_b^3}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$-2\Delta P'_{кз1} \left( \frac{S_1}{S_H} \right)^2 \frac{U_H^2}{U_b^3} + \frac{2\Delta P'_{xx1} U_b}{U_H^2} - \frac{2(S_1 + S_2)^2 r_1}{U_b^3} \rightarrow 0. \quad (7)$$

Так как необходимо найти точку экстремума функции, полученное выражение необходимо приравнять к 0:

$$-2\Delta P'_{кз1} \left( \frac{S_1}{S_H} \right)^2 \frac{U_H^2}{U_b^3} + \frac{2\Delta P'_{xx1} U_b}{U_H^2} - \frac{2(S_1 + S_2)^2 r_1}{U_b^3} = 0. \quad (8)$$

Выполнив математические преобразования, можно получить значение оптимального напряжения в точке  $b$ :

$$U_b = \sqrt[4]{\frac{\Delta P'_{кз1} U_H^4 \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1 U_H^2}{\Delta P'_{xx1}}} \quad (9)$$

Подставив данное выражение в уравнения нагрузочных потерь и потерь холостого хода, можно заметить, что они равны:

$$\Delta P'_{xx1} \left(\frac{1}{U_H}\right)^2 \sqrt{\frac{\Delta P'_{кз1} U_H^4 \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1 U_H^2}{\Delta P'_{xx1}}} = \sqrt{\frac{\left(\Delta P'_{кз1} U_H^4 \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1\right) \Delta P'_{xx1}}{U_H^2}}; \quad (10)$$

$$\left(\Delta P'_{кз1} \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 U_H^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1\right) \sqrt{\frac{\Delta P'_{xx1}}{P'_{кз1} U_H^4 \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1 U_H^2}} = \sqrt{\frac{\left(\Delta P'_{кз1} \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 U_H^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1\right) \Delta P'_{xx1}}{U_H^2}}. \quad (11)$$

Равенство данных потерь подтверждает, что найденное значение напряжения соответствует максимуму КПД системы.

Напряжение в точке *a* находится следующим образом [2]:

$$U_a = U_b + \frac{P_l r_1 + Q_l x_1}{U_b} + j \frac{Q_l r_1 - P_l x_1}{U_b}, \quad (12)$$

где  $P_l$  и  $Q_l$  – активная и реактивная мощность линии,  $r_1$  и  $x_1$  – активное и реактивное сопротивление линии,  $U_a$  – напряжение в точке *a*. Так как известна полная мощность, можно выразить активную и реактивную мощность по уравнениям (13)–(14):

$$P_l = S_l \cdot \cos\varphi = (S_1 + S_2) \cos\varphi. \quad (13)$$

$$Q_l = S_l \cdot \sin\varphi = (S_1 + S_2) \sin\varphi. \quad (14)$$

Подставив данные выражения и найденное значение напряжения  $U_b$ , а также выполнив упрощение можно получить следующее значение для искомого напряжения  $U_a$ :

$$U_a = \sqrt[4]{\frac{\Delta P'_{кз1} U_H^4 \left(\frac{S_1}{S_H}\right)^2 + (S_1 + S_2)^2 r_1 U_H^2}{\Delta P'_{xx1}}} + (r_1 \cos\varphi + x_1 \sin\varphi + j(r_1 \sin\varphi + x_1 \cos\varphi)). \quad (15)$$

Полученные выражения найти оптимальное напряжение питания участка сети произвольной конфигурации, позволяющее обеспечить наименьшие совокупные потери электрической энергии рассматриваемого участка. Таким образом возможно снизить потерь в магистральной электрической сети методом регуляции напряжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баланс электроэнергии и потери // ПАО «Россети Центр и Приволжье» : [сайт]. – URL: [https://mrsk-sr.ru/for\\_consumers/electric\\_power\\_transmission/electric\\_capacity\\_balance/?print=Y](https://mrsk-sr.ru/for_consumers/electric_power_transmission/electric_capacity_balance/?print=Y) (дата обращения: 09.11.2024).
2. Готов И.А. Проектирование районной электрической сети [текст]: В 3 частях. Часть 3. Расчеты установившихся режимов работы электрических сетей: методические указания к курсовому проекту по дисциплине «Электрические сети» для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» / И.А. Готов: Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. 2010. – 44 с.

## **СОКРАЩЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА СОБСТВЕННЫЕ НУЖДЫ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

**И.М. Дайс**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-11*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент,  
зам. зав. кафедры ЭПП, ЭФ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

Система электроснабжения Российской Федерации представляет собой совокупность большого количества источников электроэнергии и установок, предназначенных для приема, передачи, преобразования и ее распределения. Потери электрической энергии являются неотъемлемой составляющей частью работы электросети, что обусловлено физическими процессами, протекающими в проводах и электрооборудовании, необходимостью обеспечения работы технологического оборудования подстанций и другими факторами.

Все потери электроэнергии можно условно разделить на коммерческие и технические. Коммерческие потери зачастую обусловлены проблемами в сфере организации контроля за потреблением электроэнергии, что включает в себя несанкционированное подключение к питающим линиям электропередач, погрешности в работе счетчиков и так далее [1]. К техническим потерям в свою очередь относят нагрузочные потери, потери холостого хода, потери на корону и другие физические процессы.

В отдельную категорию выделяют потери на собственные нужды энергообъектов. К ним относят затраты электроэнергии, необходимые для стабильного и бесперебойного функционирования технологического оборудования энергообъектов, к которым относятся линии электропередач, высоковольтные подстанции, трансформаторные подстанции и распределительные щиты. [2] Так, электроэнергия тратится на освещение, охлаждение или обогрев оборудования (в зависимости от условий окружающей среды и параметров работы самого оборудования), системы управления подстанциями и вспомогательные устройства синхронных компенсаторов, текущий ремонт оборудования, работа устройств регулирования напряжения под нагрузкой и многое другое.

По данным ПАО «Россети» расход на собственные нужды энергообъектов за 2023 год составил более 450 млн кВт·ч, что в денежном эквиваленте составляет более 2,2 млрд руб. Все эти затраты на покрытие потерь включаются в тариф на электроэнергию. Соответственно, снижая уровень данных потерь электросетевые организации не только смогут увеличить свой собственный доход, но и улучшить качество обслуживания сетей, что положительно скажется на качестве и надежности электроснабжения.

Генераторы использующие возобновляемые источники электроэнергии (ВИЭ) все больше внедряются в систему электроснабжения: от малых солнечных панелей, устанавливаемых на фонарных столбах для освещения пешеходных до огромных площадей, занятых ветрогенераторами, которые снабжают электроэнергией свыше 210 тысяч домохозяйств [3].

На данном этапе развития данных технологий, генераторы электроэнергии ветряными генераторами и солнечными панелями, обладают эффективностью до 40 %. В теории, это позволит при относительно небольших габаритах генераторных установок обеспечить выработку достаточного количества электроэнергии для компенсации затрат на собственные нужды энергообъектов. Данные установки могут значительно сократить потери на собственные нужды подстанций, а также, если количество выработанной электроэнергии превышает количество потребляемой, отдавать часть ее в сеть для компенсации других видов потерь.

Тем не менее при интеграции системы генерации, функционирующей на базе альтернативных источников, энергии возникает проблема, связанная с неравномерностью выработки электроэнергии с течением времени. В России широкое применение нашли ветрогенераторы и солнечные панели вследствие особенностей географического расположения страны. Использование подобных устройств имеет свои особенности. Во многих регионах среднегодовая скорость ветра составляет 3,5 м/с или более, что соответствует оптимальному значению данного параметра для установки ветрогенераторных установок. Так, мощность ветряных генераторов зависит от скорости потоков воздуха – чем больше скорость, тем больше вырабатываемая мощность. Однако при скорости ветра 25 м/с и выше генерация электроэнергии на подобных установках прекращается [4], так как в этом случае генератор начинает работать сверх установленной мощности, что негативно сказывается прежде всего на техническом состоянии оборудования.

В свою очередь минимальная продолжительность солнечного сияния для эффективной работы солнечных панелей составляет 1700 часов в год [5]. Как видно по карте продолжительности светового дня на территории Российской Федерации данный показатель выше минимальной отметки в большинстве регионов страны. Следовательно, применение солнечных панелей является рентабельным.

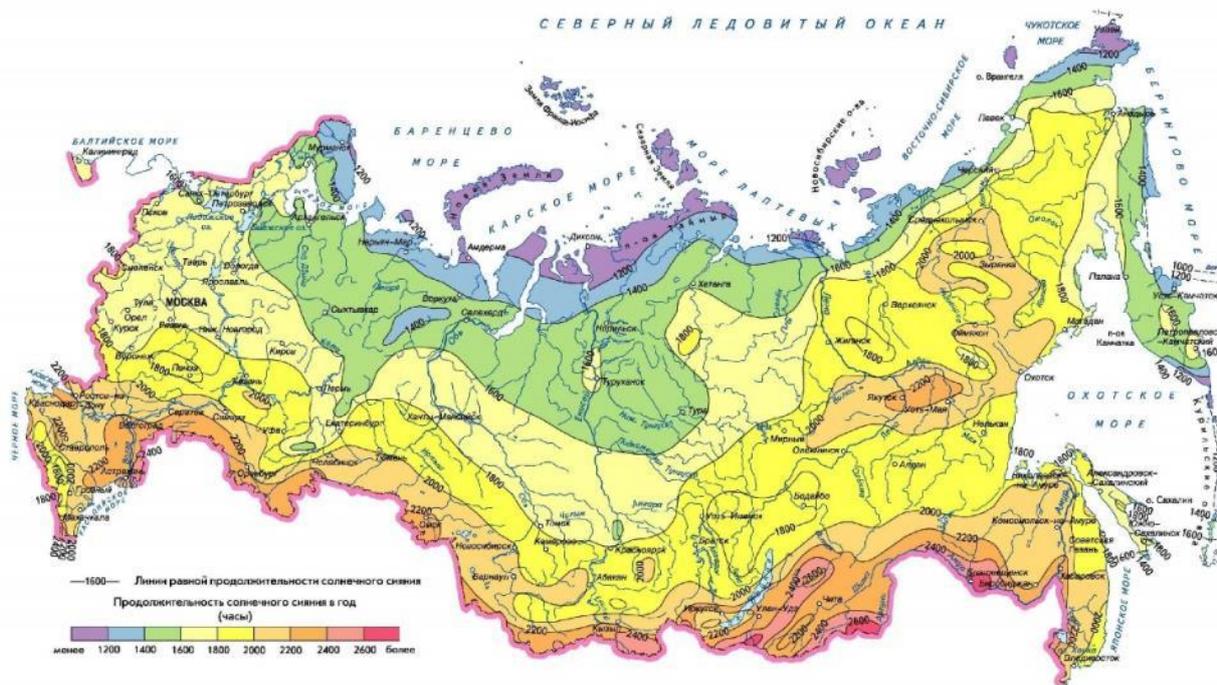


Рис. 1. Продолжительность солнечного сияния на территории РФ

Так как скорость ветра и солнечное излучение имеет непостоянный характер, наиболее эффективным решением является комбинирование различных генераторов. Кроме того, необходимым условием при внедрении таких систем является полное резервирование. Данное условие необходимо для предотвращения остановки работы энергооборудования и возникновения аварийных ситуаций.

Таким образом, на основе вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что внедрение генераторов на базе возобновляемых источников энергии имеет потенциал развития во многих регионах нашей страны. Интеграция данных устройств способно не только снизить потери электроэнергии на собственные нужды энергооборудования, но и благоприятно повлиять на качество и надежность электроснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баланс электроэнергии и потери / [Электронный ресурс] // ПАО «Россети Центр и Приволжье» : [сайт]. – URL: [https://mrsk-cp.ru/for\\_consumers/electric\\_power\\_transmission/electric\\_capacity\\_balance/?print=Y](https://mrsk-cp.ru/for_consumers/electric_power_transmission/electric_capacity_balance/?print=Y) (дата обращения: 09.11.2024).
2. Что такое энергообъекты / [Электронный ресурс] // ПАО «Россети Запад» : [сайт]. – URL: <https://electrofriend.rosseti-sz.ru/secureelectricity/energyobjects/> (дата обращения: 10.11.2024).
3. Михайлов А.В. Мурманской области запустили самый большой в мире ветропарк // Российская газета. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rg.ru/2023/05/15/po-vole-vetra.html?ysclid=m3ct506hx2141879230> (дата обращения: 10.11.2024).
4. FAQ (часто задаваемые вопросы) // Российская ассоциация возобновляемых источников энергии и электротранспорта. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rawi.ru/services/faq/> (дата обращения: 11.11.2024).
5. Местников Н.П. Особенности эксплуатации солнечных электростанций микромощности в условиях Севера. Часть 1: монография. – Якутск: ООО РИЦ «Офсет» Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2021 – 113 с.

## РАБОТА ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА В ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

**Е.С. Болдушевский, Н.Н. Галашов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова*

Научный руководитель: Н.Н. Галашов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Впрыск пара в камеру сгорания (КС) комбинированных газопаровых установок (КГПУ) позволяет существенно повысить КПД цикла [1, 2] и снизить выброс оксидов азота в атмосферу [3].

Выполненные с помощью программы расчеты тепловых схем КГПУ [4–6], показали, что ввод пара в КС позволяет повысить электрический КПД до 53–57 %.

Применение теплоутилизаторов (ТУ) в КГПУ позволяет устранить основной недостаток впрыска пара – большие выбросы теплоты и пара в окружающую среду.

Теоретические вопросы работы и применения теплоутилизаторов в энергетических установках рассмотрены в [7–9].

В работе [10] рассмотрено применение контактного теплоутилизатора с активной насадкой для отпуска теплоты в системе теплоснабжения. Главным недостатком контактных теплоутилизаторов является нагрев теплоносителя не выше температуры мокрого термометра.

В поверхностных ТУ до температуры точки росы охлаждение дымовых газов происходит в сухой зоне, а ниже – в мокрой. Эти ТУ позволяют нагревать не только однофазные жидкости и газы, но и низкокипящие рабочие тела (НРТ) до температуры перегретого пара, поэтому их можно использовать в Органическом цикле Ренкина (ОЦР) для дополнительной выработки электроэнергии [11].

В работах [12, 13] рассмотрены вопросы эффективности утилизации теплоты дымовых газов парогазовых установок (ПГУ). Особенно эффективно использовать утилизационные ПГУ в регионах с низкой температурой [14], где для конденсации пара выгодно применять воздушные конденсаторы [15].

В данной работе рассмотрена совместная работа поверхностного ТУ с ОЦР. Методика расчета поверхностного ТУ описана в [16]. Свидетельство о регистрации программы расчета ТУ на ЭВМ представлено в [17].

На рис. 1 показаны процессы в ТУ: дымовые газы от температуры  $t_{1ГПС}$  до температуры точки росы  $t_p$  отдают теплоту  $Q_{СУХ}$  теплоносителю в сухой зоне без конденсации влаги с низкой изобарной теплоемкостью, дальше от  $t_p$  до  $t_{2ГПС}$  в мокрой зоне теплота  $Q_{МОК}$  передается теплоносителю при конденсации влаги с высокой изобарной теплоемкостью, что видно по наклону линий. Теплоноситель нагревается в трубках ТУ от температуры  $t_{1Т}$  до температуры  $t'_{2Т}$ , если это жидкость или газ, и до температуры  $t_{2Т}$ , если это НРТ, которое проходит

этапы нагрева жидкости до кипения в экономайзере до точки 4, испарения при температуре насыщения  $t_{sT}$ , соответствующей давлению НРТ, в испарителе до точки 3 и перегрева пара до  $t_{2T}$ . При этом на разницу температур между газами и теплоносителем накладываются ограничения по теплообмену:  $\Delta t_{1-2} > 5 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\Delta t_{5-4} > 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Из рис. 1 видим, что для НРТ температура перегретого пара  $t_{2T}$  может быть значительно выше  $t_p$ , а для однофазного теплоносителя  $t'_{2T}$  не может быть выше температуры мокрого термометра.

На рис. 2 приведена схема включения ТУ в Органический цикл Ренкина. ТУ установлен в нижней части котла-утилизатора (КУ) за экономайзером. Верхняя часть КУ перед ТУ обрешана. Поток газов в состоянии 1 разделяется на две части. Основная часть потока идет на ТУ, а другая часть через шибер (Ш) идет сразу в дымовую трубу для поддержания необходимой температуры газов в трубе. Поток газов, прошедший через ТУ, в состоянии 2 проходит через сепаратор (С) и смешивается с потоком, прошедшим через шибер. В сепараторе из газов отделяется крупнодисперсная влага. В ТУ газы отдают теплоту НРТ, при этом в мокрой зоне из уходящих газов конденсируется часть влаги. Конденсат собирается в нижней части КУ и по линиям 4 и 5 конденсатным насосом КН1 перекачивается на химводоочистку для получения пара, впрыскиваемого в КС.

Полученный в ТУ перегретый пар НРТ по линии 6 идет в хладоновую турбину (ХТ), где вырабатывает механическую мощность, которая в электрическом генераторе (ЭГ) вырабатывает электрическую мощность. Из ХТ пар НРТ по линии 7 поступает в конденсатор (К), где охлаждается потоком воды или воздуха и конденсируется. Конденсат НРТ по линиям 8 и 9 конденсатным насосом КН2 перекачивается в ТУ.

Алгоритм расчета Органического цикла Ренкина подробно рассмотрен в [11].

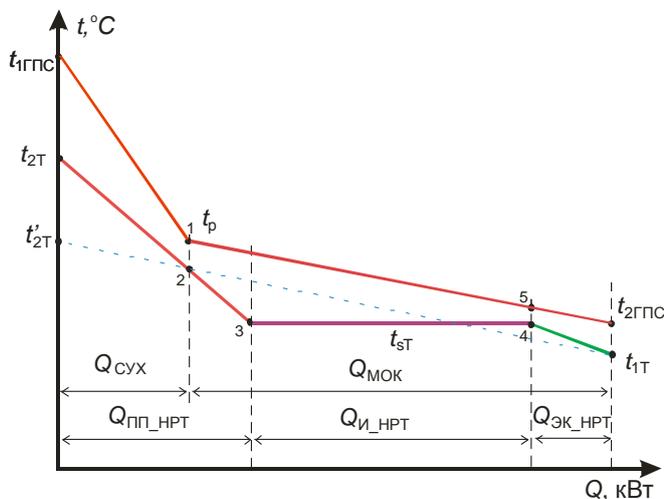


Рис. 1. Процессы в теплоутилизаторе

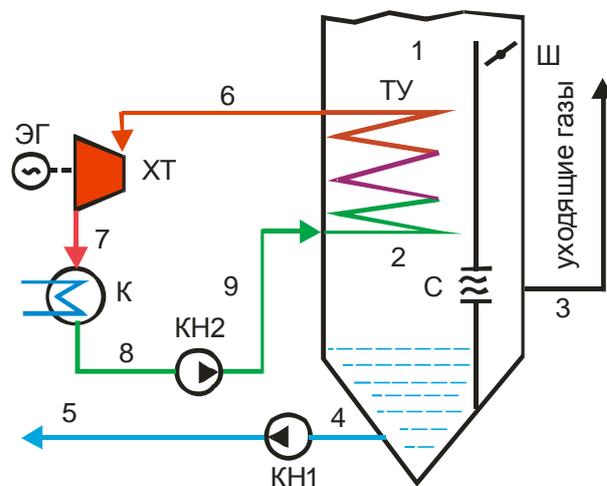


Рис. 2. Схема включения теплоутилизатора в Органический цикл Ренкина

### Заключение

Рассмотрены вопросы работы поверхностного теплоутилизатора и включения его в Органический цикл Ренкина. Установка теплоутилизатора на выходе уходящих газов из котла-утилизатора позволит снизить их температуру ниже температуры точки росы до 40–60  $^\circ\text{C}$ , что существенно сократит тепловые выбросы в атмосферу. Кроме того, из газов будет уловлено большое количество влаги, что сократит выбросы пара в окружающую среду. Уловленная влага после очистки может быть использована для получения пара в котле-утилизаторе для впрыска в камеру сгорания КГПУ.

Получение перегретого пара НРТ в теплоутилизаторе и работа его в Органическом цикле Ренкина позволит выработать дополнительную электроэнергию и повысить КПД цикла КГПУ, в который встроены теплоутилизатор с Органическим циклом Ренкина.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
2. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
3. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
4. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Баннова А.И. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2021. – Т. 332, № 12. – С. 124–135.
5. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Болдушевский Е.С., Минор А.А. Влияние расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 2. – С. 48–59.
6. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Болдушевский Е.С. Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2023. – Т. 334, № 5. – С. 27–36.
7. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
8. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
9. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsibulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
10. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Беспалов В.В., Минор А.А., Болдушевский Е.С. Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 5. – С. 43–55.
11. Research of efficiency of the Organic Rankine cycle on a mathematical model / N. Galashov, S. Tsibulskiy, A. Gabdullina, D. Melnikov, A. Kiselev // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01070–01073.
12. Promising direction of perfection of the utilization combine cycle gas turbine units / A.I. Gabdullina, N.N. Galashov, S.A. Tsibulskiy, D.V. Melnikov, I.A. Asanov, A.S. Kiselev // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2016. – P. 01004–01008.
13. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Тепловая эффективность утилизационных ПГУ тройного цикла / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2014. – № 10(999). – С. 11–15.
14. Numerical research of steam and gas plant efficiency of triple cycle for extreme north regions / N. Galashov, S. Tsibulskii, A. Matveev, V. Masjuk // EPJ Web of Conferences. – Tomsk, 2016. – P. 01019–01022.
15. Numerical analysis of the condensation characteristics of different heat-transfer media in an air-cooled condenser / N.N. Galashov, S.A. Tsibul'ski // Power Technology and Engineering. – 2016. – Т.49. – № 5. – P. 365–370.
16. Болдушевский Е.С., Туболев А.А., Галашов Н.Н. Алгоритм расчета поверхностного теплоутилизатора // Бутаковские чтения. Сборник статей III Всероссийской с международным участием молодежной конференции. – Томск, – 2023. – С. 486–490.
17. Галашов Н.Н., Болдушевский Е.С. Расчет конденсационного утилизатора теплоты и влаги из уходящих газов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024664217, заявка 18.06.2024.

## DEVELOPMENT OF A COMBINED CONTROL SYSTEM OF THE ULTRAFILTRATION PROCESS FOR THE SEPARATION OF AMERICIUM AND CURIUM

O.P. Ojo

*Tomsk Polytechnic University, A2-43i Group*

Supervisor: I.S. Nadezhdin, Associate Professor, Department of Nuclear Fuel Cycle (IATES)

### Ultrafiltration for Radionuclide Separation: An Overview

Ultrafiltration utilizes a semi-permeable membrane to separate particles. The process commonly employs crossflow filtration, where the liquid flows parallel to the membrane, minimizing fouling and allowing for continuous processing.

Ultrafiltration is cost-effective and efficient, enabling high permeate quality and waste volume reduction.

Radionuclide Separation with Ultrafiltration leverages the fact that actinide wastes often exist as colloids in radioactive waste streams. These colloids, along with suspended solids and high molecular weight organic molecules, are effectively rejected by the ultrafiltration membrane, concentrating them in the retentate stream.

Dissolved radionuclides can be pre-treated through complexing, forming larger particles that are subsequently separated by the membrane.

### Neural Network Model

Neural networks are mathematical models that use learning algorithms inspired by the brain to store information. Similar to the brain, neural networks are built up of many neurons with many connections between them.

Neural networks are designed to learn from data and can be trained to perform a wide range of tasks, such as recognizing patterns, making predictions, and classifying data. They are particularly useful for tasks that are too complex or too vast for humans to perform manually and can be used in a variety of fields, including image and speech recognition, natural language processing, and predictive modeling.

By integrating a neural network model, the efficiency of the UF process is enhanced, allowing precise predictions and adaptive control.

### Technological Variables of the Ultrafiltration Process

Technological variables can be described as the different factors that affect the outcome of the separation process. They can be divided into input and output variables. Input variables are the factors that can be controlled or adjusted before or during the process while output variables are the measurable results of the process.

In constructing an Artificial Neural Network (ANN) tailored for ultrafiltration processes for the separation of radionuclides, a holistic consideration of input variables is essential. Membrane properties, including pore size and surface charge, alongside operational factors such as feed flow rate, feed concentration, pH of the feed solution, temperature, feed pressure, and membrane surface area, stand out as pivotal contributors to the process's performance

Table 1. Optimization procedures for the neural network model

Optimization Strategy	Description	Potential Benefits
Data Expansion	Increase the size and diversity of the training dataset. Include data on various pollutant types, concentrations, operational conditions (temperatures, pressures), and membrane properties	Enhances model robustness, accuracy, and generalizability. Reduces the risk of overfitting
Architecture Tuning	Experiment with different: Numbers of hidden layers and neurons. Activation functions (e.g., ReLU, sigmoid)	Fine-tunes the model's complexity and learning capabilities. Improves prediction accuracy
Training Algorithm Selection	Explore alternative training algorithms (e.g., gradient descent, Levenberg-Marquardt) and adjust learning rates, momentum, and other hyperparameters	Optimizes the model's learning process. May lead to faster convergence and improved accuracy
Loss Index and Regularization	Consider different loss functions (e.g., mean absolute error, Huber loss) and regularization techniques (e.g., L1, L2) to prevent overfitting and improve generalization	Enhances model stability and predictive performance on unseen data
Incorporating Membrane Properties	Include membrane characteristics (material, pore size, hydrophobicity, etc.) as input variable.	Improves predictive power across different membrane types. Enables optimization of membrane design for radioactive wastewater treatment

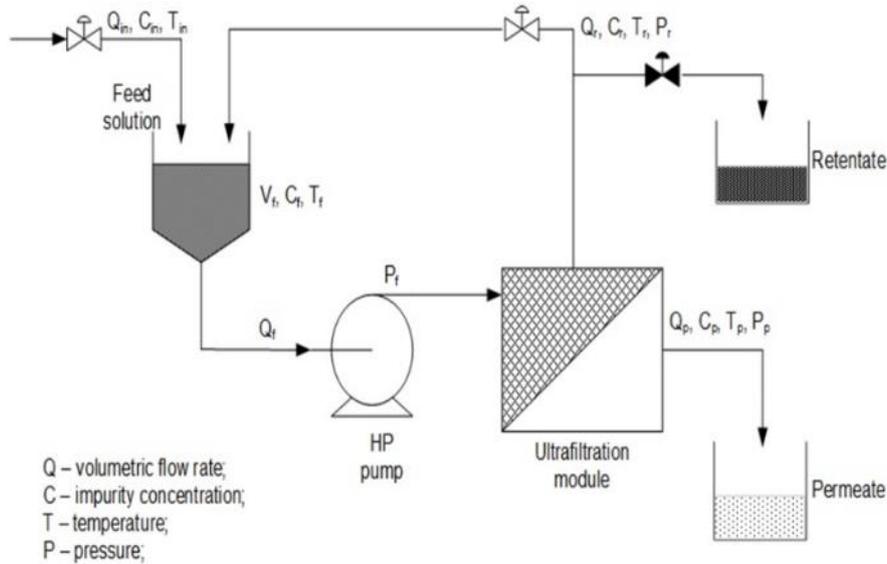


Fig. 1. Schematic diagram of the UF process

## Mathematical Modeling of the Ultrafiltration Process

Conservation of mass

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \sum_{i:\text{inlet}} \rho_i F_i - \sum_{j:\text{outlet}} \rho_j F_j; \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rate of accumulation} \\ \text{of mass in the tank} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{mass in} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{rate of} \\ \text{mass out} \end{array} \right\}.$$

$$\frac{d(C_s V)}{dt} = Q_i C_{s\text{in}} - Q C_s;$$

$$\frac{d(CV)}{dt} = Q_{in} + Q_r - Q_f;$$

$$\frac{dC_{in} V}{dt} = C_{in} Q_{in} - C_p Q_p;$$

$$C_{in} \frac{dV}{dt} + V \frac{dC_{in}}{dt} = C_{in} Q_{in} - C_p Q_p. \quad (2)$$

## REFERENCES

1. Dragoi E.N., Vasseghian Y. Modeling of mass transfer in vacuum membrane distillation process for radioactive wastewater treatment using artificial neural networks. *Toxin Reviews*. – 2021. – V. 40(4). – P. 1526–1535. <https://doi.org/10.1080/15569543.2020.1744659>
2. Ahmad A.L., Chong M.F., Bhatia S. Ultrafiltration modeling of multiple solutes system for continuous cross-flow process. *Chemical Engineering Science*. – 2006. – V. 61(15). – P. 5057–5069. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2006.03.017>
3. Asbi B.A., Cheryan M. Optimizing process time for ultrafiltration and diafiltration. *Desalination*. – 1992. – V. 6(1). – P. 49–62. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(92\)80023-3](https://doi.org/10.1016/0011-9164(92)80023-3)
4. Avula X.J.R. Mathematical Modeling. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. – 2003. – P. 219–230. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00411-7>
5. Bowen W.R., Jenner F. Theoretical descriptions of membrane filtration of colloids and fine particles: An assessment and review. *Advances in Colloid and Interface Science*. – 1995. – V. 56(C). – P. 141–200. [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(94\)00232-2](https://doi.org/10.1016/0001-8686(94)00232-2)
6. Dobre T., Zicman L.R., Părvulescu O.C., Neacșu E., Ciobanu C., Drăgolici F.N. Species removal from aqueous radioactive waste by deep-bed filtration. *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 241. – P. 303–310. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2018.05.065>
7. Drioli E., Bellucci F. Concentration polarization and solute-membrane interactions affecting pressure driven membrane processes. *Desalination*. – 1978. – V. 26(1). – P. 17–36. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84125-9](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84125-9)

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА КРЫШАХ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

А.Н. Давлатзода<sup>1</sup>, Б.В. Худоназаров<sup>2</sup>, Д.С. Силемонов<sup>3</sup>

*Институт энергетики Таджикистана,*

*<sup>1</sup> аспирант ИЭТ, <sup>2</sup> бакалавр, группа 430105-05, <sup>3</sup> магистрант ИЭТ, группа 430105-05*

Научный руководитель: И.Б. Махсумов, к.т.н., зав. кафедрой АИЭ, ИЭТ

### Введение

Современное общество сталкивается с рядом глобальных вызовов, связанных с экологической устойчивостью и переходом к использованию возобновляемых источников энергии. Одной из наиболее перспективных и доступных технологий для достижения этих целей является использование солнечной энергии, и особенно – установка солнечных панелей на крышах зданий. В последние десятилетия наблюдается резкий рост интереса к солнечной энергетике, особенно в урбанизированных районах, где ограниченные площади для размещения солнечных электростанций делают использование крыш наиболее эффективным вариантом для установки солнечных панелей [1].

Солнечные панели на крышах зданий позволяют значительно снизить потребление электроэнергии из традиционных источников, таких как уголь и газ, что способствует сокращению выбросов углекислого газа в атмосферу и уменьшению негативного воздействия на окружающую среду. Это особенно важно в условиях стремительного роста населения в городах и возрастающих потребностей в энергии. По данным исследований, переход к возобновляемым источникам энергии, таким как солнечная, может сыграть ключевую роль в достижении целей по снижению выбросов парниковых газов и поддержке климатической нейтральности городов к 2050 году [2].

Тем не менее, несмотря на многочисленные преимущества, солнечные панели на крышах сталкиваются с рядом технических, экономических и экологических ограничений. Одним из основных факторов, влияющих на эффективность таких установок, является затенение от соседних зданий, деревьев или других объектов, которое может значительно снизить их энергетическую производительность. К тому же, урбанизация влияет на доступность солнечного света для отдельных крыш, особенно в густонаселенных районах с высокими зданиями. Эти проблемы требуют детального анализа и поиска оптимальных решений для повышения эффективности солнечных панелей в условиях городской застройки [3].

Цель данной статьи – провести всесторонний анализ эффективности установки солнечных панелей на крышах в городских условиях, учитывать влияние затенения, архитектурные особенности и климатические условия, а также рассмотреть возможности оптимизации таких систем для достижения максимальной энергетической и экономической выгоды. В статье также анализируются примеры успешного применения солнечных панелей в различных странах и регионах, что позволяет выявить лучшие практики и рекомендации для внедрения этой технологии в условиях урбанизированных территорий. Таким образом, установка солнечных панелей на крышах является не только важным шагом на пути к устойчивому развитию городов, но и основным элементом энергетической стратегии для многих урбанизированных территорий. Внедрение инновационных решений и оптимизация проектирования солнечных установок помогут повысить их эффективность и снизить затраты на внедрение этой технологии, что сделает ее доступной для широкой массы потребителей.

## Преимущества использования солнечных панелей на крышах в городе

Одним из главных преимуществ установки солнечных панелей на крышах является возможность использования свободного пространства, которое иначе остаётся неиспользованным. В условиях города, где каждый квадратный метр ценен, крыши зданий представляют собой идеальное место для размещения солнечных установок. Использование солнечных панелей на крышах зданий имеет ряд преимуществ, что делает их одним из наиболее оптимальных решений для генерации возобновляемой энергии в городах. Рассмотрим основные из них:

Преимущества использования солнечных панелей на крышах:

- *Экономия пространства:* использование крыш помогает избежать необходимости выделения больших территорий для солнечных электростанций. Крыши зданий представляют собой большие, неиспользуемые площади, которые можно эффективно задействовать для размещения солнечных панелей [4].

- *Снижение нагрузки на электросети:* использование солнечных панелей снижает потребность в электроэнергии из традиционных источников, уменьшая нагрузку на городские электросети.

- *Уменьшение теплового воздействия:* солнечные панели могут снижать температуру крыш, что уменьшает эффект «городского теплового острова».

- *Снижение затрат на электроэнергию:* жильцы домов с солнечными панелями могут значительно сократить свои расходы на электричество.

- *Влияние на экологию:* использование солнечных панелей снижает зависимость от традиционных источников энергии, таких как уголь или газ, что уменьшает выбросы парниковых газов.

- *Экологическая выгода:* солнечные панели помогают снизить углеродный след и уменьшить выбросы парниковых газов, что особенно важно для экологически неблагоприятных городских зон.

- *Экономическая выгода:* благодаря государственной поддержке и субсидиям, затраты на установку панелей могут быстро окупиться за счёт снижения расходов на электричество [5].

Влияние городской застройки на эффективность солнечных панелей

Несмотря на очевидные преимущества, городская застройка создаёт определённые трудности для эффективного использования солнечных панелей. Основными факторами, влияющими на производительность панелей в городах, являются:

**Затенение:** в плотной застройке высокие здания и другие объекты могут создавать тени, что значительно снижает количество солнечного света, попадающего на панели. Затенённые панели теряют производительность, и это может отрицательно сказаться на общей эффективности системы. Затенение может уменьшить выработку энергии до 40 % [5]. На рис. 1 показано влияние затенения от соседних зданий на производительность солнечных панелей.

**Ограниченное пространство:** не все крыши подходят для установки солнечных панелей из-за ограниченной площади или сложной архитектуры. Это снижает возможности для масштабного размещения солнечных установок [6].



Рис. 1. Демонстрация влияния затенения от соседних зданий на эффективность работы солнечных панелей на крыше здания в городской застройке

Загрязнение воздуха: в крупных городах воздух может быть загрязнён частицами пыли и выхлопных газов, что снижает прозрачность атмосферы и уменьшает количество солнечного света, доходящего до поверхности панелей.

Угол наклона и ориентация крыши: это два ключевых параметра, которые сильно влияют на эффективность солнечных панелей при преобразовании солнечной энергии в электричество. Оптимальный угол наклона солнечных панелей зависит от географического положения и времени года. В южных регионах Республики Таджикистан угол наклона, близкий к широте местности (примерно  $30^{\circ}$ – $40^{\circ}$ ), обычно считается простирающимся для круглогодичной работы. Более крутой угол наклона лучше подходит для зимних месяцев, когда солнце стоит ниже горизонта, тогда как более пологий угол максимизирует выработку энергии летом, когда солнце находится выше. Для максимальной эффективности солнечные панели должны быть установлены под определённым углом ( $30^{\circ}$ – $40^{\circ}$ ) и направлены на юг (в северном полушарии) [6]. В табл. 1 приведены факторы, влиявшие на неэффективность крышных солнечных панелей.

Таблица 1. Факторы, влиявшие на эффективность крышных солнечных панелей и их описания

Фактор	Описание	Влияние на эффективность
Затенение	Тени от соседних зданий, деревьев или других объектов	Снижение эффективности до 40 %
Ограниченное пространство	Небольшие крыши, не позволяющие установить достаточное количество панелей	Сокращение возможной площади установки
Загрязнение воздуха	Пыль и выхлопные газы, уменьшающие количество солнечного света	Снижение эффективности на 10–15 %
Угол наклона и ориентация крыши	Неправильный угол наклона или ориентация крыши могут снизить выработку энергии	Потери до 20 %
Климатические особенности	Частые облачные дни или недостаточное количество солнечных часов в году	Снижение эффективности до 30 %

### Экономическая и экологическая выгода и окупаемость

Инвестиции в солнечные панели на крышах могут окупиться за счёт экономии на электроэнергии и возможных субсидий от государства. Несмотря на то, что первоначальные затраты на установку могут быть высокими, снижение счетов за электричество в долгосрочной перспективе может значительно улучшить экономическую рентабельность такого проекта. Окупаемость солнечных панелей зависит от ряда факторов, включая стоимость электроэнергии в регионе, климатические условия и уровень солнечной активности.

Примеры успешных проектов по установке солнечных панелей на крышах в крупных городах показывают, что в правильных условиях это решение может стать не только экологически, но и экономически выгодным.

Экономическая выгода от установки солнечных панелей на крышах зданий в городской среде может быть значительной. Вложения окупаются через 7–10 лет, при этом экономия на счетах за электроэнергию может достигать \$300–\$800 в год в зависимости от региона и уровня солнечной активности. Дополнительно, государственные субсидии и программы поддержки могут покрыть до 30 % от стоимости установки [6, 7]. На табл. 2 приведены основные показатели экономической выгоды.

Таблица 2. Показатели экономической выгоды и окупаемости от использования крышных солнечных панелей

Показатель	Значение
Средняя стоимость установки (за 1 кВт)	\$1,500–\$2,500
Средний срок окупаемости	7–10 лет
Экономия на электроэнергии в год	\$300–\$800 в зависимости от региона
Государственные субсидии и льготы	20–30 % от стоимости проекта

Солнечные панели на крышах зданий представляют собой одно из самых перспективных решений для генерации возобновляемой энергии в городской среде. Установка солнечных панелей на крышах зданий в условиях городской застройки может быть эффективным решением для получения чистой энергии и снижения нагрузки на традиционные энергосистемы. Несмотря на существующие проблемы, такие как затенение и ограниченное пространство, современные технологии и правильные подходы к установке позволяют значительно повысить производительность солнечных панелей. В перспективе использование солнечной энергии в городах будет только расти, что положительно скажется на экологии и энергосбережении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations (UN). World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization. – Nairobi: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat), 2020. – 252 с.
2. Kumar A., Garg S. Effect of shading on the performance of photovoltaic modules in urban environments // Energy Reports. – 2017. – Т. 3. – С. 155–162. DOI: 10.1016/j.egy.2017.04.008.
3. Razzak M.M.A., Li J., Liu C. Performance and optimization of urban rooftop solar panels: A case study // Renewable Energy. – 2020. – Т. 149. – С. 774–786. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.008.
4. Bian J., Zhang L., Liu S. Impact of urban morphology on the efficiency of solar photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Т. 135. – С. 110195. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110195.
5. Aronescu A., Appelbaum J. Shading on Photovoltaic Collectors on Rooftops // Applied Sciences. – 2020. – Т. 10, № 8. – С. 2977. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10082977>.
6. Kapsalis V., Karamanis, D., Vardoulakis E. Simulation of the cooling effect of the roof-added photovoltaic panels // Advances in Building Energy Research. – 2014. – Т. 8, № 1. – С. 41–54. DOI: 10.1080/17512549.2014.890534.
7. Li W., Li Y., Shah K.W. A materials perspective on radiative cooling structures for buildings // Solar Energy. – 2020. – Т. 207. – С. 247–269. DOI: 10.1016/j.solener.2020.06.095.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА CATERPILLAR 3516DITA ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУХОМ

**В.О. Хажакян**

*Ступинский филиал Московского авиационного института  
(национальный исследовательский университет), группа ТСО-403Б-21*

Научный руководитель: С. В. Бабин, к.т.н., доцент СФ ФГБОУ ВО МАИ (НИУ)

Современные производственные процессы и хранение товаров требуют эффективных систем климат-контроля, обеспечивающих оптимальные условия для работы оборудования и сохранности продукции. Атмосферный воздух, обладая низкой температурой, может стать эффективным средством для поддержания комфортного микроклимата внутри зданий, особенно в зимний период. Данная концепция не только способствует снижению потребления электроэнергии, но и позволяет использовать естественные ресурсы, что делает её более устойчивой и экологически чистой.

Цель данного исследования заключается в анализе возможностей применения атмосферного воздуха в качестве охладителя, а также в оценке его эффективности по сравнению с традиционными системами. Была поставлена задача рассчитать суммарную мощность, отбираемую холодным воздухом от воды в теплообменных аппаратах систем охлаждения дизельного мотор-генератора. Расчёты произведены для системы охлаждения дизельного генератора Caterpillar 3516 DITA [1, 2].

Таблица 10. Исходные данные

Тип данных	Обозначение	Значение
Тепловая мощность, отводимая охлаждающей водой из рубашки охлаждения двигателя (Heat Rejection to Jacket Water (total))	$Q_1$	670 кВт
Расход воды в системе охлаждения	$G_b$	75 м <sup>3</sup> /ч
Температура воды на входе в охладитель	$T_{вх}$	93 °С
Температура воды на выходе из охладителя	$T_{вых}$	83 °С
Тепловая мощность, отводимая охлаждающей водой с помощью дополнительного охладителя (Heat Rejection to Aftercooler)	$Q_2$	270 кВт
Расход воды в системе охлаждения дополнительного охладителя	$G_b$	26 м <sup>3</sup> /ч
Температура воды на входе в охладитель	$T_{вх}$	71 °С
Температура воды на выходе из охладителя	$T_{вых}$	60 °С
Температура воздуха окружающей среды используемого для охлаждения мотор-генератора	$T_{окр.возд}$	42 °С
Температура холодного атмосферного воздуха, используемого для охлаждения воды холодильника, изменяется в пределах		(–5 ... –20) °С

Рассчитаем мощность, отбираемую системой охлаждения из рубашки охлаждения двигателя. Оценить тепло, отбираемое охлаждающей водой от двигателя можно по формуле:

$$Q = C_b \cdot G_b \cdot (\Delta T), \quad (1)$$

где  $Q$  – отводимая тепловая мощность;  $C_b$  – теплоемкость воды;  $G_b$  – массовый расход воды (объемный расход, умноженный на плотность воды и разделенный на 3600 сек [кг/с]);  $\Delta T$  – разность температур на входе и на выходе из теплообменника.

$$Q = 4196 \cdot (75 \cdot 1000/3600) \cdot (93 - 83) = 874166,7 \text{ Вт.}$$

По паспортным данным эта величина составляет 670 кВт, для дополнительного теплообменника по расчётам – 333348,9 Вт, по паспорту – 270 кВт. В расчете используем и паспортное и теоретическое значение  $Q$ , полученное расчётным способом по формуле (1), для сравнения.

Процесс теплопередачи от охлаждаемой воды холодному воздуху описывается следующим уравнением:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta T. \quad (2)$$

Неизвестными являются коэффициент теплопередачи  $K$  и площадь теплообменника  $F$ . Оценить данные параметры полностью теоретическим путем не представляется возможным из-за недостатка данных.

Предлагается использовать формулу (2) и исходные данные для процесса передачи тепла от горячей воды в системе охлаждения мотора генератора к воздуху окружающей среды. Из формулы (2) можно определить произведение  $K \cdot F$ .

Параметры воздуха при изменении температуры от –20 до 42 °С меняются не существенно, так как воздух находится в состоянии далеко от конденсации, поэтому множитель  $K \cdot F$ , полученный для температуры 42 °С, можно распространить и на отрицательные температуры. Таким образом, получаем:

$$K \cdot F = Q / \Delta T, \quad (3)$$

где  $\Delta T$  – средний перепад температур в теплообменнике

$$\Delta T = T_{вх} + T_{вых} - T'_{вх} + T'_{вых}. \quad (4)$$

Значение температуры воздуха на выходе из теплообменника  $T'_{вых}$  можно оценить, зная расход воздуха  $G$  через теплообменник. Для оценки расхода воздуха воспользуемся извест-

ной мощностью вентилятора, предназначенного для принудительной продувки воздуха через теплообменник и диаметром проходного сечения вентилятора:

$$N = (G \cdot V_2)/2, \quad (5)$$

где  $N$  – мощность электродвигателя вентилятора;  $V$  – скорость воздуха через теплообменник;  $G$  – расход воздуха через теплообменник.

В данном случае неизвестными являются два параметра  $V$  и  $G$ . Данная задача решалась на ЭВМ методом последовательных приближений, при этом предварительно задавалась скорость потока воздуха. В результате расчетов получено для вентилятора диаметром  $D = 1$  м расход воздуха  $G$  составляет 12,8 кг/с, для вентилятора диаметром  $D = 0,85$  м  $G = 10,21$  кг/с.

Расход воздуха умножается на количество вентиляторов в системе. Это соответственно составляет:

- для основной системы –  $G_1 = 12,8 \cdot 2 = 25,6$  кг/с,
- для дополнительной –  $G_2 = 10,21 \cdot 3 = 30,63$  кг/с.

Температура воздуха на выходе из теплообменника оценивается по формуле

$$Q_1 = G_1 \cdot (i_1 - i_2), \quad (6)$$

где  $i_1$  – энтальпия воздуха на входе в вентилятор (при температуре воздуха 42 °С);  $i_2$  – энтальпия воздуха на выходе из вентилятора.

Нахождение  $i_2$  позволяет определить температуру воздуха.

$$i_2 = (Q_1 + i_1 \cdot G_1)/G_1. \quad (7)$$

В результате расчета получены следующие данные:

Таблица 11. Расчётные данные

Параметр	Для Q <sub>1</sub>	Для Q <sub>2</sub>
Энтальпия воздуха после нагрева	341	323
T воздуха на выходе из теплообменника, °С	68	51

В результате средний перепад температур в теплообменнике основной системы охлаждения при теплопередаче от горячей воды к воздуху определится как

$$\Delta T = \frac{93 + 83}{2} - \frac{42 + 68}{2} = 330 \text{ °С},$$

а в системе дополнительного охладителя

$$\Delta T = \frac{71 + 60}{2} - \frac{42 + 51}{2} = 190 \text{ °С}.$$

Произведение  $K \cdot F$  для основного и дополнительного теплообменников, рассчитанное по формуле (3) соответственно составит

$$K \cdot F_1 = 26489,9;$$

$$K \cdot F_2 = 17544,68.$$

Мощность охлаждения воды теплообменниками системы охлаждения двигателя генератора оценивается по формуле

$$N = K \cdot F \cdot \Delta T_{\text{ср}} \quad (8)$$

или

$$N = K \cdot F \cdot [(T_{\text{потр}} + T_{\text{хол}})/2 - (T_{\text{окр.возд.}} + T_{\text{окр.возд.}} + 2)/2], \quad (9)$$

где  $T_{\text{потр}}$  – температура воды после потребителя (7 °С);  $T_{\text{хол}}$  – температура воды после холодильника (7 °С);  $T_{\text{окр. возд.}}$  – температура воздуха в окружающей среде.

В результате расчетов по данным формулам получено:

Таблица 12. Мощность охлаждения воды основной системой охлаждения

$T_{\text{окр. воздуха, °C}}$	Мощность охлаждения, Вт
-50	225164,1
-100	357613,6
-150	490063,1
-200	622512,6

Таблица 13. Мощность охлаждения воды дополнительной системой охлаждения

$T_{\text{окр. воздуха, °C}}$	Мощность охлаждения, Вт
-50	149129,8
-100	236853,2
-150	324576,5
-200	412299,9

Таблица 14. Суммарная мощность охлаждения воды системами охлаждения

$T_{\text{окр. воздуха, °C}}$	Мощность охлаждения, кВт
-50	374
-100	595
-150	815
-200	1035

Таблица 15. Параметры, рассчитанные для мощностей, отводимых охлаждающей водой по паспорту агрегата при  $Q_1 = 670$  кВт,  $Q_2 = 270$  кВт

$T_{\text{окр. воздуха, °C}}$	Мощность охлаждения, кВт
-50	293
-100	466
-150	638
-200	811

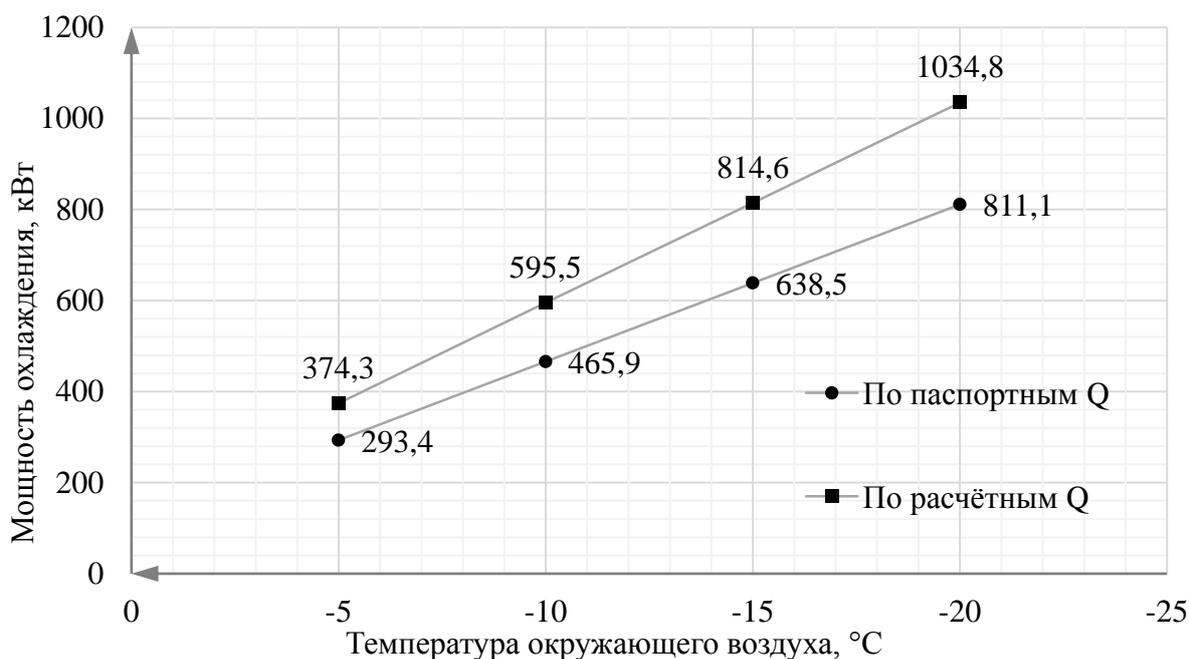


Рис. 1. Суммарная мощность охлаждения воды

Таким образом, использование атмосферного воздуха в холодное время года действительно является доступным способом охлаждения, позволяющим «разгрузить» охлаждающие системы и сделать процесс более экологичным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 318 с.
2. Cat® 3516 Industrial Diesel Engine Industrial // Pon-Cat. 2024. – URL: <https://www.pon-cat.com/en-no/pon-power/produkter/industrial-engines/industrial-diesel-engines-lesser-regulated-non-regulated/cat-3516> (дата обращения 08.11.2024).

## СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЕ ОБЪЕКТОВ МИКРОГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ФЭП НА НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Д.К. Кугучева

Калининградский государственный технический университет

Научный руководитель: М.С. Харитонов, к.т.н., доцент кафедры энергетики, КГТУ

Возобновляемые источники энергии являются перспективным направлением развития энергетической отрасли, что доказывается непрерывным сокращением потребления традиционных углеводородов и ежегодным увеличением доли возобновляемых источников энергии. Прогнозируется, что к 2028 году на долю ВИЭ придется более 42 % мирового производства электроэнергии (на 2023 год – 26 %) [1].

Правительством Российской Федерации поставлены цели по достижению углеродной нейтральности к 2060 году. Одним из ключевых направлений для реализации этой цели является увеличение доли ВИЭ-генерации в энергобалансе страны. Согласно [2], бытовой сектор является значительным потребителем электроэнергии (табл. 1), поэтому одним из показателей достижения углеродной нейтральности к 2060 году является снижение влияния бытовой нагрузки на энергобаланс страны путем внедрения собственной генерации на базе ВИЭ (развитие отрасли микрогенерации). Согласно [3], общее количество заключенных договоров на подключение объектов микрогенерации за 2023 год выросло в 8 раз с 2021 года, когда рынок микрогенерации в России только начал развиваться (рис. 1).

Таблица 1. Потребление электроэнергии бытовым сектором в различных регионах РФ, в процентах от общего энергопотребления регионом

Регион	Потребление, %	Регион	Потребление, %
Калининградская область	30,51	Республика Дагестан	41,32
Псковская область	32,62	Чеченская Республика	35,52
Республика Крым	36	Приморский край	29,3
Краснодарский край	28,7	Ивановская область	26,46

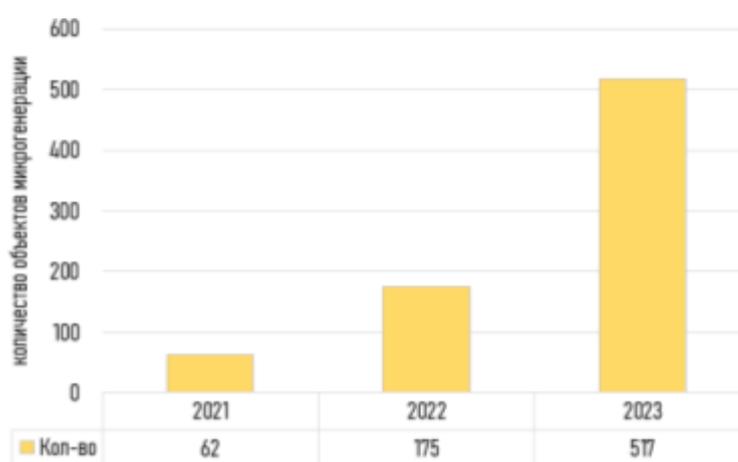


Рис. 1. Статистика развития микрогенерации в России за 2021-2023 гг.

Согласно [4, 5], объекты микрогенерации оказывают серьезное воздействие на некоторые показатели качества электроэнергии. В свете стремительного роста развития данного молодого сектора энергетики требуется уделить большое внимание средствам снижения негативного влияния объектов микрогенерации на показатели качества электроэнергии, поскольку

несоблюдение нормативных требований, установленных в ГОСТ 32144-2013, по отклонению напряжения и несимметрии напряжений может привести к снижению эффективности работы оборудования, преждевременному его износу, увеличению потерь электроэнергии, а также аварийным ситуациям.

Для решения данных проблем предлагается внедрение системы повышения качественных характеристик распределительных электрических сетей низкого напряжения с объектами микрогенерации на базе ФЭП, которая направлена на минимизацию отклонений напряжения от допустимых пределов и снижение несимметрии напряжений. Данная система представляет собой:

- Систему позиционирования, функционирующей в двух режимах: режим максимизации приходящего на поверхность ФЭП количества солнечного излучения путем ориентации ФЭП по направлению солнца и режим снижения количества приходящего на поверхность ФЭП излучения путем отворота ФЭП в противоположную от солнца сторону.
- Устройство симметрирования, подключенное к выходу однофазного инвертора и осуществляющее переключение генерирующего объекта между фазами.

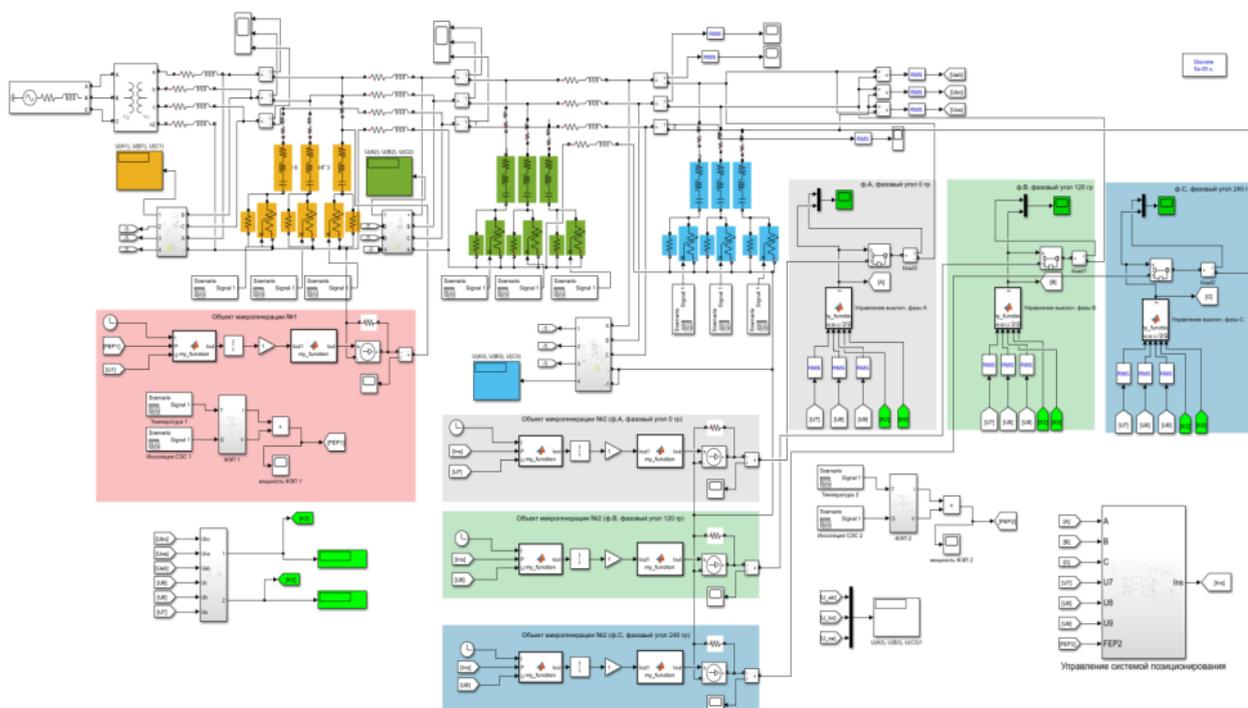


Рис. 2. Математическая модель, построенная в ПК Matlab/Simulink участка распределительной электрической сети низкого напряжения с объектами микрогенерации на базе ФЭП и с системой повышения качественных характеристик распределительных электрических сетей низкого напряжения

Математическая модель разработанной системы представлена на рис. 2. Результаты моделирования тестового участка сети без системы повышения качественных характеристик распределительных электрических сетей низкого напряжения с объектами микрогенерации на базе ФЭП и с данной системой представлена на рис. 3.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что внедрение объектов микрогенерации может привести к ухудшению показателей качества электроэнергии, связанных с несимметрией напряжений и положительным отклонением напряжения. Внедрение системы повышения качественных характеристик распределительных электрических сетей низкого напряжения с объектами микрогенерации на базе ФЭП позволяет снизить данное негативное влияние.

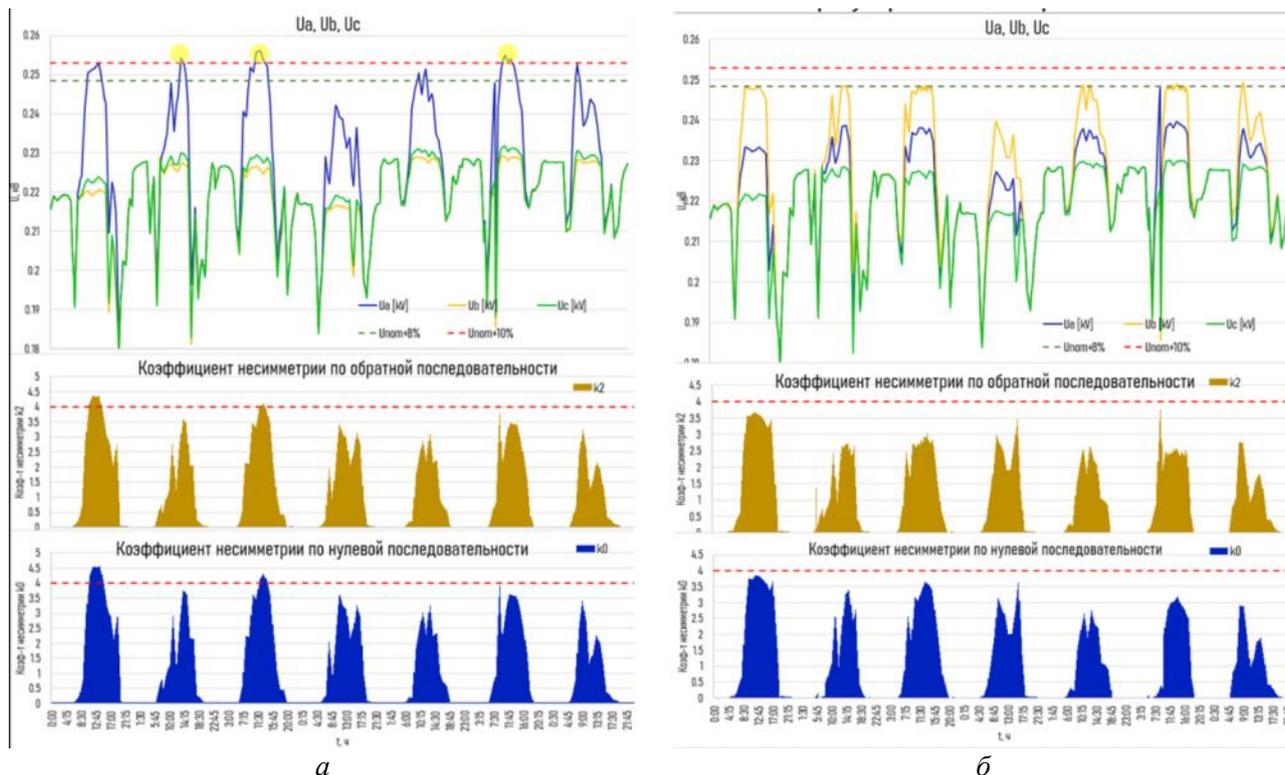


Рис. 3. Результаты моделирования некоторых режимных параметров сети при внедрении объектов микрогенерации: а – без системы повышения качественных характеристик распределительных электрических сетей низкого напряжения; б – с системой повышения качественных характеристик распределительных электрических сетей низкого напряжения

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewables share of total energy supply [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (дата обращения 13.11.2024).
2. ЕМИСС. Государственная статистика. Потребление электроэнергии в Российской Федерации [Электронный ресурс]. – URL: <https://fedstat.ru/indicator/43277> (дата обращения 10.05.2024).
3. Рынок возобновляемой энергетики России: текущий статус и перспективы развития (АРВЭ) [Электронный ресурс]. – URL: [https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065blilscovlumxq02gqvkcx/202408\\_RREDA\\_annual\\_RES\\_report.pdf](https://rreda.ru/upload/iblock/c86/ck53fh9u065blilscovlumxq02gqvkcx/202408_RREDA_annual_RES_report.pdf) (дата обращения 13.11.2024).
4. Харитонов М.С., Кугучева Д.К. Исследование влияния объектов микрогенерации на уровень напряжения в электрических сетях низкого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2024. – № 1(82). – С. 34–43.
5. Кугучева Д.К. Оценка эффективности регулирования выходной мощности фотоэлектрических преобразователей для повышения качества электроэнергии // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2024. – № 1(100). – С. 31–43. – DOI 10.37493/2307-907X.2024.1.3.

## **ВЛИЯНИЕ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ: ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВЫХ ГОРОДОВ**

**М.Д. Павлов**

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-14*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент АлтГТУ

### **Введение**

С ростом населения городов и увеличением энергетических потребностей необходимо искать способы уменьшения энергозатрат. Городская инфраструктура, включая жилищную, транспортную, коммерческую и общественную сферу, играет ключевую роль в определении уровня потребления энергии. Рассмотрение современных подходов к проектированию городов может стать базисом для создания наиболее устойчивых и энергоэффективных урбанистических систем.

### **Влияние городской инфраструктуры на потребление энергии**

#### **1. Транспортная инфраструктура**

Городское планирование, направленное на интеграцию общественного транспорта и велосипедной инфраструктуры, позволяет значительно снизить зависимость от личных автомобилей, а следовательно уменьшает энергозатраты. Примеры успешных городов, внедривших такие системы, показывают снижение выбросов углерода и потребления энергии.

#### **2. Жилищная инфраструктура**

Энергоэффективность жилых зданий напрямую связана с их проектированием и строительством. Использование современных технологий, таких как пассивное солнечное отопление, вентиляция с рекуперацией и умные энергосистемы, позволяет значительно снизить потребление энергии.

#### **3. Коммерческая инфраструктура**

Энергоэффективные технологии, такие как LED-освещение, системы управления освещением и энергией также могут быть использованы в коммерческих зданиях, что делает возможным снизить потребление энергии и затраты на электроэнергию.

#### **4. Общественная инфраструктура**

Обеспечение зеленых площадей, устойчивых водных систем и эффективного управления отходами способствует созданию более здоровой городской среды и снижению общего энергопотребления.

### **Подходы к проектированию устойчивых городов**

#### **1. Интеграция зелёной инфраструктуры**

Адаптация природных экосистем в городское планирование может колоссально улучшить энергоэффективность. На примере таких технологий, как зеленые крыши и стенки, можно увидеть, как они уменьшают необходимое количество энергии для отопления и охлаждения зданий.

#### **2. Создание многофункциональных зон**

Многофункциональные зоны, в которых жилые и коммерческие пространства взаимосвязаны и доступны, снижают до минимума необходимость в длительных поездках, тем самым снижая общее потребление энергии.

#### **3. Умные технологии**

Использование IT и умных технологий для мониторинга и управления энергопотреблением в реальном времени позволяет городам оптимизировать использование ресурсов.

## Заключение

Городская инфраструктура играет главную роль в определении уровня потребления энергии. Внедрение устойчивых подходов к проектированию городов и инфраструктуры может заметно повысить энергосбережение и снизить негативные последствия для окружающей среды. Наиболее эффективные стратегии включают интеграцию зелёной инфраструктуры, создание многофункциональных зон и использование умных технологий. Будучи осведомлёнными о важности нашего влияния, необходимо стремиться к созданию более устойчивых, энергоэффективных городов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громов А.И., Смирнов В.Н. Устойчивое развитие городов: подходы к проектированию и управлению: учебное пособие. – М.: Город, 2019. – 240 с.
2. Жуков С.В. Энергоэффективное градостроительство: практика и перспективы // Градостроительство и территориальное развитие. – 2020. – № 5(1). – С. 34–45.
3. Кузнецов Д.А., Чистякова Е.Ю. Влияние городской инфраструктуры на потребление энергии: анализ и рекомендации // Научные исследования в области экологии и устойчивого развития. – 2021. – № 10(2). – С. 112–125.
4. Мельников П.Ю. Устойчивые города: подходы и стратегии. – М.: «Наука», 2022. – 300 с.
5. Николаев А.И. Устойчивое энергоснабжение и городская инфраструктура: новые вызовы и решения // Экологические технологии. – 2020. – № 15(3). – С. 58–71.
6. Орлова Т.Н. Энергосбережение в городской инфраструктуре: проблема и решение // Вестник городской экономики. – 2018. – № 22(4). – С. 18–27.
7. Петрова Л.С., Сидоров И.А. Инновационные подходы к проектированию устойчивых городов // Научный вестник. – 2019. – № 18(2). – С. 90–104.
8. Соловьёв Р.В. Градостроительство и энергосбережение: новые горизонты. – М.: «Экономика», 2021. – 250 с.
9. Фомина Н.В. Энергоэффективные технологии в городской инфраструктуре // Энергетические решения. – 2022. – № 7(1). – С. 45–56.
10. Шевченко А.П. Проектирование устойчивых городов: интеграция экологии и архитектуры // Архитектурный вестник. – 2019. – № 14(3). – С. 75–88.

## ВЛИЯНИЕ УМНОГО ЗДАНИЯ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ: ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ

**М.Д. Павлов**

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-14*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент АлтГТУ

### Введение

Современные технологии умных зданий представляют собой большой шаг к повышению энергоэффективности и снижению потребления энергии. Умные дома интегрируют автоматизированные системы управления, которые оптимизируют расходы энергии на вентиляцию, освещение, отопление и другие сферы. В статье будет рассмотрено влияние умных зданий на энергопотребление и приведены примеры успешного внедрения таких технологий.

### 1. Определение умного здания

Умное здание – конструкция, оснащенная технологическими решениями, позволяющими управлять различными системами и процессами через информационные технологии. В таких зданиях используются датчики, систем мониторинга и управления для оптимизации расхода энергии и повышения комфорта жильцов.

## 2. Технологии умных зданий

### 2.1. Умные термостаты

Умные термостаты позволяют управлять системой отопления и охлаждения с учетом присутствия жильцов, а также климатических условий. Такие устройства обучаются привычкам пользователей и могут автоматически регулировать температуру, что позволяет экономить энергию.

### 2.2. Автоматизация освещения

Современные системы освещения, такие как LED-светильники, интегрированные с датчиками движения и освещенности, могут значительно снизить потребление электроэнергии. Такой результат достигается при помощи автоматического регулирования яркости и отключения света в неиспользуемых помещениях.

### 2.3. Энергоменеджмент

Системы управления энергией (EMS) контролируют потребление энергии в реальном времени, демонстрируя пользователям данные о ситуациях, в которых можно сократить это потребление. Такая система может включать рекомендации по оптимизации времени работы приборов или переключения на альтернативные источники энергии.

## 3. Исследования влияния умных зданий на энергопотребление

### 3.1. Пример: Умный жилищный комплекс в Калифорнии

В одном из жилых комплексов в Калифорнии внедрили систему умного энергоменеджмента, которая использует солнечные батареи и аккумуляторы для хранения энергии. По результатам потребление энергии снизилось на 40 % в сравнении с традиционными домами.

### 3.2. Сравнительный анализ

В нескольких исследованиях был проведен сравнительный анализ традиционных и умных зданий. В большинстве случаев умные здания показывали снижение потребления энергии от 20 до 50 % за счет использования технологий управления и автоматизации.

## 4. Практические примеры успешного внедрения

### 4.1. Бизнес-центр «ECOS» в Москве

Такой бизнес-центр использует систему «умного здания», которая включает в себя интеллектуальные системы HVAC (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха), автоматическое управление освещением и системы мониторинга энергопотребления. В результате, энергозатраты удалось снизить на 30 %.

### 4.2. Жилищный комплекс «Green Valley»

В проекте «Green Valley» внедрена концепция «умного дома», где все системы интегрированы в единую сеть. В результате применения умных технологий, пользователи сообщили о снижении счетов за электроэнергию на 25 % в год.

## Заключение

Умные здания представляют собой инновационное решение, способствующее снижению энергопотребления и повышению энергоэффективности. Технологии, такие как автоматизация освещения, умные термостаты и системы энергоменеджмента, позволяют оптимизировать использование энергии, что, в свою очередь, способствует устойчивому развитию и снижению воздействия на окружающую среду. Внедрение таких решений в городскую инфраструктуру уже продемонстрировало положительные результаты и требует дальнейшего изучения и популяризации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А. Умные здания: технологии и перспективы. – М.: Энергоатомиздат, 2020. – 215 с.
2. Баранов И.И. Энергоэффективные технологии в строительстве: учебное пособие. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2019. – 180 с.

3. Сидоров П.П., Кузнецов А.О. Влияние умных систем управления на энергопотребление зданий // Вестник научных исследований. – 2021. – № 4. – С. 45–51.
4. Фролова Е.В. Умные дома: новые подходы к энергоэффективности // Энергетика и строительство. – 2020. – Т. 34, № 3. – С. 23–30.
5. Еремеев В.Ю., Чумаков Д.Г. Перспективы применения интеллектуальных технологий в современных зданиях // Архитектурное проектирование. – 2022. – № 2. – С. 12–19.
6. Киселев А.Л., Степанов Т.П. Устойчивое развитие городов: мировые тренды и практические примеры. – Новосибирск: Сибирское университетское издание, 2021. – 350 с.
7. Смирнова Н.А. Роль автоматизации в энергоэффективных зданиях // Научные труды СПбГЭТУ. – 2019. – № 10. – С. 3–9.
8. Савельев О.П. Технологии «умного дома» и их влияние на энергосбережение // Энергоизвлечение: практика и инновации. – 2020. – № 7. – С. 61–67.

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В СИСТЕМАХ ОСВЕЩЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Д.С. Клименко**

*Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-11*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент АлтГТУ

### **Введение**

Одним из ключевых факторов стабильного развития и снижения пагубного воздействия на окружающую среду является энергоэффективность. В сфере систем освещения она приобретает большую актуальность, так как освещение является одной из основных статей потребления электроэнергии по всему миру. В данной статье рассмотрены основные тенденции и перспективы развития энергоэффективности в системах освещения, также проанализированы их преимущества и недостатки.

### **1. Основные аспекты энергоэффективности**

Системы освещения являются одними из наиболее энергоёмких потребителей. Они используются в бытовых и промышленных целях, и их эффективность непосредственно влияет на потребление энергии. Основные аспекты энергоэффективности в системах освещения:

1.1. Использование современных технологий: применение светодиодных ламп, обладающих высокой эффективностью и длительным сроком службы, позволяет значительно снизить потребление электроэнергии.

1.2. Интеллектуальное управление освещением: внедрение систем управления освещением, которые автоматически регулируют яркость и время работы ламп также способствует повышению энергоэффективности.

### **2. Современные технологии и подходы**

Среди технологий и подходов, направленных на повышение энергоэффективности систем освещения, можно выделить следующие:

2.1. Светодиодные лампы: светодиодные лампы (LED) являются одним из самых перспективных направлений в области энергоэффективного освещения, так как они обладают высокой светоотдачей, длительным сроком службы и низким потреблением энергии, в отличие от, например, ламп накаливания.

2.2. Обучение и повышение осведомлённости: обучение и повышение осведомлённости о преимуществах энергоэффективного освещения способствуют его широкому распространению и внедрению.

2.3. Динамическое управление освещением: системы динамического управления освещением позволяют автоматически регулировать яркость ламп в зависимости от времени суток и погодных условий.

2.4. Энергосберегающие светильники: использование светильников, таких как люминесцентные и галогенные лампы, также может способствовать снижению потребления электроэнергии, но они имеют более низкий срок службы в сравнении со светодиодными лампами.

2.5. Интеграция с возобновляемыми источниками энергии: использование солнечных панелей и ветроэлектрических установок, позволяет снизить зависимость от традиционных источников электроэнергии и повысить экологическую устойчивость.

2.6. Внедрение систем мониторинга и анализа: системы мониторинга и анализа систем освещения позволяют отслеживать и анализировать потребление энергии. Это помогает быстро выявить и устранить неэффективные участки, а так же оптимизировать работу системы.

2.7. Использование датчиков движения: датчики движения позволяют автоматически включать и выключать освещение при обнаружении движения, что особенно полезно в общественных местах, где постоянное освещение не требуется.

### 3. Перспективы развития

Перспективы развития энергоэффективности в системах освещения связаны с дальнейшим развитием и внедрением современных технологий. Перспективными направлениями в этой сфере являются:

3.1. Разработка новых материалов и компонентов для светодиодных ламп, позволяющих улучшить их характеристики и снизить стоимость.

3.2. Внедрение систем управления освещением с помощью искусственного интеллекта, что позволит оптимизировать работу систем в реальном времени.

3.3. Развитие технологий беспроводной связи для интеграции систем освещения с другими инфраструктурными системами.

3.4. Расширение применения возобновляемых источников энергии для питания систем освещения.

3.5. Повышение навыков и знаний в области энергоэффективности среди предприятий и населения в целом.

### Заключение

Таким образом, энергоэффективность в системах освещения является важным фактором устойчивого развития и экологической устойчивости. Применение современных технологий и подходов позволяет значительно повысить эффективность использования энергии и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Дальнейшее развитие и внедрение этих технологий будет способствовать созданию более эффективных и экологически чистых систем освещения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54814–2011. Светодиоды и светодиодные модули для общего освещения и связанное с ними оборудование. Термины и определения.
2. Блохин А.В., Вагин Г.Я., Манусов В.З. Основные направления развития энергоэффективности систем электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 2–6.
3. Гвоздев С.М., Панфилов Д.И., Пешков И.А. Энергосбережение в освещении. – М.: АСВ, 2008. – 192 с.
4. Кононович Ю.Г., Хренов Б.Н. Основы формирования световой среды города. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2004. – 315 с.
6. Кувшинов А.И. Энергоэффективность и устойчивое развитие городской среды // Энергосбережение. – 2007. – № 6. – С. 4–7.
7. Мельников Ю.С., Рахимов Р.Р., Куприянов В.М. Управление энергосбережением в системах освещения зданий и сооружений // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 18–22.
8. Сапронов А.А., Симаков Г.М., Шарупич В.П. Энергосберегающие технологии в освещении // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – № 1. – С. 6–9.
9. Шевченко Д.А., Шурский В.О., Бугров С.А. Современные тенденции развития систем освещения // Светотехника. – 2005. – № 4. – С. 8–12.

## ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ И АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**И.Р. Галиев**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-11*

Научный руководитель: А.А. Грибанов, к.т.н., доцент, ЭФ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

Для выявления действенных подходов к обеспечению стабильности электроснабжения, повышению эффективности работы энергосистем, соответствия государственному стандарту, обеспечению электромагнитной совместимости помогает анализ методов контроля качества электроэнергии. Государственные стандарты применяются для контроля параметров качества электроэнергии (ПКЭ) [1]. В основном используются такие показатели как: отклонение напряжения, колебания напряжения, отклонение частоты, доза фликера, коэффициент временного перенапряжения, провал напряжения, импульсное напряжение, несимметрия напряжений в трехфазной системе, несинусоидальность формы кривой и перенапряжение [2].

Нарушение норм качества электроэнергии влечет за собой экономический ущерб для потребителей из-за старения изоляции, уменьшения эффективности и возникновения неполадок оборудования. Несимметрия напряжения в трехфазной системе характеризуется искажением фаз, когда амплитуды фаз не равны между собой. Это может вызвать перегрев и выход из строя электрооборудования, а также к снижению качества электроэнергии. Одним из важных показателей является отклонение частоты. Характеризуется изменением частоты переменного тока в энергосистеме. Стандартная частота установлена в размере 50 Гц, стабильность частоты должна определяться эффективностью генерируемых установок, а также их правильными эксплуатационными характеристиками.

Сложность разработки мер по повышению качества электроэнергии связана с тем, что параметры качества электроэнергии контролируются кратковременно и недостаточно периодически. С помощью мониторинга [3] будет формироваться статистическая база данных, которая позволит прогнозировать процессы, происходящие в электрической сети, и обеспечивать соблюдение параметров качества электроэнергии.

Так как электромагнитные процессы в сетях протекают быстро, только фиксация и анализ данных позволит осуществлять непрерывный контроль ПКЭ в реальном времени для оперативного управления качеством электроэнергии в соответствии с требованиями.

Рассмотрим основные проблемы, которые необходимо решить для создания системы мониторинга ПКЭ:

Для определения направления распространения искажений все измерения должны выполняться синхронно.

Необходимо разработать гибкие системы анализа данных, которые смогут обрабатывать информацию от различных средств измерений и поддерживать базу данных. Но необходимо учесть следующие факторы:

- значительные объёмы данных, требуют мощных вычислительных систем для обработки;
- алгоритмы анализа должны учитывать все факторы, влияющие на качество электроэнергии;
- визуализация результатов анализа могла бы облегчить их интерпретацию.

Вопросы, связанные с нормированием и исследованием частотных характеристик трансформаторов напряжения, остаются недостаточно изученными. Больше всего на частотные характеристики трансформаторов напряжения и результаты измерений гармонического со-

става напряжения влияют конструкция трансформатора, наличие гармонических составляющих в сети и подключение нагрузки.

Выбор оптимального места для установки измерительных приборов позволит оптимизировать расходы на их приобретение, передачу, обработку, хранение данных и обслуживание контрольных точек.

Таким образом, для обеспечения стабильности электроснабжения и соответствия параметров качества электроэнергии государственным стандартам необходимо разработать и внедрить систему мониторинга ПКЭ. Решение проблем, рассмотренных в данной статье создаст эффективную систему мониторинга, которая обеспечит стабильность электроснабжения, повысит эффективность энергосистем и соответствие государственному стандарту.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014.07.01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
2. Показатели качества электроэнергии. – URL: <https://yaenergetik.ru/blog/parametry-kachestva-elektroenergii/> (дата обращения 19.11.2024). – Текст: электронный.
3. Белицын И.В. Мониторинг магнитного поля воздушных линий электропередач на основе ИИС блочно-модульной конструкции // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2–2. – С. 56–65.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ СТЕНОВОЙ ГЛИНОЗОЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Ю.Д. Смирнова<sup>1</sup>, А.А. Сергиенкова<sup>2</sup>

*Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,  
ИФФ, ЭТГ, <sup>1</sup> группа 3-72Мт; <sup>2</sup> соискатель*

Научный руководитель: Е.В. Гусев, к.т.н., доцент ЭТГ ИФФ ИГЭУ

Одной из энергоемких стадий производства стеновых керамических изделий является сушка сырцов-материалов. Повышение теплоэнергоэффективности процесса сушки связано с увеличением интенсивности обезвоживания при сохранении качества готовой продукции.

Одним из перспективных способов снижения энергозатрат в производстве стеновых керамических изделий является применение в качестве одного из основных видов сырья золашлаковых отходов энергетических предприятий. В настоящее время имеется производственная и исследовательская практика по производству стеновых глинозольных изделий, доказывающая возможность применения топливосодержащих отходов в керамической промышленности для повышения интенсивности термической обработки и улучшения качества продукции [1–3]. Перспективность и экономическая целесообразность использования зол ТЭС в производстве керамических материалов в качестве одного из основных видов сырья (с содержанием 20–50 %) обуславливается тем, что их минеральная часть по химическому и минералогическому составу близка к глинистому легкоплавкому сырью, а органическая часть зольного компонента обладает запрессованным топливом, что способствует при правильной организации производственных процессов существенному снижению топливо-энергетических расходов на термическую обработку глинозольного материала, улучшению его сушильных и обжиговых свойств и повышению качества готовой продукции

В качестве основных сырьевых материалов использовались классифицированная тонкодисперсная отвальная зола Ивановской ТЭЦ-2 (менее 125 мкм) и умеренно-пластичное глинистое сырье Норского месторождения (г. Ярославль).

Производство стеновых глинозольных изделий-сырцов осуществлялось по технологии полужесткого пластического формования, позволяющее влиять на структурообразование материала в процессе прессформования [3].

Исследование кинетической закономерной сушки глинозольных образцов-сырцов различного состава осуществлялось в камерной сушилке при двухстороннем продольном обтекании материала нагретым воздухом в условиях изотермического обезвоживания и постоянных параметрах сушильного агента ( $t_c = 75-125$  °C,  $v_c = 1-5$  м/с,  $\varphi = 5$  %).

Интенсивность внешнего теплообмена в процессе конвективной сушки при взаимодействии теплоносителя и поверхностью влажного глинозольного материала определялась по плотности теплового потока на базе кинетических влаготермических кривых сушки материала во времени ( $\bar{U} = f(\tau)$ ;  $\bar{t}_m = f(\tau)$ ) по основному уравнению кинетики сушки:

$$q(\tau) = \alpha(t_c - t_m) = r_{исп} \rho_0 R_0 \frac{d\bar{U}}{d\tau} + c_{пр} \rho_0 R_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_c$  и  $t_m$  – температура теплоносителя и поверхности материала, °C;  $r_{исп}$  – удельная теплота испарения, Дж/кг;  $c_{пр} = c_m + c_{ж} X_3$  – приведенная удельная теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·°C);  $\bar{U}$  – среднее влагосодержание материала, кг/кг;  $c_{ж}$  – удельная теплоемкость воды;  $c_m = (c_{ог} X_{Г} + c_{оз} X_3) / 100$  – удельная теплоемкость сухого глинозольного материала с учетом содержания глины  $X_{Г}$ (%) и золы  $X_3$ (%);  $c_{ог}$  и  $c_{оз}$  – удельная теплоемкость глины и золы;  $\rho_0 = 2160 - 15X_3$  – плотность сухого материала толщиной  $2R_0$ , кг/м<sup>3</sup>.

В результате обработки экспериментальных данных установлены зависимости коэффициента теплоотдачи от влагосодержания глинозольного материала с различным содержанием золы для режимных параметров сушки с учетом наилучшего качества изделий (рис. 1).

С целью определения коэффициента теплоотдачи для различных режимных параметров процесса сушки глинозольного материала получено следующее критериальное уравнение:

$$Nu = A Re^{0.5} \left( \frac{T_c}{T_m} \right)^2 \left( \frac{\bar{U}}{\bar{U}_{кр}} \right)^m, \quad (2)$$

где  $Nu = \alpha l / \lambda_c$  – критерий Нуссельта;  $A = 0,45 + 0,0062 X_3$  – параметр, зависящий от содержания золы ( $X_3$ , %) в глинозольном материале;  $Re = (v_c l) / \nu_c$  – критерий Рейнольдса ( $Re = 2300-12000$ );  $v_c$  – скорость сушильного агента, м/с;  $l$  – длина пластины вдоль движения теплоносителя, м;  $\lambda_c$  и  $\nu_c$  – теплопроводность и кинематическая вязкость воздуха;  $\bar{U} / \bar{U}_{кр}$  – соотношение текущего и критического влагосодержаний материала в периоде падающей скорости сушки;  $m = 0,0013 X_3 + 1,19$  – показатель степени.

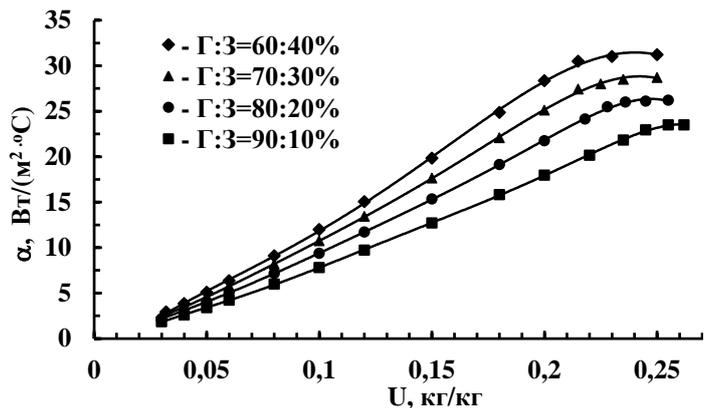


Рис. 1. Зависимости коэффициентов теплоотдачи глинозольных

Полученные данные позволяют говорить о возможности повышения интенсивности теплообмена за счет увеличения содержания золы в высушиваемом глинозольном изделии, температуры и скорости теплоносителя при соблюдении качественных показателей материала. При этом повышение энергоэффективности сушки по величине удельного теплового потока с ростом содержания золы от 10 до 50 % составляет  $[(q_{50}-q_{10})/q_{10}]100\% = 45\%$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Кулбеков М. Золы ТЭС в производстве строительной керамики. – Алма-Ата: Казахстан, 1986. – 260 с.
2. Теплоизоляционные керамические материалы с нанопористой структурой, изготовленные с использованием золосодержащих отходов ТЭЦ / Т.В. Вакалова, Т.А. Хабас, И.Б. Ревва, И.А. Павлова // Сырьевые материалы. – 2014. – No. 2. – С. 6–11.
3. Закономерности формирования массопроводных свойств керамических изделий на основе отходов промышленных котельных / Е.В. Гусев, А.И. Сокольский, А.А. Сергиенкова, Ю.А. Родякаева // Вестник ИГЭУ. – 2018. – No. 1. – С. 33–36.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

К.В. Колотилкина

*Самарский государственный технический университет,  
ТЭФ, ТОТуг, группа 3-УПНК-1.2.2*

Научный руководитель: В.А. Кудинов, д.ф.-м.н., профессор ТОТуг, ТЭФ

Тепловые сети обеспечивают передачу тепловой энергии от источника к потребителям, но неизбежные тепловые потери существенно снижают эффективность системы. Ключевым фактором, влияющим на эти потери, является качество теплоизоляции трубопроводов. В последние годы эта проблема стала особенно актуальной, так как она напрямую влияет на энергоэффективность и эксплуатационные расходы. В данной работе рассматриваются методы снижения тепловых потерь за счет модернизации теплоизоляции. В качестве примера проведен сравнительный расчет потерь в системе с минеральной ватой и модернизированной системе с применением вспененного полиуретана.

**Цель работы** – предложить метод оптимизации тепловых сетей используя программное обеспечение MATLAB, анализируя тепловые потери и влияние теплоизоляции трубопроводов на энергоэффективность системы.

Традиционные методы расчёта теплотерь, основанные на упрощённых моделях и эмпирических формулах, часто недостаточны для точной оценки эффективности теплоизоляции. В данной работе используются более сложные термодинамические расчёты с помощью моделирования в MATLAB, что позволяет учесть широкий спектр факторов, таких как геометрия трубопроводов, свойства материалов и условия эксплуатации. Расчёт тепловых потерь через цилиндрическую поверхность трубы с различными изоляционными материалами позволил провести сравнительный анализ системы с минеральной ватой и модернизированной системы на основе вспененного полиуретана [1, 2].

Для анализа тепловых потерь используется уравнение стационарного теплового потока через цилиндрическую стенку трубы, что позволяет учитывать радиальные потоки тепла. Данная модель адекватно отражает поведение теплового потока в зависимости от параметров изоляции (толщины и теплопроводности) [3]. Для описания теплового потока используется формула:

$$Q = \frac{2\pi L\lambda(T_{\text{внутренняя}} - T_{\text{внешняя}})}{\ln\left(\frac{r_{\text{внешний}}}{r_{\text{внутренний}}}\right)}, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток (Вт);  $L$  – длина трубы (м);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности изоляционного материала;  $T_{\text{внутренняя}}$  и  $T_{\text{внешняя}}$  – температура внутри трубы и окружающей среды соответственно;  $r_{\text{внешний}}$  и  $r_{\text{внутренний}}$  – радиусы внешней и внутренней поверхностей изоляции и трубы соответственно.

Для анализа была выбрана зависимость тепловых потерь от толщины изоляции для каждого из материалов. Средние значения температур и коэффициентов теплопроводности для двух типов изоляционных материалов – минеральной ваты  $\lambda = 0,04$  Вт/(м·К) и вспененного полиуретана  $\lambda = 0,02$  Вт/(м·К), исходя из их широкого применения в теплоснабжении и доступности данных о теплофизических свойствах. Толщина изоляции (минеральная вата) 3 см (радиус изоляции  $r_{\text{внешний}} = 0,08$  м); толщина изоляции (вспененный полиуретан) 7 см (радиус изоляции  $r_{\text{внешний}} = 0,12$  м);

С помощью ПО MATLAB была построена математическая модель, которая позволяет оценить теплотери при различных параметрах теплоизоляции трубопроводов. На рис. 1 показан сравнительный график тепловых потерь для двух видов теплоизоляционных материалов: минеральной ваты и вспененного полиуретана. Получившиеся результаты после проведенного расчета переданы в табл. 1.

Таблица 1. Результаты проведенного расчета

Материал изоляции	$\lambda$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ – коэффициент теплопроводности	$r_{\text{внутренний}}$ (м) – внутренний радиус	$r_{\text{внешний}}$ (м) – внешний радиус	$T_{\text{внутренняя}}$ (°C) – температура внутри трубы	$T_{\text{внешняя}}$ (°C) – температура окр. среды	$Q$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ – тепловой поток
Минеральная вата	0.04	0.05	0.08	80	20	32.08
Вспененный полиуретан	0.02	0.05	0.12	80	20	8.61

Табл. 1 показывает, что тепловые потери при использовании вспененного полиуретана значительно ниже, чем у минеральной ваты, благодаря его более низкой теплопроводности. Это указывает на высокую эффективность полиуретана в сохранении тепла, позволяя снизить эксплуатационные затраты на поддержание температуры теплоносителя.

На рис. 1 показан температурный график, демонстрирующий зависимость тепловых потерь от температуры окружающей среды для минеральной ваты и вспененного полиуретана, что позволяет наглядно оценить влияние изменений внешней температуры на теплотери каждого из материалов.

На рис. 1 видна четкая тенденция, что при экстремально низких температурах (до  $-40$  °C) разница в тепловых потерях между материалами становится особенно заметной. При снижении температуры

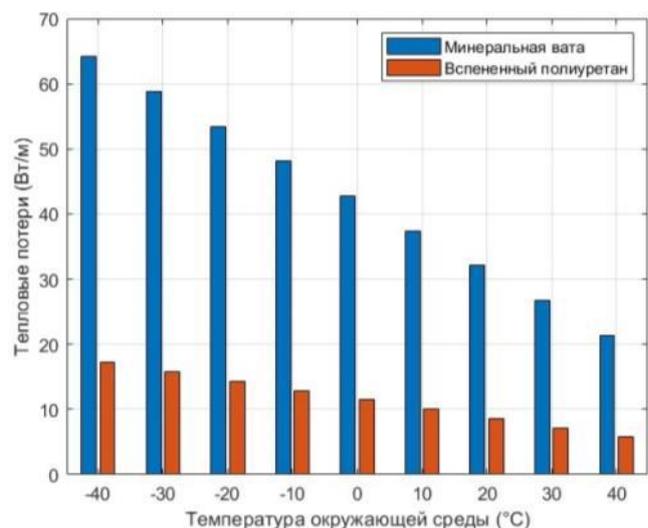


Рис. 1. Зависимость тепловых потерь от температуры окружающей среды

окружающей среды тепловые потери увеличиваются для обоих материалов, но остаются заметно ниже у вспененного полиуретана, при более высоких температурах, близких к температуре теплоносителя, потери уменьшаются из-за снижения разницы температур, при этом вспененный полиуретан сохраняет лучшие изоляционные свойства. Превосходство вспененного полиуретана делает его оптимальным выбором для различных климатических условий, особенно для холодного климата, где теплотери могут существенно повлиять на эксплуатационные расходы (рис. 2).

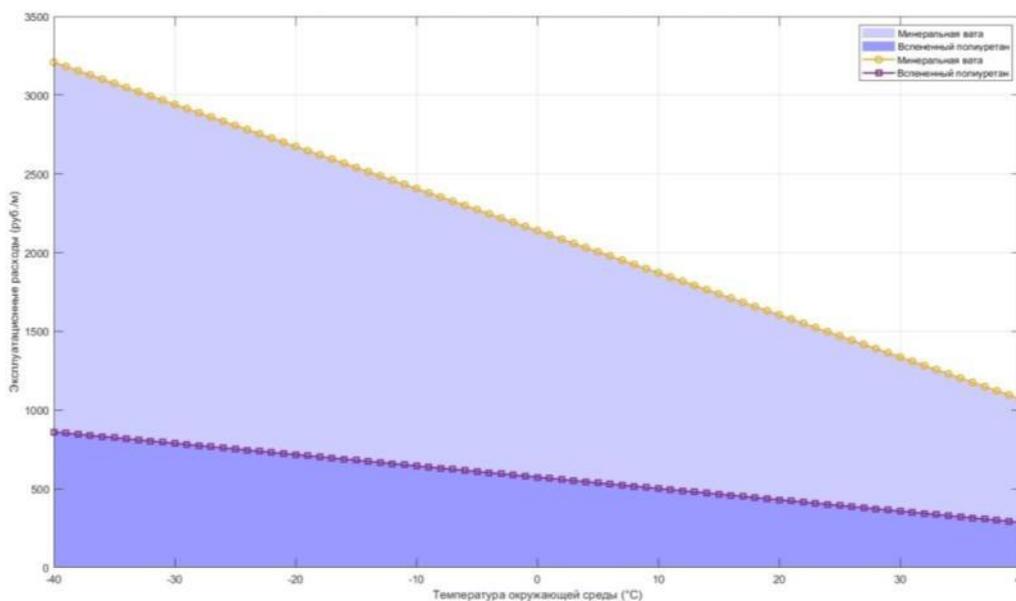


Рис. 2. Зависимость эксплуатационных расходов от температуры окружающей среды

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие влияние температуры окружающей среды на эксплуатационные расходы для минеральной ваты и вспененного полиуретана. Эксплуатационные расходы, зависящие от тепловых потерь, также снижаются при повышении температуры окружающей среды, при этом расходы на полиуретан остаются значительно ниже. Это делает его предпочтительным теплоизоляционным материалом для трубопроводов, особенно при низких температурах, где его изоляционные преимущества наиболее заметны.

На рис. 3, график демонстрирует явное преимущество вспененного полиуретана перед минеральной ватой. При меньшем радиусе изоляции, равном 0,06 м, теплотери для минеральной ваты составляют 83 Вт/м, а для вспененного полиуретана – 40 Вт/м, что подтверждает более высокую теплоизоляционную способность полиуретана. По мере увеличения радиуса изоляции разница в эффективности сохраняется: при радиусе 0,15 м теплотери для минеральной ваты снижаются до 14 Вт/м, а для вспененного полиуретана – до 7 Вт/м. Это наглядно показывает, что при одинаковой толщине изоляции полиуретан обеспечивает почти вдвое меньшие теплотери, что

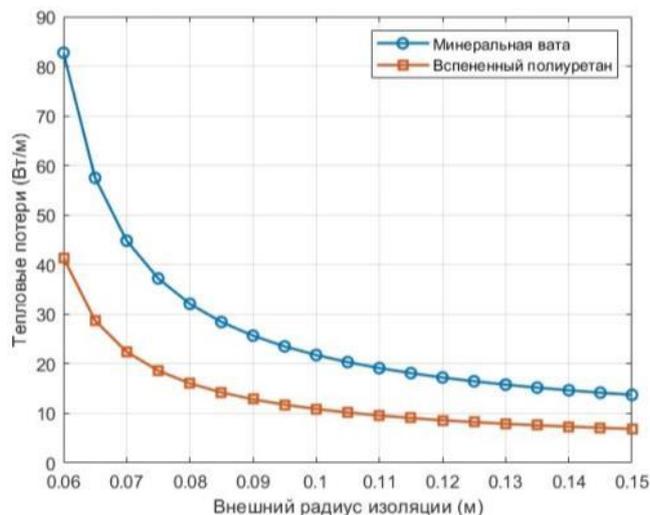


Рис. 3. Зависимость тепловых потерь от внешнего радиуса изоляции

делает его более предпочтительным материалом для изоляции трубопроводов с целью минимизации теплопередачи и повышения энергоэффективности системы.

В ходе работы была проведена оценка эффективности тепловых сетей с учетом термодинамических принципов и численных расчетов, выполненных с помощью ПО MATLAB. Рассчитанные модели подтвердили возможность значительного сокращения теплопотерь и оптимизации параметров тепловых сетей для повышения их энергоэффективности. Основным выводом работы заключается в том, что увеличение толщины и улучшение теплопроводящих свойств изоляционных материалов, таких как вспененный полиуретан, позволяют сократить теплопотери на 40–50 %, что влечет за собой снижение затрат на электроэнергию, повышение эффективности системы теплоснабжения и уменьшение экологического следа.

Таким образом, использование ПО MATLAB в расчетах обеспечивает высокую точность при моделировании теплопередачи и является необходимым инструментом для дальнейшего развития энергоэффективных технологий в теплоснабжении.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ахметова И.Г., Мухаметова Л.Р. Актуальные вопросы повышения энергоэффективности теплоснабжающих организаций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11–12. – С. 108–113.
2. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. Теплотехника: учебное пособие. – М.: «КУРС», 2015. – 424 с. – ISBN 978-5-905554-80-3. – EDN UTCXFF.
3. Матвеев Ю.А., Одинцов А.Ю. Определение тепловых потерь системы теплоснабжения // Вестник науки. – 2023. – Т. 4. – № 12 (69). – С. 1475–1480.

## **УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**К.А. Егорихин**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-14*

Научный руководитель: И.А. Павличенко, ассистент ЭФ ЭПП АлтГТУ

Управление мощностью в системах электроснабжения играет ключевую роль в обеспечении эффективной работы энергетических систем и улучшении качества предоставляемых услуг. С постоянным ростом потребления электроэнергии и расширением сетей передачи, необходимо разработать инновационные подходы к управлению мощностью для обеспечения стабильности и надежности сетей.

Основная задача управления мощностью заключается в оптимизации использования доступных ресурсов, минимизации потерь и обеспечении баланса между производством и потреблением энергии. В статье будут рассмотрены основные принципы управления мощностью, технологии и методы, используемые для достижения оптимальной работы энергосистем.

Эффективное управление мощностью имеет важное значение, обеспечивая надежную работу энергетических систем и оптимизируя процессы передачи и распределения электроэнергии. Регулирование мощности позволяет балансировать нагрузки, предотвращать перегрузки и сбои в сетях, а также повышать эффективность использования энергоресурсов.

Одним из основных принципов эффективного управления мощностью является применение современных технологий автоматизации и мониторинга. Системы управления мощностью позволяют быстро реагировать на изменения в нагрузках и сбалансировать производство и потребление электроэнергии. Такие системы обеспечивают оптимальное распределе-

ние нагрузок между источниками энергии и потребителями, что позволяет избежать перегрузок и минимизировать потери электроэнергии.

Кроме того, эффективное управление мощностью включает в себя разработку и внедрение стратегий энергосбережения и энергоэффективности. Оптимизация рабочих процессов, регулирование нагрузок в зависимости от пикового спроса, использование smart-технологий и ресурсосберегающих решений – все это позволяет снизить расходы на электроэнергию и сделать энергоснабжение более устойчивым и экологически безопасным.

Таким образом, эффективное управление мощностью имеет ключевое значение для поддержания стабильности и результативности системы электроснабжения. Разработка инновационных решений и внедрение современных технологий позволяют оптимизировать работу энергетических систем, повысить качество обслуживания потребителей и улучшить экономические показатели в отрасли.

Основные принципы регулирования мощности в энергетике включают в себя несколько важных аспектов. Во-первых, это сбалансированное распределение мощности между производителями и потребителями электроэнергии. Это необходимо для обеспечения надежности и стабильности электросетей. Регулирование мощности также включает оптимальное использование имеющихся ресурсов, чтобы минимизировать потери и обеспечить эффективное функционирование системы электроснабжения.

Важной частью управления мощностью является использование современных технологий и систем автоматизации. Это позволяет быстро реагировать на изменения в нагрузке и обеспечивать баланс между производством и потреблением электроэнергии. Кроме того, применение интеллектуальных систем управления позволяет оптимизировать работу энергетических систем, улучшая их производительность и экономичность.

Другим важным принципом регулирования мощности является принятие во внимание возобновляемых источников энергии. Интеграция возобновляемых источников, таких как солнечная и ветровая энергия, требует специального подхода к управлению мощностью. Необходимо разрабатывать инновационные стратегии и технологии, чтобы эффективно интегрировать разнообразные источники энергии в общую систему и обеспечить устойчивое развитие энергетики.

Таким образом, основные принципы регулирования мощности в энергетике включают балансирование мощности между производителями и потребителями, использование современных технологий и систем автоматизации, а также учет возобновляемых источников энергии. Разработка и реализация эффективных стратегий управления мощностью играют ключевую роль в обеспечении устойчивого функционирования сетей электроснабжения.

Одним из основных элементов в управлении мощностью в областях электроснабжения является применение современных технологий и методов оптимизации энергопотребления. Такие технологии позволяют снизить потребление электроэнергии и повысить эффективность системы в целом. Одним из эффективных методов является использование систем умного управления, которые автоматически регулируют потребление энергии в зависимости от текущих потребностей и наличия энергоресурсов. Такие системы могут быть использованы как на уровне отдельных зданий, так и на уровне целых городов или регионов.

Другим важным методом оптимизации энергопотребления является применение систем управления освещением. Современные LED-технологии могут значительно снизить расходы на освещение и уменьшить нагрузку на электросеть. Кроме того, использование датчиков освещенности позволяет автоматически регулировать яркость освещения в зависимости от освещенности окружающей среды, что помогает экономить энергию.

Технологии и методы оптимизации энергопотребления также включают в себя разработку энергоэффективных систем кондиционирования воздуха, отопления и вентиляции. Использование современных технологий позволяет снизить расходы на энергию и сделать системы более экологически чистыми.

В целом, применение современных технологий и методов оптимизации энергопотребления играет важную роль в повышении эффективности системы электроснабжения, снижении потребления энергии и уменьшении негативного влияния на окружающую среду. Адаптация таких технологий в различных секторах экономики становится все более актуальной задачей для обеспечения устойчивого развития и снижения зависимости от традиционных источников энергии.

Управление мощностью в областях электроснабжения сталкивается с рядом вызовов и открывает перспективы для развития энергетической системы. Одним из главных вызовов является нестабильность производства возобновляемой энергии, такой как солнечная и ветровая. Иногда их производство превышает спрос, что может привести к перегрузкам в сети. Для управления этим вызовом необходимо развивать инновационные методы хранения энергии и гибкие системы управления нагрузкой.

Помимо этого, растущий объем электромобилей и других устройств, потребляющих энергию, создает дополнительную нагрузку на энергетическую систему. Это требует разработки умных сетей, способных эффективно распределять мощность и учитывать потребности различных потребителей.

Перспективы управления мощностью включают в себя внедрение технологий Интернета вещей (IoT) для мониторинга и управления энергосистемами в режиме реального времени. Это позволит оптимизировать использование ресурсов и улучшить эффективность сети. Кроме того, развитие смарт-гридов и цифровых технологий предоставит операторам электросетей более точные данные для принятия решений и управления нагрузкой.

В целом, управление мощностью в электроснабжении становится все более сложным и требует современных подходов и инновационных решений для обеспечения устойчивости и эффективности энергетической системы.

Инновации в области управления мощностью играют ключевую роль в повышении энергоэффективности сетей электроснабжения. Одним из наиболее эффективных методов считается внедрение современных систем управления нагрузкой. Такие системы позволяют автоматически регулировать распределение энергии в сети в зависимости от текущей потребности, оптимизируя процессы и минимизируя потери.

Другим важным направлением развития является внедрение интеллектуальных сетей с возможностью удаленного мониторинга и управления потреблением энергии. Такие системы позволяют оперативно реагировать на изменения нагрузки в сети и оптимизировать работу оборудования для экономии ресурсов.

Современные технологии также предлагают новые методы хранения и использования энергии, такие как аккумуляторные батареи и системы управления накопителями. Это позволяет сглаживать пиковую нагрузку и использовать энергию более эффективно, что в свою очередь способствует снижению расходов на электроэнергию и уменьшению нагрузки на сеть.

Управление мощностью в области электроснабжения становится все более инновационным и эффективным благодаря новым технологиям и системам, направленным на повышение энергоэффективности и улучшение качества электроснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности энергетических систем. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
2. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электрической энергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с. – ISBN 978-5-93196-958-9.
3. Щербаков Е.Ф., Александров Д.С., Дубов А.Л. Электроснабжение и электропотребление в строительстве: учебное пособие. 2-е изд., доп. – СПб.: «Лань», 2012. – 512 с. – ISBN 978-5-8114-1390-4.

## РАЗВИТИЕ В ОБЛАСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

**К.А. Егорихин**

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
ЭФ, ЭПП, группа Э-14*

Научный руководитель: И.А. Павличенко, ассистент ЭФ ЭПП АлтГТУ

Солнечная энергия представляет собой один из самых экологически чистых источников возобновляемой энергии, который в последние десятилетия активно развивается. Этот источник энергии использует солнечное излучение для генерации электричества или тепла, что делает его не только эффективным, но и доступным для широкого круга пользователей. Технологии, связанные с производством и использованием солнечной энергии, стремительно эволюционируют, открывая новые горизонты для устойчивого развития общества и экономики в целом.

В последние годы наблюдается значительный рост инвестиций в солнечную энергетику, что связано с падением цен на солнечные панели и улучшением их эффективности. Современные технологии, такие как солнечные концентраторы и фотогальванические системы нового поколения, позволяют значительно увеличивать выход энергии даже при относительно низкой интенсивности солнечного света. Это делает солнечную энергетику более доступной, особенно в регионах с ограниченными ресурсами.

Однако, несмотря на все преимущества, солнечная энергетика сталкивается и с определенными вызовами. Одним из них является необходимость в эффективных системах хранения энергии, которые позволят использовать солнечную энергию в ночное время или в облачные дни. Разработка новых аккумуляторных технологий, таких как литий-ионные и другие перспективные решения, может существенно улучшить ситуацию.

Также стоит отметить, что солнечная энергетика имеет потенциал для внедрения в различные сферы, включая сельское хозяйство, где солнечные панели могут быть установлены на фермах для обеспечения электричеством и уменьшения затрат. В некоторых странах уже активно применяются агрофотовольтаические системы, которые позволяют сочетать производство пищи и энергии на одной площади.

Серьезные исследования в области солнечной энергии начались в середине XX века, когда научные и инженерные разработки стали активно применяться в различных отраслях промышленности. Первые солнечные батареи появились в 1950–1960 гг. и были использованы в космических аппаратах.

Однако истинным прорывом стало развитие технологий солнечных панелей в 1970–1980 гг., когда стали возникать возможности использования солнечной энергии для генерации электроэнергии на земле. С появлением поддержки государственных программ, инвестиций и научных исследований энергия солнца начала применяться в промышленных масштабах.

Активно разрабатываются системы аккумулирования энергии, включая литий-ионные батареи и другие технологии, направленные на обеспечение стабильного и бесперебойного питания от солнечных источников

Благодаря активному использованию солнечной энергии в самых разных сферах, таких как производство электроэнергии, нагрев воды, освещение и даже в авиационной индустрии, технологии продолжают развиваться и улучшаться. С каждым годом солнечная энергия становится всё более доступной и экономически оправданной, что способствует её широкой популяризации и дальнейшему прогрессу в энергетическом секторе.

Современные солнечные панели функционируют благодаря фотоэлектрическому эффекту, при котором электроны и дырки образуются в результате взаимодействия света с полупро-

водниковыми материалами. Это явление позволяет разрабатывать различные виды солнечных панелей, включая моно- и поликристаллические, а также аморфные и другие варианты. Каждая из этих типов отличается своими характеристиками, включая стоимость, уровень эффективности и необходимую площадь для установки.

Солнечные панели нашли широкое применение как в небольших автономных системах, таких как фонарики и зарядные устройства, так и в крупных солнечных электростанциях. Они обеспечивают не только электроэнергией удаленные области без связи с централизованной сетью, но и промышленные предприятия, офисные здания и жилые дома.

Сейчас солнечные панели становятся более доступными и эффективными благодаря постоянному прогрессу технологий и снижению производственных затрат. Это расширяет возможности использования солнечной энергии и делает её более конкурентоспособной по сравнению с традиционными источниками.

Исследования в области солнечных технологий продолжаются, включая создание высокоэффективных и защитных панелей, интеграцию с системами накопления энергии и улучшение методов их производства. Эти нововведения открывают новые горизонты для солнечной энергетики и способствуют формированию экологически устойчивого энергетического сектора.

Экономические аспекты перехода на солнечную энергию играют значительную роль в развитии этой сферы. В последние годы солнечная энергия становится все более конкурентной по сравнению с традиционными энергоресурсами, такими как уголь, нефть и газ. Основными преимуществами солнечной энергии являются ее неистощимость и доступность, а также отсутствие выбросов парниковых газов и загрязняющих агентов в процессе производства.

Солнечная энергия быстро превращается в более рентабельный и привлекательный вариант благодаря снижению цен на технологии ее производства, улучшению эффективности солнечных панелей и развитию систем для сбора и хранения энергии. Крупные инвесторы и власти многих государств направляют капиталы в развитие этой сферы, что содействует ее дальнейшему распространению.

Основными экономическими выгодами перехода на солнечную энергию являются экономия на энергии, уменьшение зависимости от традиционных источников, импортируемых из других стран, создание новых рабочих мест и стимуляция экономического развития. Более того, использование солнечной энергии помогает снизить затраты на устранение последствий загрязнения окружающей среды, что также оказывает положительное влияние на экологию.

Важным элементом перехода на солнечные источники энергии является возможность для частных домов и бизнесов создавать и использовать электричество самостоятельно. Это способствует снижению затрат на электроэнергию и увеличению энергетической автономии. Развитие технологий накопления энергии делает солнечную энергию более стабильной и эффективной для пользователей.

Таким образом, экономические преимущества перехода на солнечную энергию имеют решающее значение для дальнейшего прогресса этой области, способствуя устойчивому экономическому развитию, уменьшению выбросов загрязняющих веществ и улучшению жизненных условий на планете.

Одним из самых значимых направлений в сфере солнечной энергии является создание более продуктивных и долговечных солнечных панелей. Исследователи и инженеры по всему миру трудятся над формированием новых материалов и технологий, которые помогут повысить эффективность преобразования солнечного света в электрическую энергию, а также сократить затраты на производство и установку панелей.

Еще одной ключевой областью инноваций выступает разработка систем хранения энергии, полученной от солнечных установок. С учетом создания эффективных систем хранения, будет возможно более рационально использовать солнечную энергию даже в ночное время или в дни с низкой солнечной активностью. Это существенно повысит надежность солнечной энергии в качестве источника питания и сделает ее более доступной для пользователей.

Важным моментом является также интеграция солнечных технологий в городскую инфраструктуру. Инновационные разработки позволяют внедрять солнечные панели на крышах зданий, встроенные в окна и фасады зданий, а также встроенные в дорожное покрытие, что позволяет эффективно использовать пространство и снижать зависимость от традиционных источников энергии.

Таким образом, инновации в области солнечной энергии играют важную роль в развитии данного сектора и способствуют расширению использования солнечной энергии как одного из основных источников энергии в будущем.

Солнечная энергия уже давно признана одним из самых многообещающих источников возобновляемой энергии, и ее развитие играет ключевую роль в сокращении зависимости от ископаемых видов топлива. Однако, несмотря на значительные достижения в этой области, перед солнечной энергетикой стоит ряд вызовов и задач, которые необходимо решить для дальнейшего успешного развития.

Один из основных вызовов, с которым сталкивается солнечная энергетика, – это нестабильность производства. Если солнечная энергия является одним из наиболее доступных и устойчивых источников энергии, то изменчивость погодных условий может затруднить постоянное производство энергии. Для решения этой проблемы требуется разработка эффективных систем хранения энергии и сетевых решений, способных компенсировать колебания в производстве.

Еще одним значимым вызовом является недостаток инфраструктуры для расширения использования солнечной энергии. Несмотря на рост спроса на солнечные установки, во многих странах отсутствует необходимая инфраструктура для продвижения солнечной энергетике. Проектирование и строительство новых солнечных энергетических установок требует значительных инвестиций и технических решений.

Однако, несмотря на вызовы, перед солнечной энергией открываются огромные перспективы. Быстрое развитие технологий солнечных панелей и снижение их стоимости делает солнечную энергию все более конкурентоспособной по сравнению с традиционными источниками энергии. Большой потенциал для солнечной энергетике видится также в развивающихся странах, где она может стать доступным источником энергии для миллионов людей, не имеющих доступа к электричеству.

Для успешного развития солнечной энергетике необходима комплексная стратегия, включающая в себя как технологические инновации и инфраструктурные решения, так и поддержку со стороны государственных и частных инвесторов. Только создав сбалансированную и устойчивую систему поддержки и регулирования, мы сможем обеспечить стабильный рост в области солнечной энергии и перейти к более чистой и устойчивой энергетике в будущем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Германович В., Дурилин А. Альтернативные источники энергии и энергосбережение. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы. – СПб.: Наука и техника, 2014. – 320 с. – ISBN 978-5-94387-852-7.
2. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Альтернативные источники энергии : учебное пособие. – 2-е изд., стер. – Москва : ИНФРА-М, 2024. – 247 с. – ISBN 978-5-16-019494-3.
3. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : учебное пособие. – Томск : ТПУ, 2015. – 128 с.

## АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПЛАНОВ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ ДЛЯ НЕПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

А.С. Мелькова, М.А. Сильванович, М.Р. Пильковская

Белорусский национальный технический университет, ЭОЭ, группа 10607122

Научный руководитель: Е.П. Корсак, старший преподаватель, ЭОЭ БНТУ

Вопрос энергосбережения становится все актуальнее во всем мире, так как с развитием технологий потребление энергии растет, что ведет к истощению природных ресурсов. Для контроля и снижения потребления электроэнергии нужно регулировать энергосбережение на государственном уровне. Так в Республике Беларусь существует программа энергосбережения, которая предусматривает перечень мероприятий по снижению потребления энергии. В независимости от того, является ли предприятие производственным или нет, при годовым суммарным потреблением топливно-энергетических ресурсов 300 т у. т. и более (для государственных организаций 50 и более процентов акций которых находится в собственности Республики Беларусь) и 1500 т у. т. (для иных юридических лиц), обязательно ежегодно должны быть разработаны и выполнены планы мероприятий по энергосбережению [1]. К этим планам должны прикладываться технико-экономические обоснования, которые показывают степень экономии после проведения мероприятия.

Мероприятия по энергосбережению могут быть разными в зависимости от предприятия, на котором они проводятся. Если на производственных предприятиях они разнообразны и неразрывно связаны с процессом производства, направлены на совершенствование работы техники и оборудования, то в непроизводственных организациях разнообразие возможных способов понижения потребления энергии не так велико. При анализе целесообразности выполнения планов мероприятий по энергосбережению необходимо учитывать, как и экологический эффект, так и экономический. Зачастую современные организации, для работы которых необходимы только офисные помещения, начинают свою деятельность сразу в зданиях, построенных с учетом всех норм по энергосбережению, но многим из них в силу их масштабности все равно нужно составлять планы мероприятий со сохранению энергии. Для демонстрации того, какую экономию т у. т. могут принести энергосберегающие мероприятия для таких компаний рассмотрим пример, когда планом предусматривается замена ламп и светильников внутреннего освещения в двух офисных зданиях непроизводственной организации. Показатель топлива на отпуск электроэнергии, используемой на освещение, находится по формуле (1).

$$B_{\text{ЭЭ}} = \Delta \text{Э} \cdot \left(1 + \frac{K_{\text{пот}}^{\text{Э}}}{100}\right) \cdot b_{\text{ЭЭ}}^{\text{зам}} \cdot 10^{-6}, \text{ т у. т.}, \quad (1)$$

где  $b_{\text{ЭЭ}}^{\text{зам}}$  – удельный расход топлива на отпуск электроэнергии принимается равным фактическому расходу топлива на замыкающей станции в энергосистеме за год, предшествующий составлению расчета, т у.т./кВт ч;  $K_{\text{пот}}^{\text{Э}}$  – коэффициент, учитывающий потери в электрических сетях ГПО «Белэнерго» за год, предшествующий составлению расчета, %;  $\Delta \text{Э}$  – экономии электроэнергии в результате внедрения энергоэффективной системы освещения, кВт ч, считается по формуле (2).

$$\Delta \text{Э} = \text{Э}_1 - \text{Э}_2, \quad (2)$$

где  $\text{Э}_1$  – потребляемое количество электроэнергии при работе существующего освещения, кВт ч;  $\text{Э}_2$  – потребляемое количество электроэнергии при работе планируемых к установке осветительных приборов, кВт ч [2].

В табл. 1 представлен пример плана и факта мероприятий по энергосбережению для непроизводственного предприятия с годовым потреблением более 300 т у.т. на год.

*Таблица 1. Пример плана и факта мероприятий по энергосбережению для непроизводственного предприятия на год, (ожидаемая и фактическая экономия, т у.т.)*

№		1		Эконо- мия по кварта- лам т у.т.	2		Эконо- мия по кварта- лам т у.т.	Итого эконо- мия по месяцам т у.т.	Итого экономия по квар- талам т у.т.
Наименование мероприятия		Внедрение энер- гоэффективных светильников в здании № 1			Внедрение энер- гоэффективных светильников в здании № 2				
<b>План</b>									
№ квартала	1	январь	0,1	0,26	–	–	0,1	0,26	
		февраль	0,095		–		0,095		
		март	0,065		–		0,065		
	2	апрель	0,07	0,2	0,1	0,26	0,17	0,46	
		май	0,07		0,08		0,15		
		июнь	0,06		0,08		0,14		
	3	июль	0,003	0,011	0,006	0,019	0,009	0,03	
		август	0,003		0,006		0,009		
		сентябрь	0,005		0,007		0,012		
	4	октябрь	0,082	0,249	0,093	0,307	0,175	0,556	
		ноябрь	0,083		0,094		0,177		
		декабрь	0,084		0,12		0,204		
2023 год		0,72			0,586		1,306	1,306	
<b>Факт</b>									
№ квартала	1	январь	0,103	0,264	–	–	0,103	0,264	
		февраль	0,096		–		0,096		
		март	0,065		–		0,065		
	2	апрель	0,07	0,2	0,12	0,3	0,19	0,5	
		май	0,07		0,093		0,163		
		июнь	0,06		0,087		0,147		
	3	июль	0,003	0,0112	0,0066	0,0211	0,0096	0,0323	
		август	0,003		0,0065		0,0095		
		сентябрь	0,0052		0,008		0,0132		
	4	октябрь	0,085	0,26	0,13	0,4	0,215	0,66	
		ноябрь	0,088		0,12		0,208		
		декабрь	0,087		0,15		0,237		
2023 год		0,7352			0,7211		1,4563	1,4563	

По данным табл. 1 видно, что от первого мероприятия ожидается большая экономия, чем от второго. Связано это может быть с тем, что второе мероприятие планировалось внедрить во втором квартале, а первое – с начала года, также могут влиять такие факторы, как количество внедряемых ламп и их мощность. Данные таблицы также показывают, что ожидания оправдались, так как фактическая экономия у первого мероприятия выше, чем у второго, однако в отличии от плана, их показатели практически равны, объяснить это явление можно проанализировав объем выполнения плана по энергосбережению по обоим мероприятиям. Данные об объеме выполнения плана представлены в табл. 2.

По данным табл. 2 видно, что в 2023 году есть как и точное выполнение плана по энергосбережению, так и перевыполнение этого плана по месяцам и кварталам. Заметно, что итоговое значение выполнения плана превышает 100 % на 11,51 %, что является хорошим показателем и позволяет расходовать на 0,1503 т у.т. меньше ожидаемого значения. Больше всего план был перевыполнен по первому и по второму мероприятию в четвертом квартале.

Что касается первого мероприятия, то факт точно соответствовал плану в марте, апреле, мае, июне и июле, в остальные месяцы план был перевыполнен. Связана такая динамика мо-

Секция 6  
Энергосбережение и энергоэффективность

жет быть с тем, что искусственное освещение использовалось меньше часов в течении месяца, чем планировалось. На это могут повлиять такие факторы, как погодные условия, количество часов нахождения определенных сотрудников в офисе и другие факторы. Так, например, перевыполнение плана в основном наблюдается в осенние и зимние месяцы, что предположительно может быть связано с меньшим, чем обычно, количеством пасмурных дней.

Таблица 2. Объем выполнения плана по экономии т у.т. 2023 года, %

№		1		2				
Объем выполнения плана ( % вып.плана)		% вып.плана по первому мероприятию по месяцам	% вып.плана по первому мероприятию по кварталам	% вып.плана по второму мероприятию по месяцам	% вып.плана по второму мероприятию по кварталам	Итого % вып.плана по месяцам	Итого % вып.плана по кварталам	
№ квартала	1	январь	103,00	101,54	–	–	103,00	101,54
		февраль	101,05		–		101,05	
		март	100,00		–		100,00	
	2	апрель	100,00	100,00	120,00	115,38	111,76	108,70
		май	100,00		116,25		108,67	
		июнь	100,00		108,75		105,00	
	3	июль	100,00	101,82	110,00	111,05	106,67	107,67
		август	100,00		108,33		105,56	
		сентябрь	104,00		114,29		110,00	
	4	октябрь	103,66	104,42	139,78	130,29	122,86	118,71
		ноябрь	106,02		127,66		117,51	
		декабрь	103,57		125,00		116,18	
2023 год			102,11 %		123,05		111,51	

Анализируя показатели второго мероприятия, можно заметить, что данные представлены со второго квартала, это объясняется тем, что это мероприятие внедрили не с января, а с апреля, при этом оставшаяся экономия от этого мероприятия будет включена в отчет за 2024 г., так как следует учитывать годовое значение этого показателя. В этом графике знаменательно, что во все месяцы экономия была выше предусмотренного плана, в июне и августе она достигала наименьших значений, а в октябре дошла до наивысшего состояния для этого мероприятия. Такая положительная динамика может быть связана с тем, что по факту в организации закупили и установили лампы мощностью меньше, чем планировалось, что позволило сэкономить больше т у. т., чем было предусмотрено.

Таким образом, оба мероприятия повлияли на итоговую экономию. Можно сделать вывод, что в обоих мероприятиях прослеживается то, что в осенние месяцы экономия была выше предусмотренных значений, а в теплый период фигурируют более низкие показатели. В точности выполнить план по энергосбережению не удалось, так как это практически невозможно из-за влияния большого количества факторов. Общая экономия за год составила 1,4563 т у.т., что, учитывая, что данное предприятие потребляет более 300 т у.т., является лишь малой частью расходуемых энергоресурсов.

Конечно, существуют различные непроизводительные организации, и в случае, если их деятельность способствует большим потерям энергии, то внедрение энергосберегающих мероприятий является необходимым этапом развития. Так может проводиться замена оконных блоков ПВХ, замена или реконструкция отопительных приборов, закупка более энергосберегающей техники, необходимой для работы, и даже корректировка ландшафта местности для снижения потребности в продолжительном использовании искусственного освещения из-за загромождения окон растениями и т.д. Каждое проводимое мероприятие необходимо продумывать и обосновывать для достижения максимальной экономии.

В случаях, когда в силу современности здания и используемой техники, предприятие не имеет обоснования для внедрения энергосберегающих мероприятий, стоит задуматься о це-

лесообразности составления планов по энергосбережению каждый год. С другой стороны, все имеет свой износ, и со временем проведение данных мероприятий станет необходимостью. Даже очень малая доля получаемой экономии может дать экологический эффект и стимулировать организацию на поиск новых решений для достижения больших результатов с перспективой на будущее. Сейчас активно развивается сфера энергосбережения, создаются проекты по созданию зеленого офиса и придумываются инновационные решения. Обязанность ежегодно разрабатывать и выполнять план по внедрению мероприятий по энергосбережению на любых предприятиях с большим потреблением способствует более быстрому прогрессу в этой отрасли.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об энергосбережении. Закон Республики Беларусь «от 8 января 2015 г. № 239-3, принятый Палатой представителей 11 декабря 2014 года, одобрен Советом Республики 18 декабря 2014 года, изменения и дополнения: Закон Республики Беларусь от 24 мая 2021 г. № 111-3.
2. Методические рекомендации по составлению технико-экономических обоснований для энергосберегающих мероприятий / соглас. Национальной академией наук Республики Беларусь № \_26-09/4725 «28» августа 2020 г. / утв. Департаментом по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь – Минск, 2020.

## ПРОТОКОЛЫ ДИММИРОВАНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ

**И.С. Савченко, Е.А. Мельникова, Д.Д. Радюк**

*Белорусский национальный технический университет, ФИТР, РТС, группа 10703222*

Научный руководитель: В.Н. Калечиц, к.т.н., доцент ЭС ЭФ БНТУ

В статье «Анализ эффективности диммируемых схем освещения на примере учебной аудитории с использованием программы DIALUX» [1] была доказана их большая экономичность и энергоэффективность относительно традиционных схем без возможности регулирования интенсивности освещения. В данной статье рассмотрим основные протоколы диммирования, сравним их и определим области возможного применения.

На нынешнем этапе существуют пять основных протоколов диммирования [2]: TRIAC, DALI, 1-10V, PWM и Casambi.

В протоколе TRIAC процесс управления интенсивностью освещения происходит за счет кратковременного отключения светильника, что приводит к отсечению части синусоиды переменного тока. Подача тока регулируется с помощью симметричного триодного тиристора (triode for alternating current – TRIAC), откуда и возникло название протокола. Диммирование с отсечением по переднему фронту – наиболее распространенный вариант регулировки домашнего освещения в связи с относительно дешёвыми, легко устанавливаемыми и эксплуатируемыми устройствами. Подходит для использования с галогенными лампами, лампами накаливания и некоторыми



Рис. 1. Волна переменного тока с отсечкой по переднему и заднему фронтам

небольшими люминесцентными лампами, что указывается в документации к светильнику. Диммирование с отсечением по заднему фронту было разработано для светодиодных ламп. Здесь сила тока нарастает плавно, что приводит к отсутствию резких скачков напряжения. Такой способ диммирования немного дороже предыдущего варианта, однако по-прежнему является относительно дешевым и простым в эксплуатации решением.

1-10V по принципу работы достаточно прост: сигналом к изменению интенсивности освещения является изменение напряжения от 1 до 10 с градацией в 1 В. Например, при напряжении в 4 В яркость светильника составит 40 % от максимальной. Главным отличием данного метода от своего предшественника 0–10V является минимально возможная к установлению яркость в 10 % от полной. Такой протокол подходит для использования со светодиодными и люминесцентными лампами. Основным недостатком являются возможные сложности с точной регулировкой, так как напряжение на линиях большой длины затухает и использование на больших территориях становится затруднительным.

Диммирование с помощью широтно-импульсной модуляции, или PWM, также осуществляется с помощью симистора. Процесс регулирования происходит иначе: яркость светильника прямо пропорциональна длине и частоте импульсов, который подается симистором в виде электрического тока. Основным преимуществом перед протоколом TRIAC является возможность управления по беспроводным каналам связи, за счёт чего PWM часто используется в системах умного дома. Этот метод диммирования будет дороже предыдущих.

Протокол DALI имеет следующий принцип работы: контроллер подключается к сети, где у каждого светильника выставлен свой уникальный адрес. Сигналы передаются по шине в обе стороны, что позволяет получать уведомления, если у одного из источников света произошел сбой. С помощью этого протокола можно более точно настраивать интенсивность освещения, так как уровень яркости здесь 254. Также в одной сети DALI может одновременно находиться до 64 светильников и быть задано до 16 настраиваемых сценариев освещения. Зачастую в больших зданиях используют сразу несколько сетей DALI, которые объединяются в одну общую сеть. Такое решение является более дорогим, но наиболее удобным для использования в системах освещения улиц и больших зданий.

Для управления Bluetooth-светильниками через мобильное приложение может быть использован протокол Casambi. Благодаря ему можно настраивать интенсивность освещения, цвет и цветовую температуру, создавать свои сценарии освещения для определенных групп источников света. Здесь могут быть добавлены датчики освещенности, движения и другие, на основе сигналов которых может происходить изменение света отдельных групп. В отличие от DALI, Casambi не требует дополнительной проводки, в следствии чего может быть введен на любом этапе.

Исходя из вышеизложенного материала можно сделать следующий вывод: выбор протокола диммирования в конкретной ситуации зависит от многих факторов, включая бюджет, этап строительства здания, масштабы помещений, каналы связи, возможность объединения в группы, создания сценариев освещения, подключения различных датчиков и многих других. На современном этапе существуют как дорогие, так и дешёвые способы управления интенсивностью освещения. Подключение может быть произведено и кабельным, и беспроводным соединением.

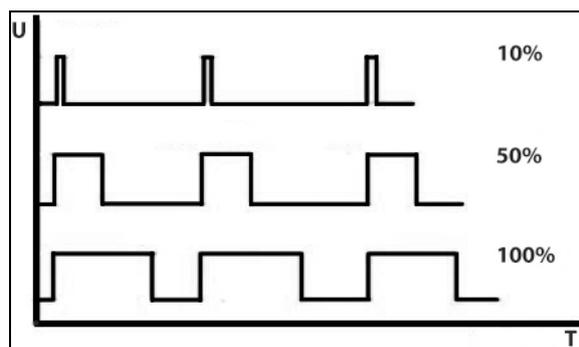


Рис. 2. Зависимость напряжения источника света от длины и частоты импульсов

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко И.С., Мельникова Е.А. Анализ эффективности диммируемых схем освещения на примере учебной аудитории с использованием программы DIALUX // Лучшая исследовательская статья. – 2024. – С. 26–34.
2. Диммирование светодиодов в общем и в деталях [Электронный ресурс]. – URL: <https://aledo-pro.ru/articles/view/17>. Дата обращения: 10.11.2024.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ В СЛОЕВОМ КОТЛЕ ПРОМЕТЕЙ ЭКО

К.С. Есин

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5ВМ31*

Научный руководитель: С.А. Янковский, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Потребление электроэнергии в России неуклонно растет. Каждый год страна использует 1107,1 млрд кВт·ч, что составляет приблизительно 5 % от общего мирового потребления. С 2010 года спрос на электроэнергию увеличился более чем на 8 % из-за технологического роста, но также из-за увеличения стоимости ископаемого топлива. В 2021 году мировое добыча угля выросла на 5,7 % после восстановления мирового спроса [1]. Решение задачи по снижению воздействия энергетического оборудования на окружающую среду является наиболее актуальным вопросом современного энергетического и научного сообществ. Энергия, производимая с помощью солнца, ветряных электростанций и других ВИЭ имеет высокую стоимость и длительный срок окупаемости, поэтому в последние годы стало понятно, что этот процесс эволюции в энергетике не сможет превзойти традиционную энергетику в ближайшие десятилетия. Одним из возможных решений для по снижению негативного воздействия традиционных источников энергии на окружающую среду может стать частичная замена классического органического твердого или жидкого топлива на углерод-нейтральное биотопливо [2]. Такой альтернативной добавкой к углю может стать биомасса или отходы ее переработки. Биомасса обладает большим потенциалом, поскольку является возобновляемой, в отличие от ископаемого топлива. Совместное сжигание биомассы с углем или отходами угольного производства расширит использование энергии биомассы и улучшит свойства углей, например, отходов угледобычи. Выбор биомассы как сырья для энергетического применения, зависит от наличия ее в каждом конкретном регионе мира, и этот список довольно широк: отходы лесопиления, трава, жмых сахарного тростника, рисовая шелуха, отруби, кукуруза и др. [2].

Для выполнения экспериментальных исследований в качестве исходного материала был использован уголь Балахтинского месторождения, Красноярского края. В качестве добавки к бурому углю использовались отходы лесопиления, а именно древесная щепа (ЛПК «Дзержинское», Томская область).

В качестве связующего для брикетов применялся клей ПВА на водной основе. Выбор связующего обоснован из-за относительно конкурентной себестоимости, по сравнению с такими аналогами как: силикатный клей, клей на основе природных загустителей и др. Связующее экологически безопасное и доступное в связи с достаточно большим количеством предприятий в РФ, которые занимаются его производством и поставками. Основное преимущество связующего не токсичность для человека и окружающей среды, в том числе и при сжигании.

Опытным путём было установлено оптимальное количество связующего. Для экспериментального сжигания топливной композиции на основе угля и биомассы были подготовле-

ны брикеты из измельченного угля массой 500 г, и древесной щепы массой 500 г и связующего.

На первом этапе экспериментальных исследований определялись технические характеристики исследуемых топливных композиций. Результаты исследований приведены в табл. 1

*Таблица 1. Результаты исследование теплотехнических характеристик полученной топливной композиции*

Топливо	Теплотехнические характеристики			
	$A_r, \%$	$W, \%$	$V_{daf}, \%$	$Q_p^H, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Уголь 50 % / Древесная щепа 50 %	2,72	8,05	76,36	22,84

Следующим этапом экспериментальных исследований было сжигание подготовленных топливных композиций с целью определения их эффективной теплоотдачи.

Перед испытанием были выполнены подготовительные работы слоевого котла Прометей ЭКО 25 кВт: подготовлено оборудование для измерения температуры дымовых газов и температуры в слое; выполнена проверка работоспособности и достоверности показаний штатных контрольно-измерительных приборов; установлен газоанализатор «Тест-1» и датчик температуры по тракту дымовых газов; выполнена подготовка котла к работе в номинальном режиме – очистка зольника, чистка внутренних поверхностей, экранов от угольной пыли.



*Рис. 1. Типичные фотографии проведения испытаний котла*

На втором этапе выполнялось сжигание смесового топлива и изучение технического паспорта водогрейного котла. Полученные результаты приведены в табл. 2.

На третьем этапе выполнялся расчет КПД слоевого котла Прометей ЭКО 25 кВт. Результаты приведены ниже.

Формула расчета КПД котла по прямому балансу [3]:

$$\eta_k = \frac{Q_k}{Q_H^p \cdot B_p}$$

где  $Q_k$  – теплопроизводительность котла, кДж;  $Q_H^p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

$$Q_k = c_p G_T (t_{\text{вых}} - t_{\text{в}}) = 3,26 \cdot 1,8 \cdot (32,5 - 26,7) = 34,03 \text{ кДж};$$

где  $c_p$  – теплоемкость теплоносителя (этиленгликоль),

$$\eta_k = \frac{Q_k}{Q_H^p \cdot B_p} = \frac{34,03}{19,75 \cdot 1,972} = 0,874.$$

Таблица 2. Результаты экспериментальных измерений параметров котлоагрегата при сжигании топливных-композиций

Расход топлива	$B_p = 1,972 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$
Температура теплоносителя на входе	$t_{\text{т.н.в.}} = 26,7 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура теплоносителя на выходе	$t_{\text{т.н.вых.}} = 32,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура дымовых газов	$T_{\text{дым}} = 53,5 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура в слое	$T_{\text{сл}} = 718,34 \text{ }^\circ\text{C}$
Низшая теплота сгорания	$Q_H^p = 19,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
КПД	> 80 % (по паспорту)
Расход теплоносителя через котел	$G_T = 1,8 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ (по паспорту)
Теплоноситель	Этиленгликоль

Результаты экспериментальных исследований сжигания топливных композиций на основе бурого угля в смеси с отходами лесопиления в равных по массе соотношениях (уголь / древесина) показали свою достаточную эффективность. По результатам испытаний КПД котлоагрегата составил более 87 %, что является сопоставимым с КПД твердотопливных котлоагрегатов, сжигающих традиционные угли. Испытания подтвердили перспективность применения топливных композиций на основе низкосортного угля и отходов лесопиления в энергетических котлах малой мощности без существенных потерь в энергетических показателях, но с существенно более низкими показателями зольности и вредных выбросов в окружающую среду.

Таким образом, выполненные натурные испытания топливных композиций на основе измельченного угля в смеси с отходами лесопиления в виде брикетов подтверждают целесообразность применения таких топлив для котельных установок малой мощности, что открывает перспективы для их более широкого применения с целью производства тепла для жилых и промышленных объектов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта ПИШ-НИР-2024-011.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Influence of Grinding Methodology and Particle Size on Coal and Wood Co-Combustion via Injection Flame Opening Angle / S. Yankovsky, A. Misjukova, A. Berikbolov, M. Vagner, N. Yankovskaya // Energies, MDPI. – 2023. – No. 16(11). – P. 4469.
2. Analysis of the Characteristics of Bio-Coal Briquettes from Agricultural and Coal Industry Waste / A. Nikiforov, A. Kinzhibekova, E. Prikhodko, A. Karmanov, S. Nurkina // Energies, MDPI. – 2023. – V. 16(8). – P. 1–16.
3. Акимов Ю.И., Васильев А.В., Антропова Г.В. Тепловой расчет котлоагрегатов // Саратовский государственный технический университет, 2006. – С. 95. ISBN5-7433-0033-X

# Секция 7

## Новации инженерного образования

### ШКОЛЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ: ВЕКТОР РАЗВИТИЯ ДЛЯ НОВЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ

К.В. Шехин

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа А4-46*

Научный руководитель: А.С. Зайцев, к.ф.-м.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова;  
В.Е. Рудник, к.т.н., ассистент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Актуальность использования передовых технологий, таких как цифровые двойники, искусственный интеллект, машинное обучение, облачные вычисления, 3D-печать и промышленный интернет вещей, в настоящее время трудно переоценить. Эти инструменты предлагают эффективные решения для достижения различных целей и особенно важны в критически значимых областях, таких как энергетика. Например, на атомных электростанциях цифровые двойники используются для создания виртуальных моделей основного и вспомогательного оборудования, а также различных систем, что позволяет проводить анализ их работы в реальном времени. Это помогает предсказывать режимы работы и потенциальные неисправности оборудования, повышая безопасность и надежность функционирования станции. Внедрение таких технологий сокращает количество ошибок, допускаемых персоналом, и повышает качества работы; ускоряет проведение первичного и регулярного инструктажа оперативного персонала по актуальному состоянию технологических процессов; позволяет проводить регулярную проверку оперативного персонала на профессиональную грамотность и знание протоколов действий в различных ситуациях. В условиях жесткой конкуренции и быстрого прогресса использование данных решений становится важным фактором устойчивого роста и инноваций в энергетическом секторе.

С развитием технологий многие компании сталкиваются с дефицитом высококвалифицированных специалистов, обладающих необходимыми знаниями для работы с новыми инструментами и подходами. Это создает трудности в поиске и удержании квалифицированных кадров, что негативно сказывается на их росте и развитии. Проблема особенно актуальна в области информационных технологий, энергетики, инженерии и науки, что связано с недостаточной подготовкой кадров в области цифровых технологий и автоматизации, затрудняющей внедрение инновационных решений в производство. Ситуация усугубляется тем, что традиционные образовательные программы не всегда успевают адаптироваться к динамично меняющимся требованиям рынка труда. Учебные заведения, хотя и повышают стандарты образования, не всегда успевают за изменениями, что ведет к несоответствию между подготовкой специалистов и реальными потребностями бизнеса.

Понимая важность наличия квалифицированных кадров, компании активно меняют свои подходы. Они разрабатывают корпоративные университеты и программы обучения на рабочем месте, а также взаимодействуют с образовательными учреждениями для формирования более эффективных учебных курсов. Многие из них выступают инициаторами открытия новых образовательных программ и генеральными партнерами.

Сотрудничество компаний и вузов становится неотъемлемой частью решения проблемы нехватки квалифицированных кадров. Учебные заведения начинают сотрудничать с бизнесом для адаптации образовательных программ к текущим потребностям рынка. При создании таких программ у генерального партнера есть возможность участвовать в формировании учебного плана и согласовывать его с опытными специалистами компании. Совместные проекты, стажировки и курсы повышения квалификации помогают студентам приобрести практические навыки, необходимые для успешного трудоустройства. Компании также участвуют в создании исследовательских проектов и лабораторий на базе университетов, что способствует внедрению новых технологий и формирует у студентов понимание реальных бизнес-процессов. Такое сотрудничество создает взаимовыгодную среду, в которой готовятся специалисты, способные эффективно работать в современном, быстро меняющемся мире.

Государственная корпорация «Росатом» активно внедряет передовые технологии для повышения эффективности работы своих объектов и обеспечения безопасности в атомной энергетике. В этом контексте АО «Инженерно-технический центр «ДЖЭТ» предлагает услуги по созданию цифровых двойников «под ключ». Этот процесс включает в себя полную синхронизацию модели с реальным объектом через несколько этапов, таких как формирование комплексной модели, применение методов моделирования для описания всех подсистем, создание системы управления с обратной связью и разработка сценариев изменений процессов с предиктивной аналитикой. Согласно концепции мониторинга, осуществляется постоянное наблюдение за параметрами объекта в реальном времени на протяжении всего его жизненного цикла. Для оптимизации технико-экономических показателей применяются мультидисциплинарные цифровые двойники, а предиктивная аналитика осуществляется с использованием машинного обучения и симуляционного моделирования для диагностики узлов и агрегатов объекта-прототипа [1].

АО «Инженерно-технический центр «ДЖЭТ» активно развивает сотрудничество с образовательными учреждениями, открывая школы моделирования в различных университетах. Эти инициативы направлены на подготовку студентов к современным требованиям рынка труда и обеспечивают их необходимыми компетенциями в области цифровых технологий и моделирования.

В рамках школы моделирования, открытой в ТПУ в сентябре 2022 года, студенты получают теоретические знания и практические навыки, обучаясь основам создания математических моделей в программе REPEAT (Real-time Platform for Engineering Automated Technologies) и программном обеспечении «САПФИР» (Система Автоматического Проектирования Физических Инженерных Расчетов) используя теплогидравлический код CMS (Compressible Media Solver).

Система САПФИР представляет собой многопользовательскую распределенную графическую среду автоматизированного моделирования физических процессов. Она включает в себя развитые средства отладки программ, визуализации расчетов и отображения состояния моделируемого оборудования [2].

Студенты направления «Теплоэнергетика и теплотехника» изучают теплогидравлический код CMS, предназначенный для расчета параметров в реальной теплогидравлической сети произвольной конфигурации. Этот код позволяет моделировать основные физические процессы и явления, которые могут иметь место во всем спектре режимов нормальной и аварийной эксплуатации. Примеры лабораторных работ студентов с использованием ПО «САПФИР»:

1. Математическое моделирование теплообменников и насосного оборудования (на примере системы сетевой воды), пример представлен на рис. 1.
2. Разработка упрощенной схемы математической модели котла типа БКЗ 320-140 ГМ.
3. Математическое моделирование паротурбинной установки (на примере теплофикационной турбины КТ-63-7,7).

Программа REPEAT – модельно-ориентированная среда проектирования и математического моделирования, благодаря которой пользователи смогут разрабатывать модели энергообъектов/процессов, создавать цифровые двойники, повышать эффективность энергообъекта и т. д.

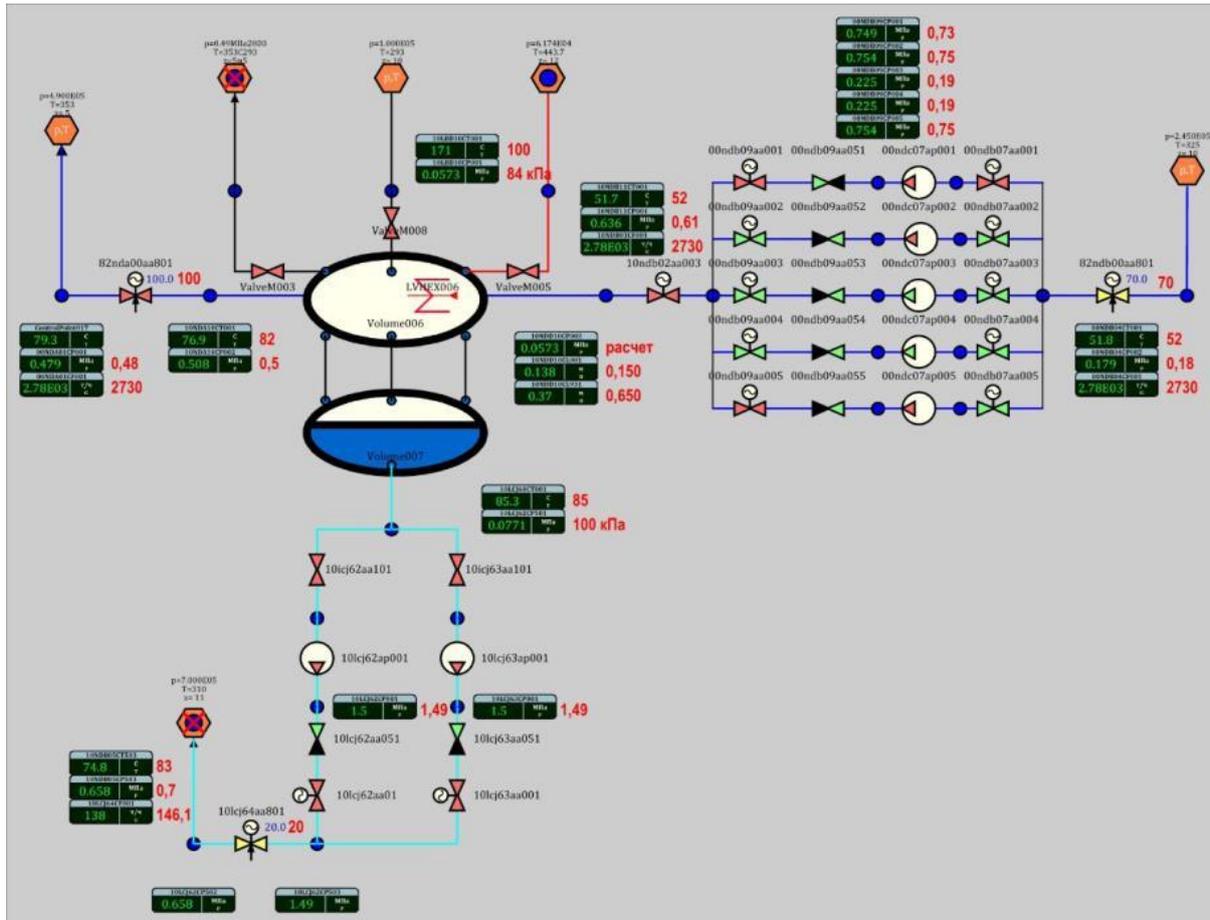


Рис. 1. Пример работы

Студенты направления «Электроэнергетика и электротехника» в школе моделирования преимущественно используют программное обеспечение (ПО) REPEAT для изучения различных аспектов электроэнергетики и электроники [3]. В рамках учебной программы они выполняют следующие лабораторные работы:

1. Исследование цепи постоянного тока.
2. Исследование режима работы синхронного генератора.
3. Исследование режима работы параллельно работающим синхронным генераторов.
4. Исследование режима работы электрической станции.
5. Анализ режима работы электрической станции при однофазных, двухфазных и трехфазных коротких замыканиях, с учетом разных схемно-режимных ситуациях.
6. Моделирование автоматического регулятора частоты и активной мощности (АРЧМ) для синхронного генератора, пример представлен на рис. 2.
7. Исследование режима работы преобразовательных устройств на базе IGBT транзисторов.

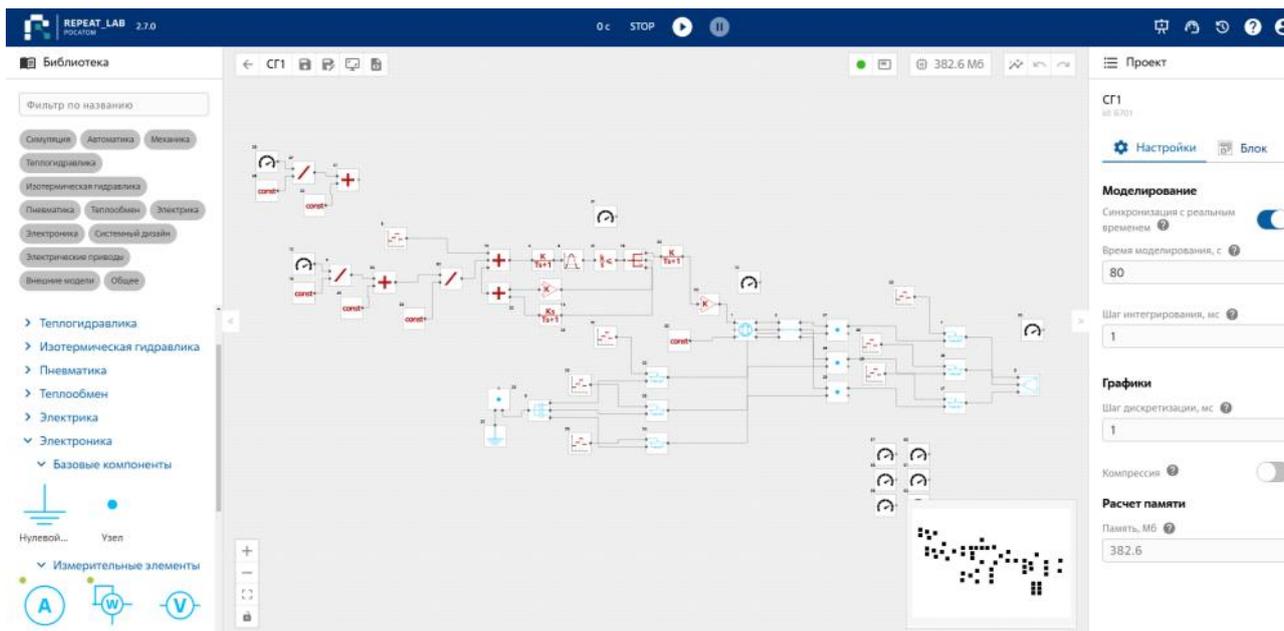


Рис. 2. Пример работы в ПО REPEAT

Студенты, обучающиеся в школе моделирования, получают уникальные ИТ-компетенции и опыт участия в реальных проектах в сфере математического моделирования, что значительно повышает их конкурентоспособность на рынке труда. Они имеют возможность участвовать в тематических кейс-чемпионатах и хакатонах, где могут проявить свои навыки и креативность, а также выиграть ценные призы. По окончании курса обучения в Школе моделирования студенты получают сертификат, который подтверждает их квалификацию и знания. Кроме того, им предоставляется доступ к учебным материалам, разработанным опытными инженерами, что способствует углубленному изучению предмета. Важным аспектом программы является возможность пройти практическую подготовку и начать карьеру в энергетических и других промышленных компаниях страны, что открывает для студентов широкий спектр перспектив и карьерных возможностей.

Внедрение передовых технологий, таких как цифровые двойники, в атомной энергетике и других отраслях становится ключевым фактором для повышения эффективности и безопасности работы объектов. АО «Инженерно-технический центр «ДЖЭТ» активно развивает эти направления, предлагая инновационные решения и услуги «под ключ». Совместная работа с образовательными учреждениями, включая открытие школ моделирования, обеспечивает подготовку высококвалифицированных специалистов, готовых к современным требованиям рынка труда.

Компетенции, полученные в школе моделирования, позволяют студентам не только закрепить теоретические знания, но и развить навыки практического применения математического моделирования в тепло- и электроэнергетике, что является основополагающим для их будущей профессиональной деятельности. Такой подход способствует углубленному пониманию предметной области и помогает учащимся развивать критическое мышление, навыки работы в команде и адаптивность – качества, востребованные в быстро меняющемся мире технологий.

Таким образом, усилия по созданию взаимовыгодного сотрудничества между промышленностью и образованием, а также внедрение школ моделирования от ДЖЭТ, играют важную роль в подготовке нового поколения специалистов, способных эффективно работать в сфере высоких технологий и успешно справляться с вызовами современного рынка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Школа моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://get-sim.ru/>, свободный – (10.11.2024).
2. Программный комплекс САПФИР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://get-lab.ru/>, свободный – (10.11.2024).
3. Программный комплекс REPEAT, справка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://app.repeatlab.ru/docs/ru/reference/index.html>, свободный – (10.11.2024)

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРЕПОДАВАНИИ МАТЕМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

**М.А. Проскуряков**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5А26*

Научный руководитель: Е.А. Беляускене, старший преподаватель, ОММФ, ИЯТШ ТПУ

В последние годы образование претерпевает значительные изменения, и одним из ключевых факторов этих изменений является внедрение компьютерных технологий в учебный процесс. Эти технологии продолжают развиваться, предлагая новые возможности, инструменты и методы для улучшения качества образования и повышения эффективности учебного процесса. Среди используемых в образовании компьютерных технологий особое место занимает искусственный интеллект (ИИ) – «искусственная система, имитирующая решение человеком сложных задач в процессе его жизнедеятельности» [1]. ИИ может значительно улучшить и оптимизировать образовательный процесс, повысить результаты обучения и облегчить трудовую деятельность преподавателей. В настоящее время существует опыт применения ИИ в учебном процессе в различных предметных областях, а также в управлении образованием [2]. Несмотря на накопленный опыт успешного внедрения технологий ИИ в образовательный процесс, наблюдается неоднозначное отношение к этому вопросу [3–5].

Статья посвящена различным аспектам внедрения различных технологий ИИ в изучении и преподавании математики. Отметим, что применение компьютерных технологий в математике ограничено областями, связанными с решением трудоемких задач, математическим моделированием и визуализацией различных процессов [6]. Тем не менее, в последние годы в связи с развитием методов машинного обучения и нейронных сетей наблюдается активное внедрение методов ИИ в сферу преподавания математики. Электронные курсы на платформах Khan Academy [7], MathIA [8], IXL [9], Knewton [10], Plarion [11] и др. реализованы на основе адаптивных алгоритмах, которые анализируют прогресс ученика, его сильные и слабые стороны для оптимизации уровня сложности заданий, подбора эффективных методов обучения, необходимых учебно-методических материалов и предоставления индивидуальной обратной связи. Кроме того, эти платформы используют ИИ для автоматической проверки домашних заданий, тестов и контрольных работ. ИИ анализирует ответы учеников, сравнивая их с эталонами, оценивает правильности ответов, иногда предоставляя частичные баллы за частично правильные решения, предоставляет обратную связь, объясняя студентам, где они допустили ошибки.

С другой стороны, ИИ может оказывать преподавателям помощь в подборе учебно-методических материалов для проведения занятий и оценочных мероприятий. Различные нейросети позволяют генерировать задания, кейсы, учебные игры, изображения, а также переводить аудио записи в текст для расшифровки лекций и устных выступлений [12].

Для изучения возможностей использования ИИ на занятиях математики в техническом вузе нами был проведен опрос студентов, в котором приняли участие 125 человек из них

53,6 % студенты первого, 16,8 % – второго, 12,8 % – третьего и 16,8 % – четвертого курсов Московского авиационного института и Томского политехнического университета. Всего 10 % респондентов удовлетворены тем, как преподают математику в их вузе. Более половины опрошенных считают (76 %), что использование ИИ в изучении математики могло бы повысить их уровень знаний, а 73,4 % хотели бы изучать математику с применением технологий ИИ.

На вопрос, используете ли Вы ИИ в обучении, 53,6 % ответили положительно. При этом указывались, в основном, предметы социально-гуманитарного блока (иностраный язык, история и пр.). Однако 48 % использовали ИИ для решения математических задач.

Внедрение технологий искусственного интеллекта в образование открывает новые горизонты для улучшения качества обучения и оптимизации учебных процессов. Результаты опроса студентов показывают, что большинство из них осознают потенциал ИИ в преподавании математики и выражают желание использовать эти технологии для повышения уровня своих знаний. Это свидетельствует о растущем интересе к адаптивным методам обучения, которые могут быть реализованы с помощью ИИ, включая автоматическую проверку заданий и индивидуализированный подход к каждому студенту. Тем не менее, несмотря на положительные аспекты, существует и определённая настороженность по поводу интеграции ИИ в образовательный процесс. Важно учитывать возможные риски, связанные с использованием этих технологий [13]. Таким образом, будущее образования с использованием искусственного интеллекта выглядит многообещающе, однако его успешная реализация требует комплексного подхода и внимательного анализа существующих практик. Учитывая текущие тенденции и результаты опросов, можно с уверенностью сказать, что ИИ способен значительно изменить подход к обучению в математике, делая его более персонализированным и эффективным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Словарь по кибернетике / А.А. Дородницын, И.Н. Коваленко, А.А. Бакаев и др.; под ред. В.М. Глушкова. — Киев: Укр. сов. энциклопедия, 1979. — 623 с. : ил.: 20 см.
2. Котлярова И.О. Технологии искусственного интеллекта в образовании // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Образование. Педагогические науки. — 2022. — Т. 14, № 3. — С. 69–82. — DOI 10.14529/ped220307. — EDN JADHNV.
3. Иванченко И.С. Оценка перспектив применения искусственного интеллекта в системе высшего образования // Science for Education Today. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 170–194. — DOI 10.15293/2658-6762.2304.08. — EDN ZGCXNI.
4. Фурс С.П. Искусственный интеллект в сфере образования – помощник педагога или «подрывная» технология? // Преподаватель XXI век. — 2023. — № 1-1. — С. 40–49. — DOI 10.31862/2073-9613-2023-1-40-49. — EDN VRIIJS.
5. Донина И.А., Воднева С.Н., Михайлова М.Н. Искусственный интеллект в современном образовании: возможности и угрозы // Психолого-педагогический поиск. — 2021. — № 1(57). — С. 17-29. — DOI 10.37724/RSU.2021.57.1.002. — EDN RITYKT.
6. Бабкина А.А., Андрюшечкина Н.А. применение искусственного интеллекта в математике // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. — 2023. — №11-2 (86). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-v-matematike> (дата обращения: 21.11.2024).
7. Официальный сайт академии. — URL: <https://www.khanacademy.org/>.
8. Официальный сайт платформы для обучения математике по школьной программе. — URL: <https://www.carnegielearning.com/solutions/math/mathia/>.
9. Официальный сайт для обучения. — URL: <https://www.ixl.com/>.
10. Официальный сайт для адаптивного обучения. — URL: <https://support.knewton.com/en/s/>
11. Официальный сайт системы адаптивного обучения. — URL: <https://plario.ru/>.
12. Онлайн преобразование аудио и видео в текст. <https://any2text.ru/>
13. Кудряшова П.А. Правовое регулирование использования искусственного интеллекта // Вестник науки. — 2023. — № 6 (63). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pravovoe-regulirovanie-ispolzovaniya-iskusstvennogo-intellekta> (дата обращения: 21.11.2024).

## **СТУДЕНЧЕСКОЕ СОУПРАВЛЕНИЕ КАК МЕСТО ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ПРОБ И РАЗВИТИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ОБУЧАЮЩИХСЯ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ**

**А.М. Эралиева**

*Сибирский Федеральный Университет, Политехнический институт,  
кафедра тепловых электрических станций, группа ФЭ22-01б*

Научный руководитель: А. А. Пикалова, к.п.н., доцент, Сибирский федеральный университет, Политехнический институт, кафедра тепловых электрических станций

В условиях современного быстро меняющегося мира конкурентоспособность человека в профессиональной сфере определяется его компетентностью и гибкостью, оптимумом знаний и уже случившихся проб в карьере, готовностью к коммуникации на разных уровнях, умением достигать желаемый результат и взаимодействовать в различных командах, иными словами владением комплексом профессиональных и надпрофессиональных личностных качеств.

Показателем результативности системы подготовки кадров является сформированность компетенций, которые зафиксированы в федеральных образовательных стандартах, а также в требованиях работодателя, отраженных в профессиональных стандартах [1]. Формирование и многоуровневое развитие которых происходит в ходе изучения дисциплин, а также в различных форматах практики. Универсальные компетенции не являются исключением. Так, на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (далее ТЭС ПИ СФУ) имеет отражение в цикле гуманитарных дисциплин, таких как: «Деловые коммуникации», «Технология личностного роста и социального взаимодействия», «Ответственные инновации: этика, безопасность», «Управление изменениями». Которые реализуются в течение трех курсов обучения студентов, а также отражают в своем содержании контекст получаемой инженерной профессии или профессионализации компетенций через наличие междисциплинарных связей с такими дисциплинами как: «Основы инженерной деятельности», «Основы проектной деятельности», «Решение технических кейсов», «Управление проектами». В процессе обучения студент приобретает ключевые компетенции, необходимые для профессионала-теплоэнергетика как при изучении теории основ инженерного дела, так и на практических занятиях, в том числе включающих в себя проектирование и реализацию социальных и инженерных проектов различного уровня.

Одновременно с этим, на кафедре ТЭС ПИ СФУ проектная деятельность реализуется не только в учебной деятельности, но и во внеучебное время. Так, у обучающихся есть возможность обнаружить и сформулировать свои запросы, на основе чего построить индивидуальную траекторию собственного развития и реализовать ее с помощью студенческого объединения, которое создано и функционирует в рамках данной кафедры и носит название – «Органа студенческого самоуправления» (далее ОСС). Основной целью ОСС является создание пространства возможностей для развития универсальных компетенций студентов и построение будущей профессиональной траектории развития, которое включает следующие основные направления деятельности:

### **1. Кураторский отдел**

*Цель:* помощь студентам первых курсов в успешной адаптации к новым для них условиям университета и, как следствие, сохранение контингента обучающихся кафедры, через мероприятия на сплочение учебной группы, мониторинг успеваемости, оперативное реагирование на запросы и трудности студентов.

*Мероприятия:*

- внутренняя организация ежегодного шоу-конкурса «Прошу слова», направленного на адаптацию и сплочение учебной группы в процессе создания творческого номера и выступления на мероприятии института и университета;
- Посвящение первого курса, включающее в себя экскурсию на одной из тепловых электрических станций города в рамках стратегического сотрудничества с компанией-партнером; встреча с выпускниками кафедры разных лет – действующих теплоэнергетиков в формате пресс-конференции или круглого стола. Данный блок мероприятий позволяет первокурсникам узнать об особенностях обучения на кафедре и углубиться в суть будущей профессии, что в совокупности повышает мотивацию к обучению;
- проведение «Киновечера ТЭС», где первокурсникам предоставляется возможность представить себя в творческом формате видео-сюжета продолжительностью не более одной минуты и рассказать о своих качествах, талантах и обозначить свою уникальность. Такое мероприятие позволяет студенту нестандартно подойти к решению задачи, а также взаимодействовать в неформальной обстановке со студентами старших курсов, которые выступают персональными наставниками первокурсника, помогают ему в создании видео-сюжета, узнают больше про своего наставляемого, что в будущем позволяет завязать дружеские отношения и реализовывать совместные проекты.

## **2. Информационный отдел**

*Цель:* внешнее позиционирование кафедры и освещение деятельности в информационной среде: паблик кафедры в социальной сети «ВКонтакте», телеграмм-канал «Теплые вести: жизнь студента кафедры ТЭС», сайт ТЭС ПИ СФУ со всей важной информацией, собственный бренд – макот «Капля Оз».

*Мероприятия:*

- проект «Кафедра в лицах» – публикация серии интервью с преподавателями и выпускниками, которая раскрывает индивидуальность кафедры через персоналии, позволяют студентам почувствовать себя частью профессионального сообщества;
- создание и презентация mascota ТЭС – «Капля Оз», фирменного узнаваемого персонажа, который олицетворяет кафедру и подчеркивает ее индивидуальность во внешней среде, а также меняется и «растет» вместе со студентами разных курсов;
- видео-интервью со студентами кафедры;
- ребрендинг кафедры, освоение новых форматов позиционирования в информационной среде.

## **3. Профориентационный отдел**

*Цель:* помощь будущим абитуриентам в выборе профессионального пути и поступлении на кафедру ТЭС ПИ СФУ.

*Мероприятия:*

- профориентационные поездки в школы городов Красноярского края. Взаимодействие студентов с учениками специализированных энергоклассов является одним из эффективных методов профориентации, позволяющих будущему абитуриенту ознакомиться с самим местом обучения, с возможностями будущего карьерного пути и, как следствие, с потенциальным работодателем;
- День открытых дверей для абитуриентов и учащихся школ города Красноярска;
- интенсив «Летняя школа будущего теплоэнергетика», в рамках которого ученики погружаются в инженерное дело и в течение пяти дней, осваивает знания путем проектно-ориентированной деятельности.

## **4. Научно-исследовательский отдел**

*Цель:* возможность для развития как надпрофессиональных, так и профессиональных компетенций в инженерной деятельности.

*Мероприятия:*

- региональный форум «Бирюса», в рамках которого обучающиеся представляют свои социальные проекты;
- всероссийский форум «Таврида-Арт» в рамках которого обучающиеся представляют свои идеи развития отрасли;
- участие в международном инженерном чемпионате «CASE-IN»;
- участие в III Конгрессе молодых ученых;
- Студенческое конструкторское бюро «Энергетик». Стратегическое партнерство кафедры ТЭС с АО «СибИАЦ» открывает для студента возможность дополнительной профессиональной подготовки, где в рамках программы студент решает проектно-конструкторские задания по профилю деятельности конкретных подразделений АО «СибИАЦ», что позволяет совмещать учебный процесс в вузе с получением уникального опыта проектных работ на объектах теплоэнергетики.

**5. Отдел корпоративной культуры**

*Цель:* формирование новых и поддержание имеющихся традиций на кафедре.

*Мероприятия:*

- организация традиционного профессионального праздника «День энергетика» с приглашением профессионального сообщества;
- корпоративные выходы на природу (заповедник «Столбы», эко-парк «Гремячая грива»);
- ежегодное посещение музея, театральные выставки, спортивные состязания от компаний-партнеров.

Структура ОСС выстроена таким образом, что каждый отдел нацелен на собственные ключевые показатели эффективности и выполняет собственные задачи, однако, одновременно с этим, все отделы тесно взаимосвязаны друг с другом. Именно такое комплексное функционирование ОСС является существенной основой качественных результатов и показателей. В рамках ОСС обучающийся имеет уникальную возможность применить полученные теоретические знания на практике, выстраивать разные формы коммуникации, работать в команде, формулировать задачи и искать новые пути решения. Все это позволяет развивать надпрофессиональные компетенции.

Определяющим показателем качества образования является соотношение полученного результата обучения с актуальными потребностям участников образовательного процесса, что в том числе находит отражение в трудоустройстве и успешности выпускников. Исследователи утверждают, что «сотрудничество между университетами и предприятиями является ключевым инструментом как повышения качества образования, так и наиболее эффективно использования знаний в сфере труда (на предприятиях)» [2].

В связи с этим, одной из ключевых функций в деятельности ОСС является предоставлять возможность обучающимся взаимодействовать со стратегическими партнерами, определяя свой будущий профессиональный путь в том числе через индивидуальную траекторию развития при обучении в университете.

Формирование универсальных компетенций у студентов в вузе зависит от комплексности созданных условий, которые охватывают учебную и внеучебную деятельность, а также степени заинтересованности и вовлеченности в нее обучающихся [3]. Орган студенческого самоуправления, как элемент внеучебной деятельности способствует развитию профессиональных и надпрофессиональных компетенций, а активное участие и заинтересованность студентов в построении индивидуальной траектории развития, ответственное отношение к собственному выбору и возможность положительно влиять на профессиональное становление является ключевым элементом в становлении квалифицированного профессионала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника. Приказ Минобрнауки России от 28.02.2018 N 143 (ред. от 08.02.2021).
2. Бойко Е.А., Пикалова А.А. Формирование универсальных компетенций у инженерных кадров на примере реализации многоуровневой модели проектно-ориентированной подготовки // Профессиональное образование в России и за рубежом. – 2021. – № 4(44). – С. 145–152. – DOI 10.54509/22203036\_2021\_4\_145. – EDN DRKFYN.
3. Пикалова А.А. Развитие общекультурных компетенций студентов в условиях внеучебной проектной деятельности // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В.П. Астафьева. – 2016. – № 3(37). – С. 91–94. – EDN UOFPTO.

## ОБУЧАЮЩИЙ ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ПО ОБРАБОТКЕ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ФИЗИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЯХ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Э.И. Хаерова<sup>1</sup>, Б.И. Гатауллин<sup>2</sup>

*Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ, ИКТuЗИ  
<sup>1</sup>ДПУ, группа 4165; <sup>2</sup>СИБ, группа 4504*

Научный руководитель: М.В. Тумбинская, к.т.н., доцент каф. СИБ

В настоящее время цифровые компетенции приобрели большую ценность в образовательном контексте [1]. Важным условием формирования цифровых компетенций у обучающихся является использование в образовательных целях цифровых средств и технологий. В последнее время большую популярность приобретают цифровые двойники, виртуальные цифровые решения, которые основаны на технологиях дополненной и виртуальной реальности [2]. Как правило, такие решения успешно используются в процессе обучения в качестве тренажеро-симуляторов, которые позволяют приобретать практические навыки без участия преподавателя или наставника.

По результатам сравнительного анализа виртуальных тренажеров в области защиты информации можно сделать следующие выводы:

- большинство представленных на рынке виртуальных тренажеров в области защиты информации являются платными;
- 90 % виртуальных тренажеров включают в себя только обучающие материалы без последующей оценки полученных знаний;
- представленные виртуальные тренажеры занимают значительный объем дискового пространства и потребляют оперативную память;
- проанализированные виртуальные тренажеры не обучают обработке конфиденциальных данных на съемных носителях.

В результате анализа можно сделать вывод о том, существующие виртуальные тренажеры являются узконаправленными программными средствами, которые не способны обеспечить защиту конфиденциальных данных на съемных носителях информации. Поэтому требуется разработка виртуального тренажера с целью его применения в учебном процессе студентов, сотрудников предприятий, слушателей повышения квалификации, по обработке конфиденциальной информации на съемных носителях, в части безопасного восстановления, гарантированного удаления и шифрования данных, для обучения процессам «безопасного восстановления данных», «гарантированного уничтожения данных» и «шифрования данных» студентов образовательных учреждений и профильных специалистов. Функциональные требо-

вания к программному обеспечению фокусируются на том, каким образом должна функционировать программа или какое поведение для данной программы приемлемо. В процессе разработки виртуального тренажера были определены следующие требования к его функциональности:

1. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность отображения набора видеоинструкций по пошаговой работе с программными продуктами по процессам «безопасного восстановления данных», «гарантированного удаления данных» и «шифрования данных» при нажатии на соответствующие кнопки.

2. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность автоматически приостанавливать воспроизведение видеоинструкций и автоматически запускать её при нажатии на соответствующую кнопку.

3. Виртуальный тренажёр должен иметь функцию живой панели.

4. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность перемотки видеоинструкций на 10 секунд назад и вперёд.

5. Виртуальный тренажёр должен правильно и логично реализовывать движение цифрового инструктора (3D-модели) при запуске и остановке видеоинструкций.

6. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность отображения выбора случайным образом тестового задания.

7. Виртуальный тренажёр должен иметь функционал, который позволит пользователям получать дополнительную информацию об использовании данного программного продукта при нажатии на соответствующую кнопку. Эта функция особенно важна для новичков, которым требуется дополнительная поддержка в процессе обучения.

8. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность перемещения, навигации, управления персонализированными процессами обучения и тестирования по теоретическому блоку и блоку тестирования (сцена навигации и панель управления в виртуальном пространстве).

9. Виртуальный тренажёр должен предоставлять пользователям возможность запускать процедуру тестирования при нажатии на соответствующую кнопку.

10. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность просмотра теоретического блока – набора видеоинструкций на виртуальной доске.

11. Виртуальный тренажёр должен содержать вводный аудио-инструктаж.

12. Виртуальный тренажёр должен отображать тестовые задания и результаты тестирования на виртуальной доске.

13. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность переключения между тестовыми заданиями с помощью панели управления персонализированным процессом тестирования при нажатии на соответствующую кнопку.

14. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность выбора правильного варианта ответа на тестовые задания и автоматического сохранения этого выбора.

15. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность завершения процедуры тестирования при нажатии на соответствующую кнопку.

16. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность неограниченного количества попыток прохождения тестирования.

17. Виртуальный тренажёр должен обеспечивать возможность активации управления курсором мыши при нажатии на соответствующую кнопку.

18. Виртуальный тренажёр должен обладать интуитивно понятным интерфейсом.

Виртуальный тренажёр был разработан и протестирован в компьютерной системе, обладающей следующими характеристиками:

- операционная система: Windows 10;
- процессор: Intel ® Core ™ i5-6200U CPU @ 2.30GHz;

- видеокарта: Intel® HD Graphics 520 и NVIDIA GeForce 920 MX;
- частота процессора: 2.4 ГГц;
- количество ядер процессора: 2;
- Объем оперативной памяти: 12 Гб.

Разработка виртуального тренажёра была проведена в 3 этапа. На первом этапе проводилась разработка и программная реализация первого главного экрана, содержащего виртуальную доску с теоретическим блоком (набор видеоинструкций) и панелью управления персонализированным процессом обучения (кнопки). На втором этапе была разработана анимация цифрового инструктора (3D-модели). На третьем этапе проводилась разработка и программная реализация второго главного экрана, содержащего блок тестирования и панель управления персонализированным процессом тестирования. Виртуальный тренажёр был реализован с использованием языка C#. Также была разработана блок схема по работе с виртуальным тренажёром по обработке конфиденциальной информации на физических носителях.

Поскольку основным элементом является главный экран, содержащий виртуальную доску с теоретическим блоком (набором видеоинструкций) и панелью управления персонализированным процессом обучения (кнопки), рассмотрим все его активные элементы.

Процесс создания кнопок на панели управления включает в себя последовательное выполнение четко определённых этапов. В рамках разработки предусмотрены следующие ключевые этапы:

1. Создание «коллайдера» кнопок. «Коллайдер» – это компонент, который представляет собой невидимые «границы» объекта [3].

2. Анимация кнопок. Для обеспечения удобства и наглядного отображения нажатия кнопки была внедрена анимация кнопок. При каждом нажатии на кнопку она может увеличиваться и плавно возвращаться в исходное состояние.

3. Взаимодействие с теоретическим блоком. Данный этап позволяет реализовать управление набором обучающих видеоинструкций – при нажатии определенных кнопок запускать видеоинструкции, останавливать и совершать перемотку видеоинструкции на 10 секунд вперед и назад. Для программной реализации была включена одна из основных библиотек «using UnityEngine.Video».

4. Взаимодействие с цифровым инструктором (3D-моделью). Данный этап позволяет управлять цифровым инструктором (3D-моделью). Например, при нажатии на кнопку запуска (play) цифровой инструктор (3D-модель) озвучивает выбранную видеоинструкцию (кнопка 1, 2, 3). Для реализации была использована библиотека «using System.Threading», в которой определены классы, поддерживающие многопоточное программирование.

Цифровой инструктор (3D-модель) был импортирован и анимирован из онлайн сервиса Mixamo [4]. Mixamo – онлайн-сервис для создания и анимирования 3D-моделей совместно с Unity для разработки анимаций [5]. Для запуска и остановки анимации, контроля проигрывания анимации, взаимодействия с таймером (перемотка на 10 секунд назад и вперед) был написан программный модуль на языке C#.

Также в среде Unity были разработаны сценарии анимации цифрового инструктора (3D-модели), по которым осуществляется его функционирование и визуализация [6]. Сценарии отражены в схеме программного модуля с использованием переменных «entry», «stay», «talk»:

- «Entry» – исходное состояние цифрового инструктора (3D-модели);
- «Stay» – анимация приостановки действий цифрового инструктора (3D-модели);
- «Talk» – анимация озвучивания видеоинструкций и движений цифрового инструктора (3D-модели).

Блок тестирования играет ключевую роль в структуре виртуального тренажера. Он позволяет не только оценить уровень усвоения материала, но и уровень цифровых компетен-

ций [7]. Блок тестирования функционирует через основную виртуальную доску, на котором отображаются вопросы и варианты ответов, а также через панель управления персонализированным процессом тестирования.

Для активации кнопки «Начать» был разработан специальный код с использованием библиотеки «using UnityEngine.EventSystems». После нажатия на эту кнопку она исчезает, и на экране мгновенно появляется первое случайное тестовое задание из выборки.

Также была разработана специальная программа для создания «коллайдеров» кнопок, анимации и их взаимодействия с виртуальной доской, а также для вывода результатов на экран.

Виртуальный тренажер может быть использован для обучения по направлению «Информационная безопасность», а также практикующих специалистов в области эксплуатации программных средств защиты информации. В дальнейшем планируется доработка тренажера по двум направлениям: в части разработки сценариев дополненной реальности, конвертации виртуального тренажера в ядро AR платформа Unity и моделирования инцидентов информационной безопасности за счет расширения набора ситуаций, а также планируется использования таких устройств, как очки, шлемы виртуальной реальности [8]. Это исследование прокладывает путь для внедрения технологии кейс-метода в высшее техническое образование.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеенко Н.В., Дорофеева Д.Д. Инновационные технологии в образовательном процессе: тенденции, перспективы развития // Вестник Самарского Государственного Технического Университета. Сер. Психолого-педагогические науки. – 2017. – № 2(34). – С. 6–15.
2. Mareev: Сбой USB-накопителя и восстановление данных с поврежденной или нерабочей флешки — Текст: электронный // Hetman Software: [сайт]. — URL: [https://hetmanrecovery.com/ru/recovery\\_news/repair-usb-disk-and-recover-data-from-a-damaged-or-non-working-flash-drive.htm](https://hetmanrecovery.com/ru/recovery_news/repair-usb-disk-and-recover-data-from-a-damaged-or-non-working-flash-drive.htm) (дата обращения: 02.01.2024).
3. Как использовать функции столкновений в Unity: OnCollisionEnter/Stay/Exit, OnTriggerEnter – Текст: электронный // Хабр: [сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/articles/709960/> (дата обращения: 06.04.2024).
4. Mixamo. – URL: <https://www.mixamo.com/#/> (дата обращения: 07.04.2024).
5. Использование Mixamo для анимаций 3D-моделей в Unity – Текст: электронный // vk.com: [сайт]. – URL: [https://vk.com/wall-174154494\\_1194](https://vk.com/wall-174154494_1194) (дата обращения: 07.04.2024).
6. Akins J.L., Lamm A.J., Telg R., Abrams K., Meyers C., Raulerson B. Seeking and engaging: Case study integration to enhance critical thinking about agricultural issues // Journal of Agricultural Education – 2019. – V. 60(3). – P. 97–108. <https://doi.org/10.5032/jae.2019.03097> (дата обращения: 07.04.2024).
7. Хаерова Э.И., Гатауллин Б.И., Тумбинская М.В. Виртуальный программный комплекс по обработке конфиденциальной информации на физических носителях. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024612628.
8. Хаерова Э.И., Гатауллин Б.И., Тумбинская М.В. Программный модуль для виртуального тренажера по шифрованию данных на физическом носителе. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024619421.

## ВИРТУАЛЬНАЯ И ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ: НОВЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

Т.С. Козлова

*Московский авиационный институт, Институт №12 «АНТИП», кафедра 1205 «ТИЭ»*

Научный руководитель: М.Ю. Горожеев, к.т.н., доцент кафедры 1203 «ТППСУЛА», МАИ

Инженерное образование всегда было дуэтом теоретических знаний и практических навыков. Традиционный подход, основанный на лекциях, лабораторных работах и проектах, хоть и эффективен в определенной степени, но часто не способен передать всю сложность и многогранность инженерных задач. Многие аспекты, например, пространственное мышление, работа с крупными системами или моделирование опасных ситуаций, требуют большего,

чем простое чтение учебника или работа с физическими моделями. В последние годы виртуальная реальность (VR) и дополненная реальность (AR) стали революционными инструментами, кардинально меняющими подход к подготовке будущих инженеров. Эти технологии предлагают иммерсивные и интерактивные обучающие среды, значительно превосходящие возможности традиционных методов.

Виртуальная реальность (VR) полностью погружает студента в смоделированный мир, предоставляя возможность непосредственного взаимодействия с виртуальными объектами и средами [1]. Это позволяет проводить виртуальные эксперименты, моделировать различные сценарии, в том числе аварийные ситуации, и решать практические задачи в безопасной и контролируемой среде. Представим, например, студента-строителя, проектирующего мост. Вместо работы с плоскими чертежами и макетами, он может «пройтись» по виртуальному мосту, осмотреть его конструкцию изнутри и снаружи, проверить прочность отдельных элементов, моделируя различные нагрузки, от ветра до землетрясения, и видя мгновенные результаты своих изменений в конструкции. Это позволяет не только лучше понять физику процесса, но и значительно ускорить процесс проектирования и избежать потенциальных ошибок на этапе реального строительства. Более того, VR позволяет моделировать работу сложных механизмов, например, двигателей внутреннего сгорания или реактивных двигателей, позволяя студентам наблюдать за работой отдельных компонентов, изменять параметры и видеть влияние этих изменений на общую производительность системы.

Дополненная реальность (AR), в свою очередь, накладывает цифровую информацию на реальный мир. Это позволяет студентам видеть виртуальные объекты и данные в своем физическом окружении. Например, при изучении электроники студент может направить планшет на реальную электрическую схему, и на экране появятся виртуальные обозначения элементов, интерактивные диаграммы, показывающие потоки тока и напряжения, а также 3D-модели компонентов, позволяющие детально изучить их внутреннее устройство.

AR может также использоваться для обучения сборке и обслуживанию оборудования, проведения инспекций сложных конструкций, таких как мосты или нефтепроводы, и даже для визуализации абстрактных инженерных понятий, таких как поля напряжений в материале. Студент может «увидеть» напряженность в реальной детали, выделяющуюся разными цветами, и понять, почему именно в этом месте конструкция наиболее уязвима.

Преимущества использования VR и AR в инженерном образовании многочисленны [2] и охватывают различные аспекты обучения:

### **1. Повышение вовлеченности**

Виртуальная и дополненная реальность делают обучение более интересным и запоминающимся. Возможность интерактивного взаимодействия с виртуальной средой, ощущение присутствия и возможность «потрогать» виртуальные объекты значительно повышают мотивацию к обучению. Вместо пассивного восприятия информации, студент становится активным участником процесса, что ведет к более глубокому пониманию материала.

### **2. Практическое обучение**

Возможность проводить виртуальные эксперименты и манипулировать виртуальными объектами – это ключевое преимущество. Студенты могут моделировать различные сценарии, исследовать последствия различных решений и учиться на своих ошибках, не опасаясь реальных последствий. Это особенно важно для таких специальностей, как машиностроение, аэрокосмическая инженерия или химическая технология, где эксперименты в реальном мире могут быть сложными, дорогостоящими или опасными. Абстрактные инженерные понятия, такие как работа сложных механизмов, распределение напряжений в конструкциях, процессы теплообмена или аэродинамика, становятся наглядными и интуитивно понятными. Студенты могут «почувствовать» эти процессы, наблюдая их в динамике и изменяя параметры модели.

### **3. Безопасность**

VR и AR позволяют проводить эксперименты и моделировать опасные ситуации без риска повреждения оборудования или причинения вреда студентам. Это особенно важно при изучении процессов, связанных с высокими напряжениями, высокими температурами или опасными веществами.

### **4. Эффективность**

Использование VR и AR может ускорить процесс обучения, поскольку студенты могут самостоятельно экспериментировать и получать обратную связь в режиме реального времени. Это позволяет им лучше усваивать материал и развивать навыки решения проблем.

### **5. Удобство**

Виртуальная и дополненная реальность технологии могут сделать инженерное образование более доступным для студентов из отдаленных регионов [3] или с ограниченными возможностями. Они могут получать качественное образование, не имея доступа к дорогостоящему оборудованию или специализированным лабораториям.

Однако внедрение виртуальной и дополненной реальности в инженерное образование сталкивается с определенными вызовами. Это и высокая стоимость оборудования, и необходимость разработки качественного и образовательного контента, и необходимость подготовки преподавателей к работе с новыми технологиями. Кроме того, существует риск переоценки возможностей VR и AR. Важно помнить, что эти технологии являются лишь инструментом, и их эффективность зависит от правильного применения и интеграции в учебный процесс. Необходимо разработать методики обучения, учитывающие специфику VR и AR технологий, и интегрировать их в существующую систему образования, а не просто заменять традиционные методы. В перспективе, оптимальным решением будет комбинированный подход, сочетающий традиционные методы обучения с использованием VR и AR технологий для повышения эффективности и качества подготовки будущих инженеров. Развитие данного направления потребует совместных усилий университетов, разработчиков программного обеспечения и производителей оборудования.

Рассмотрим подробнее примеры использования VR в инженерном образовании. Виртуальные тренажеры, как те, что используются в Томском политехническом университете, представляют собой мощный инструмент для отработки практических навыков в условиях, имитирующих реальную производственную среду. Студенты могут, например, виртуально обслуживать сложные технологические установки, такие как резервуары для нефти или учебный ядерный реактор, без риска для собственной безопасности и дорогостоящего оборудования. Не менее важным является и снижение финансовой нагрузки на университет, поскольку виртуальные тренажеры заменяют дорогостоящее оборудование и расходные материалы.

Платформа VR Concept является ярким примером программного обеспечения, предназначенного для совместной работы студентов и преподавателей в виртуальной среде. Она позволяет визуализировать и взаимодействовать с 3D-моделями самых разных объектов: от сложных механизмов, которые можно собирать и разбирать по частям [4], до архитектурных проектов зданий, по которым студенты могут «пройтись» виртуально, осматривая их с разных ракурсов. Такой подход позволяет углубить понимание пространственного мышления и детализированного проектирования. Подобные платформы могут интегрироваться с системами управления обучением (LMS), обеспечивая отслеживание прогресса студентов и персонализацию обучения.

Виртуальные лаборатории, такие как VR Chemistry Lab, предоставляют безопасную среду для проведения химических экспериментов [5]. В отличие от реальных лабораторий, виртуальная лаборатория позволяет проводить эксперименты многократно, исследовать различные сценарии и анализировать результаты без опасения ошибок или несчастных случаев. Важно

отметить, что в виртуальной среде действуют те же физические и химические законы, что и в реальном мире, обеспечивая реалистичность моделирования. Однако, виртуальные лаборатории не полностью заменяют реальные практические занятия, а служат важным дополнением, позволяющим освоить базовые принципы и подготовиться к работе в реальных условиях.

Дополненная реальность (AR) также находит широкое применение в инженерном образовании. AR-приложения, интегрированные с учебными пособиями, позволяют «оживить» статичный учебный материал. Например, при изучении анатомии, студенты могут сканировать страницы учебника и видеть трёхмерные модели органов и систем организма, которые можно вращать, увеличивать и рассматривать с разных сторон. Это значительно улучшает понимание сложных анатомических структур и их взаимосвязи. Аналогичным образом AR может применяться при изучении механизмов, строительных конструкций, электронных схем и других сложных объектов.

В заключение, VR и AR технологии предоставляют беспрецедентные возможности для создания инновационных и эффективных методик обучения в инженерном деле. Они способствуют более глубокому пониманию сложных концепций, отработке практических навыков в безопасной среде и повышению общей эффективности учебного процесса. Постоянное развитие этих технологий обеспечивает непрерывное совершенствование образовательных инструментов и подготовку высококвалифицированных специалистов, готовых к вызовам современной инженерной индустрии. Дальнейшее исследование в области интеграции виртуальной и дополненной реальности с системами обратной связи, искусственным интеллектом и персонализированными обучающими программами будет способствовать еще большему улучшению качества инженерного образования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование дополненной и виртуальной реальности в проектировании инженерных систем // ААБ. – URL: <https://aab-corp.ru/tpost/b8mktmxcp1-ispolzovanie-dopolnnoy-i-virtualnoy-re> (дата обращения: 13.11.2024).
2. VR AR технологии в образовании // APPTASK – URL: <https://apptask.ru/blog/vr-ar-technologii-v-obrazovanii?ysclid=m3j5kz7j98783698589> (дата обращения: 13.11.2024).
3. Замошников П.А. Применение виртуальной и дополнительной реальности в инженерном обучении: сборник трудов конференции. // Социально-педагогические вопросы образования и воспитания: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 26 окт. 2023 г.) / редкол.: Ж. В. Мурзина [и др.] – Чебоксары: ИД «Среда», 2023. – С. 147–148. – ISBN 978-5-907688-75-9.
4. VR Concept и Lenovo Explorer: универсальный подход к прототипированию в виртуальной реальности // Хабр. – URL: <https://habr.com/ru/companies/lenovo/articles/371201/> (дата обращения: 13.11.2024).
5. «VR с нейросетями — это будущее». Как обучение в VR изменит уроки химии // RB.RU. – URL: <https://rb.ru/interview/vr-chemistry/> (дата обращения: 13.11.2024).

### РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ СТУДЕНТАМ ИНЖЕНЕРНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

**Б.Б. Самба-Людуп**

*Сибирский государственный медицинский университет, лечебное дело, группа 1334*

Научный руководитель: А.А. Меньшикова, к. филос. н.,  
старший преподаватель кафедры иностранных языков

Учебная деятельность студентов – это деятельность по овладению знаниями и способами действий, а также саморазвитию в процессе решения учебных задач, поставленных преподавателем. Эта деятельность направлена не только на освоение знаний и умений, но и на самого субъекта (студента) в плане совершенствования, развития его личностных качеств.

Важную часть учебного процесса составляет практика. Практика для студентов – это часть учебного процесса, которая обычно проходит вне стен вуза, на различных предприятиях или учреждениях в условиях, максимально приближенных к будущей профессиональной деятельности.

Практика позволяет решить следующие задачи:

1. Закрепление и проверка теоретических знаний, полученных в вузе.
2. Получение информации об организации технологических, производственных и управленческих процессов на предприятии или учреждении.
3. Изучение реальных условий будущей профессиональной деятельности.
4. Сбор сведений, необходимых для написания различных учебных работ – курсовой, лабораторной, дипломной и т. д.

Так как студенты-инженеры работают с техникой и оборудованием, практика может таить в себе некоторые опасности. Например:

- электрический ток;
- механическое оборудование: студенты могут столкнуться с опасностью травмирования при работе с движущимися частями машин и механизмов;
- химические вещества: существует риск отравления, ожогов кожи и глаз, а также пожаров;
- высота;
- тепловое воздействие: при работах с горячими поверхностями или открытым пламенем можно получить ожоги;
- психологическая нагрузка: практика может быть связана с высоким уровнем стресса и ответственности, что может привести к негативному психическому состоянию студента;
- несчастные случаи: несмотря на все меры предосторожности, несчастные случаи могут произойти из-за непредвиденных обстоятельств.

С медицинской точки зрения, нужно учитывать следующие аспекты для обеспечения безопасности студента:

- соблюдение режима сна и отдыха: старайтесь спать не менее 7–8 часов в сутки, недостаток сна может привести к снижению концентрации внимания, а это чревато несчастными случаями.
- правильное питание и гидратация: здоровое питание и регулярное потребление воды помогут поддержать высокий уровень энергии и концентрации, старайтесь избегать употребления алкоголя и других веществ, которые могут повлиять на работоспособность и безопасность, перед рабочей деятельностью.
- физическая подготовка: регулярные физические упражнения помогут поддерживать хорошую физическую форму и выносливость, что особо важно при работе с тяжелым оборудованием.
- средства индивидуальной защиты: использование защитных очков, масок, перчаток, специальной одежды помогут предотвратить травмы и заболевания.
- профилактика профессиональных заболеваний: некоторые виды деятельности могут привести к развитию хронических болезней, таких как вибрационная болезнь, шумовая травма слуха, заболевания опорно-двигательного аппарата и др. для предотвращения необходимо соблюдать режим работы, делать перерывы и использовать специальные приспособления для снижения нагрузки на организм.
- все должны быть обучены основам оказания первой медицинской помощи.

Основываясь на этом, можно порекомендовать включить в образовательную программу в первую очередь оказание первой медицинской помощи: студентам необходимо овладеть навыками оказания первой помощи в различных случаях, включая сердечно-легочную ре-

анимацию, остановку кровотечения, обработку ран и ожогов, транспортировку пострадавших. Студенты должны знать базовый алгоритм действий, которые помогут им не растеряться при чрезвычайных происшествиях.

А также проведение регулярных обучений и тренингов:

- по охране труда – это комплексные меры по защите здоровья и жизни сотрудников во время того, как они выполняют свои трудовые обязанности. Эти меры направлены на предотвращение производственных травм и заболеваний профессионального характера, а также на обеспечение безопасных условий работы при взаимодействии с оборудованием, инструментами, механизмами;
- технике безопасности – основной инструмент предотвращения производственного травматизма на предприятиях. Это комплекс организационно-технических мер, направленных на создание безопасных условий труда. Такие мероприятия помогают минимизировать или полностью исключить вероятность возникновения несчастных случаев на рабочем месте;
- безопасности при работе с химическими веществами – изучение свойств химических веществ, их токсического действия на организм человека, правил хранения и транспортировки химикатов, а также методов защиты при работе с ними.

Помимо всего прочего, важно студентам оказывать психологическую поддержку. Создание условий для психологической разгрузки (физическая активность, приветливое общение, творчество и т. д.), предоставление доступа к услугам психолога поможет студентам справляться со стрессом и избегать профессионального выгорания, что положительно скажется на их безопасности и продуктивности. Например: можно создать видеоуроки или буклеты по правильному дыханию, устраивать походы или соревнования на свежем воздухе.

Необходимо соблюдать санитарно-гигиенические мероприятия: поддержание чистоты и порядка в учебных аудиториях и лабораториях, соблюдение требований к вентиляции, освещенности и температурному режиму создаст комфортные и безопасные условия для учебы и работы.

Также важно проводить регулярные медицинские осмотры для контроля состояния здоровья и своевременного выявления отклонений и изменений, связанных с учебным или рабочим процессом, а также для того чтобы удостовериться в отсутствии противопоказаний к выполнению определенных видов работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Психология деятельности в аспекте обучения в высшей школе. – URL: <https://edu.vgsa.ru/mod/book/view.php?id=136275&chapterid=16879>
2. Практические алгоритмы первой помощи на производстве. – URL: <https://www.kiout.ru/info/news/30222?ysclid=m3gyji67lj71411468>
3. Охрана труда и техника безопасности на производстве. – URL: <https://www.ohranatrud.ru/faq/articles/oxrana-truda-i-tehnika-bezopasnosti-na-proizvodstve.html>
4. Требования безопасности при прохождении производственной практики. – URL: <https://infourok.ru/trebovaniya-bezopasnosti-pri-prohozhdenii-proizvodstvennoj-praktiki-4083136.html>

## АКТИВНАЯ ТЕПЛОВИЗИОННАЯ ДИАГНОСТИКА

Д.А. Ткаченко

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, ЭФ, ЭПБ, 8Э-32*

Научный руководитель: Б.С. Компанеев, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭПБ

В статье поднимается вопрос применения активной тепловизионной съемки для обнаружения температурных аномалий в электрооборудовании. Несмотря на то, что активная тепловизионная съемка имеет свои ограничения, включая сложность оборудования, проблемы безопасности и стоимость, ее преимущества делают ее привлекательным вариантом для профилактического обслуживания, обнаружения неисправностей и оптимизации энергоэффективности.

**Ключевые слова:** активная тепловизионная съемка, пассивная тепловизионная съемка, тепловизионная камера, источник тепла, обнаружение неисправностей, оптимизация энергоэффективности, аномалия, активная тепловизионная диагностика, активное тепловизионное изображение, тепловая реакция, тепловая стимуляция, тепловизионная съемка

Причиной многих пожаров, сбоев в электроснабжении и снижении энергоэффективности может быть низкое качество контактных поверхностей. Контактное соединение является элементом повышенной опасности из-за повышенной нагрузки, которую оно несет, что делает его миной замедленного действия для несчастных случаев. Для снижения риска аварий, вызванных «плохим контактом», решающее значение имеют своевременная диагностика и ремонт. По мере роста числа энергетических сетей и усложнения конфигураций устройств важное значение приобретает метод диагностики, позволяющий быстро и точно оценить состояние электрических устройств с минимальными затратами времени и технических средств.

Со временем все контактные соединения неизбежно изнашиваются, что приводит к постепенному увеличению сопротивления. Это повышенное сопротивление вызывает нагрев при прохождении тока через соединение, что позволяет обнаруживать неисправные элементы (с сопротивлением, превышающим допустимые значения) с помощью тепловизора. Этот неразрушающий метод обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами оценки, включая обнаружение температурных аномалий в режиме реального времени, быструю и эффективную диагностику, а также экономию затрат на техническое обслуживание и ремонт [1].

Тепловизионная съемка является перспективным диагностическим методом для выявления температурных аномалий в электрооборудовании, который может быть использован для оптимизации энергоэффективности. Этот метод основан на принципе, согласно которому все объекты излучают тепловое излучение, которое может быть обнаружено с помощью тепловизионных камер. Температура объекта прямо пропорциональна количеству испускаемого им теплового излучения. Тепловизионные камеры фиксируют это излучение и преобразуют его в видимое изображение, что позволяет обнаруживать температурные аномалии, в том числе образование оксидных слоев на электрических контактах.

Тепловизионная съемка является незаменимым инструментом в различных отраслях промышленности, включая диагностику электрооборудования. В то время как пассивная тепловизионная съемка, без внешней стимуляции, получила широкое распространение, активная тепловизионная съемка в последние годы ещё набирает популярность благодаря своей способности обнаруживать незначительные температурные аномалии и неисправности в электрооборудовании. Активная тепловизионная съемка предполагает использование внешнего источника тепла для усиления тепловой чувствительности оборудования, что позволяет об-

наруживать температурные аномалии, которые могут быть незаметны при использовании пассивной тепловизионной съемки [2–3].

Активная тепловизионная съемка основана на принципе тепловой стимуляции, при котором для стимуляции тепловой реакции оборудования используется внешний источник тепла. Источником тепла может быть лампа-вспышка, лазер или другие методы тепловой стимуляции. После стимуляции тепловые характеристики оборудования измеряются с помощью тепловизионной камеры, которая фиксирует распределение температуры на поверхности оборудования [4].

На сегодня разработано несколько методов активной тепловизионной съемки:

Импульсная термография – метод предполагает использование мощной лампы-вспышки для стимуляции теплового отклика оборудования, затем термический отклик измеряется с помощью тепловизионной камеры.

Фиксированная термография – метод предполагает использование модулированного источника тепла для получения тепловой реакции, которая в дальнейшем измеряется с помощью тепловизионной камеры, синхронизируемой с источником тепла.

Оптическая термография с фиксацией – метод предполагает использование лазера для получения тепловой реакции, которая измеряется с помощью тепловизионной камеры, синхронизируемой с лазером.

Активная тепловизионная съемка имеет ряд преимуществ перед пассивной тепловизионной съемкой:

- повышенная чувствительность: активная тепловизионная съемка позволяет обнаруживать незначительные температурные аномалии, которые могут быть незаметны при использовании пассивной тепловизионной съемки;
- повышенная точность: съемка может обеспечить более точные измерения температуры благодаря контролируемой тепловой стимуляции;
- сокращение времени проверки: Активная тепловизионная съемка может сократить время проверки благодаря возможности получить результаты обследования сразу после проявления тепловой реакции оборудования.

Недостатки активной тепловизионной диагностики:

- сложность оборудования: требуется специализированное оборудование, включая источники тепла и тепловизионные камеры;
- соображения безопасности: съемка может представлять угрозу безопасности из-за использования мощных источников тепла;
- стоимость: активная тепловизионная съемка может быть более дорогостоящей, чем пассивная тепловизионная съемка, из-за стоимости оборудования;
- снижение ресурса электрооборудования: дополнительный нагрев электрооборудования приводит к ускоренному снижению естественного ресурса.

На сегодняшний день активная тепловизионная диагностика применяется:

- профилактическое техническое обслуживание: может использоваться для обнаружения температурных аномалий, которые могут указывать на потенциальные неисправности или отказы в электрооборудовании;
- обнаружение неисправностей: обнаружение неисправностей в электрооборудовании, таких как перегрев или электрические разряды;
- оптимизация энергоэффективности: выявление областей потери тепла или неэффективности.

Несколько исследований продемонстрировали эффективность активного тепловизионного изображения при диагностике электрооборудования. Например, в исследовании [5] активное тепловизионное изображение использовалось для обнаружения температурных аномалий на кузове автомобиля, что позволяет прогнозировать потенциальные неисправности и отказы.

устойчивость. В другом исследовании [6] использовалась активная тепловизионная съемка для обнаружения неисправностей электрооборудования при холодном и горячем состоянии путем машинного анализа, что позволяет выявлять неисправности и оптимизировать энергоэффективность.

В заключение следует отметить, что активная тепловизионная съемка стала мощным инструментом диагностики электрооборудования, позволяющим выявлять едва заметные температурные аномалии и неисправности в электрооборудовании. Преимущества активной тепловизионной съемки в повышенной чувствительности и точности, делают ее привлекательным вариантом для профилактического обслуживания, обнаружения неисправностей и оптимизации энергоэффективности, однако необходимо тщательно учитывать ограничения активной тепловизионной съемки, в том числе сложность оборудования и проблемы безопасности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко Д.А., Компанец Б.С. Анализ методов контроля контактных соединений // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК : Материалы Международной научной конференции, Майский, 14–15 марта 2023 г. Т. 4. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. – С. 128–129. – EDN UMLGVB.
2. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.
3. Defect detection on electrical power equipment using thermal imaging technology [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – URL: [http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/7598/1/Defect %20detection %20on %20electrical %20power %20equipment %20using %20thermal %20imaging %20technology.pdf](http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/7598/1/Defect%20detection%20on%20electrical%20power%20equipment%20using%20thermal%20imaging%20technology.pdf)/ Загл. с экрана ((дата обращения: 06.10.2024).
4. Does Active Thermal Imaging (NDI method) detect all types of structural faults in modern civil aircraft? [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – URL: [https://translated.turbopages.org/proxy\\_u/en-ru.ru.7133d6db-6702738b-1ca2ed2d-74722d776562/https/aviation.stackexchange.com/questions/22439/does-active-thermal-imaging-ndi-method-detect-all-types-of-structural-faults-i/](https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.7133d6db-6702738b-1ca2ed2d-74722d776562/https/aviation.stackexchange.com/questions/22439/does-active-thermal-imaging-ndi-method-detect-all-types-of-structural-faults-i/) Загл. с экрана ((дата обращения: 06.10.2024).
5. Тепловизионный метод контроля технического состояния кузова легкового автомобиля [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – URL: [http://vestnik.osu.ru/2014\\_10/9.pdf](http://vestnik.osu.ru/2014_10/9.pdf)/ Загл. с экрана ((дата обращения: 06.10.2024).
6. Fault Diagnosis of Electrical Equipment through Thermal Imaging and Interpretable Machine Learning Applied on a Newly-introduced Dataset [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/349386652\\_Fault\\_Diagnosis\\_of\\_Electrical\\_Equipment\\_through\\_Thermal\\_Imaging\\_and\\_Interpretable\\_Machine\\_Learning\\_Applied\\_on\\_a\\_Newly-introduced\\_Dataset/](https://www.researchgate.net/publication/349386652_Fault_Diagnosis_of_Electrical_Equipment_through_Thermal_Imaging_and_Interpretable_Machine_Learning_Applied_on_a_Newly-introduced_Dataset/) Загл. с экрана ((дата обращения: 06.10.2024).

# Секция 8

## Твой первый шаг в энергетику

### ЗАМЕНА СВАРОЧНЫХ АППАРАТОВ, ПУТЁМ СОЗДАНИЯ СВАРОЧНОГО АППАРАТА НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

А.А. Зволь

МБОУ СОШ № 2, 10А класс

Научный руководитель: Канаш Н.Г, учитель физики МБОУ СОШ № 2 г. Саяногорск

На сегодняшний день сварочные аппараты используются повсеместно. Их применяют в кораблестроении, авиастроении, изготовлении каркасов домов и во многих других областях. Видов сварочных аппаратов существует великое множество, но их проблемой является то, что они отрицательно влияют на окружающую среду и требуют немалых ресурсов для своей работы.

Актуальность данной темы обоснована тем, что сварочный аппарат, который будет менее энергозатратен, с которым можно будет работать без дополнительных средств защиты, можно изготовить самостоятельно, в домашних условиях. Проанализированы наиболее распространенные сварочные аппараты (табл. 1), было принято решение создать сварочный аппарат на основе водородного топлива.

Таблица 1. Сравнение различных видов сварочных аппаратов

Сварочный аппарат	Преимущества	Недостатки
Точечный	Сваривает чёрные и цветные металлы. Работает с тонкими слоями металлов	Выбрасывает в атмосферу мелкодисперсную пыль. Необходимость использования специальной защиты для глаз
Ручной дуговой	Дешевизна производства и использования	Сваривает лишь чёрные металлы. Необходимость использования специальной защиты для глаз
Аргонодуговой	Сваривает чёрные и цветные металлы, в том числе и алюминий	Использует аргон для работы, вследствие чего опасен в закрытом помещении. Необходимость использования специальной защиты для глаз
Плазменный	Эффективно сваривает легированную, нержавеющей сталь	Сваривает лишь тонкие слои металлов. Использует аргон или гелий, вытесняющий кислород из воздуха. Необходимость использования специальной защиты для глаз
Водородный	Сваривает чёрные и цветные металлы. Не производит выбросов в атмосферу. Сваривает любую толщину листа металла. Безопасный для глаз	Сложность и дороговизна в производстве и эксплуатации в данное время

Из таблицы видно, что наиболее безопасным для окружающей среды и здоровья человека является водородный сварочный аппарат.

У сварочного аппарата на водородном топливе есть несколько преимуществ, из которых можно выделить отсутствие токсичных продуктов горения, а также возможность получения водородного топлива электролизом во время работы аппарата.

При сварке с помощью водородного топлива не будет оставаться сторонних веществ на поверхности металла. Водородом можно сваривать, например, алюминий, ведь температура горения водорода составляет свыше 3000 °С, а температура плавления алюминия 660 °С. Алюминий является проблемным в сварке металлом из-за своей оксидной плёнки, которая имеет невероятную твёрдость в 9 единиц по шкале Мооса, для примера у алмаза она составляет 10 единиц, также температура плавления 2050 °С, с которой легко справится водород.

Водород для сварки будем добывать путём электролиза с помощью электролизного аппарата, схема которого представлена на рис. 1.

Отдельно, на рис. 2, изображено сопло сварочного аппарата.

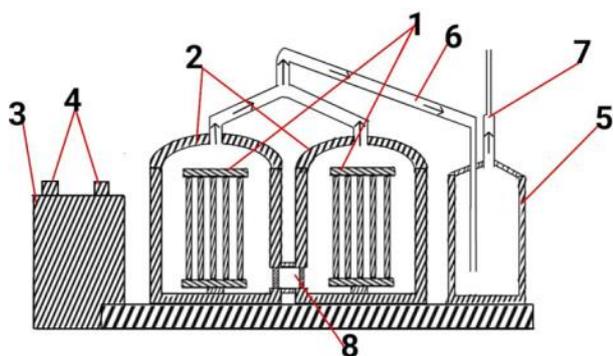


Рис. 1. Схема электролизера:

- 1 - сборка из катодов и анодов;
- 2 - электролизная ванна;
- 3 - блок питания;
- 4 - контакты;
- 5 - бак для фильтрации гремучего газа;
- 6 - трубки для транспортировки гремучего газа;
- 7 - выход для чистого водорода в сопло;
- 8 - перемычка для соединения сообщающихся сосудов

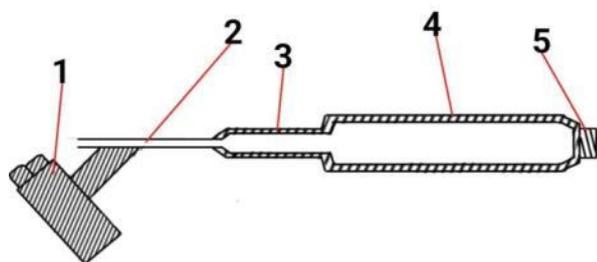


Рис. 2. Сопло сварочного аппарата:

- 1 - зажигательный элемент;
- 2 - игла сопла;
- 3 - уплотняющее кольцо;
- 4 - цилиндр;
- 5 - резьба для закрепления трубки

Сам сварочный аппарат будет представлять собой сборную конструкцию из сопла и электролизера. Приблизительный вес конструкции около 5 кг, геометрические размеры 300×400×250 мм. Особое внимание необходимо уделять уровню электролита в электролизной ванне и следить за состоянием блока питания.

Необходимые детали и материалы приобретены, рассчитана общая стоимость конструкции. Данные по затратам на изготовление сварочного аппарата представлены в табл. 2.

Таблица 2. Затраты на изготовление аппарата

№	Наименование	Стоимость за ед., руб.	Количество, шт.	Цена, руб.
1	Стеклянная банка 1 л с пластиковой крышкой	174	1	174
2	Упаковка лезвий канцелярского ножа 10 шт (электрод)	86	4	344
3	Моток капельной трубки 5 м	300	1	300
4	Лист фанеры 5 мм	291	1	291
5	Блок питания 12 V 10 A	1299	1	1299
6	Шприц 12 мл	70	1	70
7	Силиконовый герметик	580	1	580
	<b>Итого:</b>			<b>3058</b>

Временные затраты на изготовление составляют 2–3 дня (без учета времени на закупку деталей и материалов)

Данный сварочный аппарат на водородном топливе после испытания и необходимых доработок можно предложить для использования в личных целях.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Точечная сварка. – URL: <https://svarka74.ru/> (дата обращения 11.10.2024)
2. Иноземцева К.В. Машиностроение. Воздействие сварочных газов на окружающую природную среду и организм человека». – URL: <https://tksvarka.ru/poleznaya-informaciya/kontaktная-tochechnaya-svarka/> (дата обращения 11.10.2024)
3. НИИ Атмосфера. Методика расчета выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу при сварочных работах. – URL: <https://www.nii-atmosphere.ru/> (дата обращения 12.10.2024)

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

**Я.Н. Старостенков**

*Учащийся, УО «Национальный детский технопарк»*

Научный руководитель: Петровская Т. А., старший преподаватель  
УО «Национальный детский технопарк»

Солнечная энергия при её использовании преобразуется в другие формы, такие как тепловая и электрическая. В дневной период тепловая энергия, исходящая от Солнца, нагревает земную и водную поверхности и атмосферу. Наряду с тепловой энергией на Землю поступает инфракрасное излучение, содержащее в себе большие объёмы энергии. Традиционная фотоэлектрическая (PV) технология собирает энергию только из видимого диапазона спектра (400–750 нм) и при этом оставляет инфракрасный (ИК) диапазон совершенно неиспользованным. Около 80 % солнечного излучения поглощается атмосферой и поверхностью земли; эти волны переизлучаются в виде среднего ИК-излучения (5–15 мкм). Другими источниками ИК-излучения являются нагрев металла, нагрев жидкости, парообразование, термическая обработка и агломерация. Температура для этих процессов колеблется от 250 до 1500 К, а соответствующие длины волн в среднем ИК-диапазоне варьируются от 2 до 11 мкм [2]. Инфракрасные волны являются короткими, вследствие чего возникает проблема улавливания данного излучения. Для преобразования энергии ИК-излучения необходимы антенны микроскопических размеров, но технология разработки матрицы для корректной расстановки данных антенн сложная и дорогостоящая. С учётом этих недостатков ведётся поиск эффективных методов создания подобных антенн. Одним из таких методов является квантовое туннелирование, которое основано на туннельном эффекте. Данный метод можно использовать при рассмотрении колебаний высокочастотных электромагнитных волн, которые можно собирать и выпрямлять с помощью комбинации наноантенны и выпрямителя, обычно называемого ректенным устройством (рис. 1).

Туннельный эффект – это явление, при которой элементарная частица способна пройти через потенциальный барьер, при этом барьер выше полной энергии данной частицы. Квантовое туннелирование относится к квантово-механическому явлению, при котором частица туннелирует через барьер, который она не могла преодолеть в классическом понимании.

Из этого можно сделать вывод, что это явление относится исключительно к квантовой природе.

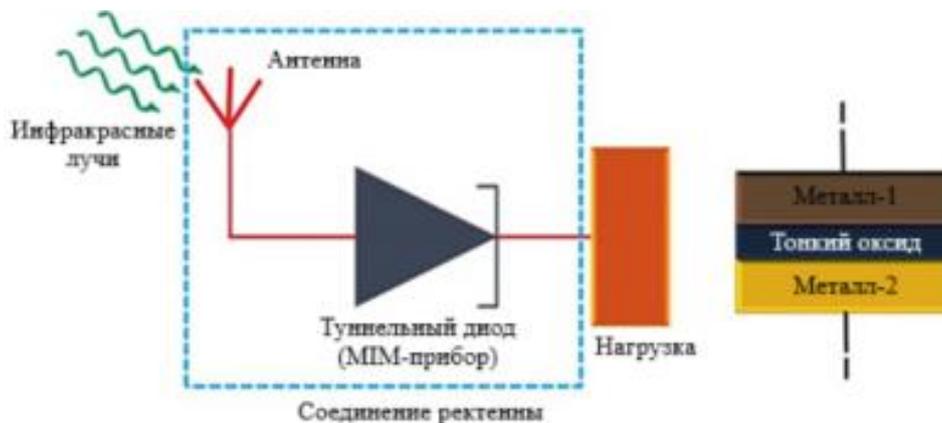


Рис. 1. Схема получения электроэнергии из инфракрасных лучей при применении наноантенны

В квантовой механике существует вероятность, что частица проникнет через барьер, несмотря на то что у неё нет достаточного количества энергии. Такое поведение часто объясняется волновой природой частиц в квантовой механике. В квантовой механике частица характеризуется волновой функцией, отражающей вероятность обнаружения частицы в конкретном месте в определенный момент времени. При столкновении частицы с потенциальным барьером используется уравнение Шрёдингера, позволяющее оценить вероятность проникновения частицы через барьер, так как волновая функция быстро уменьшается по экспоненте. Это означает, что потенциальный барьер в мире квантовой механики не является абсолютной непроницаемой границей, как это принято в классической механике Ньютона. В случае относительно малой высоты барьера или значения суммарной энергии, близкого к пороговому, волновая функция, несмотря на быстрое уменьшение по мере приближения к краю барьера, позволяет частице преодолеть его. Таким образом, существует определенная вероятность обнаружения частицы по ту сторону потенциального барьера, что невозможно в мире механики Ньютона.

Квантовое туннелирование применяется в различных сферах, таких как микроэлектроника, нанотехнологии. В связи с этим создание модели преобразователя инфракрасного излучения в электрическую энергию на основе наноантенны с внедрённым туннельным устройством типа «Металл-диэлектрик-металл» (МММ-прибор) является целесообразным.

Основной целью исследования является создание оптимальной модели преобразователя ИК-излучения в электрический ток на основе разработанной формы наноантенны и созданного туннельного устройства (МММ-прибора).

В ходе эксперимента были разработаны 3 модели наноантенн, которые состоят из двух частей. Эти части симметричны друг другу, поскольку для создания условия квантового туннелирования частицы ИК-излучения необходимо сжатие обеих частей для получения симметричного МММ-прибора. Каждой модели наноантенны были присвоены названия, соответствующие их форме. Наглядные изображения моделей приведены на рис. 2.

Далее необходимо произвести сравнительную характеристику предложенным моделям наноантенн по таким показателям, как резонансная частота, коэффициент усиления. Сравнительная характеристика моделей наноантенн показана в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика предложенных моделей наноантенн

Показатели	Галстук-бабочка	Антенна-стрелка	С-антенна
Резонансная частота, ТГц	542,7	541,3	536,7
Коэффициент усиления	6,7	7	5,4



*Рис. 2. Разработанные модели наноантенн:  
1 – «Галстук-бабочка», 2 – «Антенна-стрелка», 3 – С-антенна*

В результате сравнительной характеристики было выяснено, что модель «Галстук-бабочка» обладает наибольшим показателем резонансной частоты (около 542,7 ТГц). В данном случае показатель резонансной частоты является индикатором настройки наноантенны, что подразумевает собой адаптацию под определённую длину волны. Галстук-бабочка наиболее подходит для улавливания волн инфракрасного излучения, поскольку показатель резонансной частоты максимальный и способен уловить большое число волн несмотря на погрешности в их длине. Для эксперимента настраиваемая резонансная частота составит 28,3 ТГц, которая соответствует длине волны, равной 10,8 мкм. Настройка резонансной частоты не повлияет на производительность наноантенны вследствие подбора соответствующих материалов. Коэффициент усиления в данной модели несколько низок по сравнению с антенной-стрелкой, но его числового значения достаточно для преобразования ИК-излучения в электрический ток. В данном случае коэффициент отражает степень сжатия частот наноантенны с МИМ-прибора для последующего процесса преобразования.

Для создания условий преобразования ИК-излучения в электрическую энергию было произведено перекрытие плеч наноантенны. Данный процесс достаточно сложен, поскольку проходит в наноскопических масштабах и требует выравнивания для преобразования ИК-волн в электрический ток. Для выпрямления инфракрасной волны в электрический ток был использован диод типа «Металл-изолятор-металл» (МИМ-прибор), который является туннельным устройством для перемещения электрона через барьер. Поскольку этот барьер имеет толщину всего в один нанометр, диоды МИМ могут обрабатывать высокочастотные сигналы порядка фемтосекунд, что достаточно быстро. В данном эксперименте таким диодом служит антенна «Галстук-бабочка», плечи которой состоят из сплава золота и титана. Между слегка перекрывающимися плечами была внедрена плёнка изолятора, состоящего из оксида алюминия. Подобное устройство способно создавать интенсивные электромагнитные поля, необходимые для квантового туннелирования.

В ходе испытания сборки преобразователя было выяснено, что устройство успешно улавливало инфракрасное излучение при нулевом приложенном напряжении, то есть включалось только при необходимости.

Таким образом, в результате эксперимента был создан преобразователь, состоящий из наноантенны «Галстук-бабочка» и диода типа «Металл-изолятор-металл». С помощью собранной модели возможно улавливание инфракрасных волн и дальнейшее их преобразование в электрическую энергию. Созданная разработка позволяет решить проблему с низкой энергоэффективностью у солнечных панелей, поскольку климатические условия и низкая производительность материала производства фотоэлектрической ячейки негативно влияют на данный показатель. Основным преимуществом разработки является возможность получения преобразованной электроэнергии в ночное время суток, поскольку инфракрасные волны исходят из земной поверхности. При дальнейшем проектировании и модернизации разработ-

ки станет возможным создание масштабного производства солнечных панелей с повышенным коэффициентом полезного действия (КПД). Кроме того, стоимость произведённой солнечной панели по предложенным технологиям будет ниже по сравнению с ныне существующими конструкциями, что позволит в будущем на протяжении суток бесперебойно производить электрическую энергию для дальнейшего использования.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Петровская Т.А., Старостенков Я.Н. Повышение КПД солнечных панелей // Лучшие студенческие исследования: материалы XI Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза. – 2024. – С. 31–34.
2. Джаявал Г., Белкади А., Мередов А., Пельц Б., Моддель Г., Шамим А. Оптическое выпрямление через пассивную ректенну MIM на основе  $Al_2O_3$  на частоте 28,3 ТГц [Электронный ресурс] – Режим доступа: – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468606917301739?via%3Dihub>. Дата доступа: 05.11.2024
3. Низовцова М.А., Драб А.А. Туннельный Эффект. Туннельный Микроскоп [Электронный ресурс] – Режим доступа: – URL: [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/57170/1/Nizovcova\\_Tunnel%27nyj.pdf](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/57170/1/Nizovcova_Tunnel%27nyj.pdf). Дата доступа: 03.11.2024.
4. Госвами Д.Й., Виджаярагхаван С., Лу С., Тамм Г. Новые и перспективные разработки в области солнечной энергетики [Электронный ресурс] – Режим доступа: – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X03001038>. Дата доступа: 05.11.2024
5. Лячин А.В., Фёдоров М.В. Туннельный эффект в вырожденном p–n – переходе [Электронный ресурс] – Режим доступа: – URL: <https://edu.tusur.ru/publications/852/download>. Дата доступа: 06.11.2024.

Научное издание

## **БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Сборник статей  
IV Всероссийской с международным участием  
молодёжной конференции

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*

**Зарегистрировано в Издательстве ТПУ  
Размещено на корпоративном портале ТПУ  
в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ