

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

23 – 27 мая 2022 г.

СБОРНИК ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Москва
Издательство МЭИ
2022

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Рогалев Н.Д.	- д.т.н., ректор НИУ «МЭИ», Председатель;
Драгунов В.А.	- д.т.н., проректор по научной работе, заместитель Председателя;
Комаров И.И.	- к.т.н., директор ЦИР, заместитель Председателя, ответственный за проведение конференции;
Кролин А.А.	- к.э.н., начальник ОКИПП ЦИР – ответственный секретарь;
Кальщиков А.А.	- к.т.н., ст. преп. кафедры ОРТ;
Курбатова Е.П.	- к.т.н., доцент кафедры ЭМЭА;
Лямасов А.К.	- к.т.н., доцент кафедры ГГМ;
Маленков А.С.	- к.т.н., начальник ОИРР ЦИР;
Меркурьев И.В.	- д.т.н., и.о. директора ЭнМИ;
Насыров Р.Р.	- к.т.н., доцент кафедры ЭЭС;
Осипов С.К.	- к.т.н., доцент кафедры ИТНО;
Петров П.Ю.	- к.т.н., доцент кафедры ТМ;
Щербатов И.А.	- к.т.н., и.о. директора ИЭВТ;
Буканев А.	- председатель студенческого научного общества (СНО) «Технологии будущего».

Т 97 Технологии будущего: VI Междунар. науч.-техн. конф. Студентов и аспирантов (23–27 мая 2022 г., Москва): сборник трудов конференции. – М.: Издательство МЭИ, 2022. – 332 с.

ISBN 978-5-7046-2649-7

Доклады и тезисы докладов студентов и аспирантов, помещенные в настоящий сборник, отражают выполненные ими исследования в таких областях развития энергетики, как: тепловая и атомная энергетика; технологии для цифровой экономики и энергетики; гидроэнергетика, ВИЭ и распределенная энергетика; интеллектуальные системы распределения и потребления энергии; водородная энергетика; электроника; радиотехника; информационные технологии; робототехника; технологии создания конструкций нового поколения. Большинство исследований было выполнено студентами и аспирантами под руководством сотрудников из числа научного и профессорско-преподавательского штата НИУ «МЭИ» в рамках Программ научных исследований на 2020-2022 годы, финансируемых за счет собственных средств университета. Некоторые работы выполнялись с участием зарубежных студентов и аспирантов НИУ «МЭИ».

Сборник предназначен для студентов, аспирантов, преподавателей вузов и инженеров, интересующихся указанными выше направлениями науки и техники.

В отдельных случаях в авторские оригиналы внесены изменения технического характера. Как правило, сохранена авторская редакция.

Материал издается в авторской редакции

**УДК 621
ББК 31**

ISBN 978-5-7046-2649-7

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Доклады очных участников конференции

Секция 1. Тепловая и атомная энергетика

научный руководитель – Осипов С.К.

- Д.Д. Львов, Д.А. Мечник, Д.А. Островский, С.К. Осипов**
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ХЛАДАГЕНТА НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТУРБИНЫ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 10
- И.А. Максимов, Д.С. Ковалев, Б.А. Махмутов, В.О. Киндра, М.В. Опарин**
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕКИСЛОТНОГО РЕГЕНЕРАТОРА КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ 16
- Д.А. Лымарев, Д.И. Левенок, Е.Т. Ильин**
ОПТИМИЗАЦИЯ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ БАКОВ АККУМУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ СЕТЕВОЙ ВОДЫ 22
- Д.А. Лымарев, Д.И. Левенок, Е.Т. Ильин**
РАСШИРЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНОГО ДИАПАЗОНА ТЭЦ ПУТЕМ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА 28
- М.А. Бабичева, С.К. Звонарева, О.В. Егошина**
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭНЕРГОБЛОКА ТЭС (НА ПРИМЕРЕ ТЭЦ МЭИ) 34
- К.Т. Чан (Tran Quoc Thinh), А.А. Сухих**
АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСИЛОВОГО КОНТУРА АЭСММ НА CO₂ 40

Секция 2. Технологии для цифровой экономики и энергетики

научные руководители – Щербатов И.А., Кролин А.А.

- В.А. Агибалов, М.К. Белов, А.Н. Долгушев, И.А. Щербатов**
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС И ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ 47
- А.А. Гаврилов, А.А. Курушкина, С.Д. Блаженова, А.Н. Зейн**
РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 53
- М.С. Скиба, М.В. Андронов, А. А. Соболев, Е.В. Сухарева**
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ 59
- К.С. Володина, Е.А. Сысоева, Н.Л. Кетоева**
ВНЕДРЕНИЕ ПРАКТИК ГИБКОГО УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ЕДИНИЦ ВУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА 65

Секция 3. Гидроэнергетика, ВИЭ и распределенная энергетика

научные руководители – Курбатова Е.П., Лямасов А.К.

С.И. Столбунов, И.С Соколов, Е.М. Алешкова, А.В. Рыженков

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

72

Т.А. Золотарев, Е.А. Кущенко, Е.П. Курбатова

КИНЕТИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ СО СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

78

Е.Д. Зенько, Е.В. Конюшенко, О.Н. Молоканов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ МУЛЬТИПЛИКАТОРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ ДЛЯ НУЖД ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

84

В.В. Журавлева, Г.А. Кромм, С.П. Черепанов, А.В. Волков

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ БИОМИМЕТИКИ В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

90

О.С. Кузнецова, Е.С. Трушин, А.Ю. Лихаева, С.В. Григорьев

О СОЗДАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЕРЕМЕННОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК НА НРТ

96

М.А. Бирюлин, К.Е. Денисов, А.К. Лямасов

ОСНОВНОЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗС ТОННЕЛЬНОГО ТИПА

102

М.А.Дурова, К. Мякота, Д.А. Фрей

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ АКТИВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА РОЗНИЧНЫХ РЫНКАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

108

М.А.Дурова, К. Мякота, Д.А. Фрей

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ЦЕН В АКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

114

А.А. Проскурина, Н.В. Лазарева, А.А. Сысоев, М.Г. Тягунов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ СТРОИТЕЛЬСТВА НОВЫХ ГИДРОСТАНЦИЙ В СЛОЖНЫХ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

120

Н.Ю. Моздер, А.Ф. Нарынбаев, А.Г. Васьяков

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ РАБОТОЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЁТОМ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПРИХОДА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

126

Секция 4. Интеллектуальные системы распределения и потребления энергии

научный руководитель – Насыров Р.Р.

И.И. Бердышев, М.В. Бурмейстер, Р.В. Булатов, Р.Р. Насыров

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ ВИЭ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

133

И.И. Бердышев, М.В. Бурмейстер, Р.В. Булатов, Р.Р. Насыров ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЙ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	139
А.С. Демиденко, Г.А. Парфенов, С.А. Куделина, Г.В. Шведов АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ КВАРТИРЫ И ЖИЛОГО ЗДАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ	145
Р.Ю. Гоенко, В.М. Королев, А.Д., Чернышева, А.С. Ванин РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ КЛАССА 6-10/0,4 КВ В ЦИФРОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ	151
П.А. Бордадын, Я.А. Маринов, К.В. Шиш, М.А. Силаев ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЙСЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ РЕАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ	157
С.А. Зенин, П.В. Мешалова, А.В. Шишкин, Ю.В. Яворовский СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕПЛОВОЙ СЕТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ	163
А.П. Софроницкий, А.А. Сесин, С.В. Гужов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОФИСНОГО ЗДАНИЯ	169
Р. Биткулов, Д.Д. Умурзаков, И.Д. Витлинский, Г.Ч. Чо ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ	175
Н.А. Каримов, И.С. Зубкова, Д.А. Аверьянов, О.Н. Кузнецов РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ	181
А.С. Гудожников, М.П. Тибряев, М.А. Рашевская РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НН ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ДУГОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ	187
О.И. Игнатъев, В.В. Кох, Д.В. Мостовой, П.А. Рашитов ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИМ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ	193
Секция 5. Водородная энергетика научный руководитель – Маленков А.С.	
М.В. Козлова, С.И. Бутрим, М.А. Соловьев, С.А. Григорьев, И.В. Пушкарева, А.С. Пушкарев ПРИМЕНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ГЕТЕРОАТОМАМИ АЗОТА, В КАЧЕСТВЕ НОСИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРА ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ТВЕРДЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ	199
А.А. Гаврилюк, С.В. Курочкин, В.Н.Кулешов, Н.В. Кулешов СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВОЙ ПЕНЫ	205
В.Ю. Наумов, Т.П. Карев, А.С. Маленков ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АММИАКА В ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ	210

С.А. Дронов, В.Э. Панарин, Д.В. Сёмин, А.В. Федюхин
РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГАЗОРЕГУЛЯТОРНЫХ ПУНКТОВ
НА БАЗЕ РОТОРНОГО ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА МАЛОЙ МОЩНОСТИ 216

Секция 6. Электроника, радиотехника и IT
научный руководитель – Кальщиков А.А.

Д.В. Софуев, Ш.Ш. Усманова, Н.М. Скорнякова
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО
МЕТОДА 223

В.В. Пинчуков, А.Д. Богачев, Е.В. Шматко, А.Ю. Поройков
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ УСЛОВИЙ
ПОВЫШЕННЫХ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК 229

А.А. Иванов, А.К. Рыжков, Б.А. Сафронов, А.А. Волошин, А.Н. Васильев
РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО СКАНЕРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СТАНДАРТА МЭК61850
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ 235

Д.С. Дикарев, Я.В. Стожек, Т.Б. Дуйшеналиев
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ЛИНИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ КРУГОВ НАПРЯЖЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ
КОНСТАНТ 241

Н.О. Игнатьев, К.Е. Липшиц, А.С. Швецов
БЕСПРОВОДНЫЕ ПАССИВНЫЕ ДАТЧИКИ БЫСТРОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ 247

А.П. Малышев, А.А. Чугунов, Т.А. Бровко, И.В. Корогодин
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА БАЗЕ СМАРТФОНОВ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ 253

Е.Е. Козлова, К.Ю. Ванин, Л.А. Цырульникова, А.Р. Сафин
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
«АНТИФЕРРОМАГНЕТИК – ТЯЖЕЛЫЙ МЕТАЛЛ» 259

Секция 7. Технологии создания конструкций нового поколения
научный руководитель – Петров П.Ю.

Е.К. Титарев, А.В. Нехорошев, А.Л. Гончаров
РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ЦЕЛЕЙ 266

Е.М. Воронкова, Д.В. Голубев, Д.И. Ковалев
НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ТОКОПРОВОДОВ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В
СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ 272

Т.Д. Баландин, Д.А. Жгут, М.В. Карпова, В.А. Барат, А.Ю. Марченков
ДИАГНОСТИКА РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЛИТНЫХ И АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ 278

В.А. Мурашов, А.А. Борисов, А.С. Попов, К.В. Строгонов
РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ПЕЧИ БАРБОТАЖНОГО ТИПА 284

А.В. Молостова, А.Н. Журкин, М.Я. Погребисский, С.М. Нехамин
УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ ДУГОВОЙ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА СТОРОНЕ ВТОРИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ 290

Секция 8. Робототехника

Научный руководитель – Меркурьев И.В.

А.М. Соколов, А.П. Жарков, В.В. Борисов

КАСКАДНО-КОМПОЗИЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ 296

И.В. Апанасевич, Д.Р. Андреев, Г.Р. Сайпулаев, И.В. Меркурьев

РАЗРАБОТКА МАКЕТА НОВОГО АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРОСОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ 301

В. Дони, П.А. Скулова, М. Р. Сайпулаев, Б.И. Адамов

РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРО-ГИДРОПНЕВМОПРИВОДА, УВЕЛИЧИВАЮЩЕГО ФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА И КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ 307

О.В. Воробьев, М.Н. Кирсанов

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ ФЕРМ С ПОДЪЕМОМ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ 313

Тезисы докладов заочных участников конференции

А.А. Гаврилов, А.А. Курушкина, С.Д. Блаженова, А.Н. Зейн

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ 320

И.П. Шорсткин, А.В. Соломатин, К.В. Крюков

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ» 321

В.А. Хомичев, Г.В. Шведов

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТДЕЛЬНОЙ КВАРТИРЫ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА В ЧАСЫ УТРЕННЕГО МАКСИМУМА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕГАПОЛИСОВ 322

С.В. Курочкин, А.А. Гаврилюк, В.Н. Кулешов

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВОЙ ПЕНЫ 323

О.И. Дьячкова, А.Г. Звончевский, А.В. Федюхин

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ 324

О.И. Дьячкова, А.Г. Звончевский, А.В. Федюхин

ОЦЕНКА ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА НА ОСНОВЕ ПИНЧ-АНАЛИЗА 325

А.А. Деев, А.А. Кальщиков

РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХПУТЕВОГО МЕТОДА СУБНАНОСЕКУНДНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В СИНХРОННЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ 326

А.А. Иванов, А.К. Рыжков, Б.А. Сафронов, А.А. Волошин, А.Н. Васильев

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО СКАНЕРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СТАНДАРТА МЭК61850 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ 327

М.В. Кахальников, О. Очирбат, Е.В. Сухарева

СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ 328

Доклады

очных участников конференции

Секция 1

Тепловая и атомная энергетика

Руководитель –
к.т.н. **Осипов С.К.**

Д.Д. Львов¹, Д.А. Мечник¹, Д.А. Островский¹, С.К. Осипов²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПА ХЛАДАГЕНТА НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТУРБИНЫ КИСЛОРОДНО- ТОПЛИВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе проведено исследование влияния перехода с углекислотного хладагента на азотный на теплогидравлические характеристики каналов охлаждения лопатки первой ступени углекислотной турбины. Установлено, что при переходе с углекислотного охлаждения на азотное коэффициент теплоотдачи снижается для канала: с штырьковыми интенсификаторами в 1,3-1,65 раз, со штырьково-луночными интенсификаторами в 1,65-1,77 раз. Установлено, что при переходе со штырьковых интенсификаторов на штырьково-луночные коэффициент теплоотдачи увеличивается для системы охлаждения с углекислотным хладагентом на 2,2-2,5%, но при азотном хладагенте коэффициент теплоотдачи остается неизменным. Установлено, что для сохранения постоянства коэффициента теплоотдачи при переходе с углекислотного на азотный хладагент необходимо обеспечить расход азота на 23,6 % больше по сравнению с диоксидом.

Ключевые слова – цикл Аллама, интенсификаторы теплообмена, углекислотная турбина

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая отрасль вносит существенный вклад в загрязнение окружающей среды и антропогенного воздействия на климат. Большое количество выбросов CO₂ при сжигании органического топлива является причиной глобального потепления [1]. В связи с этим, необходимо разработать решения, позволяющие снизить выбросы CO₂ на предприятиях, производящих электроэнергию.

Внедрение получивших широкую известность технологий улавливания диоксида углерода на тепловых электрических станциях (ТЭС) приводит к увеличению стоимости производимой электроэнергии в 1,5-2 раза [2]. В этой связи вопрос о создании экологически безопасных и экономически целесообразных источников энергии большой мощности остается открытым.

Перспективным решением задачи может стать кислородно-топливная технология производства энергии. В отличие от традиционных установок кислородно-топливные энергетические комплексы (КТЭК) практически не загрязняют атмосферу выбросами за счет организации замкнутого цикла Брайтона, использования кислорода в качестве окислителя топлива и захоронения удаляемого из цикла углекислого газа. Наиболее эффективной установкой из КТЭК является цикл Аллама. Эффективность снижения выбросов CO₂ данных установок достигает 99% [3-4] при КПД нетто 50%. Установлено, что наибольшая эффективность КТЭК, работающего по циклу Аллама, достигается при начальных параметрах равным 1100 °С и 30 МПа [5].

Начальный уровень температур перед первой ступенью углекислотной турбины ставит задачу разработки системы охлаждения для лопаток первых ступеней.

В работе [7] приводят результаты численных и экспериментальных исследований теплогидравлических характеристики каналов с различными интенсификаторами (штырьковыми, штырьковые со сплошными ребрами и штырьковые со скругленными ребрами), омываемыми углекислотным теплоносителем. В данной работе приводят разработанные корреляционные зависимости числа Нуссельта от Рейнольдса, которые возможно использовать при разработке системы охлаждения лопаток углекислотной турбины.

Решить проблему снижения экономичности цикла Аллама при увеличении температуры выше $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет переход на азотное охлаждение. Азот с параметрами 5 МПа и $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ возможно получать из ВРУ энергетического комплекса.

В работе [8] было установлено, что переход с углекислотного охлаждения на азотное позволит повысить начальную температуру цикла с $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, и, соответственно, КПД нетто цикла Аллама на 2,4%.

Переход на азотное охлаждение лопаток первых ступеней турбины приводит к изменению конструкции системы охлаждения с открытого на закрытый тип, что связано с необходимостью предотвращения смешения азотного хладагента с углекислотным рабочим телом в межлопаточных каналах ступеней. В связи с этим необходимо оценить влияние перехода с углекислотного хладагента на азотный на теплогидравлические характеристики каналов охлаждения лопаток с различными интенсификаторами.

В настоящей статье проводится исследование влияния перехода с углекислотного хладагента на азотный на теплогидравлические характеристики канала охлаждения со штырьковыми и штырьково-луночными интенсификаторами теплообмена, которые возможно применять как для области середины пера лопатки, так и ее выходной кромки. Штырьковые интенсификаторы устанавливаются перпендикулярно направлению движения охлаждающей среды. Штырьково-луночный интенсификатор отличается от штырькового тем, что сами штырьки располагаются соосно с лунками. Было установлено, что размещение штырька в лунку позволяет увеличить число Нуссельта в канале на 10% [9].

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Методом исследования являлось численное моделирование теплогидравлических процессов методом осреднения системы уравнения Навье-Стокса по Рейнольдсу (RANS).



а) штырьковые интенсификаторы

б) штырьково-луночные интенсификаторы

Рис 1. Охлаждаемые каналы с расположенными в шахматном порядке интенсификаторами теплообмена.

Моделирование теплогидравлических процессов выполнялось в сопряженной постановке, то есть организовывалось совместное влияние друг на друга стенки металла и по-

тока хладагента. Моделирование теплогидравлического процесса выполнялось с помощью кода Ansys CFX.

Сетка стенки канала – это набор тетраэдрических неструктурированных ячеек с максимальным линейным размером элемента 0,5 мм. Количество четырехгранных элементов для разных моделей лежит от 3,8 миллионов.

Объектами моделирования являются каналы прямоугольного сечения с различными видами интенсификаторов (рисунок 1). Моделирование теплогидравлических процессов выполнялось в сопряженной постановке, то есть организовывалось совместное влияние друг на друга стенки металла и потока хладагента. Моделирование теплогидравлического процесса выполнялось с помощью кода Ansys CFX.

Граничные условия проведения численного эксперимента для двух хладагентов заключались в следующем: на входе в каналы задавались полное давление и температура хладагента, равные для углекислотного хладагента 30 МПа и 200 °С, а для азотного 5 МПа и 30°С. На выходе из модели задавался расход, определенный из числа Рейнольдса, который задавался в диапазоне 20000-100000, на внешней стенке модели задавалась температура металла, равная 850 °С. В качестве металла был выбран высокотемпературный сплав ХН65ВМТЮ с теплопроводностью равной $\lambda_{ст}=27,2$ Вт/м·град.

Наглядный пример расчетной сетки для штырьково-луночного канала представлен поперечным сечением на рисунке 2.

Методика обработки результатов численного моделирования описана в [9].

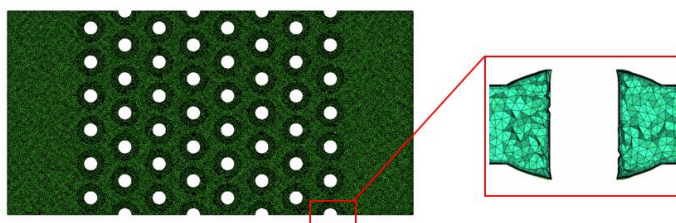


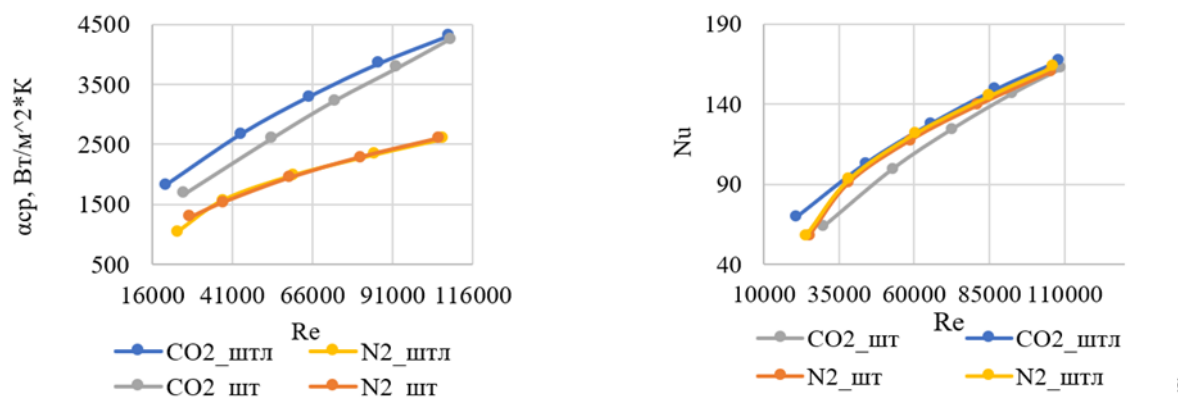
Рис 2. Расчетные сетка для штырьково-луночного канала

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было установлено, что зависимости основных теплогидравлических характеристик от числа Рейнольдса в диапазоне от 20000 до 100000 представленных на рисунке 3.

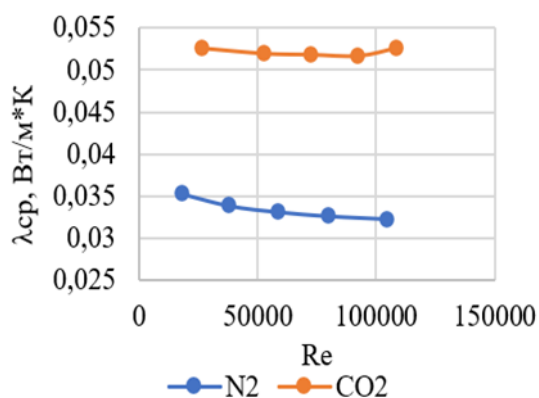
Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3а видно, что при переходе от углекислотного хладагента на азотный, при числах Рейнольдса от 20000 до 100000, коэффициент теплоотдачи уменьшается в 1,3-1,65 раз при штырьковом интенсификаторе и в 1,65-1,77 раз при штырьково-луночном. Также стоит отметить, что при углекислотном хладагенте коэффициент теплоотдачи в канале со штырьково-луночными интенсификаторами больше на 2,2-2,5% по сравнению с коэффициентом теплоотдачи в канале со штырьковыми интенсификаторами, но в аналогичной ситуации при азотном хладагенте коэффициент теплоотдачи обоих каналов не изменяется. Анализ зависимостей числа Нуссельта от Рейнольдса показывает, что в диапазоне чисел Рейнольдса от 20000 до 100000 при углекислотном хладагенте число Нуссельта для канала со штырьково-луночными интенсификаторами выше на 3,2-3,5%, чем для канала со штырьками, для азотного хладагента число Нуссельта также выше на 2,2-2,5%. При переходе с углекислотного на азот-

ный хладагент разница в числе Нуссельта в каналах для любой геометрий незначительна. При этом стоит отметить, что число Нуссельта в каналах, омываемых азотным хладагентом, становится практически на одном уровне с числом Нуссельта в канале со штырьками, омываемым углекислотным хладагентом (рисунок 3б).

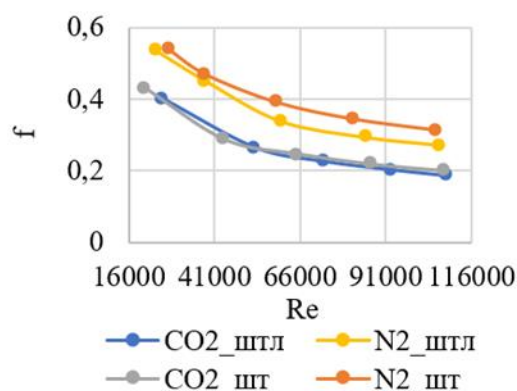


а) Зависимость коэффициента теплоотдачи от числа Рейнольдса

б) Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса в канале с различными видами хладагента



г) Зависимость теплопроводности различных типов хладагента от числа Рейнольдса интенсификаторами



в) Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для канала со штырьково-луночными

Рис 3. Основные зависимости теплогидравлических характеристик

Увеличение числа Нуссельта в канале с азотным хладагентом, обеспечивается тем, что средний коэффициент теплопроводности диоксида углерода больше теплопроводности азота в 1,55 раза при заданных давлениях и температурах (рисунок 3в).

Результаты дополнительного численного моделирования показывают, что для сохранения постоянства коэффициента теплоотдачи при переходе с углекислотного на азотный хладагент необходимо обеспечить расход азота на 23,6% больше по сравнению с углекислотным хладагентом. Анализ зависимости коэффициента гидравлических потерь от Рейнольдса показывает, что при переходе с углекислотного на азотный хладагент происходит увеличение гидравлических потерь в каналах в 1,25-1,63 раза для канала со штырьковыми интенсификаторами, для штырьково-луночных в 1,33-1,69 раза в диапазоне числа Рей-

нольдса от 20000 до 100000. Увеличение потерь давления связано с изменением вихревой структуры отрывной зоны за исследуемыми интенсификаторами теплообмена (рисунок 3г).

На рисунке 4 изображены линии тока хладагентов на продольной плоскости, проходящей через середину интенсификатора с различными теплоносителями и типом канала

При анализе длин потока за интенсификаторами было выявлено, что длина завихрений у углекислотного хладагента ниже, чем у азотного. Так при $Re=21000$ длина завихрений у диоксида углерода составляла $1,9D_{шт}$ (0,0038 м), а у азота $2,1D_{шт}$ (0,0042м); при $Re=100000$, длина при углекислотном хладагенте составляет $1,65D_{шт}$ (0,0033 м), а при азотном хладагенте $1,85D_{шт}$ (0,0037 м).

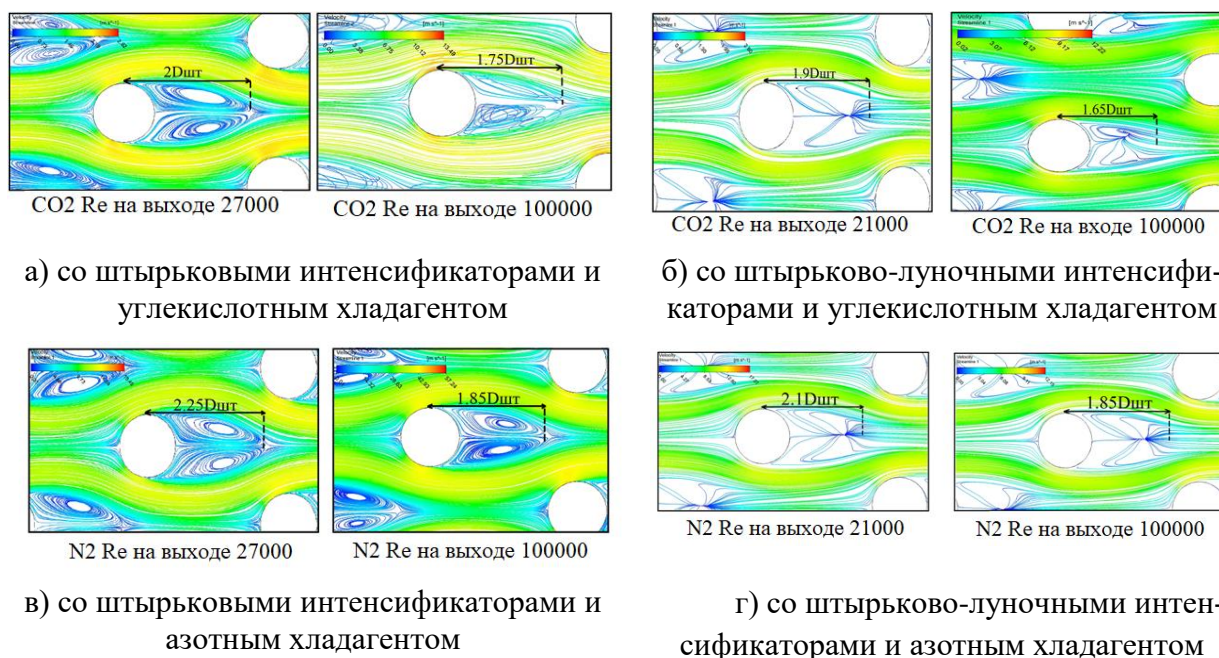


Рис 4. Линии тока на плоскости, проходящей через середину канала с различными видами конфигураций интенсификаторов и хладагентов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Установлено, что переход с углекислотного на азотный хладагент в диапазоне чисел Рейнольдса от 20000 – 100000 приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи для модели канала охлаждения лопатки углекислотной турбины: со штырьковыми интенсификаторами в 1,3 – 1,65 раз, для штырьково-луночных интенсификаторов в 1,65-1,77 раз.

2) Установлено, что переход с углекислотного на азотный хладагент в канале охлаждения лопатки углекислотной турбины со штырьковыми интенсификаторами в диапазоне чисел Рейнольдса от 20000 до 100000 уменьшает число Нуссельта в канале на 7-8,7%. Для штырьково-луночных интенсификаторов число Нуссельта при переходе с углекислотного хладагента на азотные не изменяется.

3) Определено, что для сохранения постоянства коэффициента теплоотдачи при переходе с углекислотного на азотный хладагент необходимо обеспечить расход азота на 23,6 % больше по сравнению с диоксидом.

4) Установлено, что переход с углекислотного на азотный хладагент в канале охлаждения лопатки углекислотной турбины со штырьковыми и штырьково-луночными ин-

тенсификаторами в диапазоне чисел Рейнольдса от 20000 до 100000 приводит к увеличению потерь в канале в 1,64 раз. Такой рост потерь связан с увеличением длины отрывной зоны за штырьковыми интенсификаторами в среднем в 1,09 раз и за штырьково-луночными интенсификаторами в среднем в 1,11 раз.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка научно-технических основ создания турбомашин для кислородно-топливных энергетических циклов» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **G.P. Peters, R.M. Andrew, J.G. Canadell, P. Friedlingstein, R.B. Jackson, J.I. Korsbakken, C. Le Quéré and A. Peregon**, “Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies,” *Nature Climate Change*, vol. 10, №1, 2020, pp. 3-6.
2. **J.L. Fan, M. Xu, F. Li, L. Yang, and X. Zhang**, “Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: the technology lock-in and cost optimization perspective,” *Applied energy*, vol. 229, 2018, pp. 326-334.
3. **I. Komarov, D. Kharlamova, B. Makhmutov, S. Shabalova, and I. Kaplanovich**, “Natural Gas-Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor,” *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, vol. 178, 2020, p. 01027.
4. **A. Rogalev, V. Kindra, and S. Osipov**, “Modeling methods for oxy-fuel combustion cycles with multicomponent working fluid,” In *AIP Conference Proceedings*, vol. 2047, №1, 2018, p. 020020.
5. **R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed, G.W. Brown Jr., T. Sasaki, M. Itoh and J. Manning**, “Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture,” *Energy Procedia*, vol. 114, 2017, pp. 5948-5966.
6. **Kindra, V. O., Rogalev, A. N., Osipov, S. K., Zlyvko, O. V., & Vegera, A. N.** Numerical study of flow and heat transfer in a rectangular channel with pin fin arrays and back ribs. In *14 th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics*. EUROPEAN TURBOMACHINERY SOCIETY, 2021.
7. **Rogalev A.** et al. Thermodynamic analysis of the net power oxy-combustion cycle //13 th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – European Turbomachinery Society, 2019.
8. **Kindra, V., Rogalev, A., Zlyvko, O., Zonov, A., Smirnov, M., & Kaplanovich, I.** Research on oxy-fuel combustion power cycle using nitrogen for turbine cooling. *Archives of Thermodynamics*, 2020, 191-202.
9. **Kindra, V.** Kindra V. et al. An experimental and numerical study of flow and heat transfer in cooling channels with pin fin-dimple and pin fin-groove arrays //13 th European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. – European Turbomachinery Society, 2019.

*И.А. Максимов*¹, *Д.С. Ковалев*¹, *Б.А. Махматов*², *В.О. Киндра*³, *М.В. Опарин*⁴

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта, 4 – консультант

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ УГЛЕКИСЛОТНОГО РЕГЕНЕРАТОРА КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе приведены результаты технико-экономического анализа регенеративной системы цикла Аллама. Определено влияние ключевых рабочих параметров регенератора, недогрева и допустимых потерь давления, на термодинамическую эффективность цикла и на металлоёмкость теплообменного аппарата. Проведён анализ влияния этих параметров на совокупные издержки на топливо и оборудование регенеративной системы. Определены оптимальные рабочие параметры регенератора, обеспечивающие наилучшие технико-экономические показатели: при недогреве 22 °С и потерях давления по горячему каналу 4% достигается наименьшая сумма издержек на топливо и издержек на регенеративную систему.

Ключевые слова – термодинамический цикл, теплообменный аппарат, гидравлические потери, поверхность теплообмена, энергоэффективность

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день большая часть электрической энергии в мире генерируется за счёт сжигания углеводородного топлива, в результате чего в атмосферу выбрасывается значительное количество парниковых газов. Эта глобальная проблема является угрозой устойчивому развитию человечества и для её решения необходимы новые научно-технические решения в области безуглеродной энергетики.

Одним из возможных решений отмеченной проблемы может стать развитие технологий кислородно-топливного сжигания топлива для производства электроэнергии, в основе которых лежит сжигание углеводородного топлива в чистом кислороде с последующим улавливанием углекислого газа и его захоронением. На данный момент известно множество циклов, работающих по такой технологии, однако одним из наиболее перспективных является цикл Аллама. Высокий уровень энергетической эффективности и нулевые выбросы углекислого газа в атмосферу являются главными отличительными преимуществами данного цикла.

Такой высокий уровень энергетической эффективности цикла достигается, в том числе, за счёт развитой системы регенерации [1]. Регенератор является одним из ключевых компонентов цикла и эффективность его работы напрямую определяет показатели энергетической эффективности всей энергоустановки. В этой связи вопрос обеспечения высокой степени регенерации и эффективности работы теплообменного оборудования цикла является одним из важнейших, при проектировании и создании энергоустановок с кислородным сжиганием топлива.

Регенератор является одним из ключевых элементов цикла и работает при высоком перепаде давлений теплоносителей: рабочее давление горячего потока составляет 3 МПа, тогда как холодного – 30 МПа. Это приводит к необходимости применения особых кон-

структивных решений, используя которые можно было бы обеспечить надёжную работу теплообменного оборудования при работе на таких параметрах.

Наиболее распространённым решением для таких систем является применение пластинчатых теплообменных аппаратов типа РСНЕ (printed circuit heat exchangers), в которых рабочие каналы вытравлены в пластинах методом фотохимического вытравливания, а сами пластины соединены вместе с помощью диффузионной сварки. Такое исполнение позволяет обеспечить надёжную работу аппарата при высоких рабочих температурах и перепаде давлений. Поверхности теплообмена представляют с интенсификаторами теплообмена в виде рёбер S-образной формы, которые за счёт изменения режима течения потока и его турбулизации повышают удельные тепловые потоки с единицы поверхности [2]. Пакет пластин набран таким образом, чтобы на одну пластину холодного теплоносителя приходилось по две пластины горячего – это позволяет увеличить площадь проходного сечения для горячего потока и снизить уровень потерь давления по каналу.

Ввиду особенностей изготовления такого аппарата, увеличение степени регенерации в цикле требует значительных капитальных затрат на теплообменное оборудование: стоимость регенератора может достигать 10% от стоимости всего оборудования комплекса [3], и этот фактор напрямую влияет на срок окупаемости проекта и себестоимость отпускаемой электроэнергии. В связи с этим отдельным вопросом становится определение компромисса между поддержанием высокой энергетической эффективности генерации энергии – отличительной особенностью цикла Аллама, и стоимостью основного оборудования.

В настоящей работе приведены результаты технико-экономического анализа регенеративной системы цикла Аллама.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом настоящих исследований является углекислотный регенератор цикла Аллама – многопоточный теплообменный аппарат, в котором происходит передача тепла от потока CO_2 , выходящего из турбины с температурой 663°C и охлаждаемого до 75°C с расходом 636 кг/с в базовом варианте, к нагреваемому потоку углекислого газа с расходом 543 кг/с , температура которого меняется с 60°C до 644°C , поступающего в камеру сгорания, а также от воздухоразделительной установки к потоку хладагента для охлаждаемой газовой турбины. В настоящей работе многопоточный теплообменник рассматривается как совокупность двух двухпоточных аппаратов и исследование влияния рабочих параметров на экономические показатели рассматривается только для первого теплообменника, суммарная мощность которого на порядок выше мощности второго.

3. МЕТОДИКА

Целевая функция оптимизационных исследований – приращение экономических издержек станции $\delta I_{\text{сумм}}$, которое при изменении рабочих параметров (недогрева и скорости течения в каналах) регенератора определяются только изменением стоимости теплообменного оборудования $\delta I_{\text{топ}}$ и изменением затрат на топливо $\delta I_{\text{то}}$, вызванного изменением КПД цикла:

$$\delta I_{\text{сумм}} = \delta I_{\text{топ}} + \delta I_{\text{то}} \rightarrow \min \quad (1)$$

Капитальные затраты на топливо в год, выраженные через КПД нетто энергоблока, определяются как:

$$I_{\text{топ}} = \frac{3600 \cdot N \cdot h_{\text{уст}} \cdot C_{\text{топ}}}{\eta \cdot Q_{\text{нр}}} \quad (2)$$

где N – мощность нетто энергоблока, $h_{\text{уст}}$ – установочное время работы энергоблока в год, $C_{\text{топ}}$ – цена топлива, руб/м³, η – КПД нетто энергоблока, $Q_{\text{нр}}$ – рабочая низшая теплота сгорания.

КПД нетто энергоблока напрямую зависит от величины недогрева в регенеративной системе и потерь давления в оборудовании: увеличение степени регенерации позволяет сократить потери тепловой энергии в холодном источнике, а также поднять температуру рабочей среды перед камерой сгорания.

Повышение степени регенерации в цикле приводит к уменьшению среднелогарифмического температурного напора и росту требуемой площади теплообмена аппарата. При этом площадь теплообмена определяется, в том числе, уровнем теплоотдачи в каналах которая напрямую зависит от скорости течения теплоносителей. С ростом скорости течения неизбежно возрастут потери давления в каналах, что потребует дополнительных затрат на прокачку теплоносителей.

Стоимость теплообменного оборудования напрямую зависит от металлоёмкости аппарата, которая определяется площадью теплообмена и геометрией каналов. Таким образом, при изменении уровня недогрева и потерь давления в регенераторе его стоимость можно напрямую определить как:

$$I_{\text{ТО}} = f(dT, dP) \quad (3)$$

Таким образом, при увеличении недогрева возникает два эффекта: увеличиваются издержки на топливо, что вызвано падением термического КПД цикла, а также уменьшается стоимость теплообменного оборудования. Аналогичный эффект наблюдается с ростом допустимых потерь давления.

Процесс оптимизации рабочих параметров регенератора состоит из нескольких этапов:

1. Расчёт тепловой схемы и определение базовых рабочих параметров теплообменника;
2. Конструктивный расчёт теплообменного аппарата и оценка его стоимости;
3. Исследование влияния недогрева и уровня допустимых потерь давления на термодинамическую эффективность цикла;
4. Оценка экономических издержек от изменения КПД цикла.

Термодинамические исследования регенеративной системы цикла проводились с использованием программного пакета Aspen Plus и базы данных теплофизических свойств NIST REFPROP согласно методике, изложенной в [4].

Конструктивный расчёт регенератора проводился с использованием метода сегментарного деления теплообменного аппарата, когда длина теплообменника разбивается на

элементы, в каждом из которых определяются основные параметры процессов теплообмена и гидродинамики [5]. Применение этого метода, по сравнению с методом расчёта по среднелогарифмическому напору, позволяет определять локальное изменение теплофизических свойств рабочих сред, а также учитывать нелинейность изменения температур сред по длине канала и определять наличие пинч-точек. Для определения тепловых и гидравлических характеристик течения в канале с S-образными интенсификаторами теплообмена использовались корреляционные уравнения, полученные в результате экспериментальных исследований [2].

Модель оценки стоимости регенератора основана на методе затратной чувствительности [6] стоимости теплообменника к уровню недогрева и потерь давления, суть которого заключается в том, что в качестве меры рыночной стоимости принимаются затраты (или издержки) на создание и реализацию оцениваемого объекта. Конечная стоимость аппарата определяется суммой стоимости всех основных элементов теплообменника (зависит от металлоёмкости агрегата) и стоимости операций изготовления.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В регенеративной системе одним из рабочих потоков является смесь углекислого газа с водяными парами, образующиеся при сгорании углеводородного топлива, в связи с чем при охлаждении потока рабочей среды ниже определённого уровня наблюдается конденсация паров, что приводит к нелинейности изменения температуры потока по длине канала в регенераторе (рисунок 2). Это обуславливает образование пинч-точки в аппарате, что вносит свои ограничения по допустимому температурному напору и приводит к увеличению требуемой площади теплообмена. В этой связи минимальный недогрев на холодном конце аппарата не может быть менее 12.5°C : в данном случае минимальная разница температур в пинч-точке будет меньше 0.5°C .

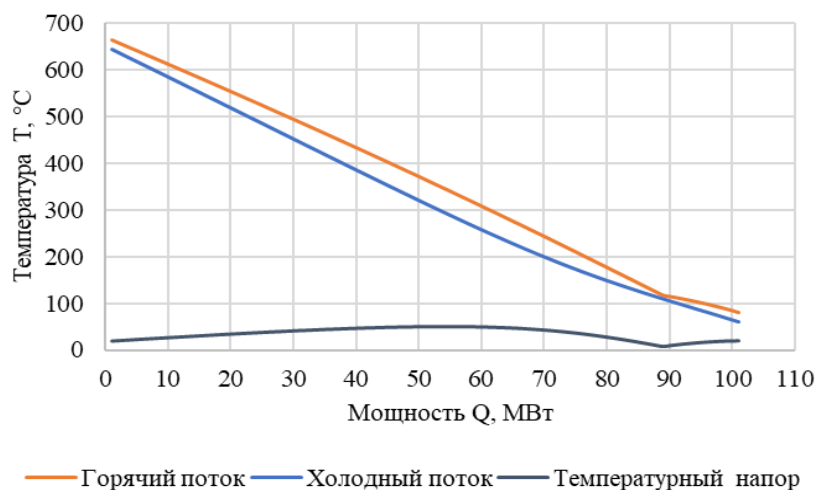


Рис. 2. Т-Q-диаграмма регенератора при недогреве на холодном конце 12.5°C

С увеличением недогрева на холодном конце в цикле повышается КПД нетто энергоблока: при допустимом уровне потерь давления по горячему каналу в регенераторе $dP_1=1\%$, уменьшение недогрева на холодном конце аппарата с 20°C до 12.5°C приводит к росту КПД нетто цикла с 47% до $47,9\%$. Одновременно с этим в 2,73 раза возрастает требуемая площадь теплообмена регенератора, а стоимость аппарата – в 2,97 раз. Это

обуславливает снижение издержек на топливо с ростом недогрева и увеличение затрат на теплообменное оборудование (рисунок 3). Наблюдается линейная зависимость издержек на топливо от недогрева в аппарате, одновременно с этим издержки на теплообменное оборудование имеют явно выраженную нелинейность: с приближением недогрева к 12°C площадь теплообмена устремляется в бесконечность ввиду практически нулевого температурного напора в пинч-точке при таких параметрах.

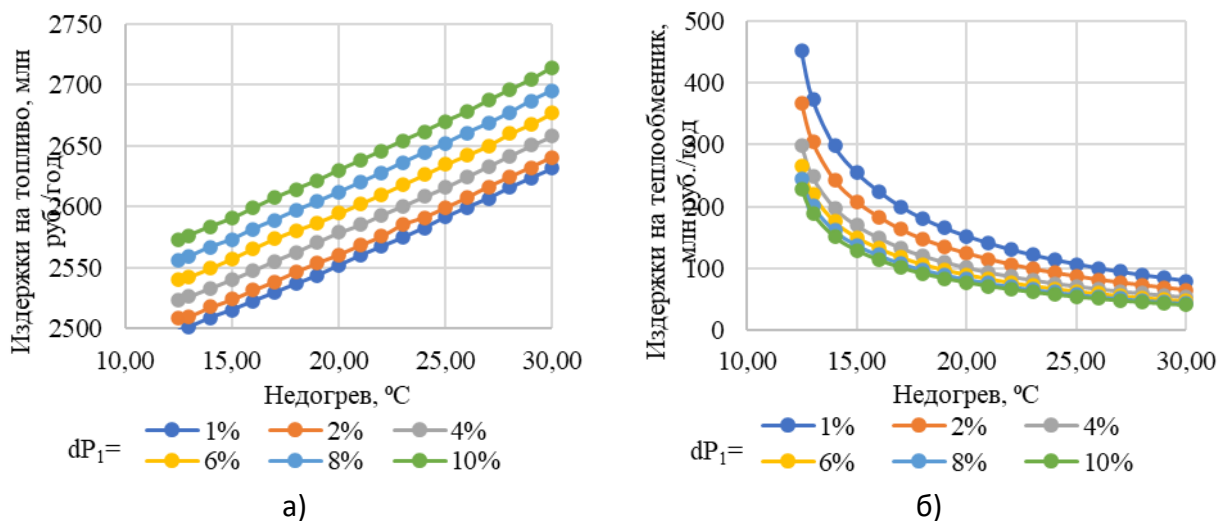


Рис. 3. График зависимости издержек на топливо (а) и на регенератор (б) от недогрева и потерь давления в регенераторе, млн руб/год

Для определения наиболее оптимальных рабочих параметров регенеративной системы было произведено сравнение изменения издержек, результаты которого приведены на рисунке 4. За базовый уровень взята схема с недогревом в регенераторе 15°C и допустимыми потерями давления по горячему каналу 4%. Из графика видно, что наименьшими совокупными издержками обладает схема с регенератором, который работает при недогреве на холодном конце 22°C и с потерями давления по горячему каналу 4%.

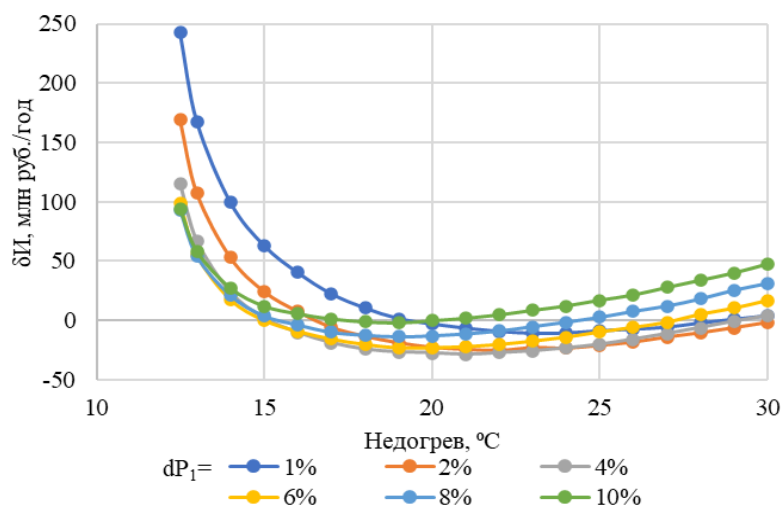


Рис. 4. График зависимости изменения суммарных издержек на регенеративную систему от недогрева в регенераторе при разных потерях давления по горячему каналу

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что минимальный недогрев в регенераторе определяется допустимым температурным напором в пинч-точке, наличие которой объясняется конденсацией водяных паров в потоке углекислого газа.

2. По результатам проведённых оптимизационных исследований выявлено, что наиболее выгодным является создание регенеративной системы, обеспечивающей недогрев на холодном конце аппарата в 22 °С с допустимыми потерями давления по горячему каналу равными 4% от входного давления. Такие параметры обеспечат минимальные суммарные финансовые издержки, обусловленные оптимальным отношением затрат на дополнительное топливо для генерации электроэнергии при пониженном КПД нетто блока и затрат на оборудование регенеративной системы цикла. Коэффициент полезного действия энергоблока при таких параметрах составляет 46,14% (по сравнению с 47,89% при минимальном недогреве и минимальных потерях давления), а требуемая площадь теплообмена сокращается в 5,2 раза по сравнению со случаем с недогревом 15°С. Стоимость регенератора при таких условиях составит 1734 млн. рублей.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка научно-технических решений для повышения эффективности и маневренности кислородно-топливных энергетических комплексов» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогалев, А. Н., Киндра, В. О., Зонов, А. С., & Комаров, И. И.** Разработка схемных и конструктивных решений в обеспечение создания регенеративного теплообменника для энергетической установки на сверхкритическом диоксиде углерода. // Современные проблемы теплофизики и энергетике. 2020. С. 238-240

2. **Ngo T. L. et al.** Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles //Experimental Thermal and Fluid Science. – 2007. – Т. 32. – №. 2. – С. 560-570.

3. **Chaturvedi R., Kennedy E., Metew S.** CO2 Sequestration by Allam Cycle. – 2021.

4. **Рогалев, А. Н., Рогалев, Н. Д., Киндра, В. О., Зонов, А. С., & Махмутов, Б. А.** (2019). Исследование экологически безопасных энергетических комплексов с кислородным сжиганием топлива. Новое в российской электроэнергетике, (8), 6-25.

5. **Lu M. et al.** Thermal hydraulic performance analysis of PCHE precooler for supercritical CO 2 Brayton cycle //2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). – IEEE, 2019. – С. 537-541.

6. **Вейг Н.В.** Оценка машин и оборудования: Учебное пособие. - СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2009. – 124 с.

Д.А. Лымарев¹, Д.И. Левенок², Е.Т. Ильин³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ОПТИМИЗАЦИЯ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ БАКОВ АККУМУЛЯТОРОВ И СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

АННОТАЦИЯ

Целью исследования является определение оптимальной единичной ёмкости баков аккумуляторов сетевой воды и эффективности систем аккумулярования. Проведены расчетные исследования ТЭЦ с турбоагрегатами Т-110-130 при работе с использованием аккумуляторов сетевой воды атмосферного типа для различных уровней ёмкости систем аккумулярования и единичной ёмкости баков аккумуляторов. Оценка экономического эффекта проведена с учётом продолжительности стояния температур наружного воздуха в течение года. Критерием выбора оптимальной ёмкости принят срок окупаемости. Установлена оптимальная ёмкость аккумулятора сетевой воды на примере станции, имеющей четыре турбины Т-110-130. Оптимальная ёмкость системы аккумулярования - 26000 м³, с четырнадцатью баками единичного объёма 2000 м³.

Ключевые слова – регулировочный диапазон, аккумулярование энергии, тепловой аккумулятор, манёвренная ТЭЦ, аккумулятор сетевой воды, комбинированная выработка

1. ВВЕДЕНИЕ

Совместная выработка тепловой и электрической энергии является наиболее эффективной, как в нашей стране, так и далеко за её пределами [1–3]. Стремление увеличить долю когенерации связано и с наиболее благоприятными условиями эксплуатации оборудования, и с увеличением эффективности его работы. Но в условиях изменяющегося в течение суток спроса на тепловую и электрическую энергию возникают ограничения при прохождении пиков и провалов электрической нагрузки, которые связаны с необходимостью отпуска тепловой энергии строго по температурному графику тепловой сети. В настоящее время вопрос расширения регулировочного диапазона теплофикационных турбин решается путём уменьшения доли комбинированной выработки и передачей тепловой нагрузки на ПВК. Это приводит к увеличению удельного расхода топлива на выработку электроэнергии и уменьшению экономичности работы турбоустановки.

Сложившуюся ситуацию усугубляет увеличение доли генераторов энергии на основе возобновляемых источников [4]. Зависимость выработки электроэнергии от неконтролируемых внешних факторов на генерирующих объектах ВИЭ увеличивает необходимость участия ТЭЦ в покрытии графика нагрузки, что требует дополнительного увеличения манёвренности теплофикационных турбин. При существующих подходах к покрытию пиков и прохождению провалов это может привести к существенному увеличению затрат топлива на ТЭЦ.

Вместе с тенденцией к использованию ВИЭ стали более актуальны исследования в области аккумулярования энергии [5]. Множество типов аккумуляторов энергии могут использоваться для различных целей в энергетике. Наиболее перспективными считаются

аккумуляторы электроэнергии, водорода. Их использование для расширения регулировочного диапазона ТЭЦ в настоящий момент имеет слишком большой срок окупаемости и повышает себестоимость производства электроэнергии. Кроме этого, производство и утилизация некоторых типов аккумуляторов несёт значительный вред для экологии, а также требует импортных компонентов и технологий.

Использование тепловых аккумуляторов сетевой воды (АСВ) позволяет решить проблему регулирования графиков нагрузки электрической и тепловой энергии на ТЭЦ. Данная технология реализуется с использованием отечественного оборудования. Исследования [6] показали, что использование АСВ существенно расширяет регулировочный диапазон. Оптимизация АСВ требует учёта индивидуальных особенностей станции, количества потоков и параметров отпускаемой тепловой энергии, наличия свободных территорий, индивидуальных ограничений на расход сетевой воды и многих других факторов.

Оптимизация в области увеличения параметров аккумулируемого теплоносителя связана с индивидуальными особенностями станции, типом оборудования, тепловой емкостью системы аккумулирования, параметров системы аккумулирования. Технология с АСВ под давлением позволяет увеличить емкость системы аккумулирования, но требует более высоких затрат [7].

Существенное влияние на экономичность работы ТЭЦ с АСВ оказывает уровень использования баков аккумуляторов по мере изменения тепловой нагрузки ТЭЦ в зависимости от температуры наружного воздуха. При этом полнота использования систем АСВ и ее эффективность в значительной мере зависит от единичной емкости баков аккумуляторов. Данная статья посвящена исследованию оптимизации единичной ёмкости баков аккумуляторов сетевой воды. В этом случае одновременно проводится оптимизация суммарной емкости системы аккумулирования и единичного объёма баков-аккумуляторов.

2. УСЛОВИЯ И ПРИНЦИП ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ АККУМУЛИРОВАНИЯ СЕТЕВОЙ ВОДЫ

Исследование проводилось на примере станции, которая имеет четыре теплофикационные турбины Т-110-130. В расчётах использовались энергетические характеристики турбины Т-110-130. Так же учитывались эксплуатационные ограничения турбоустановки: максимальная тепловая нагрузка отборов, допустимое давление в теплофикационных отборах, возможное изменение расхода сетевой воды через подогреватели и другие.

В исследовании рассмотрен только отопительный сезон, когда температура наружного воздуха ниже +8 °С. Остальная часть года не рассматривалась ввиду малых тепловых нагрузок. Присоединённая тепловая нагрузка ТЭЦ 1000 Гкал/ч. ТЭЦ работает по температурному графику магистральных тепловых сетей ПАО «МОЭК», подключённых к ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» на отопительный сезон 2021/2022 гг., представленный в таблице 1.

Зарядка производится в дневное время, разрядка в ночное. В расчётах принята продолжительность зарядки 16 часов, а разрядки 8 часов. При оценке экономической эффективности учитывалось изменение цены на сбыт электроэнергии в течение суток. Так же учитывалось изменение цен в течение отопительного сезона, то есть от температуры наружного воздуха [8]. Для оценки годового экономического эффекта использовалась климатическая маска для города Москвы.

Таблица 1. Температурный график тепловых сетей

$t_{н.в}, ^\circ\text{C}$	-25	-23	-21	-19	-17	-15	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	1	3	5	8
$t_{п.с}, ^\circ\text{C}$	130	130	130	130	130	125	120	115	110	105	100	94	89	84	79	77	77
$t_{о.с}, ^\circ\text{C}$	55	57	59	61	63	61	59	57	55	53	51	49	47	45	43	43	43

Технологическая схема работы аккумулятора такова, что один бак-аккумулятор является расходным, в то время как другой бак является принимающим. Принимающий бак наполнен ровно на столько, на сколько пуст раздающий бак, в любой момент времени. В этом случае количество баков равно $n+1$, при этом заполненными являются всегда только n баков. Соответственно, расход среды, поступающей в систему аккумулирования, и расход среды на выходе из неё должны быть равны в любой момент времени. Ввиду этого технологического решения система аккумулирования должна состоять из баков-аккумуляторов одинаковой единичной ёмкости.

3. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ЁМКОСТИ ТЕПЛООВОГО АККУМУЛЯТОРА СЕТЕВОЙ ВОДЫ

В рамках исследования рассмотрено пятнадцать различных систем аккумулирования с различными суммарными единичными объёмами. Все рассмотренные комбинации приведены в табл. 2. Оценка технической и экономической эффективности проводилась по методике, описанной в работе [9]. Расширение регулировочного диапазона всей станции при исследуемых объёмах системы аккумулирования приведено на рисунке 1, а увеличение маржинального дохода на рисунке 2.

Таблица 2. Рассматриваемые объёмы и составы системы аккумулирования и капиталовложения в их строительство

Суммарный объем системы аккумулирования, м^3	Количество баков аккумуляторов с единичным объёмом, шт / Капиталовложения в строительство соответствующей системы аккумулирования, млн. руб.			
	2000 м^3	3000 м^3	5000 м^3	10000 м^3
20000	11 / 156,35	-	5 / 169,03	3 / 170,56
21000	-	8 / 181,32	-	-
22000	12 / 170,56	-	-	-
24000	13 / 184,78	9 / 203,98	-	-
25000	-	-	6 / 202,83	-
26000	14 / 198,99	-	-	-
27000	-	10 / 226,65	-	-
28000	15 / 213,20	-	-	-
30000	16 / 227,42	11 / 249,31	7 / 236,64	4 / 227,42

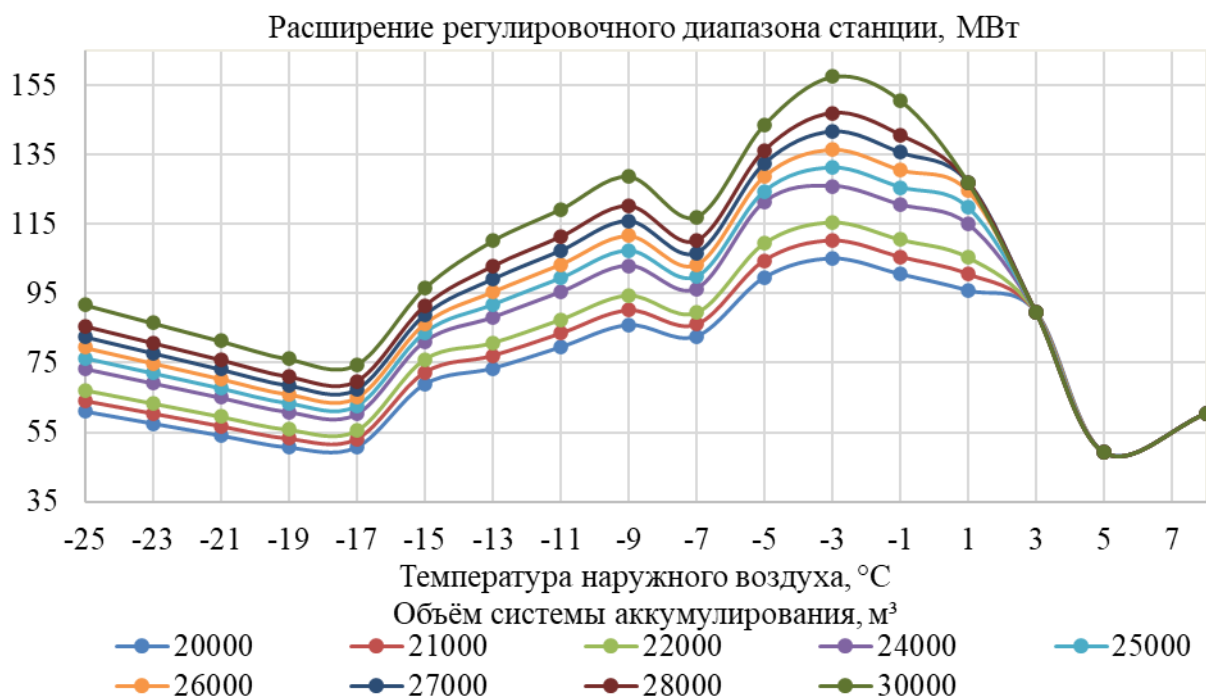


Рис. 1. Результаты исследования технической эффективности системы аккумулирования различных объёмов

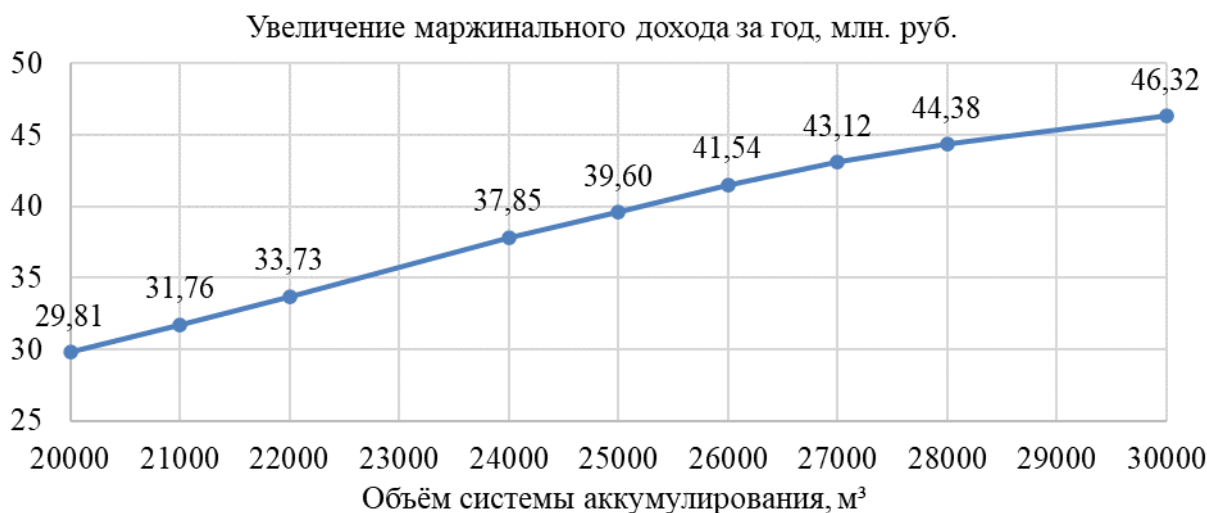


Рис. 2. Результаты исследования экономической эффективности системы аккумулирования различных объёмов

Критерием технической эффективности технологии является расширение регулировочного диапазона станции, а критерием экономической эффективности увеличение маржинального дохода за год использования технологии. На оба эти параметра существенно влияет суммарный объём системы аккумулирования, который определяет дополнительный расход сетевой воды через подогреватели в часы пиковых нагрузок, при зарядке аккумулятора и приводит к выработке дополнительной электроэнергии на тепловом потреблении. Также уменьшение расхода сетевой воды через сетевые подогреватели позволяет уменьшить выработку электроэнергии в часы провала нагрузки, когда аккумулятор разряжается. Стоит отметить, что единичный объём баков-аккумуляторов определяет

уровень использования системы аккумулирования, а также влияет на капиталовложения в их строительство. В табл. 2 приведено изменение единичной ёмкости баков аккумуляторов в зависимости от суммарной ёмкости системы и величина капиталовложений для рассматриваемых вариантов. Единичный объём баков-аккумуляторов оказывает влияние именно на капиталовложения, т.к. баки различного объёма имеют разную стоимость, кроме этого, увеличение количества баков приводит и к увеличению количества вспомогательного оборудования и коммуникаций.

Критерием оптимального объёма системы аккумулирования был принят простой срок окупаемости. В результате, оптимальной является суммарная ёмкость системы аккумулирования 26000 м³, состоящая из четырнадцати баков-аккумуляторов единичной ёмкостью 2000 м³ (БАГВ-2000). Простой срок окупаемости такого АСВ составит 4,79 года. В табл. 3 приведены результаты для остальных рассматриваемых систем.

Таблица 3. Увеличение маржинального дохода станции и простой срок окупаемости систем аккумулирования различного объёма

Суммарный объем системы аккумулирования, м ³	Увеличение маржинального дохода за год, млн. руб. / Простой срок окупаемости, лет			
	2000 м ³	3000 м ³	5000 м ³	10000 м ³
20000	29,81 / 5,24	-	29,81 / 5,67	29,81 / 5,72
21000	-	31,76 / 5,71	-	-
22000	33,73 / 5,06	-	-	-
24000	37,85 / 4,88	37,85 / 5,39	-	-
25000	-	-	39,60 / 5,12	-
26000	41,54 / 4,79	-	-	-
27000	-	43,12 / 5,26	-	-
28000	44,38 / 4,80	-	-	-
30000	46,32 / 4,91	46,32 / 5,38	46,32 / 5,11	46,32 / 4,91

Кроме капиталовложений (таблица 2) единичный объём баков-аккумуляторов серьёзно влияет на площадь, занимаемую системой аккумулирования. Несмотря на то, что критерием оптимальности ёмкости АСВ мы приняли простой срок окупаемости, нельзя забывать об индивидуальных данных каждой конкретной станции. ТЭЦ, которые находятся в городской черте, в частности в Москве, если и имеют свободные территории, то весьма ограниченные. АСВ ёмкостью 26000 м³ имеет наименьший срок окупаемости, но не каждая станция сможет разместить на своей территории такой аккумулятор. Поэтому необходимо учитывать и площади, занимаемые каждой из систем аккумулирования.

АСВ суммарной ёмкостью 26000 м³ (14 БАГВ-2000), по оценочным данным, займёт площадь 3556 м², объёмом 25000 м³ (6 БАГВ-5000) займёт на 610 м² меньше территорий, а СА объёмом 30000 м³ (7 БАГВ-5000) на 119 м². В условиях реального применения технологии это факт может стать решающим при выборе объёма системы аккумулирования и соответственно эффективности использования технологии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При увеличении суммарного объёма системы аккумулирования дополнительный расход сетевой воды через подогреватели увеличивается в часы зарядки аккумулятора и

уменьшается в часы его разрядки, что приводит к росту увеличения регулировочного диапазона при применении технологии. Но необходимо учитывать ограничение на максимальную пропускную способность сетевых подогревателей, которое может быть достигнуто ввиду увеличения ёмкости системы аккумулирования.

2. С увеличением суммарного объёма системы аккумулирования увеличивается рост маржинального дохода, так как увеличивается количество электроэнергии, выработанной на тепловом потреблении, в часы максимальных цен на РСВ.

3. Единичный объём баков-аккумуляторов не влияет на эффективность работы системы аккумулирования (расширение регулировочного диапазона и увеличение маржинального дохода станции), но влияет на капиталовложения в реализацию технологии и на площадь, занимаемую системой аккумулирования.

4. С точки зрения минимального простого срока окупаемости, оптимальной является ёмкость системы аккумулирования 26000 м³, состоящая из 14 баков-аккумуляторов объёмом 2000 м³. Простой срок окупаемости в этом случае составит 4,79 года, расширение регулировочного диапазона станции, состоящей из четырёх турбин Т-110-130, от 49,28 МВт до 136,45 МВт (при разных температурах наружного воздуха), увеличение маржинального дохода за год использования технологии 41,54 млн. руб.

5. При выборе оптимальной системы аккумулирования необходимо учитывать индивидуальные особенности каждой станции, такие как: свободные площади под размещение системы аккумулирования, качество грунта, на котором предполагается разместить систему аккумулирования, компоновку отводов тепловой энергии и их количество. Схема размещения системы аккумулирования должна разрабатываться индивидуально под каждую конкретную станцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Johansen K., Werner S.** Something is sustainable in the state of Denmark: A review of the Danish district heating sector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022. No 158.

2. **Zhang L.** et al. Comparison of district heating systems used in China and Denmark // *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 2015. Т. 4. No 3. P. 102–116.

3. **Čulig-Tokić D.** et al. Comparative analysis of the district heating systems of two towns in Croatia and Denmark // *Energy*, 2015. No 92. P. 435–443.

4. **Череповицын А.Е., Соколова А.М.** Потенциал возобновляемой энергетики и её конкурентоспособность // *Наукосфера*. 2021. – №. 5–2. С. 20–25.

5. **Olabi A. G.** et al. Battery energy storage systems and SWOT (strengths, weakness, opportunities, and threats) analysis of batteries in power transmission // *Energy*, 2022. 123987.

6. **Левенок Д.И., Ильин Е.Т.** Техничко-экономическая эффективность тепловых аккумуляторов сетевой воды // *Современные проблемы теплофизики и энергетики: 3-я Междунар. конф./ Материалы конф.* - М. 2020. С. 593-594.

7. **Puyn E., Levenok D., Lymarev D.** An extension of the CHP plants' adjustment range with the use of pressurized heating system water storage devices // *2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering. IEEE*, 2022. P. 1-5.

8. **Администратор** торговой системы: [сайт]. URL: <https://www.atsenergo.ru/>

9. **Левенок Д.И.** Применение тепловых и пневматических аккумуляторов на ТЭС для расширения регулировочного диапазона: выпускная квалификационная работа 13.04.01./ Левенок Д.И. М, 2020. 122 с.

*Д.А. Лымарев*¹, *Д.И. Левенок*², *Е.Т. Ильин*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАСШИРЕНИЕ РЕГУЛИРОВОЧНОГО ДИАПАЗОНА ТЭЦ ПУТЕМ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА

АННОТАЦИЯ

Целью исследования является расширение регулировочного диапазона ТЭЦ при работе по тепловому графику путём получения водорода методом электролиза в часы провала нагрузки и использования его в часы пиковых нагрузок. Использование электролиза для получения водорода в часы провала электрической нагрузки позволяет ТЭЦ расширить диапазон изменения нагрузки. Избыток генерируемой электроэнергии используется для получения водорода и кислорода. Рассмотрены возможности использования водорода для последующего его сжигания в топке существующих котлов, а также для получения пиковой энергии в топливных элементах. Определены целесообразные пределы изменения отпуска электроэнергии от ТЭЦ в зависимости от тепловой нагрузки и дана оценка эффективности технологических схем использования водорода.

Ключевые слова – водород, технологическая схема, электролиз, график нагрузки

1. ВВЕДЕНИЕ

Покрытие неравномерности графиков потребления электрической энергии было и остаётся одной из основных проблем энергетики России и всего мира. По мере роста доли атомных станций в составе установленных мощностей, а также роста доли возобновляемых источников электрической энергии на базе ветровых и солнечных электростанций, неравномерность графиков генерации электроэнергии возрастает. Все это требует повышения манёвренных характеристик оборудования существующей и вновь вводимой генерации [1].

Комбинированная выработка электроэнергии и тепла являются одними из самых эффективных способов повышения коэффициента использования теплоты топлива (КИТТ). При работе по тепловому графику в комбинированном цикле на ТЭЦ КИТТ достигает 80% и даже более. Следует отметить, что неравномерность графиков потребления тепловой и электрической нагрузок в течение суток вынуждает ТЭЦ в часы провалов нагрузки переходить от комбинированной выработки к раздельной. В настоящее время в ночные часы мощные ТЭЦ разгружаются по электрической энергии до минимальных нагрузок, а значительную часть отпуска тепла передают на водогрейные котлы (ПВК). Все это приводит к увеличению расхода топлива, снижению экономичности ТЭЦ, увеличению выбросов вредных веществ в атмосферу, кроме этого, постоянная смена режимов увеличивает износ оборудования, снижает надёжность его использования.

Особенно остро этот вопрос относится к станциям, работающим на твёрдом топливе. При снижении нагрузки в этом случае возникают следующие проблемы: ухудшается воспламенение топлива, полнота сгорания топлива и нарушается стабильность удаления жидкого шлака. Все это приводит к ограничению диапазона изменения нагрузки котлов и блоков в целом [2,3,4].

Для расширения регулировочного диапазона котлов, работающих на твёрдом топли-

ве, традиционно применяют технологию сжигания пылевидного угля с использованием высокорекреационного топлива (мазута или природного газа в качестве так называемой «подсветки»). В этом случае количество высокорекреационного топлива на подсветку может достигать до 30% и более тепловой мощности котла [5,6].

Получение водорода методом электролиза позволяет изменять отпуск мощности в сеть без разгрузки энергоблока ТЭЦ, в этом случае избыток электроэнергии используется для получения водорода [7, 8]. Полученный водород может использоваться для сжигания его в топке котла, замещая «подсветку», или использоваться в топливных элементах для получения пиковой энергии в часы её повышенного спроса.

В данной работе приводятся результаты расчётных исследований получения водорода с целью расширения регулировочного диапазона агрегатов ТЭЦ. На основании расчётного исследования определено влияние предлагаемых технологий на регулировочный диапазон оборудования. Проведена оценка целесообразности внедрения рассматриваемых технологических решений на основании операционной эффективности технологий и сроков их окупаемости.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ СЖИГАНИИ ЕГО В ТОПКЕ КОТЛА

Исследования по расширению регулировочного диапазона ТЭЦ с получением водорода и его использованием проведены на базе ТЭЦ с турбинами Т-110-130. Турбина работает в соответствии с температурным графиком теплосети 150/70 со срезкой 130 °С. При низких температурах наружного воздуха, а также при полной загрузке отборов турбины дальнейший нагрев сетевой воды производится в пиковых источниках. Было рассмотрено два варианта использования пиковых источников ПВК и пиковые бойлеры. Это связано с тем, что использование ПВК или пиковых бойлеров существенным образом влияет на величину разгрузки котельного агрегата и, соответственно, изменения его регулировочного диапазона, так как именно допустимые нагрузки котла чаще всего является ограничениями по изменению его производительности и регулировочному диапазону блока в целом.

В рассматриваемых условиях при работе на твёрдом топливе энергоблоки станции работают по графику, представленному на рис. 1.

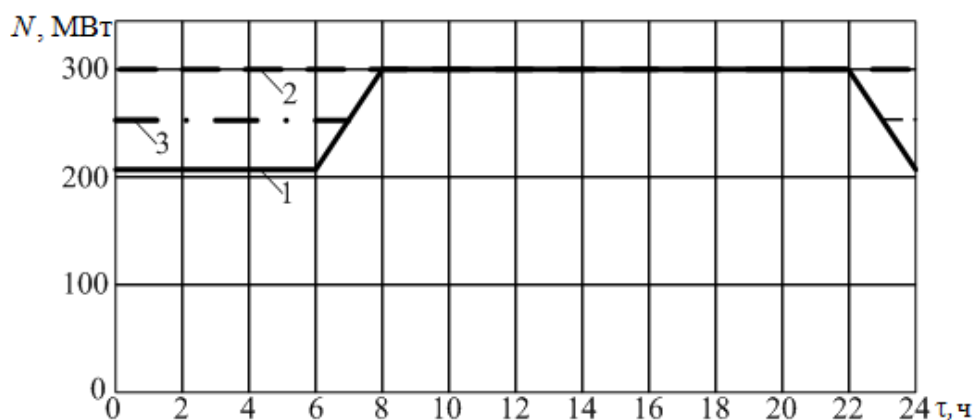


Рис. 1. Типовой суточный график изменения нагрузки энергоблока: 1 – график работы блока для существующего режима с использованием подсветки; 2 – график нагрузки при работе энергоблока с получением водорода

В этом случае в течение дня энергоблоки несут полную нагрузку, а затем разгружаются до минимальной нагрузки для прохождения провала нагрузки (линия 1) с передачей нагрузки на ПВК или пиковый бойлер.

При получении водорода блок работает по тепловому графику (линия 2), а снижение отпуска электроэнергии в сеть производится за счёт использования избытка электроэнергии для получения водорода и его сжигания в котле в качестве «подсветки» вместо мазута.

Оценка производилась по изменению затрат на топливо в течение суток в соответствии с температурой наружного воздуха. Для расчёта затрат топлива использовались энергетические характеристики оборудования. Изменение затрат на топливо для различных вариантов режимов работы для характерных суток представлены на рисунке 2.

Затраты на топливо с учётом вытеснения мазута водородом определялись по выражению:

$$Z_{\text{ном}} = \left(B_{\text{мазут}}^{\text{ном}} \cdot 24 - B_{H_2} \right) \cdot C_{\text{мазут}} + B_{\text{к}} \cdot 24 \cdot C_{\text{уголь}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{мазут}}^{\text{ном}}$ – расход мазута при работе по графику с разгрузением, тут; B_{H_2} – масса водорода полученного при электролизе, тут; $B_{\text{к}}$ – расход основного топлива на котле при работе с получением водорода, тут; $C_{\text{мазут}}$, $C_{\text{уголь}}$ – соответственно цена мазута и угля, руб./тут.

Анализ расчётов показывает, что получение водорода и использование его в качестве подсветки, с вытеснением мазута обеспечивает максимальную экономичность при полном замещении мазута, за счёт существенной разницы основного топлива и мазута.

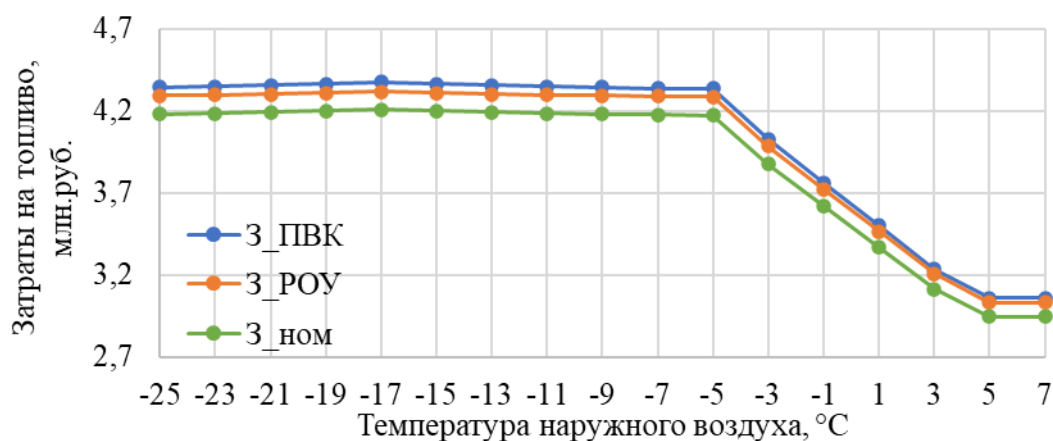


Рис. 2. Изменение затрат на топливо за сутки, в зависимости от температуры наружного воздуха и варианта работы: 3_ПВК – существующий режим работы, с подсветкой мазутом и передачей части тепловой нагрузки на ПВК; 3_РОУ – режим работы, с подсветкой мазутом и передачей части тепловой нагрузки на РОУ; 3_ном – режим работы с генерацией водорода в часы провала нагрузки и сжиганием его в топке котельного агрегата с вытеснением мазута

Аналогичные расчёты были проделаны для ТЭЦ, работающей на природном газе. В этом случае нет необходимости использовать высокорекреационное топливо типа мазута для подсветки факела, так как диапазон изменения нагрузки такого оборудования составляет обычно 50-60% от номинальной мощности. Поэтому получение водорода с больши-

ми затратами энергии на его производство приводит к снижению экономичности. Таким образом, расширение регулировочного диапазона путём получения водорода для ТЭЦ, работающих на газе, экономически не эффективно и его использование нецелесообразно.

3. ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО В ТОПЛИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПИКОВОЙ МОЩНОСТИ

Получение водорода с последующим его сжиганием в топке котла обеспечивает только снижение нагрузки, но не позволяет расширить верхнюю границу регулировочного диапазона ТЭЦ.

С целью получения дополнительной мощности была разработана технологическая схема ТЭЦ, имеющая в своём составе электролизёр и систему накопления водорода и кислорода, получаемого в процессе электролиза воды, а также включающая топливный элемент для получения дополнительной мощности. На рисунке 3. представлена принципиальная схема такой ТЭЦ. В этом случае можно использовать практически всю электроэнергию, производимую в процессе прохождения провала, для производства водорода. При этом часть водорода может использоваться для вытеснения мазута. А не использованные для вытеснения мазута часть водорода и кислорода могут использоваться в топливном элементе для получения электроэнергии в пиковые часы, когда стоимость электроэнергии значительно возрастает. В этом случае возможно использование данной технологии на ТЭЦ, работающих и на газовом топливе. Все дальнейшие расчёты приведены для ТЭЦ, работающих на газе. Результаты изменения регулировочного диапазона представлены на рисунке 4.

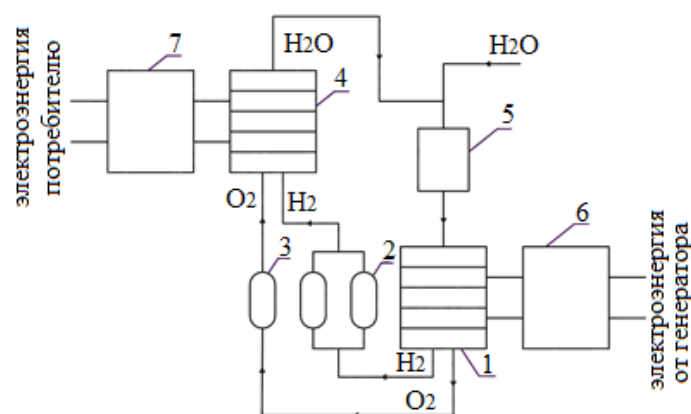


Рис. 3. Принципиальная схема ТЭЦ для получения дополнительной пиковой энергии: 1 – электролизёр; 2 – ёмкость для хранения водорода; 3 – ёмкость для хранения кислорода; 4 – топливный элемент; 5 – блок водоподготовки; 6-7 – преобразователь напряжения, инвертор

Использование топливного элемента позволяет увеличить установленную мощность станции и расширить регулировочный диапазон. Исследования, проведённые на ТЭЦ с блоками Т-110-130, показали, что данная схема позволяет разгружаться до 53% от номинальной электрической мощности турбины в часы провала и получать дополнительную мощность 11–12% в часы пика нагрузки.

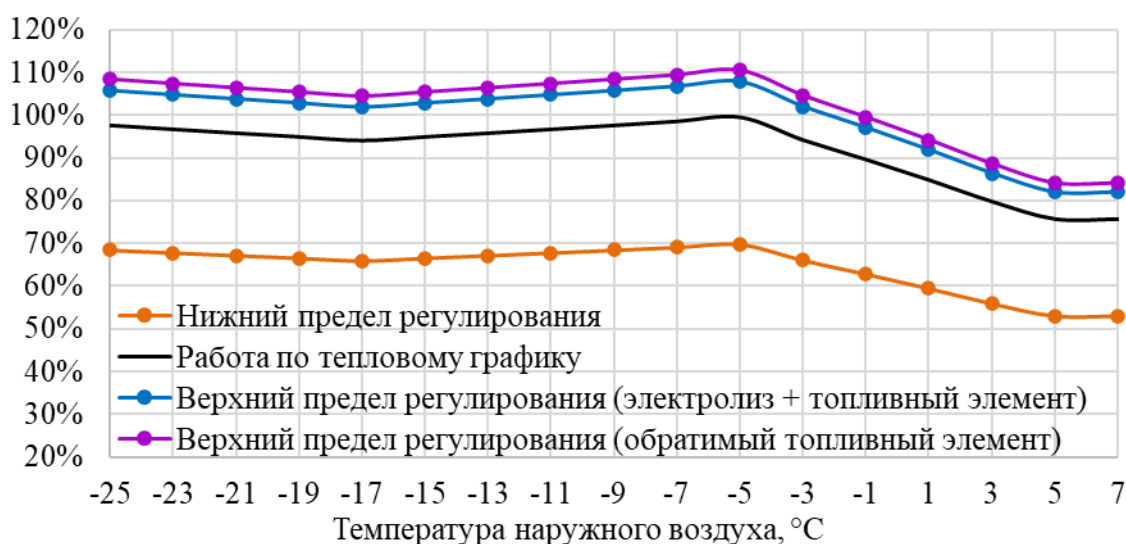


Рис. 4. Зависимость электрической мощности от температуры наружного воздуха

Для оценки технико-экономических показателей проведены расчёты по изменению годового маржинального дохода в условиях реальной эксплуатации ТЭЦ с турбинами Т-110-130. Расчёты проведены для условий работы города Москвы. Анализ результатов, представленный в таблице 1, показывает, что существующие электролизёры с удельными затратами электроэнергии на производство водорода $5,3 \text{ кВтч/м}^3$ и топливные элементы с КПД в пределах 55–60% не позволяют добиться увеличения годового маржинального дохода при использовании на ТЭЦ в качестве топлива природного газа.

Для перспективных электролизных установок с удельными затратами на получение водорода ниже $4,7 \text{ кВтч/м}^3$ и топливных элементов с высокими КПД (70–80%) возможно добиться достаточно высокого маржинального дохода 3,098 и 7,66 млн. руб. соответственно. При этом максимальная эффективность достигается при использовании перспективных реверсивных топливных элементов, которые существенно снижают капитальные затраты, и при КПД 80% простой срок окупаемости оценивается в 6,5 лет. В этом случае пиковая мощность топливных элементов рассматривается как вновь введённая мощность.

Таблица 1. Технико-экономическая оценка эффективности технологии

Период оценки капитальных затрат	Удельные капитальные затраты			Простой срок окупаемости, лет
	Электролизёр, \$/кВт	Система хранения, \$/кВтч	Топливный элемент, \$/кВт	
2020	1653	10,00	1452	41
	1503	3,66	1320	37
	1353	2,00	1188	33
2030 (прогноз)	481	8,45	1044	16,5
	437	3,09	949	14,5
	393	1,69	854	13,7
Обратимый топливный элемент	0	3,66	1000	6,5

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны принципиальные технологические схемы ТЭЦ, обеспечивающие снижение электрической мощности ТЭЦ при прохождении ночных провалов нагрузки путём получения водорода методом электролиза и дальнейшего его сжигания в топке котла. Расчётные исследования показали возможность эффективного расширения регулировочного диапазона при применении его на твёрдотопливных ТЭЦ за счёт вытеснения мазута, используемого для подсветки. Для ТЭЦ на газовом топливе использование получения водорода экономически не эффективно.

2. Получение водорода и дальнейшее его использование в топливном элементе для получения пиковой мощности позволяет существенно расширить регулировочный диапазон (более 60%).

3. Величина эффективной границы регулировочного диапазона в значительной степени зависит от коэффициента преобразования электроэнергии в водород и КПД топливных элементов по преобразованию водорода в электроэнергию. В настоящее время существующие элементы не обеспечивают окупаемости предлагаемого технологического решения.

4. Установлено, что для обеспечения эффективности использования технологии удельные затраты электроэнергии на производство водорода должны быть не выше 4,7 кВт ч/м³, а КПД топливного элемента - не ниже 70%.

5. Для оценки окончательной эффективности использования водорода для расширения регулировочного диапазона ТЭЦ были проведены технико-экономические исследования с учётом необходимых капиталовложений. Максимальная эффективность достигается при использовании перспективных реверсивных топливных элементов, что существенно снижает капитальные затраты, и при их КПД 80% простой срок окупаемости оценивается в 6,5 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маляренко В. А.** Неравномерность графика нагрузки энергосистемы и способы ее выравнивания // Светотехника и электроэнергетика. 2011. – № 4. С. 61 – 66

2. **Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А.** Моделирование горения твердого топлива. – М.: Наука, 1994.

3. **Кнорре Г.Ф.** Теория топочных процессов. – М.: Энергия, 1996.

4. **Равич М.Б.** Топливо и эффективность его использования. – М.: Недра, 1987.

5. **Липов Ю.М., Третьяков Ю.М.** Котельные установки и парогенераторы. – Москва-Ижевск НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»,

6. **РД 34.25.503.** Нормы минимально допустимых нагрузок энергоблоков 150-1200МВт. РАО «ЕЭС России», 2003.

7. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study / O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, S. Few

8. **С. А. Григорьев, В. И. Порембский, В. Н. Фатеев, Р. О. Самсонов, С. И. Козлов** – Получение водорода электролизом воды: современное состояние, проблемы и перспективы // Транспорт на альтернативном топливе. 2008. №3 28. **Б. В. Тарасов, М.В. Лотоцкий** – Водород для производства энергии: проблемы и перспективы. // Альтернативная энергетика и экология. 2006. №8 (40).

*М.А. Бабичева*¹, *С.К. Звонарева*², *О.В. Егошина*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭНЕРГОБЛОКА ТЭС (НА ПРИМЕРЕ ТЭЦ МЭИ)

АННОТАЦИЯ

Надежное функционирование системы химико-технологического мониторинга в полном объеме возможно только в случае постоянной модернизации ее технической структуры. В настоящее время модернизация системы химического контроля направлена не только контролировать, но и диагностировать и прогнозировать нарушения водно-химического режима. Кроме того, система химического контроля должна способствовать сокращению количества показателей, измеряемых объемными методами для облегчения работы персонала станции. В рамках данной работы оценена необходимость модернизации устройств отбора проб рабочей среды для получения представительной пробы, разработана и исследована модель определения скорости коррозии металла пароперегревателя на основе растворенного водорода в паре, разработана модель прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока на основе материального баланса и с использованием искусственных нейронных сетей. Разработана имитационная система с пользовательским интерфейсом.

Ключевые слова – тепловая электростанция, энергоблок, водно-химический режим, система химико-технологического мониторинга.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время приоритеты и цели развития систем химико-технологического мониторинга качества воды и пара обусловлены повышением надежности и эффективности работы основного энергетического оборудования на тепловых электростанциях. Достижение этих целей обеспечивается решением следующих задач: стабильной работой систем химико-технологического мониторинга за счет разработки и исследования новых конструкций устройств отбора проб, сокращения длины пробоотборных линий и упрощения конструкций устройств подготовки пробы. При рассмотрении перспектив развития систем химико-технологического мониторинга следует учитывать следующие тенденции: сокращение объема химического контроля; увеличение числа прикладных программ прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока; определение скорости коррозии металла на высокотемпературных участках парового тракта на основе автоматических измерений растворенного водорода в паре; разработка новых методов и анализаторов для непрерывного контроля качества воды и пара, концентрации корректирующих реагентов.

2. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВОДНО-ХИМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ЭНЕРГБЛОКА ТЭС

2.1. Разработка и исследование изокинетического пробоотборного устройства

Правильно спроектированная СХТМ позволяет контролировать качественный состав теплоносителя, управлять дозированием корректирующих реагентов, диагностировать и прогнозировать поведение примесей по тракту энергоблока. Очевидно, что качественное прогнозирование не может базироваться на не представительных показателях. Поэтому первоочередная задача: исследовать возможность получения представительной пробы. Известно, что для получения представительной пробы необходимо учитывать множество факторов: скорость потока, его влажность, конструкция и место установки пробоотборного устройства.

В работе рассмотрено влияние нарушения изокинетического отбора пробы и снижения давления на состав отбираемого потока. С помощью программного комплекса смоделирован процесс отбора пробы однососковым пробоотборным устройством и врезкой трубы под 90°. Выявлено, что при отборе перегретого пара снижается скорость потока, нарушается равномерное распределение взвешенных частиц и происходит накопление частиц продуктов коррозии в застойных зонах. Проведена модернизация типового устройства отбора за счет отбора пробы «коленом» и сглаживания угла спайки входного отверстия и пробоотборной трубки. Разработан эскиз изокинетического устройства отбора пробы перегретого пара применительно к котлам среднего давления. На основе разработанного эскиза построена 3-D модель зонда, представленная на рис. 1. В дальнейшем на основе разработанного чертежа изокинетического пробоотборного устройства предполагается сконструировать и внедрить модернизированные устройства отбора пара на действующих энергетических объектах.

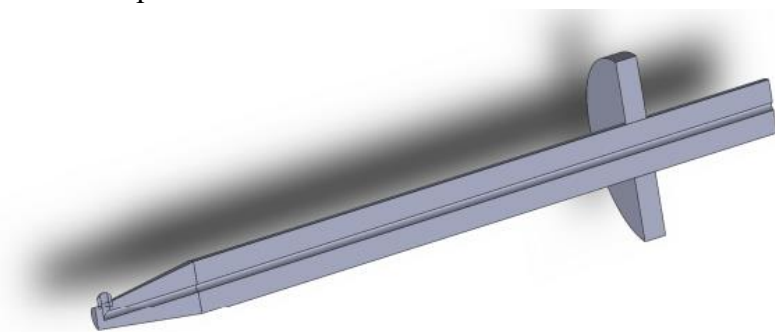


Рис.1. Модель 3D устройства отбора пробы перегретого пара после модернизации

Исследован процесс отбора пробы перегретого пара модернизированным однососковым зондом в программном комплексе AnsysCFX, показано, что предложенные способы модернизации типового пробоотборного устройства позволяют получить равномерное распределение скорости потока пара внутри устройства отбора пробы.

На основе гидродинамического расчета и результатов моделирования разработана номограмма для изокинетического пробоотборного устройства, позволяющая определить действительный расход пробы после пробоотборного устройства и требуемый диаметр входного сечения для отбора пробы в 60 кг/ч.

2.2. Прогнозирование поведения примесей по тракту энергоблока и оперативная диагностика ведения водно-химических режимов

Как было сказано ранее, получение представительных проб рабочей среды позволяет прогнозировать интенсивность протекания коррозии на основе математических моделей и исследовать поведение примесей и корректирующих реагентов по тракту энергоблока.

Разработана модель прогнозирования интенсивности протекания коррозии на основе измерений растворенного водорода в паре [2]. Согласно модели оценена скорость коррозии металла для блока парогазовой установки мощностью 450 МВт. Установлено, что скорость коррозии входит в допустимый интервал как в номинальном режиме (не превышает $0,00014 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$), так и в пусковом (не превышает $0,00072 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$). В результате исследования модели расчета концентрации молекулярного водорода, обусловленного процессом коррозии, определена концентрация молекулярного водорода, обусловленная процессом коррозии металла пароперегревателя, применительно к энергоблоку мощностью 210 МВт. Так, концентрация водорода составила в питательной воде – $0,2 \text{ мкг/дм}^3$, в перегретом паре – $3,5 \text{ мкг/дм}^3$.

Разработаны математические модели прогнозирования примесей по тракту энергоблока на основе материального баланса [3], приведена динамика распределения концентрации натрия в основном конденсате, питательной, котловой воде и в насыщенном паре, также динамическая модель по содержанию концентрации гидразина в котловой воде. Определено, что концентрация натрия в насыщенном паре для исследуемого случая изменяется от $17,2$ до $28,83 \text{ мкг/дм}^3$ при расходе продувки $0,5 \%$. Погрешность определяемых значений на основе разработанных математических моделей не превышает 5% .

Одним из основных требований к системам химико-технологического мониторинга является оперативная оценка ведения водно-химического режима на основе данных автоматического химического контроля. В работе представлен алгоритм оперативной оценки состояния водного режима на основе универсального показателя. Практическая значимость заключается в простоте внедрения, универсальности предлагаемых алгоритмов, доступности для оператора. На основании алгоритмов расчета индексов качества разработан метод прогнозирования времени наступления нарушения. На рис. 2 приведен пример прогнозирования времени наступления нарушения.

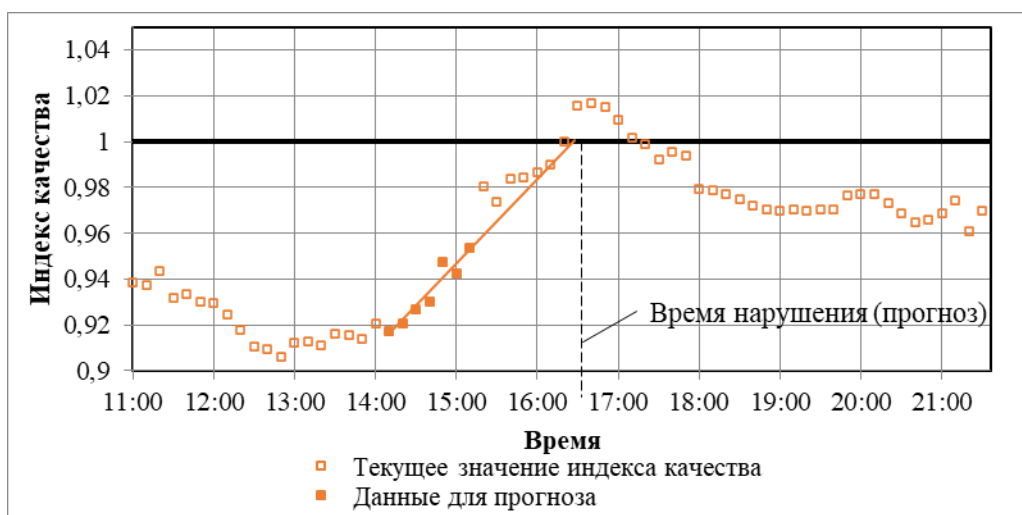


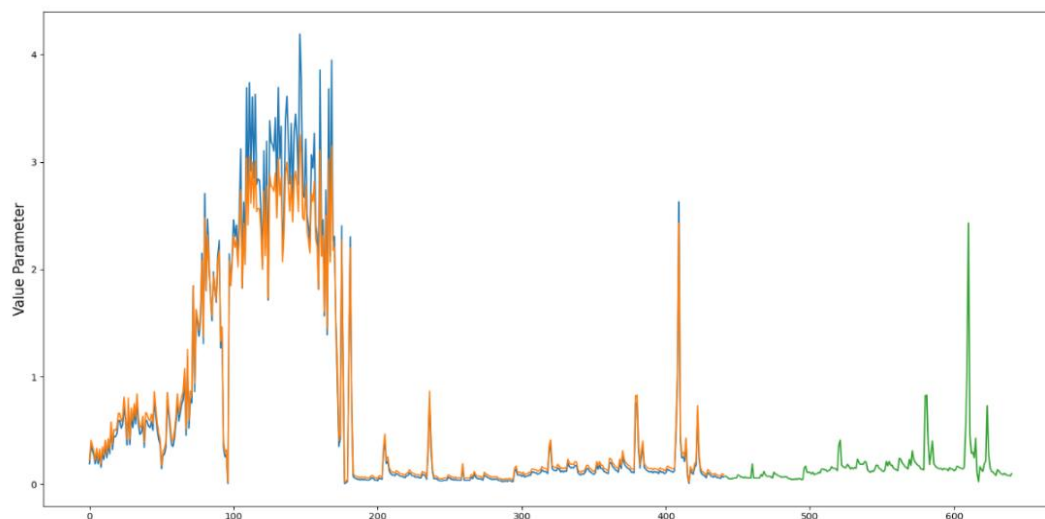
Рис. 2. Прогнозирование времени нарушения водно-химического режима.

Представленный алгоритм достаточно легко реализуется в средах программирования и планируется к внедрению при проектировании новых и модернизации существующих систем химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях.

2.3. Оценка возможности прогнозирования поведения примесей с использованием искусственных нейронных сетей

В настоящее время большое внимание уделяют разработке алгоритмов с искусственным интеллектом. В рамках работы исследована возможность обучения рекуррентных нейронных сетей особого типа долго-краткосрочной памяти Long Short Term Memory (LSTM) [4]. Для использования сети LSTM применена библиотека Keras языка Python. LSTM чувствительны к масштабу входных данных, особенно в случае использования функции активации - сигмоида, поэтому все входящие данные нормализованы. Исходные данные разделены на обучающую и тестовую выборки. Обучающая выборка – выборка, которая будет подаваться на вход нейросети в процессе её обучения. Тестовая выборка – это выборка, которая подается на вход нейросети после ее обучения для проверки соответствия реальным данным.

Сеть имеет входной слой с одним входом, скрытый слой с восьмью блоками или нейронами LSTM и выходной слой, который дает прогноз одного значения. Сеть обучена на шестидесяти эпохах. Результат работы сети для прогнозирования концентрации натрия в насыщенном паре представлен на рис. 3.



■ - исходные данные; ■ - данные предсказанные нейросетью по исходным данным; ■ - прогнозирование данных на двести значений.

Рис. 3. Прогнозирование концентрации натрия в насыщенном паре.

Как видно из графика, модель показывает довольно близкие значения к исходным. Максимальная ошибка составляет 0,79 и минимальная 0,032.

2.4. Разработка имитационной модели и технических требований для создания новых интеллектуальных систем химического контроля и управления водно-химическим режимом на ТЭС

В рамках работы разработана имитационная модель с пользовательским интерфейсом, которая позволяет наглядно контролировать поведение параметров химического

контроля энергоблока и прогнозировать поведение примесей по тракту энергоблока на основе материального баланса и с использованием искусственных нейронных сетей. В модель включен разработанный алгоритм оперативной оценки как для отдельного контролируемого потока, так и для блока в целом. На главной странице разработанной имитационной модели представлена мнемосхема энергоблока ТЭЦ МЭИ с указанием точек дозирования корректирующих реагентов и всех контролируемых потоков. На рис. 4 представлена мнемосхема энергоблока ТЭЦ МЭИ.

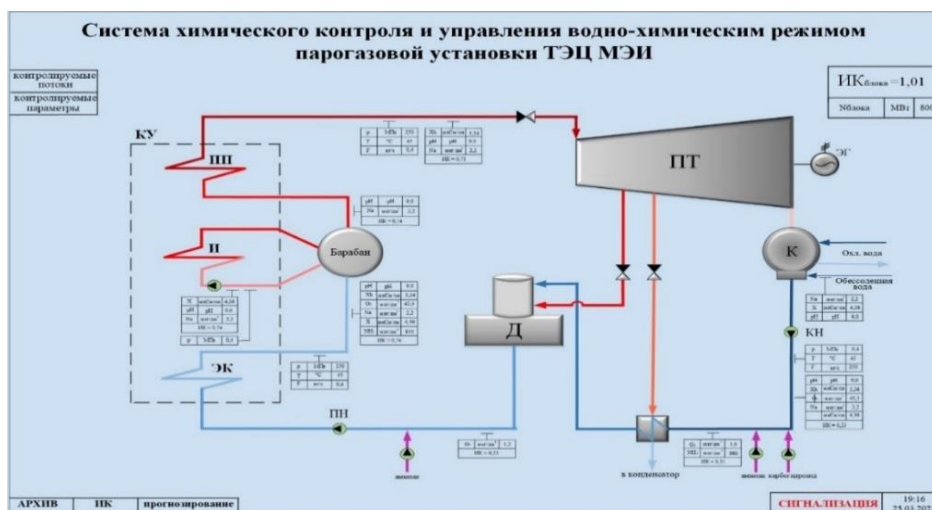


Рис. 4. Мнемосхема энергоблока ТЭЦ МЭИ

Оснащение тепловых электростанций СХТМ регламентируется общими техническими требованиями к данным системам [5], в которых сформулированы основные положения. При создании единых правил для интеллектуальных систем химико-технологического мониторинга применительно ко всем объектам тепловой энергетики необходимо учитывать следующие требования:

1. Обеспечить представительность пробы за счет применения изокинетического отбора пробы в пара.
2. Оценивать качество ведения ВХР на основе данных автоматического химического контроля с помощью безразмерных универсальных показателей.
3. Осуществлять прогнозирование поведения примесей по тракту энергоблока с использованием разработанных алгоритмов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследовано влияния типа устройства отбора пробы перегретого пара на представительность и расход пробы. Разработан эскиз изокинетического устройства отбора пробы перегретого пара применительно к котлам среднего давления. На основе разработанного эскиза построена 3-D модель зонда.

2. Разработана номограмма, позволяющая определять действительный расход пробы после пробоотборного устройства и требуемый диаметр входного сечения для отбора пробы в 60 кг/ч. Рассчитана погрешность, возникающая при работе с номограммой, которая составляет менее 5 %, что дает возможность применения на энергетических объектах.

3. Разработана и исследована алгоритм расчета скорости протекания коррозии металла пароперегревателя на основе измерений растворенного водорода в паре. Установ-

лено, что скорость коррозии входит в допустимый интервал как в номинальном режиме (не превышает $0,00014 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$), так и в пусковом (не превышает $0,00072 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$).

4. Разработаны математические модели, описывающие поведение концентрации натрия в основном конденсате, питательной и котловой воде, насыщенном паре, математические модели распределения корректирующих реагентов в пароводяном тракте, которые позволяют минимизировать объем химического контроля на стадии эксплуатации систем контроля и управления водным режимом.

5. Разработан алгоритм оперативной оценки состояния водно-химического режима на основе данных автоматического химического контроля. Алгоритм направлен на своевременное обнаружение нарушений норм качества воды и пара без запоминания персоналом количественных показателей норм в различных потоках энергоблока.

6. Оценена возможность прогнозирования поведения примесей с использованием искусственных нейронных сетей. Выявлено, что модель прогнозирует значения с погрешностью не более 0,79, что дает возможность применять данный искусственный интеллект для прогнозирования.

7. Разработана имитационная модель системы химического контроля качества воды и пара, технические требования для создания новых интеллектуальных систем, которые позволят повысить надежность работы данных систем и приведут к сокращению объема химических показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 24.031.121-2012. Методические указания Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды.

2. **Кокошкин И.А.** Определение растворенного в воде водорода для контроля коррозии оборудования тепловых энергетических установок: Дис. на степень канд. наук / ЦКТИ, Л.: 1968.

3. **Воронов В.Н., Петрова Т.И., Назаренко П.Н.** Математические модели и их использование в системах химико-технологического мониторинга электростанций // Теплоэнергетика. 2005. № 4. с. 51-53.

4. **Нейронная сеть** // Большая российская энциклопедия: [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. — М. Большая российская энциклопедия, 2004—2017.

5. РД 153-34.1-37.532.4-2001 Общие технические требования к системам химико-технологического мониторинга водно-химических режимов тепловых электростанций. М. ЗАО «Энергетические технологии», 2002.

6. **Karsten Thomsen** Corrosion product sampling and analysis -The distribution behind the results, PChem 2017, 19(3), p. 154-163.

7. **Mike Caravaggio and Brad Burns** Smart Cycle Chemistry Alarms: Intelligent, Actionable Alarms, PChem 2018, 20(5), p. 264-275.

Работа выполнена в рамках проекта "Разработка интеллектуальной системы химического контроля и управления водно-химическим режимом энергоблока ТЭС (на примере ТЭС МЭИ)" Национального исследовательского университета "МЭИ" для реализации научно-исследовательских программ "Энергетика", "Электроника, радиотехника и информационные технологии" и "Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехники" в 2020-2022 годах».

К.Т. Чан (Tran Quoc Think)¹, А.А. Сухих²

1 – студент, 2 – научный руководитель

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСИЛОВОГО КОНТУРА АЭСММ НА CO₂

АННОТАЦИЯ

Дана оценка термодинамической эффективности схем газотурбинных установок (ГТУ) при внедрении диоксида углерода в качестве рабочего тела второго контура атомных электростанций малой мощности (АЭСММ). Существенное увеличение внутреннего коэффициента полезного действия (КПД) цикла двухступенчатого сжатия рабочего тела (более 52 %) прогнозируется в теплосиловой схеме на базе регенеративной ГТУ.

Ключевые слова: газотурбинная установка, сверхкритические циклы, коэффициент полезного действия, диоксид углерода, атомная электростанция малой мощности.

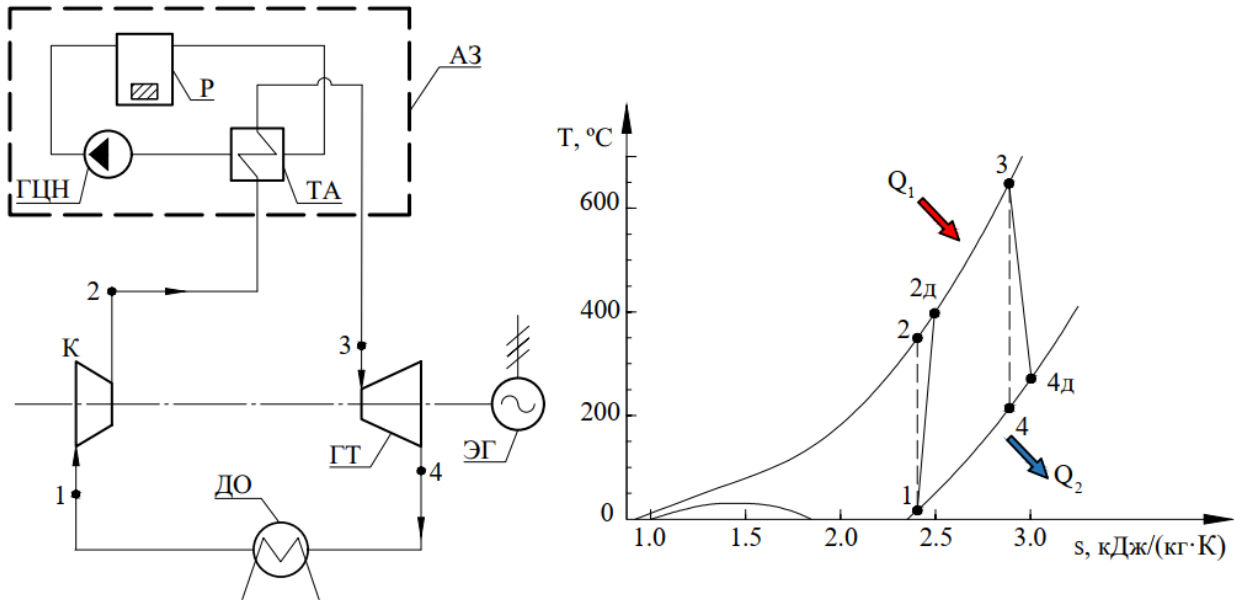
1. ВВЕДЕНИЕ

В качестве альтернативных автономных энергоисточников, применение которых позволит повысить эффективность энергоснабжения потребителей, могут выступать: современные ДЭС и газотурбинные установки (ГТУ) с отбором тепла; мини-ТЭЦ на местных видах топлива; атомные электростанции малой мощности (АЭСММ). Среди этих вариантов, наилучшим для решения всех технических и организационных проблем может стать строительство АЭСММ. Большим преимуществом АЭСММ являются значительно меньшие единовременные затраты на реализацию проекта, чем у больших АС, а также весомое снижение большинства технических, экономических и радиационных рисков, в том числе и финансовых для инвесторов [1].

Вопросы выбора наиболее оптимального рабочего тела, разработки схемы и режимов работы турбинного контура, формирования технического облика его основных аппаратов являются актуальными. В настоящей работе рассматривается термодинамическая эффективность турбинного контура на диоксиде углерода для АЭСММ с солевыми теплоносителями. Данное природное вещество является не только доступным и дешёвым, безопасным для человека, но имеет высокую термическую стабильность и может обеспечить работу ГТУ закрытого типа на утилизации теплоты реактора на высоком температурном уровне.

2. МЕТОД И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Анализ термодинамической эффективности теплосилового контура АЭСММ на диоксиде углерода при реализации цикла Брайтона проводится на основе рассмотрения в качестве переменных таких рабочих параметров, как: общей степени сжатия (β) и числа ступеней компрессора (m), температуры на входе в компрессор (T_1), температуры перед турбиной (T_3) и степени регенерации цикла (σ). Температура затвердевания жидких солевых теплоносителей порядка 360 °С, следовательно, температура входящего в активную зону ($T_{5д}$) CO₂ должна быть не ниже. Нагрев рабочего тела в соответствии с проектными характеристиками [1] может быть осуществлен до 800 °С. На рисунке 1 представлены тепловая схема и T-s диаграмма простой (одноступенчатой) ГТУ закрытого типа.



АЗ – активная зона; Р – реактор; ГЦН – главный циркуляционный насос; ТА – теплообменный аппарат «расплав соли / CO₂»; К – компрессор; ГТ – газовая турбина; ДО – доохладитель диоксида углерода

Рис. 1. Схема турбинного контура и конфигурация цикла закрытой безрегенеративной ГТУ

Действительный внутренний КПД цикла закрытой ГТУ без регенерации с необратимым сжатием и расширением рабочего тела имеет следующий вид

$$\eta_i = \frac{l_d^T - l_d^K}{q_{т.а}} = \frac{(h_3 - h_4) \cdot \eta_{oi}^T - [(h_2 - h_1)] / \eta_{oi}^K}{(h_3 - h_{2д})} \quad (1)$$

где $l_d^T, l_d^K, q_{т.а}$ – удельные действительная работа турбины, компрессора и подведенная теплота к рабочему телу; η_{oi}^T, η_{oi}^K – внутренний относительный КПД турбины и компрессора.

Для теоретического анализа зависимости внутреннего КПД регенеративного закрытого цикла ГТУ с многоступенчатым сжатием рабочего тела предлагается следующая формула в соответствии с методикой, изложенной в [2].

$$\eta_i = \frac{c_{рт} \cdot T_3 \cdot (1 - [\beta \cdot (1 - \zeta_{тр})]^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_{oi}^T - \frac{c_{рк} \cdot (\beta^{m-k} - 1)}{\eta_{oi}^K} \cdot (T_1 + (m-1) \cdot T_{ок})}{c_{рт.а} \cdot [T_3 \cdot A - T_{ок} \cdot (1 - \sigma) \cdot B_m]} \quad (2)$$

где $c_{рк}, c_{рт}, c_{рт.а}$ – удельная изобарическая теплоемкость при средней температуре процесса сжатия, расширения и подвода тепла к CO₂, соответственно, кДж/(кг·К); k – показатель адиабаты CO₂; β, m – общая степень повышения и число ступени компрессора; σ – степень регенерации; T_3 – температура CO₂ перед турбиной; $\zeta_{тр}$ – коэффициент гидравлических потерь давления по тракту (для ГТУ простого цикла $0.02 \leq \zeta_{тр} \leq 0.05$; для ГТУ с регенерацией теплоты уходящих газов $0.05 \leq \zeta_{тр} \leq 0.11$ [2]). Величины A и B_m определяются по следующим выражениям

$$A = \left[1 - \sigma \cdot \left(1 - \eta_{oi}^T \cdot (1 - [\beta \cdot (1 - \zeta_{тр})]^{\frac{1-k}{k}}) \right) \right], \quad (3)$$

$$B_m = \left[\left(\beta^{\frac{k-1}{m \cdot k}} - 1 \right) / \eta_{oi}^k + 1 \right]. \quad (4)$$

Для случая, когда температура на входе в компрессор T_1 и температура после промежуточного охладителя $T_{ох}$ равны друг другу, выражение (2) будет принимать вид

$$\eta_i = \frac{c_{пр} \cdot T_3 \cdot \left(1 - \left[\beta \cdot (1 - \zeta_{тр}) \right]^{\frac{1-k}{k}} \right) \cdot \eta_{oi}^{\tau} - \frac{c_{прк} \cdot \left(\beta^{\frac{k-1}{m \cdot k}} - 1 \right)}{\eta_{oi}^k} \cdot m \cdot T_1}{c_{пр.а} \cdot [T_3 \cdot A - T_1 \cdot (1 - \sigma) \cdot B_m]}. \quad (5)$$

Температура на выходе компрессора ($T_{2д}$) и температура на выходе из турбины ($T_{4д}$) теоретически оцениваются по формулам

$$T_{2д} = T_1 \cdot \left[1 + \frac{\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{oi}^k} \right], \quad (6)$$

$$T_{4д} = T_3 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left[\beta \cdot (1 - \zeta_{тр}) \right]^{\frac{1-k}{k}} \right] \cdot \eta_{oi}^{\tau} \right\}. \quad (7)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Влияние P_1 , T_1 и T_3 на эффективность турбинного контура АЭСММ на основе цикла безрегенеративной ГТУ на CO_2

Особенность турбинного контура АЭСММ на быстрых нейтронах с солевыми теплоносителями заключается в необходимости предотвратить затвердевание теплоносителя первого контура. Для теплоносителя на основе солевого расплава NaF-BeF₂ его температура плавления составляет 360 °С. Поэтому температура рабочего тела второго контура на входе в ТА ($T_{2д}$ для варианта без и $T_{5д}$ – с регенерацией) не должна быть ниже, чем данное значение. С учетом этого требования, далее будет проведено исследование влияния входных параметров компрессора и турбины на термодинамическую эффективность ГТУ закрытого типа на CO_2 . В таблице 1 приведены исходные данные для расчета. При этом свойства диоксида углерода взяты из [3].

Таблица 1 – К расчету термодинамической эффективности простой ГТУ на CO_2

Температура перед турбиной T_3 , °С	650 – 800
Температура на выходе компрессора $T_{2д}$, °С	360
Давление на входе в компрессор P_1 , МПа	0.5 – 3.0
Температура на входе в компрессор T_1 , °С	40
Внутренний относительный КПД компрессора η_{oi}^k	0.8
Внутренний относительный КПД газовой турбины η_{oi}^{τ}	0.85

Для рассматриваемого диапазона давлений на входе в компрессор, условие предотвращения затвердевания теплоносителя первого контура выполняется при следующих значениях давлений на входе и выходе из компрессора (рис. 2). Расчеты по данным [3] для турбинного контура АЭСММ с солевыми теплоносителями показали, что при заданном диапазоне P_1 необходимая степень повышения давления в компрессоре варьируется

от 18.5 до 34. На основе расчёта энтальпий по программе [3] и применения соотношения (1) получена зависимость внутреннего КПД цикла η_i от параметров перед компрессором P_1 , T_1 и турбиной T_3 (рис. 3).

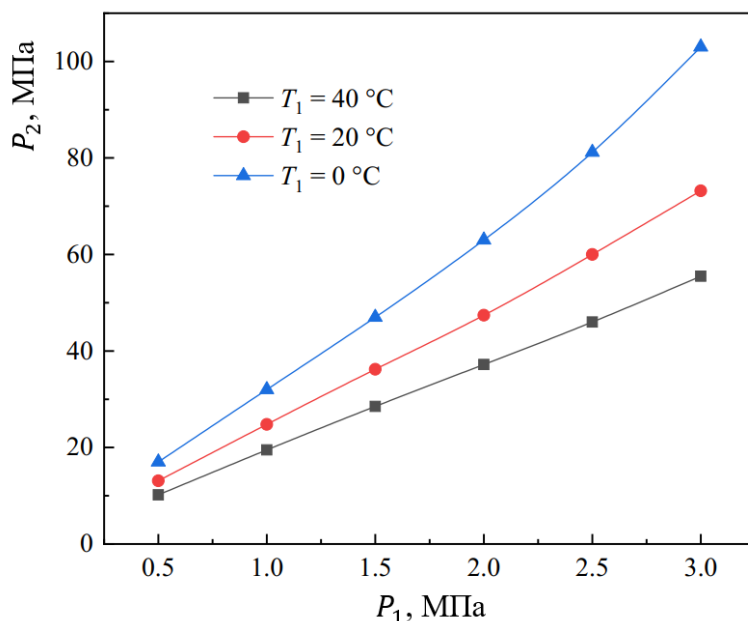


Рис. 2. Значения P_2 , необходимые для превышения температуры потока CO_2 на входе в активную зону над температурой затвердевания теплоносителя первого контура при $\sigma = 0$

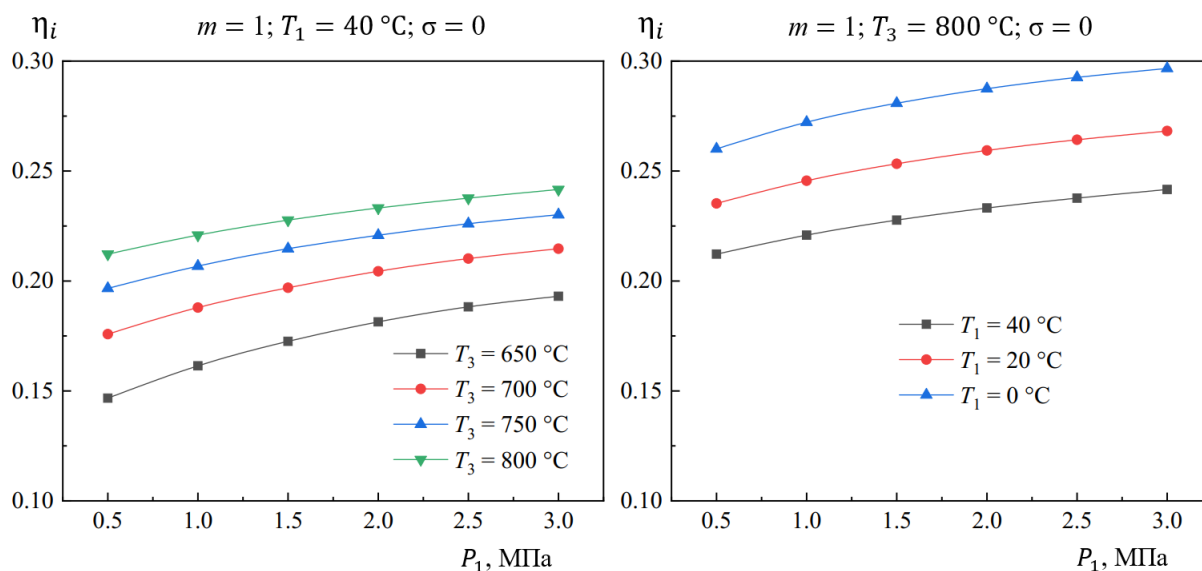


Рис. 3. Зависимость внутреннего КПД цикла от P_1 , T_1 и T_3

Результаты расчета основных показателей эффективности безрегенеративной ГТУ на CO_2 хорошо согласуются с теоретическим анализом по соотношениям (2-7). Следует отметить, что турбинный контур на основе цикла простой ГТУ без регенерации на CO_2 работает под большим давлением. Давление в тракте от компрессора до газовой турбины P_3 при данном диапазоне P_1 варьируется от 10 до 103 МПа. Такое обстоятельство требует предъявления особых требований как при разработке самого компрессора, так основных теплообменных аппаратов первого и второго контуров. В данном диапазоне давлений

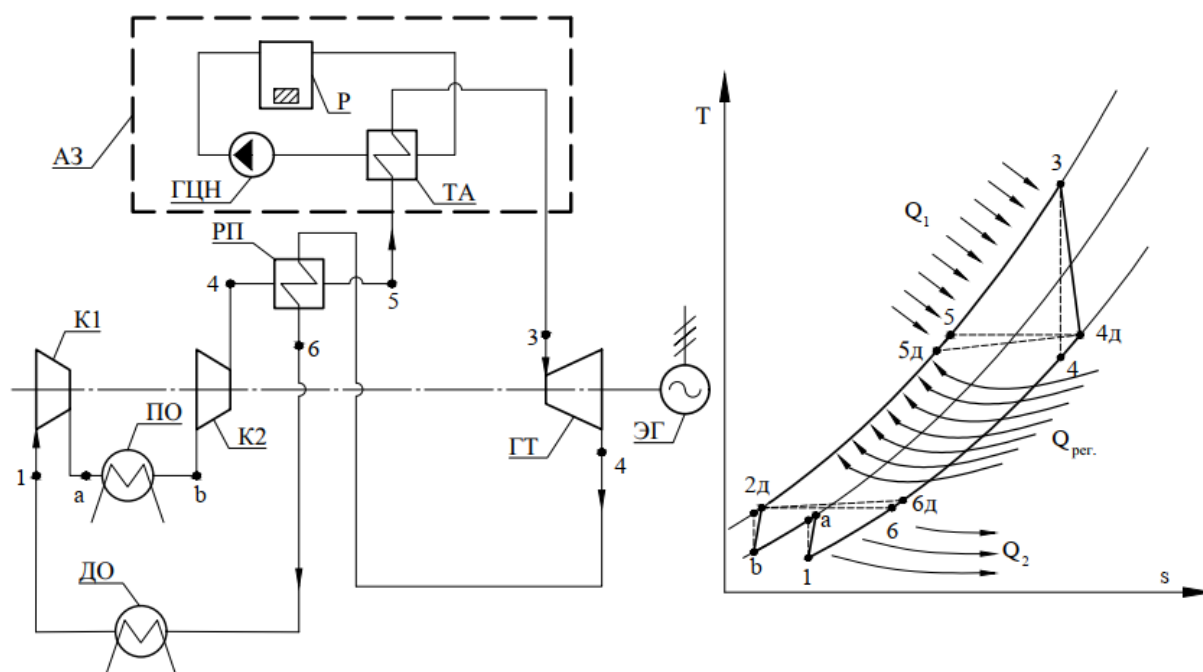
перед турбиной P_3 внутренний КПД цикла безрегенеративной ГТУ довольно низкий. Например, при реализации данного цикла в максимальном возможном диапазоне параметров ($T_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$; $P_3 = 103\text{ МПа}$ и $T_3 = 800\text{ }^\circ\text{C}$) η_i составляет примерно 30%.

3.2 Турбинный контур АЭСММ на основе регенеративной двухступенчатой ГТУ на CO_2

Существенное повышение термодинамической эффективности цикла ГТУ закрытого типа можно достичь применением двухступенчатой регенеративной схемой при сверхкритических параметрах CO_2 перед турбиной. Схема и конфигурация базового регенеративного цикла даны на рис. 4. В таблице 2 приведены исходные данные для расчета термодинамической эффективности турбинного контура на основе сверхкритической двухступенчатой регенеративной ГТУ на CO_2 .

Таблица 2 – Исходные данные для расчета двухступенчатого цикла ГТУ на CO_2

Температура перед турбиной T_3 , $^\circ\text{C}$	650 – 800
Давление на входе в компрессор P_1 , МПа	7 – 16
Температура на входе в компрессор T_1 , $^\circ\text{C}$	40
Степень повышения давления компрессора β	5
Внутренний относительный КПД ступени компрессора η_{oi}^k	0.8
Внутренний относительный КПД ступени компрессора η_{oi}^T	0.85
Температурный напор на холодном конце регенератора Δt_x , $^\circ\text{C}$	10



АЗ – активная зона; Р – реактор; ГЦН – главный циркуляционный насос; ТА – теплообменный аппарат «расплав соли / CO_2 »; К1, К2 – ступени компрессора; ПО – промежуточный охладитель; ГТ – газовая турбина; РП – регенератор; ДО – доохладитель диоксида углерода; ЭГ – электрогенератор

Рис. 4. Схема турбинного контура и конфигурация двухступенчатого регенеративного замкнутого цикла ГТУ на диоксиде углерода

Результаты расчетов для двухступенчатой ГТУ даны на рис. 5. При этом видно, что рост внутреннего КПД цикла двухступенчатой ГТУ на CO_2 при давлениях P_1 выше 9 МПа носит линейный характер. Для рассмотренного диапазона P_1 , при T_1 равной 40°C внутренний КПД цикла двухступенчатой регенеративной ГТУ может достигать 52%. В холодное время, когда температура окружающей среды уменьшается до отрицательных значений, цикл Брайтона на CO_2 может осуществлен при низких T_1 и при этом достигнут заметный прирост КПД.

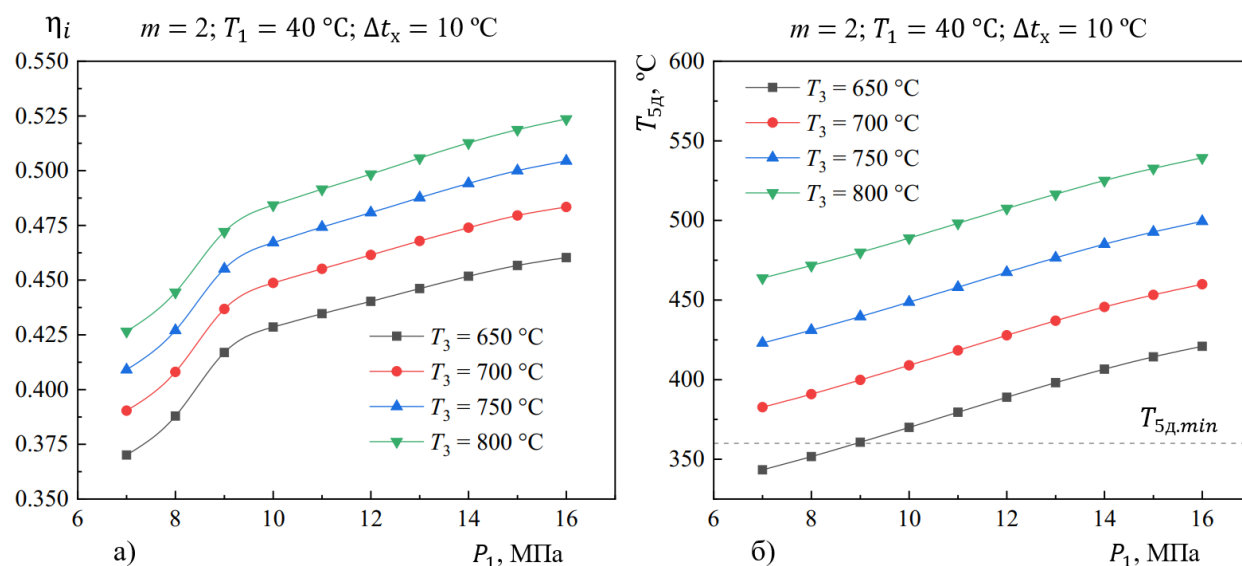


Рис. 5. Зависимость внутреннего КПД сверхкритического двухступенчатого цикла ГТУ на CO_2 от P_1 и T_3 при T_1 равной 40°C и при степени повышения давления β равной 5

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка термодинамической эффективности сверхкритического цикла Брайтона на CO_2 , который был рассмотрен в качестве второго контура атомных электростанций малой мощности (АЭСММ), была проведена при температурах на входе в турбину (T_3) в диапазоне от 650 до 800°C и температурах перед компрессором T_1 от 0 до 40°C .

Показано, что разработка и внедрение двухступенчатых регенеративных ГТУ замкнутого типа на диоксиде в качестве турбинного контура АЭСММ позволит достичь высокой термодинамической эффективности в широком диапазоне рабочих параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атомные** станции малой мощности: новое направление развития энергетики / под ред. акад. РАН А. А. Саркисова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2011. – 375 с.
2. **Комаров О. В.** Тепловые и газодинамические расчеты газотурбинных установок: учебно-методическое пособие / О. В. Комаров, В. Л. Блинов, А.С. Шемякинский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 164 с. ISBN 978-5-7996-2487-3
3. **REFPROP 10.0:** Reference Fluid Thermodynamic and Transport properties: Copyright 2010 by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the USA.

Секция 2

Технологии для цифровой экономики и энергетики

Руководители:

**к.э.н. Кролин А.А.,
к.т.н. Щербатов И.А.**

В.А. Агибалов¹, М.К. Белов¹, А.Н. Долгушев¹, И.А. Щербатов²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС И ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ДЛЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения (ПО) для построения имитационных моделей цифровых двойников (ЦД) оборудования тепловых электростанций (ТЭС) и тепловых схем для использования в составе систем диагностики и прогнозной аналитики. Создана база данных, позволяющая хранить теплотехнические параметры объекта и данные о техническом состоянии оборудования. Разработан интерфейс для работы с цифровыми моделями подогревателя низкого давления, парового цилиндра и конденсатора, позволяющий создавать различные схемы взаимного расположения оборудования в составе тепловой схемы. Описаны функциональные возможности программного обеспечения и приведены результаты его работы, а также оценки технического состояния оборудования при заданных параметрах.

Ключевые слова – диагностика, ТЭС, прогнозирование, имитационная модель, программное обеспечение, цифровой двойник, техническое состояние

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует множество методов диагностирования оборудования и оценки его технического состояния. Например, существуют методы диагностики для электрооборудования [1], холодильных машин [2], существует также методика проведения диагностики в области строительства [3]. Следует отметить, что задача обеспечения надлежащего технического состояния оборудования и планирования ремонтных циклов является актуальной. В связи с этим целесообразно осуществить переход от обслуживания по регламенту к обслуживанию по состоянию [4].

Для практической реализации данной стратегии необходимо создать модели оборудования, которые будут адекватно описывать поведение объектов. Этот переход может быть осуществлен с помощью технологии ЦД. Идея использования ЦД для диагностики не нова.

Помимо создания ЦД необходимо создать удобное ПО, обеспечивающее решение задач оценки технического состояния и прогнозирования возникновения деградационных явлений.

Существует также множество исследований по применению ЦД в области энергетики. В основном они направлены на определение дефектов оборудования [5-6], прогнозирование технического энергетического оборудования [7-9]. В этом направлении также идет [10-11] разработка ПО, но оно не способно полностью решить задачи в области оценки и прогнозирования технического состояния оборудования.

Разработка данного ПО позволит снизить вероятность возникновения аварийной ситуации и тем самым повысить надежность и эффективность работы энергосистем.

2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА

Разработка корректно работающего математического аппарата является одной из главных задач разработки ПО. Поэтому важно создать математические модели, которые будут с достаточной точностью описывать поведение теплового оборудования, разработать методику оценки технического состояния оборудования, которая сможет и создать методику прогнозирования, которая сможет самообучаться на новых данных.

Для корректной работы ЦД необходимо создать математическую модель, которая будет учитывать технические характеристики оборудования, а также сможет с достаточной точностью изменение тепловых параметров. Так, например, разработан ЦД конденсатора, который представляет собой следующую математическую модель рис. 1.

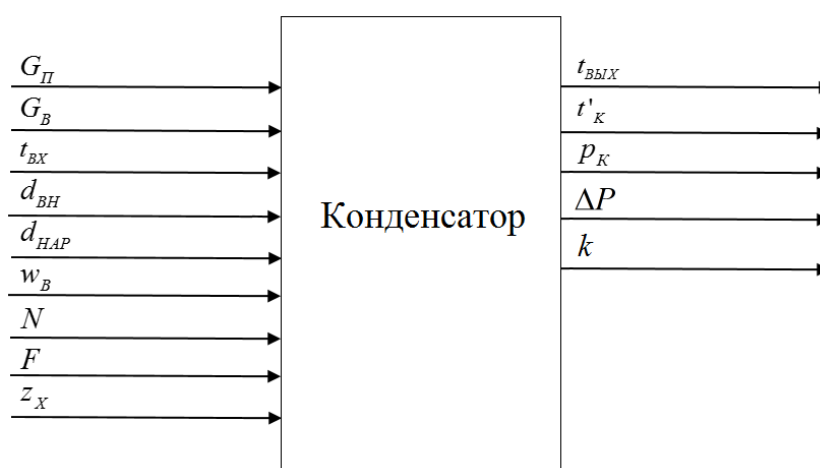


Рис. 1. Обобщенная структурная схема конденсатора

Входными данными для ЦД являются: $G_{\text{П}}$ – расход пара в конденсаторе; $G_{\text{В}}$ – расход охлаждающей воды; $t_{\text{ВХ}}$ – температура воды на входе в конденсатор; $d_{\text{ВН}}$ – внутренний диаметр трубок; $d_{\text{НАР}}$ – наружный диаметр трубок; $w_{\text{В}}$ – скорость воды в трубках; N – число ходов; F – площадь поверхности теплообмена; $z_{\text{Х}}$ – количество трубок.

Выходными данными для ЦД являются $t_{\text{ВЫХ}}$ – температура воды на выходе из конденсатора $t'_{\text{К}}$ – температура насыщения в конденсаторе, $p_{\text{К}}$ – давление насыщения в конденсаторе, ΔP – падение напора по водяному тракту аппарата.

Проведя исследования пригодности использования математической модели на экспериментальных данных, был получен результат, что относительная погрешность результатов расчёта не превосходит 1,5%.

На данный момент времени не существует методик, которые смогут оценить техническое состояние оборудования, абсолютно точно не выводя оборудование из эксплуатации. Основная идея методики оценки – сравнение параметров реального объекта и параметров, получаемых из ЦД.

За основу метрики оценки технического состояния оборудования, взята методика описана в приказе Минэнерго №676 [12]. Метрика представляет собой диапазон значений от 0 до 100, где конкретным промежуткам соответствуют необходимые вид технического воздействия. Данный перечень представлен в табл. 1.

Таблица 1. Параметры оформления текста данной Инструкции

Вид технического состояния	Диапазон индекса технического состояния	Вид технического воздействия
Критическое	≤ 25	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
Неудовлетворительное	$25 < \text{и} \leq 50$	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
Удовлетворительное	$50 < \text{и} \leq 80$	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
Хорошее	$70 < \text{и} \leq 85$	По результатам планового диагностирования
Очень хорошее	$85 < \text{и} \leq 100$	Плановое диагностирование

Так, для конденсатора метрика представлена в табл. 2.

Таблица 2. Оценка разницы параметров

Наименование параметра	Значение оценки	
	0	100
Относительная погрешность температуры воды на выходе из конденсатора	$> 10 \%$	$< 1,5\%$
Относительная погрешность коэффициента теплопередачи	$> 10 \%$	$< 3\%$
Относительная погрешность давления насыщения в конденсаторе	$> 3 \%$	$< 0,1\%$
Относительная погрешность падение напора по водяному тракту аппарата	$> 20 \%$	$< 3\%$

Для определения диапазонов относительных погрешностей, а также для подбора весового коэффициента, который будет учитывать весомости оценки погрешности использовалась экспертная оценка.

Для прогнозирования данных на долгосрочном промежутке времени лучше всего подходят рекуррентная нейронная сеть Long Short-Term Memory (LSTM), также она обладает свойством самообучения [13].

Схема работы LSTM сетей представлена на рис. 2.

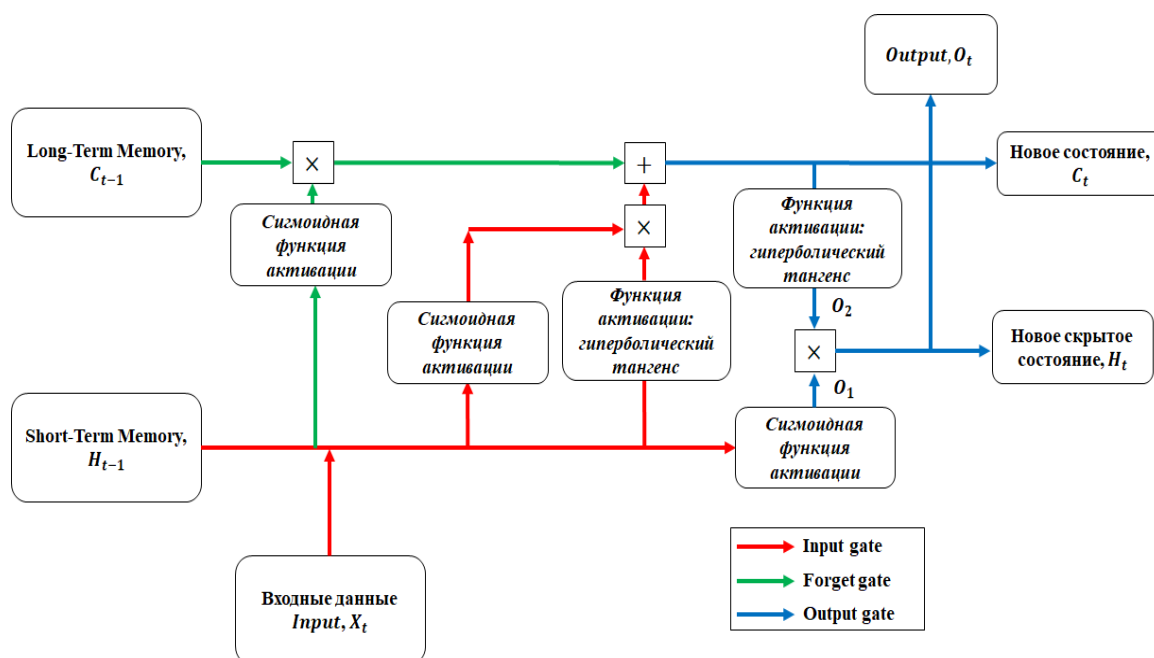


Рис. 2. Принципиальная схема распространения сигнала для модели LSTM рекуррентной нейронной сети

Данная нейронная сеть себя показывает превосходно на долгосрочных периодах работы.

3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Важным моментом разработки ПО является разработка базы данных (БД) ПО, интерфейса, а также выбор языка, на котором будет реализовываться ПО.

Для корректной работы ПО, работающего с большими объемами данных, необходимо создать базу данных, которая поможет не потерять данные и сохранить информацию в удобном для хранения формате.

Поэтому для разработки базы данных мы использовали систему управления базами данных PostgreSQL из-за ее полной совместимости со структурированным языком запросов (SQL) и распространенности данного ПО. При разработке ПО создана реляционная база данных.

Интерфейс - общая граница между двумя функциональными объектами, требования к которой определены стандартом; совокупность средств, методов и правил взаимодействия (управления, контроля и т.д.) между элементами системы. Другими словами, пользовательский интерфейс (UI) - это "способ, с помощью которого пользователь выполняет задачу с продуктом, а именно, действия, выполняемые пользователем, и то, что он получает в ответ".

Интерфейс программы разработан на языке C Sharp. Фрагмент интерфейса представлен на рис. 3.

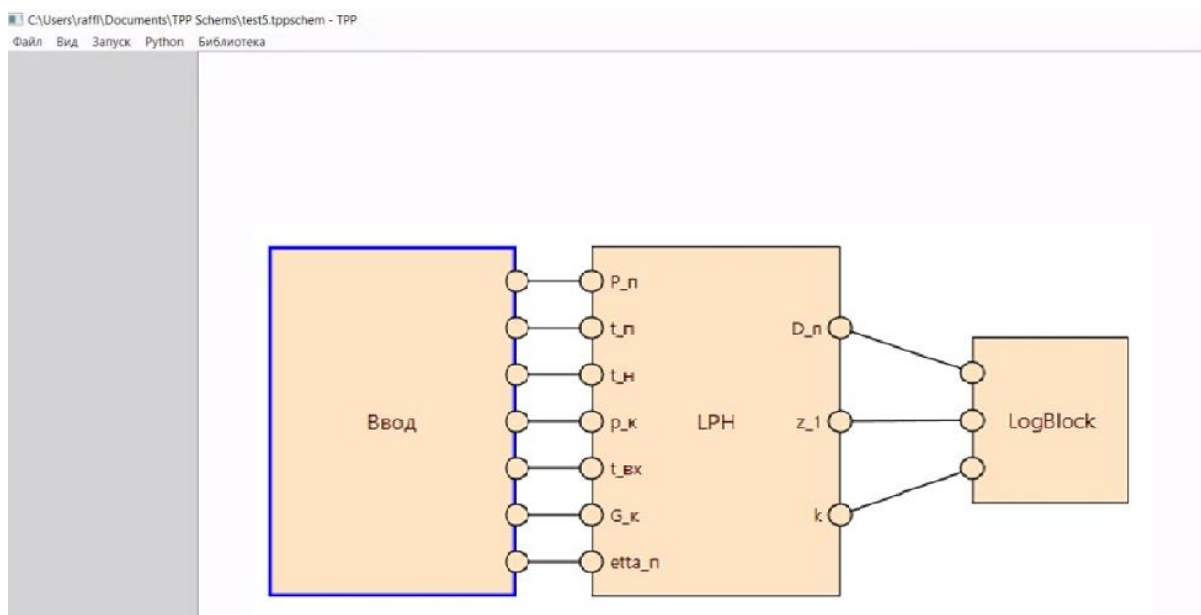


Рис. 3. Фрагмент интерфейса

Интерфейс позволяет собирать схемы, которые необходимо пользователю данного ПО. Отслеживать изменение параметров во временной шкале, оценивать и прогнозировать техническое состояние оборудования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения проекта было разработано ПО, которое позволяет собирать тепловые схемы, а также, проводить оценку технического состояния оборудования и прогнозировать его изменение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байдюк М. А., Комарова Г. В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин //Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2019. – Т. 3. – С. 78-84.
2. Лемешко М. А., Башняк С. Е. Оценка технического состояния малой холодильной машины с использованием программируемого контроллера //Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2017. – №. 2. – С. 78-82.
3. Карцев С. В., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Методика оценки технического состояния машин и технологического оборудования для специального строительства. – 2008.
4. Караваев М. А. Управление техническим состоянием машин и их составных частей при формировании структуры ремонтных циклов // Наука без границ. – 2021. – №. 5 (57). – С. 33-38.
5. Shcherbatov I. A., Turikov G. N. Determination of power engineering equipment's defects in predictive analytic system using machine learning algorithms, Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, vol. 1683, no. 4, p. 042056.
6. Shcherbatov I. A. Intellectualization of information for power plants repair management systems, Modern Technologies System Analysis Modeling. 2019, vol. 3, no. 63, p. 31-7.
7. Protalinsky O. M., Shcherbatov I. A., Stepanov P. V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies, Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2017, vol. 891, no. 1, p. 012289.

8. **Проталинский О. М.** и др. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики //Информатика и системы управления. – 2019. – №. 1. – С. 93-105.

9. **Andryushin, A., Shcherbatov, I., Dolbikova, N., Kuznetsova, A., Tsurikov, G.** Outlier detection in predictive analytics for energy equipment, *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling*, Springer, Cham, 2020, p. 193-203.

10. **Plotnikova L., Bainov A., Torkunova Y., Nadezhdina M.** Digitalizing the Process of Tracking Technical Condition of the Main Equipment of Energy Providing Enterprises, *SHS Web of Conferences*, EDP Sciences, 2021, vol. 93.

11. **Arakelian E., Pashchenko A., Shcherbatov I., Tsurikov G., Titov F.** Creation of Predictive Analytics System for Power Energy Objects, 2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD), IEEE, 2019, p. 1-5.

12. **Об утверждении** методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей: приказ Минэнерго России от 26 июля 2017 г. № 676.

13. **MIT Deep Learning 6.S191.** Deep Sequence Modeling. URL: http://introtodeeplearning.com/slides/6S191_MIT_DeepLearning_L2.pdf. MIT. 19.01.2021.

14. **Requirements** for the development of a graphical user interface of the IS <https://studfile.net/preview/987765/page:9/> Access date 06.12.2021.

А.А. Гаврилов¹, А.А. Курушикина¹, С.Д. Блаженова¹, А.Н. Зейн²

1-студенты, 2-руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В настоящее время на крупных предприятиях по разработке нового энергетического оборудования отсутствует единое информационное пространство для хранения настроек и результатов физических экспериментов, что усложняет работу инженеров, а также приводит к значительным финансовым и временным издержкам на предприятиях.

Решением данной проблемы является разработка программного комплекса (ПК), состоящего из базы данных (БД) и клиент-серверного приложения, для хранения, анализа и обработки результатов физических и виртуальных исследований, методик их проведения, а также для проведения интеллектуальной верификации и отладки расчетных моделей для численного моделирования физических процессов, протекающих в элементах энергетического оборудования.

Ключевые слова – программный комплекс, база данных, моделирование, модуль предсказания, машинное обучение

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ

В настоящее время в инжиниринговых фирмах, конструкторских бюро предприятий энергомашиностроительного сектора существует проблема, связанная с отсутствием единого информационного пространства для хранения настроек параметров численного эксперимента, а также результатов физического эксперимента и граничных условий его проведения. Данная проблема приводит не только к потере опыта численного и экспериментального исследования физических процессов в случае ухода сотрудника из предприятия, но и может привести к потере результатов исследований по тем или иным причинам.

Помимо этого, существует большое количество программных продуктов, предназначенных для численного моделирования различных физических процессов, позволяющих сократить временные и финансовые затраты на проведение физического эксперимента и соответственно затраты на проектирование оборудования. Однако такие современные программные комплексы имеют огромные возможности для тонкой настройки решения задачи, вследствие чего некорректная настройка задачи может привести к существенному отклонению результата расчета от эксперимента (вплоть до 100%).

В связи с этим необходимо верифицировать результаты численных исследований с результатами экспериментальных исследований и определять такие настройки численного эксперимента, при которых будет получена минимальная погрешность. Таким образом, для проведения верификации результатов численного эксперимента в первую очередь необходимо иметь адекватные результаты физического эксперимента с достаточно по-

дробным описанием граничных условий его проведения и методики обработки самих результатов.

Создание единой информационной системы для хранения и обработки результатов численного и экспериментального анализа физических процессов является сейчас актуальной задачей в энергомашиностроении. Оснатив созданное информационное пространство методами интеллектуальной обработки данных, возможно настроить автоматизированное получение рекомендаций к численному моделированию, позволяющих получить приемлемую для расчетчика погрешность при допустимых затратах, что предотвратит проведение большого количества экспериментальных исследований и большого количества численных расчетов при различных параметрах численного эксперимента в процессе верификации.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Разработка информационно-аналитической системы хранения и интеллектуальной обработки результатов экспериментальных и численных исследований физических процессов, протекающих в элементах энергетического оборудования, была разделена на следующие модули: модуль для обработки экспериментальных исследований, модуль для обработки результатов моделирования и модуль верификации.

Первым этапом разработки стал выбор системы управления базами данных (СУБД), которая отвечала бы определенным требованиям для реализации поставленных задач. Чтобы выбрать наиболее подходящую, было проведено сравнение разных СУБД по основным критериям. Проведя сравнение, было решено использовать PostgreSQL – открытое и бесплатное ПО, которое является мощной системой, соответствующей стандарту SQL, с открытым исходным кодом [1-3].

Далее для разработки БД и приложения необходимо определить данные, которые будут характеризовать предметную область.

При работе с экспериментом для начала необходимо определить саму задачу, а именно: тип физического процесса, тип энергетического оборудования и сам экспериментальный объект. Таким образом формируется класс задачи. После выбора класса задачи пользователь задает или редактирует информацию о стенде, на котором были проведены испытания. Далее пользователю необходимо задать исполнение объекта, которое характеризуется геометрическими параметрами. После чего, когда произошла классификация задачи и экспериментального объекта, можно вводить результаты экспериментов, проведенных с данным исполнением объекта, а также задать обработку результатов определенными функциональными зависимостями.

После определения данных, характеризующих эксперимент и действий пользователя, были разработаны БД и интерфейс приложения для работы с этой БД.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Следующим этапом стала разработка модуля для хранения, анализа и обработки результатов численных экспериментов. Данный модуль связан с предыдущим, поскольку в одной задаче над одним и тем же исполнением объекта могли быть проведены как экспериментальные исследования, так и численные. Поэтому в БД должны присутствовать не только таблицы для хранения результатов численного исследования, но и такие таблицы, которые бы осуществляли связь моделирования с экспериментами.

Как и при добавлении результатов экспериментальных исследований, пользователь должен сначала выбрать класс моделируемой задачи. Далее, поскольку в данном случае экспериментальных стендов нет, пользователь задает геометрические параметры, характеризующие исполнение исследуемого объекта. После этого необходимо задать режимные параметры моделирования. Именно на этом этапе происходит связь моделирования с экспериментом, поэтому пользователю предоставляется возможность выбрать значения режимных параметров из уже существующих в БД результатов экспериментальных исследований.

После установки режимных параметров происходит задание настроек непосредственно самого моделирования, а именно задание настроек решателя и сетки. Следующими шагами, как и при добавлении результатов экспериментов, осуществляется добавление результатов численного исследования, а также их обработка функциональными зависимостями.

Помимо добавления результатов экспериментальных и численных исследований, разработанный программный комплекс позволяет производить поиск добавленных результатов. Для этого необходимо сначала классифицировать задачу, затем ввести геометрические параметры, чтобы классифицировать сам объект. По введенным данным в базе происходит поиск, и пользователь может посмотреть информацию об экспериментальном стенде, на котором проводился эксперимент, результаты измерения и обработки экспериментальных параметров, а также настройки моделирования и результаты измерения и обработки параметров, полученных при численном моделировании.

4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ

Последним этапом стала разработка интеллектуального модуля предсказания (он же модуль верификации). Задачей всего интеллектуального модуля предсказаний является предсказание настроек эксперимента при определённых параметрах эксперимента и желаемых результатах (будем называть это прямой задачей) и предсказание результата эксперимента, то есть коэффициента потерь (будем называть это обратной задачей). Для решения задачи необходимо использовать методы машинного обучения и разработать ряд моделей.

Исходными данными для анализа и обучения являются параметры и результаты расчёта прямых труб, которые состоят из 189 объектов. Был проведён первичный анализ этих данных, в результате которого было принято решение исключить некоторые признаки из рассмотрения, так как эти признаки не помогут восстановить зависимость для построения моделей машинного обучения [4-5].

Проанализировав целевые признаки, было определено, что необходимо решать как задачу восстановления регрессии (например, для числового признака y^+), так и задачу классификации (например, для категориального признака Модель турбулентности).

4.1. Исследование обучающих алгоритмов и их параметров

Для построения модели необходимо выбрать обучающий алгоритм и настроить его параметры. Для этого было проведено исследование наиболее популярных алгоритмов классификации и регрессии, выявлен ряд достоинств и недостатков. Эти обучающие алгоритмы были первично опробованы на имеющихся данных. Выявлен ряд алгоритмов,

которые при более тщательной настройке, вероятно, могут давать хорошие результаты предсказания [4-5].

Теперь необходимо найти параметры методов, при которых они выдавали бы наилучшие показатели качества. Выберем некоторый метод и будем варьировать его параметры, чтобы найти набор параметров, дающий наилучшую точность. Для этого воспользуемся методом оптимизации гиперпараметров.

Метод оптимизации гиперпараметров был реализован на языке программирования Python. Для этого используется метод `RandomSearchCV()` библиотеки `sklearn`, в параметрах которого указывается метод машинного обучения и распределение его параметров. Принцип работы метода заключается в случайном определении набора параметров из заданного диапазона и определение качества модели с этим набором параметров. В результате работы метода оптимизации получен рейтинг параметров, с которыми алгоритм МО даёт наилучшее качество.

Таким образом были определены алгоритмы и их параметры для всех целевых признаков. Нужно отметить только то, что не удалось достичь приемлемой точности для модели классификации, прогнозирующей модель турбулентности. Было исследовано несколько методов с различными параметрами, но максимальная достигнутая точность (ассигасу, доля объектов, для которых правильно предсказан класс) составила всего 0,52, что означает, что модель делает верный прогноз с точностью 52%, что неприемлемо.

Можно предположить, что для создания модели, которая предсказывала бы модель турбулентности с приемлемой точностью, не хватает данных, а те данные, что есть в нашем распоряжении, не могут описать зависимость целевого параметра (модели турбулентности) от остальных параметров.

4.2. Разработка обучающих алгоритмов на платформе .NET C#

Нужно отметить, что данный проект разрабатывается на платформе `.NET Framework` на языке программирования `C#` [3], что означает необходимость применения моделей машинного обучения путём написания кода на этом языке.

`Microsoft Visual Studio` поддерживает пакет `ML.NET`, который позволяет добавлять в приложения `.NET` возможности машинного обучения [6]. Для разработки пользовательской модели средствами `ML.NET` необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создать контекст для операций `ML.NET`;
2. Загрузить обучающие данные в объект `IDataView` и провести подготовку данных, например преобразовать категориальные данные в числовые значения и т.п.;
3. Указать метод машинного обучения и его параметры;
4. Провести обучение модели методом `Fit()`;
5. Произвести прогнозирование на тестовых данных (`Predict()`) и оценить модель методом `Evaluate()`;
6. Сохранить модель (`Save()`) в двоичном формате для дальнейшего использования в приложении.

В данном проекте было принято решение применять именно `ML.NET` для создания моделей предсказания, так как его использование открывает ряд возможностей. Поскольку разработанные с помощью `ML.NET` модели сохраняются в определённом формате и со структурой, предусмотренной самим пакетом `ML.NET`, то в дальнейшем мы имеем воз-

возможность обучить эту модель на новых данных внутри проекта, имея только файл модели [6]. При этом этот процесс может быть реализован в коде приложения.

Тем не менее применение ML.NET не решает всех проблем применения обученных алгоритмов внутри приложения. Возможна ситуация, при которой данные, для которых были созданы модели, изменятся (дополнятся) так, что модели уже не будут давать приемлемую точность. Тогда потребуется разработка новых алгоритмов, которая может быть произведена только с участием человека, компетентного в области машинного обучения.

Таким образом, было разработано 6 основных моделей машинного обучения для решения прямой и обратной задач и также 6 альтернативных моделей для того, чтобы дать пользователю возможность выбора.

Таблица 1. Методы и их метрики для каждого предсказываемого параметра

Предсказываемый параметр	Тип задачи	Название метода	Метрика R-квадрат	Метрика Абсолютная потеря	Точность
Общая высота пограничного слоя	Регрессия (предсказывает число)	LightGbmRegression	0,98	0,03	- -
Величина глобальной ячейки	Регрессия (предсказывает число)	FastTreeRegression	0,97	0,11	-
Число слоёв	Классификация	FastTreeOva	-	-	93,96%
Модель турбулентности	Классификация	FastTreeOva	-	-	50,59%
Y+	Регрессия (предсказывает число)	LbfgsPoissonRegression	0,98	1,12	-
Коэффициент потерь полученный в CFX	Регрессия (предсказывает число)	LightGbmRegression	0,89	0,001	-

Пользователь же видит модуль верификации следующим образом: сначала необходимо выбрать класс задачи, затем выбрать прямую или обратную задачу и модель, после чего ввести необходимые для предсказания параметры, после чего эти параметры будут рассчитаны. Для сбора статистики по качеству моделей пользователь может проставить свою оценку точности предсказанных параметров, которая сохраняется в БД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате была разработана информационная аналитическая система хранения и интеллектуальной обработки результатов экспериментальных и численных исследований физических процессов, протекающих в элементах энергетического оборудования. Сложности разработки заключались в том, что исследование энергетических систем не может быть ограничено фиксированным набором атрибутов, поэтому классический подход к проектированию БД теряет свою актуальность. Следовательно, необходимо было разра-

ботать такую структуру БД, которая позволила бы хранить любое количество параметров у любых задач. Для этого использовались такие приемы, как переход от горизонтальной структуры таблиц к вертикальной, а также применение таблицы со структурой «дерево» [1-2]. Со стороны разработки приложения такие сложности привели к необходимости реализовывать динамический интерфейс, что также стало достаточно трудоемкой задачей.

Другой сложностью стало достаточно малое количество данных для обучения моделей, вследствие чего снижается точность интеллектуального модуля предсказания.

Несмотря на это, данный программный комплекс решает все поставленные задачи и актуален в сфере разработки нового энергетического оборудования, а также для исследования физических процессов, протекающих в элементах энергетического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Туманов, В.Е.** Основы проектирования реляционных баз данных / В.Е. Туманов. – Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2007. – 421 с.
2. **Волк, В.К.** Базы данных. Проектирование, программирование, управление и администрирование: учебник / В.К. Волк. — Санкт-Петербург: Лань, 2020. — 244 с.
3. **Разработка** приложений на C# с использованием СУБД PostgreSQL: учебное пособие / И. А. Васюткина, Г. В. Трошина, М. И. Бычков, С. А. Менжулин. — Новосибирск: НГТУ, 2015. — 143 с.
4. **Бурков, А.** Машинное обучение без лишних слов. — СПб.: Питер, 2020. — 192 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»).
5. **Рашка, С.** Python и машинное обучение. / Рашка С., Мирджалили В. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020 – 848 с.
6. **Capellman, J.** Hands-on machine learning with ML.NET. – UK: Packt Publishing, 2020. – 296 p.

М.С. Скиба¹, М.В. Андронов¹, А. А. Соболев¹, Е.В. Сухарева²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены этапы разработки имитационной модели оценки и прогнозирования рисков инвестиционных проектов в условиях цифровизации, которая является одним из необходимых пунктов при планировании инвестиционных проектов для энергетической отрасли, приведено описание возможных видов рисков инвестиционной деятельности, представлен пример работы данной модели. Маркетинговые и экономические исследования показали, что разработка данной модели позволит сделать процесс управления рисками на предприятии более автоматизированным, и это будет не очень затратно для предприятий.

Ключевые слова - цифровизация, цифровые технологии, риски в энергетике, модель прогнозирования риска, индустрия 4.0

В наши дни экономика развивается достаточно быстро, разрабатываются новые методы и способы управления процессами в энергетической отрасли. Цифровая экономика - деятельность, в которой ключевым фактором производства являются данные в цифровом виде, обработка больших объемов, использование результатов анализа которых по сравнению с традиционными формами хозяйствования позволяют существенно повысить эффективность различных видов производства, технологий, оборудования, хранения, продажи, доставки товаров и услуг. Появилось данное направление в постиндустриальном обществе, развитию способствовала цифровизация производства. Внедрение современных средств переработки и передачи информации в различные сферы деятельности послужило началом эволюционного перехода от индустриального общества к информационному. Этот этап называется четвертая промышленная революция или индустрия 4.0, который предполагает переход на автоматизированное цифровое производство, обработку и передачу большого объема данных в режиме реального времени.

В рамках реализации Указа Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» сформирована национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Программа развития ставит перед собой важные стратегические задачи по наращиванию технологического потенциала производственных отраслей промышленности через увеличение доли нематериальных активов [2,3]. Приобретение необходимых знаний и навыков в устанавливающейся парадигме цифровых технологий призвано обеспечить стране технологическое лидерство в цифровом пространстве экономики.

В условиях цифровизации используются и внедряются инновационные технологии, требующие инвестиционных вложений. Однако, можно заметить, что любая деятельность предприятия сопряжена с множеством рисков, необходимо заранее спрогнозировать и оценить все возможные последствия для энергетического предприятия. Для этого суще-

ствуется достаточно много программных продуктов, позволяющих автоматизировать процесс прогнозирования и оценки рисков инвестиционной привлекательности проекта: как качественных, так и количественных. Среди наиболее распространённых отечественных программных комплексов стоит отметить - "Инвестор" фирмы "ИНЭК", "ТЭО-ИНВЕСТ" Института проблем управления РАН, FOCCAL фирмы "ЦентрИнвестСофт" "Project Expert" фирмы "ПРО-ИНВЕСТ КОНСАЛТИНГ", "Альт-Инвест" фирмы "Альт". COMFAR (Computer Model for Feasibility Analysis and Reporting) и PROPSPIN (Project Profile Screening and Pre-appraisal Information system), которые созданы на базе методических подходов UNIDO, являются наиболее известными зарубежными компьютерными программами.

В силу особенностей климатических условий, а также в зависимости от вида использованной централизованной системы распределения и генерации, зарубежные способы оценки могут оказаться неэффективными, а существующие подходы чаще всего используют оценки аналогичных проектов, не учитывая внедрения новых технологий. Любой из проектов энергетической отрасли требует оценку не только предынвестиционной и инвестиционной фаз, но также и эксплуатационной, которая является одной из важнейших, так как проекты чаще всего являются долгосрочными [1].

Риск - вероятность возникновения неблагоприятных условий и последствий для предприятия, которые могут привести к негативным последствиям для сферы деятельности в целом. Неблагоприятным исходом можно считать упущенную выгоду, убыток, недополученную прибыль, а также неточность и неполноту информации об условиях реализации проекта. Для того чтобы избежать появления рисков, необходимо заранее спланировать все действия, проанализировать опыт других компаний и предприятий, заложить необходимый резерв средств и времени, готовность руководства рисковать. Оценка рисков является необходимым пунктом при планировании инвестиционных проектов. Качественное и своевременное прогнозирование рисков позволит получить положительный результат и снизить негативные последствия. К качественным методам можно отнести: метод мозгового штурма, опросы участников, диаграммы и SWOT-анализ, метод аналогий, который позволяет учитывать опыт, полученный во время реализации схожих инвестиционных проектов, метод «Делфи»- изучение мнения экспертов по определенным вопросам, метод расчета затрат, при котором оцениваются возможные угрозы для капиталовложений, что позволяет вовремя прекратить инвестирование в проект. Количественные методы включают оценку на основе анализа, а именно: определение предельной устойчивости проекта, анализ чувствительности проекта к изменению параметров [2]. Выделяют следующие оценки инвестиционных рисков:

- Количественные методы - метод сценариев, анализ чувствительности проекта, имитационное моделирование, маргинальный метод, статистический метод, расчетно-аналитический метод.

- Качественные методы - анализ уместности затрат, метод аналогий и экспертных оценок.

Оценка и прогнозирование рисков инвестиционных проектов в рамках цифровизации является новым и перспективным направлением развития экономики энергетического сектора, которое предполагает своевременное прогнозирование влияния внешних и внутренних факторов на инвестиционную деятельность энергетических предприятий. В рабо-

те проанализированы различные виды рисков инвестиционной деятельности и сформирована имитационная модель оценки и прогнозирования рисков инвестиционных проектов для энергетического сектора.

В таблице 1 представлены основные виды рисков в энергетике.

Таблица 2. Виды рисков в энергетике

Вид риска:	Характеристика:
Технологические риски	Сбои в работе оборудования, обусловлены спецификой производства и передачи продукции.
Технические риски	Отказ оборудования, перебои в подаче энергии потребителям, снижение технической надёжности электро- и теплоснабжения, износ оборудования, потери энергии и утечки теплоносителя
Экологические риски	Связан с возможным нарушением естественного функционирования ландшафтов и экосистем
Региональные риски	Связанны с географическими особенностями региона, природно-климатическими условиями, риски, связанные с прекращением транспортного сообщения в связи с удаленностью или труднодоступностью.
Регулировочные риски	Риски тарифного регулирования; риски регулирования в области безопасности, специфические налоговые риски; риски антимонопольного регулирования
Отраслевые риски	Связанны с явным завышением (занижением) величин энергии и мощности в балансе;
Финансовые риски	Инфляционный риск, риск снижения финансовой устойчивости, кредитный риск
Коммерческие риски	Рыночные колебания спроса и предложения, неплатежи, нарушение параметров потребления энергии.
Правовые риски	Риски, связанные с изменением правил функционирования оптового и розничного рынков электроэнергии, изменения в налоговом, валютном, таможенном регулировании.

Так как на сегодняшний день не существует модели оценки риска, которая учитывает особенности энергетической отрасли и влияние бурного развития цифровых технологий [4], способом решения данной проблемы является создание имитационной модели оценки рисков инвестиционных проектов [5], позволяющей спрогнозировать и оценить вероятность возникновения риска, а также учесть особенности энергетической отрасли в условиях цифровой экономики. Данная модель прогнозирования и оценки рисков в инвестиционной деятельности в дальнейшем может использоваться на любом энергетическом предприятии, таком как: ПАО «Интер РАО», ПАО «МОЭК», ПАО «Мосэнерго», АО «ОЭК», ФСК ЕЭС и других предприятиях.

Модель была построена с помощью метода Монте-Карло на основе математического моделирования инвестиционного проекта, учитывающая параметры вероятностного распределения и возможные изменения в проекте. Работа при разработке имитационной модели оценки и прогнозирования рисков проходила в несколько этапов:

1. Определены основные виды рисков, возможные в инвестиционном проекте, посредством проведения опроса энергетических предприятий;
2. Сбор и обработка полученных данных;
3. Экспертная оценка, с целью определения вероятности возникновения того или иного риска;
4. Корреляционный анализ данных;
5. Расчет теоретически ожидаемых значений;
6. Составление имитационной модели;
7. Разработка интерфейса программы;
8. Тестирования модели;
9. Устранение ошибок в работе модели;
10. Использование модели на энергетическом производстве.

В качестве базовой модели для анализа инвестиционного риска обычно используется модель расчета показателя NPV (1)

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+r)^n} = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+r)^i} \quad (1)$$

Для расчета NPV необходимо определить ставку дисконта, для этого применяют кумулятивный метод, по которому можно рассчитать премию за риски и провести корректировку с учетом уровня инфляции и безрисковую процентную ставку (2):

$$r = r_f + r_p + r_c + I \quad (2)$$

где

r – ставка дисконтирования;

r_f – безрисковая процентная ставка;

r_p – премия за риски (рассчитывается различными субъективными способами);

r_c – премия за страновой риск (используется для оценки и сравнения международных компаний, в нашем случае страновой риск можно опустить);

I – процент инфляции (корректировка на рост потребительских цен).

В качестве безрисковой составляющей принимают ставку по государственным облигациям. Премия за риск может быть определена большим количеством различных способов, из которых чаще всего используются следующие:

1. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утверждено 21.06.1999 г., Минэкономики, Минфином, Госстроем России);
2. Метод компании «Альт-Инвест»;
3. Методика, изложенная в «Положении об оценке эффективности инвестиционных проектов при размещении на конкурсной основе централизованных инвестиционных ресурсов бюджета развития Российской Федерации» (утверждено Постановлением Правительства РФ №1470 от 22.11.97);
4. Методика авторов Виленского П.Л., Лившица В. Н., Смоляка С.А.;
5. Экспертный метод Я. Хонко.

Принцип работы модели оценки и прогнозирования рисков в инвестиционных проектах заключается в том, что в разработанную модель добавляются статистические данные, полученные из опроса экспертов энергетических предприятий, далее программа сама

анализирует данные и строит прогноз. На рисунке 1 представлен принцип работы данной модели.

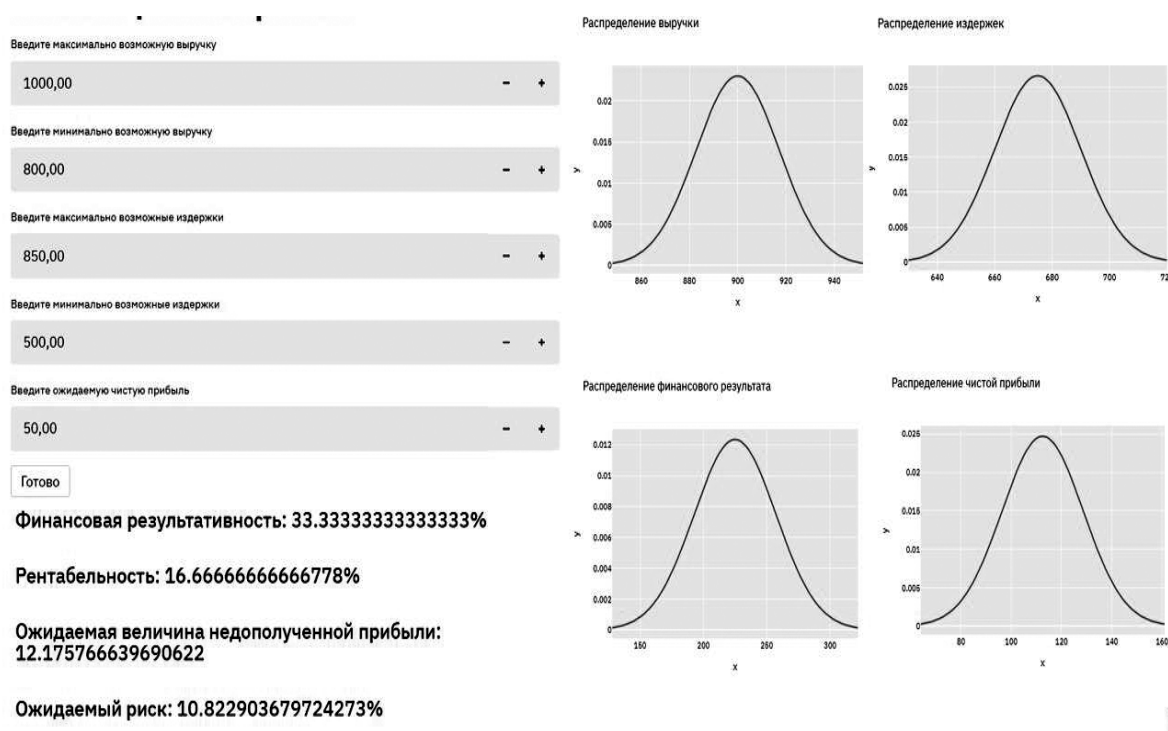


Рис. 1. Пример работы модели оценки и прогнозирования рисков

Разработка модели оценки рисков является перспективным и актуальным направлением исследования. В настоящее время основным направлением улучшения работы большинства объектов энергетики является их модернизация [6]. Реализация новых систем управления, а также создание единого цифрового пространства как инструментов моделирования внедрения цифровых технологий в энергетику требуют оценки новых видов рисков. Модель представляет собой готовое прикладное решение, не чувствительна к внешним изменениям и может быть внедрена на низком уровне в более высокоуровневые модели. Отличительной особенностью модели является учет особенностей цифровой экономики. Разработанная модель позволит учесть особенности инвестиционных проектов во всех секторах энергетики, свести к минимуму потери от негативного воздействия различных видов рисков, снизить вероятность наступления убытков и повысить экономическую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щевьева, В. А.** Финансирование инновационных проектов и экономическая оценка инвестиций. / В.А. Щевьева – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 232с.
2. **Указ** Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации"
3. **Программа** развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://innclub.info>
4. **Сухарева Е.В.** Современное состояние энергетики России// ТДР. 2014. №6. [Электронный ресурс] / Научная электронная библиотека «Киберленинка» Режим доступа: <https://cyberleninka.ru>

5. **Добрынин А.П.**, Снягов С.А., Куприяновский В.П., Намиот Д.Е. Целостная модель трансформации в цифровой экономике – как стать цифровыми лидерами» // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 5, no. 1, 2017.

6. **Муравьева В.Г.** Методические аспекты оценки рисков инвестиционных проектов // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования», №4 (9), 2015. С.208-215.

*К.С. Володина*¹, *Е.А. Сысоева*¹, *Н.Л. Кетоева*²

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта

ВНЕДРЕНИЕ ПРАКТИК ГИБКОГО УПРАВЛЕНИЯ БИЗНЕС-ЕДИНИЦ ВУЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена актуальным вопросам разработки механизма мониторинга комплексной деятельности кафедры, с применением практик гибкого управления и инструментов риск-менеджмента. С помощью реализации данного проекта решается проблема обеспечения и повышения конкурентоспособности высшего учебного заведения за счет повышения эффективности деятельности кафедры как бизнес-единицы вуза [1]. Это позволит обеспечить рыночную ориентацию образовательной и научной деятельности, удовлетворяя потребности людей в образовании, а предприятий и компаний – в квалифицированном персонале и качественной научно-технической продукции и услугах.

Ключевые слова – механизм мониторинга, комплексная деятельность кафедр, бизнес-единица образовательного учреждения, конкурентоспособность вуза, оценка эффективности деятельности кафедр, инструменты риск менеджмента

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность экономического развития страны во многом зависит от состояния кадрового потенциала, профессиональной, технической, экономической и научной подготовки специалистов. Это обязывает рассматривать высшую школу как институт государства и одновременно как институт рыночной экономики, обеспечивающий непрерывное предоставление широкого спектра образовательных услуг отдельным лицам и хозяйствующим субъектам.

Поскольку факторы макро- и микросреды во многом определяют тенденции развития бизнес-единиц вузов, вызывают не только количественные, но и структурные сдвиги в высшем образовании, их изучение становится необходимым условием формирования внутривузовских механизмов, позволяющих эффективно адаптироваться к условиям высокой динамики и низкой прогностичности внешней среды [2]. Следовательно, разработка и внедрение механизма, который позволил бы проводить комплексную оценку деятельности кафедры, становится необходимым условием для обеспечения конкурентной позиции на рынке образовательных услуг.

1. ОПИСАНИЕ ВАЖНЫХ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной целью выполнения проекта являлась разработка механизма мониторинга комплексной деятельности кафедры с целью обеспечения конкурентоспособности бизнес-единиц вуза.

Данный механизм был разработан на базе ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» и послужил алгоритмом для создания программного продукта мониторинга комплексной деятельности кафедры [3].

Отличительной особенностью разработанного механизма мониторинга комплексной деятельности кафедр является установление системности всех видов ее деятельности.

Оптимальная взаимосвязь всех бизнес-процессов формирует системный уровень или бизнес-систему. Каждое из вышеперечисленных направлений деятельности в итоге создает единую стратегию управления, результатом которой является формирование общего рейтинга кафедр и вуза в целом [4].

Данный механизм позволяет оценить эффективность кафедры поэтапно:

1. Проведение конкурентного анализа.
2. Сбор исходной информации об объекте управления.
3. Оценка эффективности деятельности кафедр, формирование рейтинга кафедр и определение нормативных значений по каждому показателю деятельности.
4. Принятие определенных управленческих решений, направленных на разработку возможных мероприятий по повышению эффективности комплексной деятельности кафедр, в том числе по отдельным показателям, а также определение задач и приоритетов развития кафедр на ближайшие 5 лет.

Одним из этапов оценки эффективности комплексной деятельности кафедры является оценка экономической эффективности портфеля образовательных программ, представляющим собой качественный и количественный анализ параметров образовательной деятельности.

На основании количественного анализа предполагается заполнение матрицы сегментации образовательных продуктов (образовательных программ) [5]. Качественный анализ предполагает анализ контингента абитуриентов, студентов и выпускников по всем реализуемым образовательным программам.

В качестве инструментов проведения анализа эффективности были выбраны инструменты стратегического менеджмента: BCG-анализ и SWOT-анализ [6].

Проводить оценку портфеля образовательных программ необходимо с учетом способа финансирования. Для оценки ОП реализуемых на платной основе предполагается оценка объема прибыли, а также оценка рентабельности реализации образовательных услуг. По результатам анализа можно распределить все реализуемые ОП по четырем основным квадрантам (согласно методике матрицы, BCG). Пример матрицы представлен на рис. 1.

		Наименование	Объем продаж	Наименование	Объем продаж	
Темп роста	Высокий (больше 10%)	ТРУДНЫЕ ДЕТИ		ЗВЕЗДЫ		
		А	х			
		Б	х			
	ИТОГО		-	ИТОГО		-
	Низкий (меньше 10%)	СОБАКИ		ДОЙНЫЕ КОРОВЫ		
		С	х	Д	х	
			Е	х		
ИТОГО		-	ИТОГО		-	
		Низкая (меньше 1)		Высокая (больше 1)		
Относительная доля рынка						

Рис 1. Матрица БКГ по объёму продаж образовательных программ кафедры.

Анализ по объему продаж позволит судить о перспективах развития деятельности бизнес-единицы вуза, а анализ по объему прибыли - о возможности инвестиций и о сбалансированности портфеля образовательных программ [7].

По результатам анализа необходимо выбрать стратегию дальнейшего развития.

После анализа графика необходимо сбалансировать категории для повышения продаж и прибыли. Нормальным считается, когда высшие позиции занимают «Звезды» и «Дойные коровы», так как они приносят больше всего капитала. Допустимо наличие «Трудных детей» как будущей замены для высших товаров. Для сбалансированного портфеля не характерно наличие «Собак».

Схожий алгоритм предлагается для проведения анализа реализуемых образовательных программ финансируемых за счет бюджетных денежных средств.

Данная матрица позволяет оценить эффективность выполнения контрольных цифр приема и при необходимости определить причину их невыполнения.

Сводная матрица SWOT-анализа формируется с учетом специфики деятельности кафедр [8]. Были выделены основные свойства образовательной программы/результата НИД и сформирован список показателей, с помощью которых предполагается оценивать перечисленные свойства.

Результатом комплексного анализа будет являться:

- выстроенная стратегия продвижения образовательных программ кафедры;
- прогноз сценария развития кафедры;

Результаты проведенного анализа могут быть использованы в качестве одного из инструментов риск-менеджмента.

2. РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ ПРОДУКТУ

Разработанный программный продукт, в основе которого лежит механизм мониторинга комплексной деятельности кафедры, решает задачи в трех подсистемах: «Учебная (образовательная) деятельность», «Научно-исследовательская и инновационная деятельность» и «Анкетирование заведующего кафедрой» [9].

Пример требований к программному продукту был разработан на основе показателей кафедры Менеджмента в энергетике и промышленности ИнЭИ НИУ «МЭИ».

Автоматизированная система «Комплексная деятельность кафедр» предназначена для всестороннего информационно-аналитического обеспечения и проведения оценки эффективности деятельности кафедры образовательного учреждения в области учебной (образовательной), инновационной и научно-исследовательской деятельности.

В области учебной (образовательной) деятельности выстроена автоматизация заполнения данных и консолидация информации по всем образовательным программам и формам обучения, а также по контингенту поступающих, обучающихся и выпускников кафедры. Данные для мониторинга подгружаются в разработанную программу из автоматизированной информационной системы, являющейся программной реализацией балльно-рейтинговой системы для студентов НИУ «МЭИ» (ЭлМЭИ/барс).

В области инновационной и научно-исследовательской деятельности предполагается автоматизация заполнения данных и консолидация информации в итоговую таблицу по научно-исследовательской и инновационной деятельности с расчетом эффективности реализации продукта. Эффективность реализации продукта рассчитывается автоматически через долю/R действующих продуктов в бюджете кафедры.

Подсистема «Анкетирование заведующего кафедрой» решает задачи:

- заполнения SWOT-анализа кафедры (заполняет заведующий кафедрой);
- заполнения результатов оценки эффективности деятельности кафедры (заполняется автоматически) при возможности заполнения комментариев (заполняет заведующий кафедрой);
- возможности заполнения опроса по результатам оценки эффективности комплексной деятельности кафедры (заполняет заведующий кафедрой).

Критерии оценки уровня эффективности комплексной деятельности кафедры должны быть прописаны в систему «Комплексная деятельность кафедр», которая рассчитывает данные показатели автоматически и тем самым формирует рейтинг кафедр от самого низкого до самого высокого значения. Уровни: Низкий, Средний и Высокий.

Результаты рейтинга будут доступны в личных кабинетах высшего звена управления и заведующих кафедрами в ИС «РУР-ПКР».

Внедрение системы «Комплексная деятельность кафедр» в ИС «РУР-ПКР» и автоматизация загрузки необходимых данных осуществляется из электронной информационно-образовательной среды МЭИ: РУР «ПКР», БАРС, Электронный МЭИ, КвИдей, Бухгалтерия, Приемная комиссия (сайт), Кабинет ГЭК, ИС Студент, ИС Кадры, ИС Трудоустройство и практики, Иностранный деканат и т.д.

Конечным результатом от разработанной программы будет являться сформированный рейтинг кафедр образовательного учреждения на основе результатов эффективности комплексной деятельности кафедры в области учебной (образовательной), научно-исследовательской и инновационной деятельности.

Оценка экономической эффективности реализации образовательных программ кафедры как одно из направлений деятельности стратегического звена управления предполагается посредством внедрения «Ситуационного центра» в организационную структуру института.

Также предполагается визуализация результатов анализа с возможностью использования инструмента «что если». Данный инструмент позволит прогнозировать сценарии развития и моделировать деятельность кафедры с учетом рисков.

Потенциальными потребителями и пользователями разработанного программного продукта являются образовательные учреждения во главе с заведующими кафедрами и сектор реальной экономики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе особое значение в развитии государства приобретают вопросы образовательной политики. Развитие цивилизованных рыночных отношений неразрывно связано со становлением и развитием рынка образовательных услуг. Очевидно, что на современном этапе развития общества, образование все чаще относят к сфере услуг, следовательно, образовательное учреждение в связи с этим рассматривается как предприятие, оказывающее образовательные услуги. Таким образом, предприятие, стремящееся выжить или улучшить свое конкурентное положение на рынке, должно постоянно совершенствовать способы организации и управления бизнес-процессами.

Разработанный программный продукт, в основе которого лежит механизм мониторинга комплексной деятельности бизнес-единиц вуза, позволяет эффективно оценить деятельность кафедры как комплексно, так и по каждому виду ее деятельности.

Применение разработанного механизма дает возможность оперативно вносить изменения в образовательную, научно-исследовательскую и инновационную деятельность кафедры, определять востребованность специальностей и, как следствие, усовершенствовать содержания программ, методик повышения квалификации преподавателей, обеспечивать рост уровня подготовки студентов, уровень квалификации преподавателей и финансового обеспечения кафедры.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования был решен ряд задач:

- проанализирована современная научная литературы по проблематике исследования, выполнен патентный поиск;
 - выявлены особенности взаимодействия кафедр с другими подразделениями вуза и со смежными рынками;
 - выявлены проблемы эффективного функционирования кафедр;
 - проанализированы методы оценки эффективности деятельности кафедр;
 - разработана модель взаимодействия кафедры со смежными рынками;
 - разработана дорожная карта оценки эффективности деятельности кафедры;
 - разработан механизм мониторинга комплексной деятельности кафедр;
 - разработан программный продукт, оценивающий комплексную деятельность кафедр;
- ведется апробация исследования в ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Репин В.В.** Бизнес-процессы. Моделирование, внедрение, управление // М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017.

2. **Сандлер Д. Г. Ключев А.К.** Управление экономикой и финансами вуза: практики российских университетов: сб. / сост. Екатеринбург: Изд-во Урал. 2018. –250 с.

3. **Кетоева Н.Л., Заргарян М.Т., Сысоева Е.А.** Формирование эффективного механизма мониторинга комплексной деятельности кафедр, как бизнес-единиц университета в условиях цифровой экономики. Журнал «Экономика и менеджмент систем управления». №4, 2021. С. 36 – 43.

4. **Кетоева Н.Л., Лисин Е.М., Киселева М.А., Коркин В.С., Заргарян М.Т.** Разработка и структурный анализ модели организационного управления информационного взаимодействия субъектов научно-образовательного процесса. Экономика и предпринимательство. № 12. 2020. С. 957-961

5. **Ketoeva N.L., Kiseleva M.A. and Dranitsyna V.K.** Development of a Mechanism for the Management of University Research Activities Based on the Principles of Sustainable Development. International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021), 2021. P. 12. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129505007>.

6. **Ketoeva N.L., Kiseleva M.A. and Sysoeva E.A.** Digital Management of Department as a business-unit of educational institution. IV International Scientific and Practical Conference “Digital Economy and Finance” (DEFIN-2021). Saint Petersburg- Russian Federation, March 18 – 19, 2021. P. 1 – 6. URL:

https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3487757.3490863?casa_token=YvI8aVsQXmsAAAAA:aWfvN_pJs1zDFxVJdGZat96ZxC_SQvoWfpooGB53ALJ7DdcVba5TKi29kr-19207qL6sJ-Br1aai.

7. **Ketoeva N.L., Zargaryan M. T. and Volodina K. S.** An Interaction Model Development between the University and the Related Markets Elements. International Scientific and

Practical Conference on Sustainable Development of Regional Infrastructure (ISSDRI 2021). Yekaterinburg - Russian Federation, March 14 - 15, 2021, P. 707-713.

8. **Ketoeva N.L., Kiseleva M.A. and Volodina K.S.** The economic mechanism for evaluating the effectiveness of the university chair as a business unit of a higher educational institution. *Kreativnaya ekonomika*, 15(12), 2021. 4571-4584. doi: 10.18334/ce.15.12.113851.

9. **Ketoeva N.L., Kiseleva M.A., Zargaryan M.T. and Sysoeva E.A.** Project management in the higher education institution activity in terms of digital economy. *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 137. III International Scientific and Practical Conference "Digital Economy and Finances" (ISPC-DEF 2020). Saint Petersburg - Russian Federation, March 19-20, 2020, P.74 - 78.

Секция 3

Гидроэнергетика, ВИЭ и распределенная энергетика

Руководители:

**К.Т.Н. Курбатова Е.П.,
К.Т.Н. Лямасов А.К.**

С.И. Столбунов¹, И.С. Соколов², Е.М. Алешкова², А.В. Рыженков³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

АННОТАЦИЯ

Повышение эффективности работы систем теплоснабжения без сомнения относится к одной из важных исследовательских целей. В данной работе рассматривается один из методов повышения эффективности децентрализованных систем теплоснабжения, в том числе включающих ТНУ, основанный на внедрении системы управления на базе алгоритма с прогнозированием тепловых нагрузок здания. В рамках проведенных исследований также было рассмотрено влияние веса прогнозируемой температуры в теле алгоритма на его эффективность, а также проведено сравнение с системой теплоснабжения без алгоритма. Совокупное снижение затрат теплоты при работе наиболее эффективной версии алгоритма составило более 40%

Ключевые слова – теплоснабжение, алгоритм, теплонасосная установка, прогнозирование нагрузок, система управления

ВВЕДЕНИЕ

Теплоснабжение – один из наиболее энергоемких и масштабных секторов Российской экономики. Однако, при значительных масштабах централизованных систем теплоснабжения неизбежно возникают проблемы, связанные с изношенностью коммуникаций и оборудования, обеспечивающих функционирование системы. Кроме того, централизованное теплоснабжение не позволяет динамически регулировать нагрузки для разных объектов и учитывать их индивидуальные особенности, что приводит к перерасходу топлива и перетопам. В то же время для труднодоступных и удаленных населенных пунктов, к которым проведение централизованного теплоснабжения невозможно или нецелесообразно, также существуют проблемы с теплоснабжением, выражающиеся в сложности доставки топлива и низкой экономичности традиционных источников теплоты.

Энергообеспечение зданий при помощи теплонасосных установок (ТНУ), которые позволяют экономить электроэнергию, отбирая тепловую энергию от низкопотенциального источника тепловой энергии, может стать перспективным способом снизить потребление невозобновляемых энергоресурсов и повысить энергоэффективность сектора теплоснабжения. Их применение также актуально в труднодоступных и удаленных регионах, где, в комбинации с фотоэлектрическими преобразователями, ТНУ сможет обеспечить стабильную подачу теплоты необходимого температурного уровня.

Однако, стоит отметить, что ТНУ наиболее эффективны при использовании в комплексе с низкотемпературными системами отопления, так как их коэффициент трансформации напрямую зависит от разницы температур между низкопотенциальным источником тепловой энергии и температурой подачи в системе отопления. Применение таких систем отопления в условиях умеренно-континентального климата, характерного, к примеру, для

города Москва, требует определенного уровня энергоэффективности здания, что не всегда бывает экономически целесообразно, особенно если речь идет об административных зданиях. К другим проблемам ТНУ, возникающим из-за неблагоприятных климатических условий, можно отнести снижение эффективности ТНУ воздух-жидкость, которое возникает при низких температурах наружного воздуха, а также захлаживание почвы при работе ТНУ жидкость-жидкость (ТНЖЖ) с геотермальным контуром в условиях дисбаланса длительности отопительного и межотопительного периодов. Кроме того, существует необходимость использования традиционных пиковых электронагревателей для обеспечения тепловой нагрузки при температурах ниже -15°C , когда ТНУ не смогут обеспечить необходимый температурный уровень теплоносителя.

Влияние упомянутых выше проблем на эффективность системы теплоснабжения на базе ТНУ может быть снижено за счет внедрения системы управления на основе алгоритма с прогнозированием тепловых нагрузок и учетом зависимости коэффициентов трансформации ТНУ от внешних условий. Причем переход отдельно стоящих административных зданий на самообеспечение теплотой за счет использования ТНУ с системой прогнозирования тепловых нагрузок позволит дополнительно экономить электроэнергию за счет учета графика работы здания.

ПРИМЕРЫ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Прогнозирование тепловой нагрузки как на короткие промежутки времени [1], от нескольких часов до суток, так и на более длительные промежутки, вплоть до нескольких месяцев, получает всё больше внимания, в том числе благодаря активному развитию систем прогнозирования на основе нейросетей [2].

Тем не менее, использование нейросетей глубокого обучения с множеством скрытых уровней требует значительных объемов данных для обучения, а неточности в задании гиперпараметров могут привести к существенным ошибкам в результатах при высоких временных и трудовых затратах на процесс разработки и обучения подобной нейросети. Таким образом, учитывая особенности, характерные для разработки алгоритмов прогнозирования тепловой нагрузки при помощи нейросетей, исследователи [3] представили поверхностную нейросеть с одним скрытым уровнем и небольшим количеством гиперпараметров. При применении разработанной нейросети для оптимизации тепло- и электропотребления трех различных объектов - госпиталя, университетского кампуса, административного здания, было получено значение ошибки менее 10% при горизонтах обучения 28 дней для тепловой нагрузки и 14 дней для электрической нагрузки.

Однако, в упомянутой выше работе не проводилось оценки возможного снижения энергопотребления при использовании разработанного алгоритма, так как оценивалась лишь точность прогнозов. Но, к примеру, в работе [4] за счет использования централизованной модели прогнозирования для системы теплоснабжения на основе ТНУ в комбинации с фотоэлектрическими преобразователями было достигнуто снижение затрат на энергоснабжение на 31% по сравнению с базовым вариантом управления системой теплоснабжения, при условии сохранения комфортной температуры в помещении в течение более чем 85% времени симуляции. Стоит отметить, что основная экономия в данном случае достигалась на основе оценки целесообразности использования выработанной фотоэлектрическими преобразователями электрической энергии в конкретный момент вре-

мени для теплоснабжения, для продажи в общую сеть или же для сохранения на будущее в системе аккумуляции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе алгоритма лежит функция тепловой нагрузки, полученная при помощи моделирования исследуемого здания в программе EnergyPlus с пакетом расширения OpenStudio. При разработке алгоритма принимались во внимание особенности источников теплоснабжения, составляющих систему и зависимость их производительности от внешних факторов. Так, для ТНУ воздух-жидкость граничным условием является температура наружного воздуха, при которой температура подачи теплоносителя превышает температуру в обратном трубопроводе системы теплоснабжения менее, чем на 5°C, а для ТНУ жидкость-жидкость с геотермальным контуром, граничным условием стало значение температуры грунта, при котором температура подачи теплоносителя превышает температуру в обратном трубопроводе системы теплоснабжения менее, чем на 5°C.

Кроме граничных условий, явно выраженных в виде значений температур, в алгоритме также присутствуют функции, выражающие зависимость величины вырабатываемой тепловой энергии и коэффициента трансформации ТНУ от температуры наружного воздуха и температуры грунта соответственно для ТНУ воздух-жидкость и ТНУ жидкость-жидкость. Управление тепловой нагрузкой производилось дискретно для каждого из теплоисточников путем их включения/выключения. Таким образом, алгоритм позволяет использовать различные ТНУ в единой системе без необходимости дополнительной модификации, позволяющей динамически изменять температуру подачи теплоносителя.

Совокупность функций, составляющих собой тело алгоритма представлена в формуле (1):

$$\left. \begin{aligned}
 t_{out} &= f(t_{x1}, t_{x2}, t_{x3}, t_{x4}) \\
 Q &= f(t_{out}) \\
 Q_{HPAL} &= f(t_{CAL}, Q) \\
 t_{CAL} &= f(t_{out}) \\
 Q_{HPLL} &= f(t_{CLL}, Q) \\
 t_{CLL} &= f(t_{out}) \\
 Q_b &= f(Q_{HPAL}, Q_{HPLL}) \\
 \tau_{wHPAL}, \tau_{wHPLL}, \tau_{wb} &= f(Q_{HPAL}, Q_{HPLL}, Q_b, \tau_n), \text{ где}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

t_{out} – температура наружного воздуха, °C; $t_{x1}, t_{x2}, t_{x3}, t_{x4}$ – прогнозируемые температуры наружного воздуха в периоды времени x_1, x_2, x_3, x_4 соответственно, °C; Q – требуемая тепловая нагрузка, кВт; Q_{HPAL}, Q_{HPLL}, Q_b – тепловая мощность, вырабатываемая на ТНУ воздух-жидкость, ТНУ жидкость-жидкость и электрическом котле соответственно, кВт; t_{CAL}, t_{CLL} – температура подачи теплоносителя для ТНУ воздух-жидкость и ТНУ жидкость-жидкость соответственно; $\tau_{wHPAL}, \tau_{wHPLL}, \tau_{wb}$ – длительность периода работы для ТНУ воздух-жидкость, ТНУ жидкость-жидкость и электрического котла соответственно, с; τ_n – значение текущего момента времени, с.

Таким образом, на основе разработанного алгоритма работы были проведены экспериментальные исследования эффективности работы системы теплоснабжения на базе корпуса 23 НИУ «МЭИ». В рамках исследований регистрировались значения температур в помещениях здания, значения температур и расходов в прямом и обратном трубопроводе системы отопления, значения температур в скважинах геотермального контура, а также значения температур наружного воздуха. На основе полученных данных по температурам и расходам в системе отопления были получены зависимости тепловых нагрузок от времени работы системы. Оценка эффективности разработанного алгоритма проводилась путем сравнения относительных коэффициентов тепловых нагрузок для различных способов управления системой теплоснабжения. Относительный коэффициент тепловой нагрузки представляет собой отношение значения фактической тепловой нагрузки к теоретическому значению тепловой нагрузки. Таким образом, при величине относительного коэффициента тепловой нагрузки больше единицы имеет место перерасход тепловой энергии, а при величине меньше единицы имеет место экономия.

Для измерения температуры в скважинах геотермального контура использовались датчики температуры ТСП50П, расположенные с промежутком в 10 м по всей глубине скважины.

Измерение температуры теплоносителя в системе отопления, температуры в помещениях, а также температуры наружного воздуха проводилось с использованием датчиков температуры Pt1000.

Допустимая погрешность измеряемых температур составила:

- при измерении температуры грунта $\pm 1.5\%$;
- при измерении температуры наружного воздуха $\pm 2.5\%$;
- при измерении температуры теплоносителя на входе в тепловой насос $\pm 2.5\%$.

Допустимая погрешность измеряемых расходов составила:

- при измерении расхода теплоносителя в системе отопления $\pm 1\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате проведения экспериментальных исследований были получены величины относительных коэффициентов тепловой нагрузки, представленные на рисунке 1.

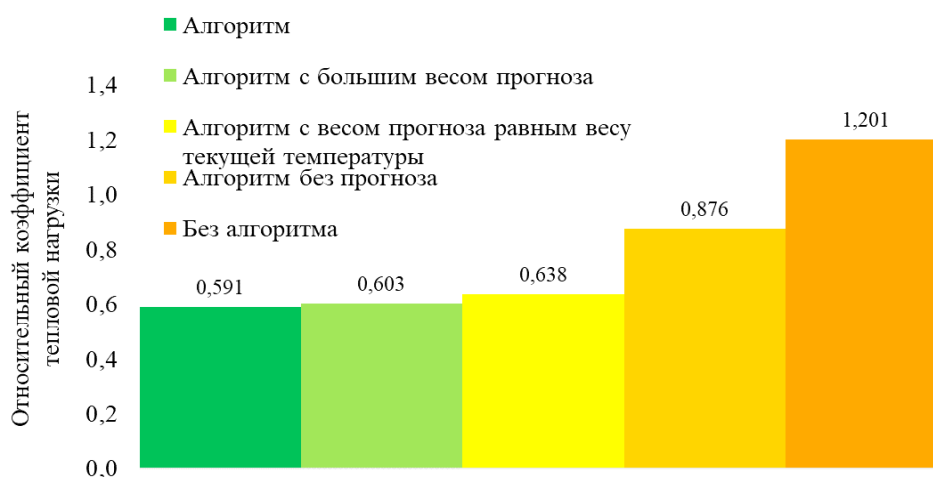


Рис. 1. Величина относительного коэффициента тепловой нагрузки для различных условий работы системы теплоснабжения

Теоретические значения тепловой нагрузки, используемые для вычисления относительного коэффициента тепловой нагрузки, были получены на основе данных моделирования системы теплоснабжения здания в программном комплексе OpenStudio на основе 3D-модели здания, созданной при помощи программного продукта SketchUp.

Значения относительных коэффициентов тепловой нагрузки получены на основе не менее десяти суток работы системы теплоснабжения. При работе без алгоритма наблюдался заметный перерасход тепловой энергии, причиной которому послужила значительная инерционность системы. При этом после введения системы управления на основе алгоритма, даже при отсутствии прогнозов тепловой нагрузки, наблюдается экономия порядка 13.6% тепловой энергии. В данном случае экономия выражается в более эффективном распределении тепловой нагрузки в соответствии с изменениями температуры наружного воздуха, однако, так же, как и в случае с вариантом без алгоритма, высокая инерционность не позволяет получить наиболее значимый эффект.

Варианты с весом прогноза равным весу текущей температуры ($t_x/t_{out} = 1$), а также с увеличенным весом прогноза ($t_x/t_{out} = 2$) показывают более значительное повышение эффективности, так как позволяют прогнозировать изменение тепловой нагрузки в течение рабочего дня.

Тем не менее, наиболее эффективным оказался вариант с наибольшим весом прогноза ($t_x/t_{out} = 4$), который позволял достичь наибольшей экономии при сохранении комфортного температурного режима здания, $t_{sp} = 21 \pm 0.5^\circ\text{C}$.

На рисунке 2 представлены зависимости средней температуры в помещениях и температуры наружного воздуха от времени суток при работе алгоритма.

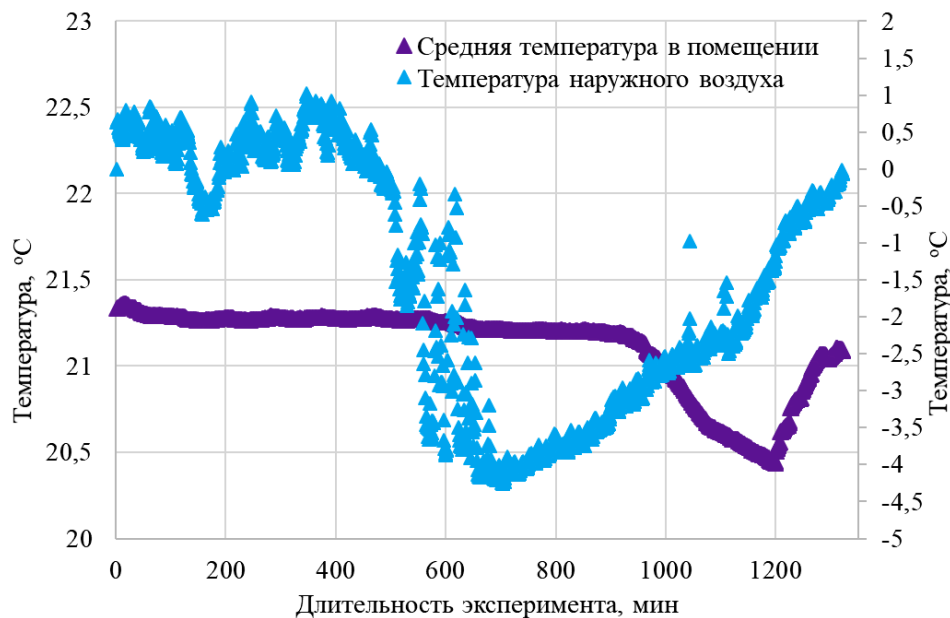


Рис. 2. Изменение средней температуры в помещениях и температуры наружного воздуха в течение суток

Стоит отметить, что нулевой отметкой в данном случае является время 8:00, таким образом снижение температуры происходит после 22:00, когда здание покидают все работники. Экономия, полученная за счет снижения требований к температуре в периоды,

когда здание пустует, также учитывалась в расчете относительного коэффициента тепловой нагрузки.

Кроме того, в рамках проекта были проведены экспериментальные исследования по влиянию восстановления температурного потенциала на эффективность работы ТНЖЖ с геотермальным контуром. Среднее повышение температуры грунта составило порядка 4°C, что эквивалентно, согласно проведенной расчетной оценке, повышению производительности ТНЖЖ на ~9%. Кроме того, повышение температурного потенциала геотермального контура привело к снижению темпа захлаживания грунта в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшая экономия тепловой энергии в результате использования разработанного алгоритма составила 40,9%. Максимальный эффект был достигнут при наибольшем весе прогноза в температурном коэффициенте при расчёте тепловой нагрузки здания, однако стоит учитывать, что дальнейшее увеличение веса прогноза может иметь отрицательный эффект из-за вероятности ошибки в прогнозах. Отсутствие корректирующей величины текущей температуры может привести к выходу тепловой нагрузки за допустимые границы при возникновении заметных расхождений между прогнозами и фактическими значениями температур наружного воздуха.

Внедрение разработанного алгоритма в системы теплоснабжения, в том числе включающие в себя ТНУ, под управлением программируемых логических контроллеров позволит повысить их эффективность и конкурентоспособность при относительно невысоких капиталовложениях. При сравнении схемы теплоснабжения, разработанной в рамках проекта с предыдущей схемой, был получен срок, составивший 6 лет, в течение которого совокупные затраты на предлагаемый проект станут ниже, чем на исходную систему теплоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gu J., Wang J., Qi C., Min C., Sundén B.** Medium-term heat load prediction for an existing residential building based on a wireless on-off control system // *Energy*, Vol. 152, 2018. pp. 709-718.
2. **Lu C., Li S., Lu Z.** Building energy prediction using artificial neural networks: A literature survey // *Energy and Buildings*, Vol. 262, 2022. P. 111718.
3. **Manno A., Martelli E., Amaldi E.** A Shallow Neural Network Approach for the Short-Term Forecast of Hourly Energy Consumption // *Energies*, Vol. 15, 2022.
4. **Seal S., Boulet B., Dehkordi V.R.** Centralized model predictive control strategy for thermal comfort and residential energy management // *Energy*, Vol. 212, 2020. P. 118456.

Т.А. Золотарев¹, Е.А. Кущенко², Е.П. Курбатова³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

КИНЕТИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ СО СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена разработке электромеханического преобразователя, предназначенного для работы в качестве мотор-генератора кинетического накопителя энергии. Особенностью представленной конструкции является использование индукторного типа электрической машины, ротор которой выполняет роль маховика. Обмотка возбуждения является неподвижной и выполнена из высокотемпературной сверхпроводящей ленты, что позволяет добиться высоких энергетических показателей машины. В докладе представлены основные результаты, полученные при разработке конструкции мотор-генератора для КНЭ с запасаемой энергией 100 кДж: анализ механической прочности ротора, расчет магнитной системы, определение электрических параметров, а также анализ работы мотор-генератора в составе КНЭ.

Ключевые слова – высокотемпературный сверхпроводник (ВТСП), сверхпроводниковая обмотка, ВТСП машина, кинетический накопитель энергии, индукторная машина

1. ВВЕДЕНИЕ

Системы хранения энергии являются важной частью энергетических систем. Для распределенной энергетике аккумуляторы энергии являются обязательным звеном, обеспечивающим не только качество электроэнергии, но и надежность, благодаря работе в качестве резервных источников. В настоящее время существует большое разнообразие систем хранения энергии, среди которых можно выделить [1]: системы, предназначенные для длительной работы – к таким относятся водородные накопители энергии, гидроаккумулирующие станции, электрохимические аккумуляторы; системы для кратковременной отдачи мощности, используемые для компенсации колебаний мощности в сети – электрохимические аккумуляторы, сверхпроводящие индуктивные накопители, кинетические накопители энергии. Наиболее популярным методом хранения энергии являются аккумуляторы, что связано с их универсальностью, относительной дешевизной. КНЭ отличаются быстрой скоростью реагирования, позволяя эффективно сглаживать колебания мощности от долей секунды до десятков минут. Таким образом, применение КНЭ может позволить повысить скорость реагирования энергетической системы на изменение баланса между генерируемой и потребляемой мощностью, связанных, например, с использованием ВИЭ, основной проблемой которых является непостоянство вырабатываемой энергии, зависящее от погодных условий [2]. КНЭ могут быть эффективным решением для децентрализованных энергосетей. В зависимости от энергопотребления могут быть применены комбинированные установки для хранения энергии [3], состоящие из КНЭ (для кратковременных колебаний мощности) и электрохимических аккумуляторов (для продолжительного питания потребителей).

Целью работы является разработка конструкции электрической машины с для применения в качестве эффективного быстродействующего электромеханического преобразо-

вателя энергии (мотор-генератора) в составе кинетического накопителя энергии. Опубликованные научные результаты показывают, что применение ВТСП материалов в генераторах и двигателях для создания магнитного поля позволяет существенно увеличить удельные показатели машины, однако в основном такие машины разрабатываются для низкоскоростных применений. В данной работе исследуется работа индукторной машины с неподвижной ВТСП обмоткой, конструкция которой позволяет использовать ее для высоких скоростей, характерных для КНЭ.

2. КИНЕТИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Разрабатываемый мотор-генератор предназначен для применения в высокоскоростном типе КНЭ. Основными техническими требованиями, предъявляемыми к электрической машине, являются: высокая скорость вращения 10 000 - 30 000 об/мин; минимальные потери, особенно в режиме холостого хода (режим хранения КНЭ); высокая удельная мощность; высокий коэффициент мощности. На основе проведенного анализа научных источников, наилучшим вариантом для высокоскоростного мотор-генератора с применением ВТСП обмоток является индукторный тип электрической машины. В этом случае все обмотки располагаются на неподвижной части машины, что упрощает конструкцию сверхпроводящей обмотки возбуждения и систему охлаждения сверхпроводников.

В качестве объекта применения для разрабатываемой конструкции был выбран КНЭ с запасаемой энергией 100 кДж и номинальной скоростью вращения 10 000 об/мин. Принципиальная схема КНЭ (рис.1а) построена на основе полностью интегрированной конструкции с комбинированным магнитным подвесом [4]. Она состоит из маховика 1, внутри которого располагается мотор-генератор 2. Ротор электрической машины интегрирован в маховик, то есть маховик выполняет роль ротора и роль инерционной массы. Для уменьшения потерь при вращении используются магнитные подшипники 3,4. Мотор-генератор представляет собой индукторную машину с осевым магнитным потоком с 4-мя парами полюсов (рис.1б).

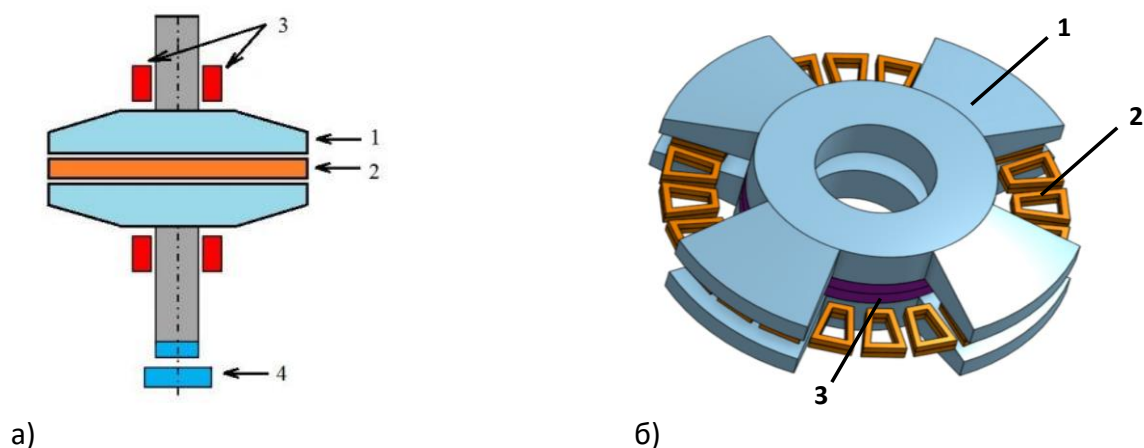


Рис. 1. Кинетический накопитель энергии: а) - принципиальная схема (1 – маховик; 2- мотор/генератор; 3 – ВТСП подшипники; 4 – опорный подшипник); б) – мотор-генератор (1 – ротор-маховик; 2) – обмотки статора; 3) – обмотка возбуждения)

3. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ РОТОРА ИНДУКТОРНОЙ МАШИНЫ

В разрабатываемой конструкции мотор-генератора ротор выполняет функцию маховика КНЭ и должен удовлетворять требованиям как по магнитным, так и механическим

свойствам. Для анализа механической прочности при работе мотор-генератора в составе КНЭ проведено моделирование методом конечных элементов в Comsol Multiphysics при номинальной скорости вращения 10000 об/мин. В качестве материала для маховика выбрана сталь 27КХ, условный предел текучести которой составляет 295 МПа. По результатам моделирования была выбрана форма полюсов, обеспечивающая запас прочности порядка 1,5.

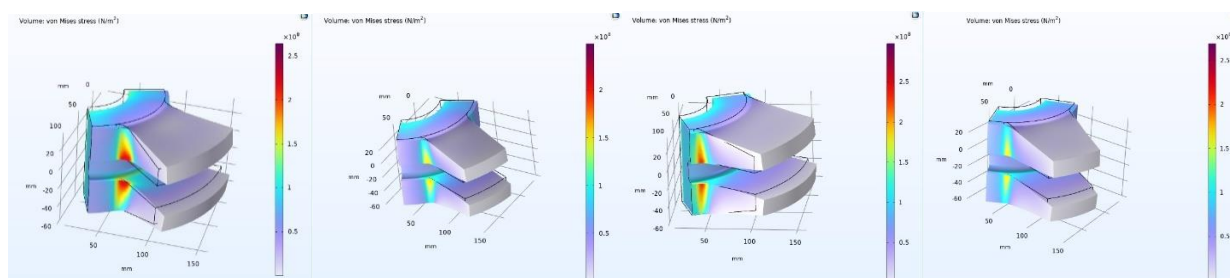


Рис. 2. Напряжение по Мизесу на роторе: а) – полюса с постоянным углом раскрытия; б) – прямые узкие полюса; в) прямые широкие полюса; г) – сужающиеся полюса

4. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА МОТОР-ГЕНЕРАТОРА

4.1. Модель магнитной системы мотор-генератора

Анализ магнитной системы разрабатываемого мотор-генератора проводился в программном комплексе для численного анализа электромагнитных полей EasyMag3D, построенном на методе пространственных интегральных уравнений. Магнитная система представлена на рис. 3. Ротор представляет собой стальной индуктор с 4-мя парами полюсов, формируемых за счет зубцов. При вращении поле в зазоре не меняет знак, а изменяется от максимального до минимального. Ротор состоит из двух дисковых половин с зубцами, между которыми размещаются неподвижные обмотки якоря и возбуждения. Обмотка якоря сосредоточенная трапецеидальная. На статоре магнитопровод отсутствует. Обмотка возбуждения имеет кольцевую форму и выполняется в виде катушек из сверхпроводящей ленты 2-го поколения.

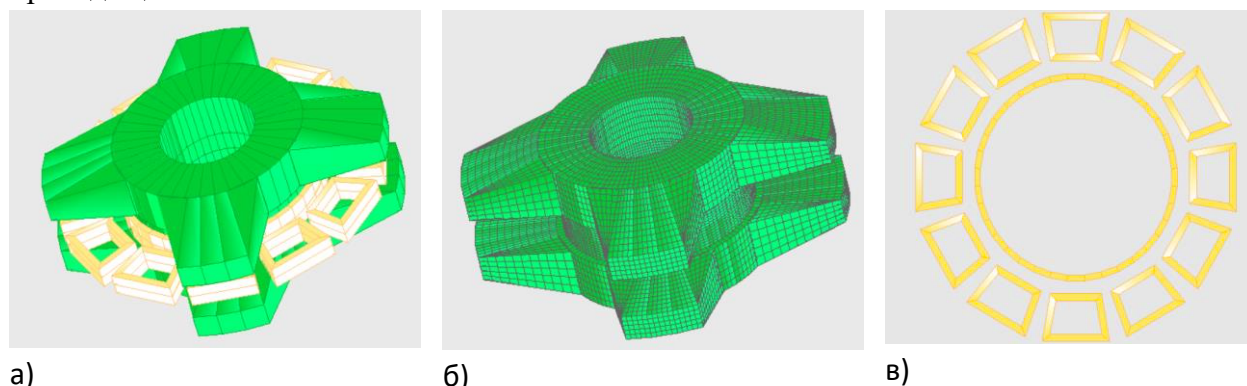


Рис. 3. Модель магнитной системы мотор/генератора в программе EasyMag3D: а) – полная модель; б) – ротор; в) – обмотки

4.2. Характеристики мотор-генератора

Для оценки электромеханического преобразования энергии в рассматриваемой конструкции были рассчитаны характеристики мотор-генераторов в виде зависимости момента, действующего на ротор, (для двигательного режима) и ЭДС ХХ (для генератор-

ного режима). Расчеты проводились в стационарном режиме без учета индуцированных токов, плотность тока по сечению обмоток однородна. Средняя по катушке плотность тока в обмотках якоря (импульсный режим работы) составляет $11,6 \text{ А/мм}^2$. Плотность тока в ВТСП обмотке возбуждения выбрана на основе расчета магнитного поля в области обмотки и сравнения с характеристиками материала. Для рассматриваемой конструкции допустимое значение плотности тока в ВТСП обмотке составляет 130 А/мм^2 . Материал ротора сталь 27КХ задан кривой намагничивания. Результаты моделирования показаны на рис.4.

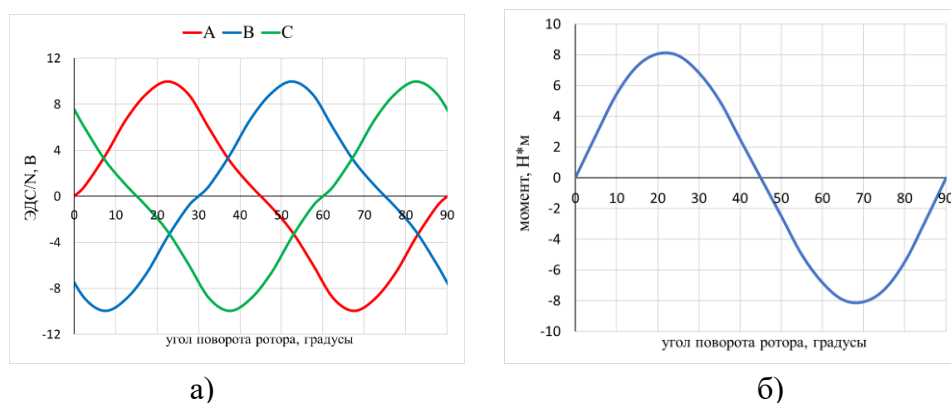


Рис. 4. Рассчитанные характеристики мотор-генератора в виде зависимости от угла поворота ротора: а) – ЭДС XX; б) – электромагнитный момент

5. АНАЛИЗ РАБОТЫ МОТОР-ГЕНЕРАТОРА В MATLAB/SIMULINK

Модель Matlab/Simulink для анализа работа мотор-генератора в составе КНЭ показана на рис. 5. Она состоит из электрической подсистемы - трехфазной модели мотор-генератора и механической подсистемы – маховика. Взаимосвязь электрической и магнитной подсистем обеспечивается за счет рассчитанных при анализе магнитной системы табличных функций потокосцепления. ЭДС определяется как $e = -d\Psi/d\varphi \cdot \omega$, момент, действующий на якорь $M = -d\Psi/d\varphi \cdot i$. Параметры обмоток определены на основе электромагнитного расчета: индуктивность $L=0,84 \text{ мГн}$, взаимная индуктивность $M=0,156 \text{ мГн}$, сопротивление $R=0,32 \text{ Ом}$. Число витков в обмотки якоря $N=28$. Моделирование проводилось для двух режимов – накопление энергии за счет разгона маховика до номинальной скорости $11\,000 \text{ об/мин}$, соответствующей 100 кДж (рис.6), и разряд накопителя в результате торможения за счет отдачи энергии на активную нагрузку (рис.7). Разгон маховика моделируется при отсутствии нагрузки (XX) подключением постоянного момента $6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ в механической подсистеме. До номинальной скорости маховик разгоняется за 32 секунды. При разряде КНЭ фазы мотор-генератора подключались к активному сопротивлению $R=4 \text{ Ом}$. Начальная скорость $11\,000 \text{ об/мин}$. За 6,5 секунды скорость уменьшается в 2 раза, что соответствует отбору 75% энергии.

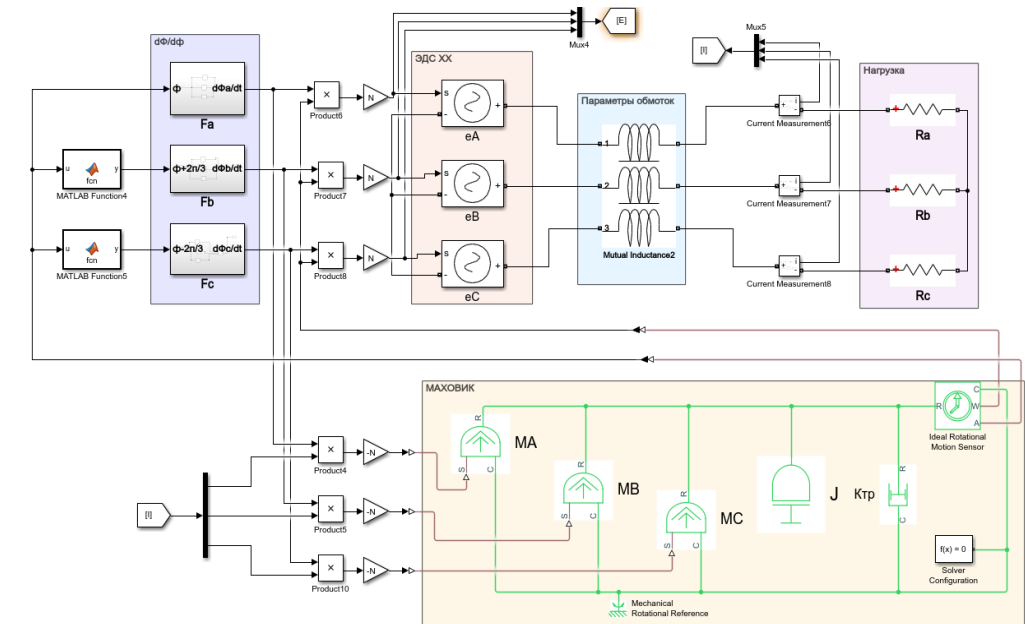


Рис. 5. Модель мотор-генератора с маховиком

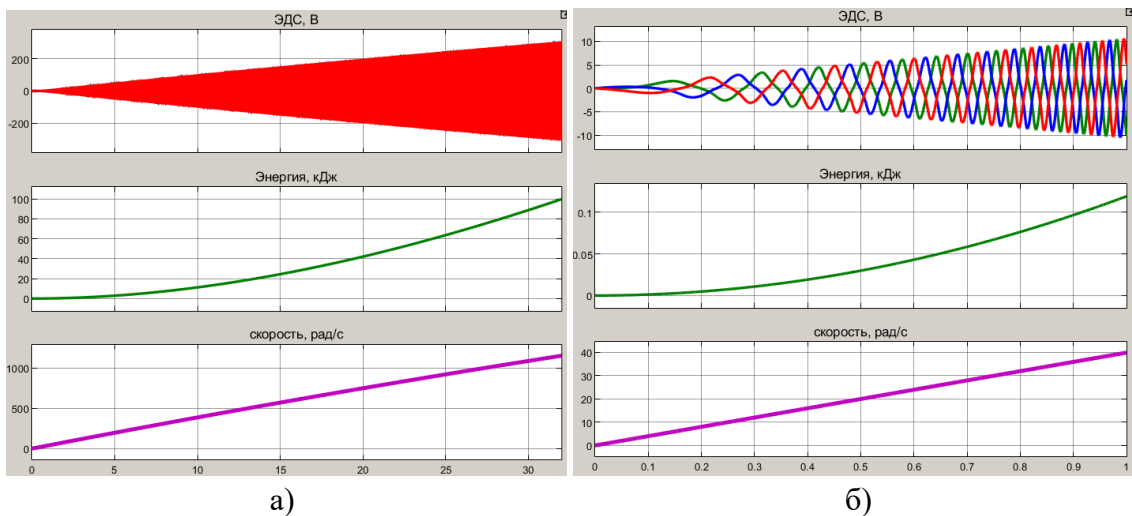


Рис. 6. Осциллограммы ЭДС ХХ запасенной энергии и скорости ротора при заряде (разгон с постоянным моментом: а) разгон до номинальной скорости; б) первая секунда)

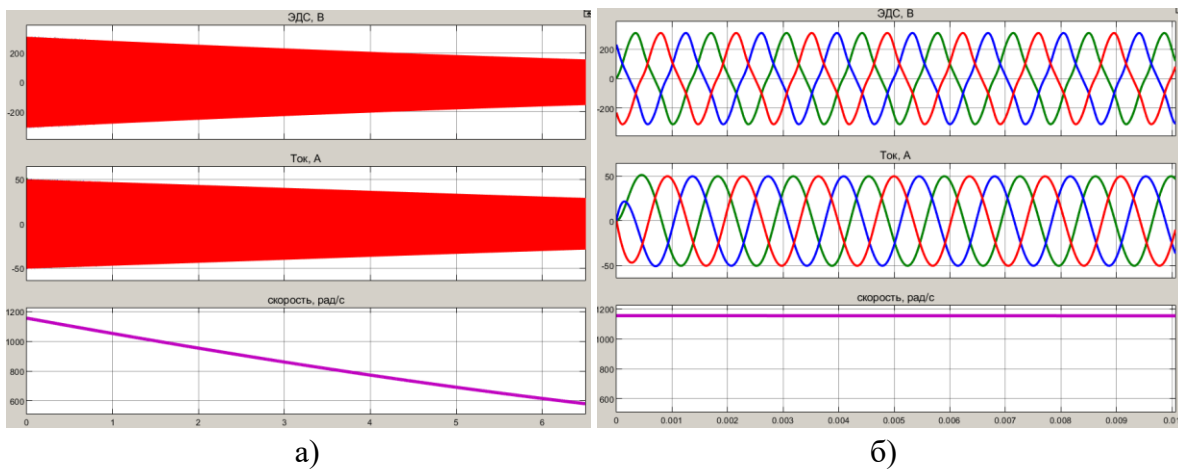


Рис. 7. Осциллограммы ЭДС ХХ, тока в фазах и скорости ротора при разряде (отдача энергии на активную нагрузку): а) – работа в течение 10 секунд; б) – первые 0.01 сек

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения проекта проведено исследование работы индукторной машины с осевым магнитным потоком и возбуждением от сверхпроводниковой обмотки возбуждения. Построены модели и выполнены расчеты и оптимизация магнитной системы, включая анализ по механической прочности ротора-маховика. Работа мотор-генератора в составе КНЭ проанализирована с помощью макромодели в Matlab, позволяющей моделировать преобразование энергии в мотор-генераторе с учетом инерции маховика.

В результате была разработана конструкция мотор-генератора для кинетического накопителя. Проработаны основные конструктивные особенности ротора и статора для возможности использования мотор-генератора в составе полностью интегрированной конструкции КНЭ, включая процесс сборки и крепления. 3D модель конструкции разработанного мотор-генератора показана на рис.8, полученные параметры электрической машины и КНЭ приведены в табл.1.

Таблица 1. Параметры мотор-генератора

Запасаемая энергия	100 кДж
Скорость	11 000 об/мин
Момент инерции маховика	0.15 Н*м
Мощность кратковременная/импульсная	12 кВт / 20 кВт
Напряжение (фазное)	220 В

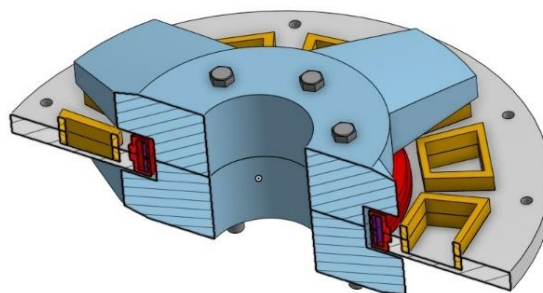


Рис. 8. 3D- модель разработанной конструкции мотор-генератора с ВТСП обмоткой возбуждения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **P. Kumar and V. Kumar**, "Energy storage options for enhancing the reliability of Power system in the presence of Renewable Energy Sources," 2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Coimbatore, India, 2020, pp. 1071-1076.
2. **M. Nadour, A. Essadki and T. Nasser**, "Power Smoothing Control of DFIG Based Wind Turbine using Flywheel Energy Storage System," 2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), Rabat, Morocco, 2020, pp. 1-7.
3. **P. Mouratidis, B. Schüßler and S. Rinderknecht**, "Hybrid Energy Storage System consisting of a Flywheel and a Lithium-ion Battery for the Provision of Primary Control Reserve," 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Brasov, Romania, 2019, pp. 94-99.
4. **P. Dergachev, A. Kosterin, E. Kurbatova and P. Kurbatov**, "Flywheel energy storage system with magnetic hts suspension and embedded in the flywheel motor-generator," 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2016, pp. 574-579.

*Е.Д. Зенько*¹, *Е.В. Конюшенко*², *О.Н. Молоканов*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ИССЛЕДОВАНИЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ МУЛЬТИПЛИКАТОРОВ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ОТНОШЕНИЕМ ДЛЯ НУЖД ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

АННОТАЦИЯ

В работе приведены результаты исследования магнитного мультипликатора с регулируемым передаточным отношением, позволяющего стабилизировать частоту вращения генератора в условиях непостоянной скорости вращения турбины. В рамках выполнения проекта создана методика проектирования, с помощью которой разработана магнитная система устройства мощностью 100 кВт, предназначенного для встраивания в системы передачи мощности и генерации электроэнергии ветроагрегата. Представлены результаты численного моделирования по методу конечных элементов, а также параметрической оптимизации геометрии магнитной системы с целью достижения минимальной цены единицы мощности при заданной тепловой нагрузке. На основании полученных результатов выполнена оценка стоимости активных материалов и сравнение с электромеханической системой прямого привода. Приведены результаты разработки 3D модели конструкции и анализа её технологичности и возможности применения в ветровых установках.

Ключевые слова – мультипликатор, магнитная передача, возобновляемая энергетика, ветроагрегат, редуктор, вариатор, удельный момент, специальные электрические машины

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для получения электрической энергии в основном используется углеводородное и ядерное топливо. Однако эти виды топлива являются не возобновляемыми ресурсами, а их использование и отходы загрязняют окружающую среду, в результате чего актуализировались вопросы создания электростанций на возобновляемых и экологически чистых источниках энергии. По оценкам экспертов ресурсы возобновляемых источников являются достаточно большими для того, чтобы в полной мере заменить существующие традиционные источники энергии [1].

Большим потенциалом использования в России обладают ветровые и малые гидроэлектростанции, однако их развитие затруднено в связи с наличием ряда проблем, на частичное решение которых нацелен настоящий проект. Основными проблемами являются:

1. Большие затраты на обслуживание и повышенные требования к надёжности оборудования, связанные с частым выходом из строя электромеханических систем в связи с повышенными динамическими нагрузками, характерными для возобновляемой энергетики.

2. Необходимость наличия мощных силовых электронных преобразователей для поддержания постоянной частоты напряжения электрогенератора при переменной скорости вращения турбины.

Одним из источников вышеуказанных проблем является механический мультипликатор, входящий в состав электроустановок возобновляемой энергетики и предназначенный

для повышения скорости вращения, передаваемой от турбины к электрогенератору. Он обладает относительно низкой надёжностью за счёт наличия зубчатого зацепления, а также не позволяет плавно регулировать передаточное отношение, что вызывает потребность в мощных преобразователях частоты. Актуальным решением этих проблем является замена на магнитный мультипликатор с регулируемым передаточным отношением, у которого отсутствуют вышеперечисленные недостатки механических аналогов [2]–[4].

Самой распространённой топологией магнитной передачи является коаксиальная магнитная передача, благодаря своей простоте и хорошим техническим данным [5]. Имея две степени свободы, данное устройство может выполнять функции дифференциального механизма, то есть способно разделять потоки мощности, получаемые от первичного двигателя, и тем самым обеспечивать постоянную частоту вращения выходного вала магнитного мультипликатора.

Принципиальная схема управляемого магнитного мультипликатора коаксиальной топологии приведена на рисунке 1. Устройство состоит из трёх соосных колец. Внутреннее кольцо состоит из магнитопровода 1, с расположенными на его внешней стороне постоянными магнитами чередующейся полярности 2. Среднее кольцо представляет собой стальные сегменты 3, выполняющие роль модулятора магнитного поля. Внешнее кольцо неподвижно и состоит из магнитопровода 4, в пазы которого уложена трёхфазная обмотка 5.

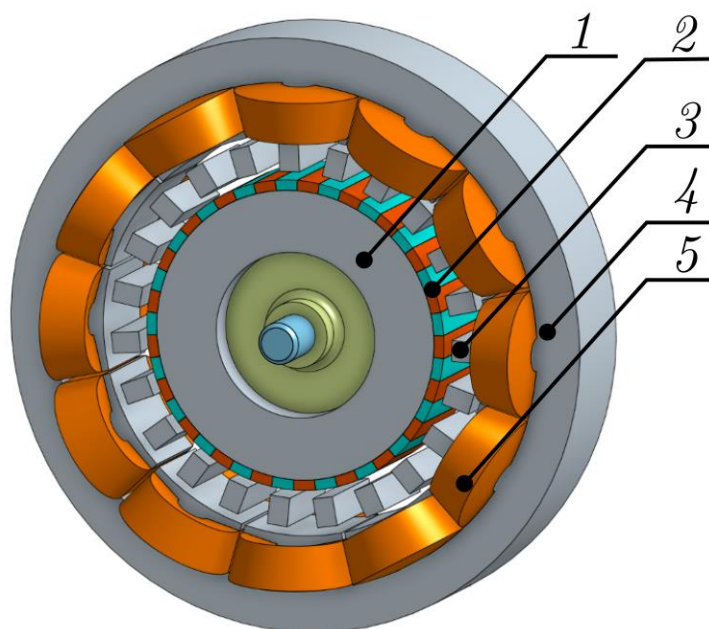


Рис. 1. Схема магнитного мультипликатора: 1 – магнитопровод внутреннего ротора, 2 – постоянные магниты, 3 – модулятор, 4 – магнитопровод статора, 5 – обмотка

Принципиальная компоновка ветроагрегата на основе магнитного мультипликатора с регулируемым передаточным отношением приведена на рис. 2.

Благодаря свойству дифференциала, поступающая от первичного источника мощность P разделяется на два потока: «магнитный» — через мультипликатор на вал генератора и «электрический» — через силовой электронный преобразователь в сеть. Основное

преимущество такого решения заключается в уменьшении массогабаритных показателей генератора за счёт повышения его частоты вращения с помощью мультипликатора, а также в уменьшении установленной мощности силовой электроники ориентировочно на 70 %. По литературным данным, стоимость последней может составлять до 22 % от стоимости системы генерации электроэнергии и около 10 % стоимости ВЭУ [6]. Это не только оказывает значительное влияние на стоимость установки, но и снижает её КПД вследствие потерь в электронных ключах, что негативно сказывается на цене вырабатываемой электроэнергии [7]. С другой стороны, параллельно с экономией на преобразователе частоты и генераторе появляется дополнительное устройство — магнитный мультипликатор. Для оценки экономической эффективности предложенного решения необходимо провести расчёт стоимости активных материалов всей системы передачи мощности и генерации электроэнергии ветроагрегата. На первом этапе исследования экономической эффективности выполнено проектирование мультипликатора и его оптимизация с целью достижения минимальной стоимости активных материалов.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО МУЛЬТИПЛИКАТОРА

В рамках работы составлена модель магнитного мультипликатора с регулируемым передаточным отношением мощностью 100 кВт в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*. Моделирование проводилось по методу конечных элементов в двумерном приближении с использованием ряда допущений: не учитываются электрические и магнитные потери; постоянные магниты задавались через относительную магнитную проницаемость и остаточную магнитную индукцию; не учитываются краевые эффекты и гистерезисные явления. На первом шаге согласно разработанной методике проектирования определены независимые размеры магнитной системы, обозначенные на рисунке 2, то есть получено начальное приближение. Далее проведена оптимизация с целью достижения минимальной цены единицы мощности по методу Нелдера — Мида по шести параметрам: высота спинки статора h_s ; высота и ширина зубца h_z , b_z ; высота и ширина стержня модулятора h_m , b_m ; высота магнитопровода индуктора h_r . Цены на активные материалы: электротехническая сталь — 1 €/кг, медь — 15 €/кг, ПМ — 100 €/кг, силовая электроника — 80 €/кг.

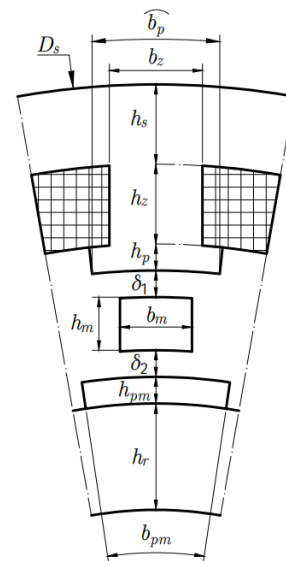


Рис. 2. Главные размеры магнитного мультипликатора

Результаты оптимизации приведены в таблице 1. Стоимость предложенной электромеханической системы составила 18,1 тыс. €, что примерно на 30 % меньше относительно системы прямого привода. Общая компоновка предлагаемой системы представлена на рисунке 3.

Таблица 1. Результаты оптимизации модели на 100 кВт

Описание	Значение
Внутреннее передаточное отношение, i_{rm}^s	6,71
Удельный момент, $\text{кН} \cdot \text{м} / \text{м}^3$	23,0
Аксиальная длина пакета l , мм	925
Статор	
Высота спинки статора h_s , мм	25,8
Высота зубца h_z , мм	43,5
Ширина зубца b_z , мм	27,5
Высота полюсного наконечника h_p , мм	43,5
Ширина полюсного наконечника b_p , мм	33
Ср. плотность тока в пазе J , $\text{А} / \text{мм}^2$	4,4
Ср. длина лобовой части l_{wo} , мм	132
Модулятор	
Высота стержня h_m , мм	55,3
Ширина стержня b_m , мм	28,9
Кол-во стержней	47
Внутренний ротор	
Ширина ПМ b_{pm} , % от полюсн. дел. инд.	75
Высота яра h_r , мм	36,1
Число пар полюсов	7

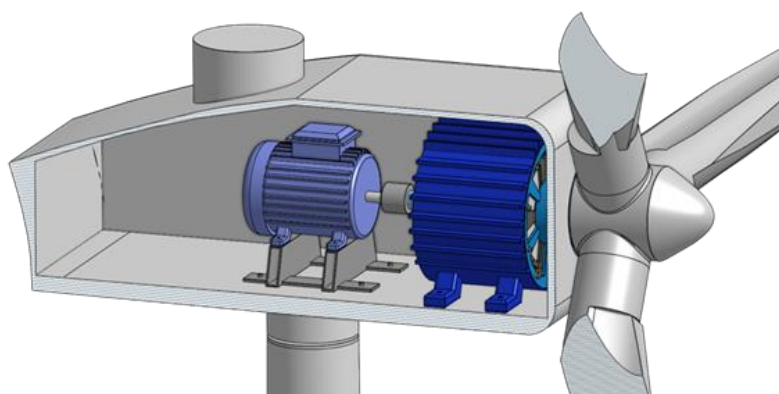


Рис. 3. Мультипликатор и генератор в гондоле ветроагрегата мощностью 100 кВт

3. СОЗДАНИЕ 3D-МОДЕЛИ МАГНИТНОГО МУЛЬТИПЛИКАТОРА

На основании полученной модели разработан вариант 3D-эскиза магнитного мультипликатора с регулируемым передаточным отношением мощностью 100 кВт, который показан на рис. 4.

Внутри оребрѐнного корпуса установлен кольцевой зубчатый магнитопровод, набранный из листов электротехнической стали. По окружности магнитопровода выполнены отверстия, в которые вставлены стягивающие шпильки, передающие усилие на торец пакета шихтовки через нажимные кольца. В пазах статора расположена трёхфазная сосредоточенная обмотка. Магнитопровод статора охватывает магнитопровод внешнего ротора. Сегменты стянуты по торцам шпильками через нажимные пластины. Одна из нажимных пластин выполнена заодно с тихоходным валом. Внутри внешнего ротора концентрично ему расположен внутренний ротор в виде цилиндрического пакета шихтовки, насаженного на быстроходный вал, с постоянными магнитами, расположенными на поверхности. Для опоры используется четыре подшипника качения.

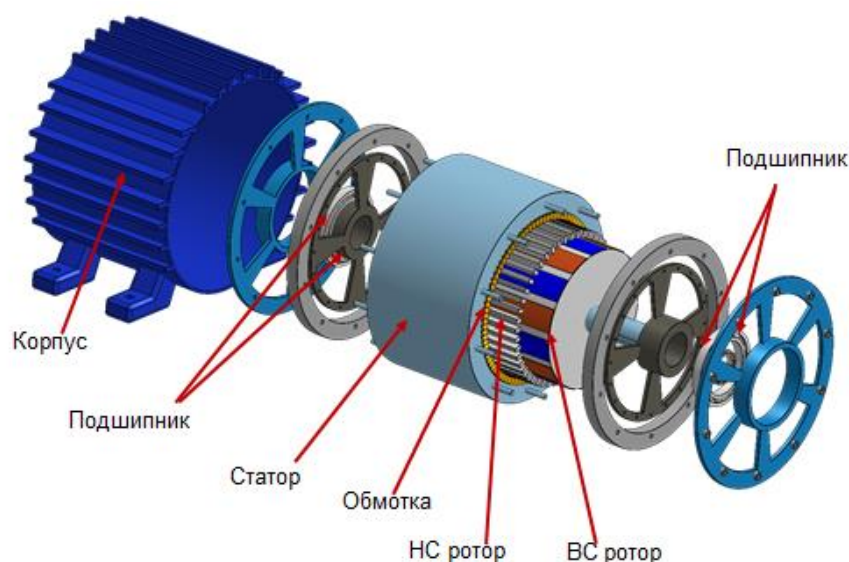


Рис. 4. 3D-эскиз мультипликатора мощностью 100 кВт

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования разработана методика проектирования магнитного мультипликатора с регулируемым передаточным отношением, а также созданы универсальные математические модели, позволяющие эффективно проводить оптимизацию магнитной системы. Разработанные модели и методики впервые позволили получить данные о предельных технико-экономических характеристиках устройства. Результаты моделирования показали, что использование предложенных подходов позволяет снизить цену системы генерации электроэнергии на 30 % по сравнению с системой прямого привода при сохранении высокого уровня надёжности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **K. Davey, T. Hutson, L. McDonald and G. Hutson** The design and construction of cycloidal magnetic gears // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017, pp. 1-6.
2. **K. Li, J. Bird, J. Kadel and W. Williams** A Flux-Focusing Cycloidal Magnetic Gear-box // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015.

3. **M. C. Gardner, M. Johnson and H. A. Toliyat** Comparison of Surface Permanent Magnet Coaxial and Cycloidal Radial Flux Magnetic Gears // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018, pp. 5005-5012.

4. **E. Park, C. Kim, S. Jung and Y. Kim** Dual Magnetic Gear for Improved Power Density in High-Gear-Ratio Applications // 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018, pp. 2529-2532.

5. **K. Atallah and D. Howe** A novel high-performance magnetic gear // IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, no. 4, pp. 2844-2846, July 2001.

6. **Hau E. Wind Turbines**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

7. **Polinder H. и др.** Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2006. Т. 21, № 3. с. 725–733.

В.В. Журавлева¹, Г.А. Кромм², С.П. Черепанов², А.В. Волков³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ БИОМИМЕТИКИ В РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе приводятся результаты по исследованию возможности применения отдельных биомиметических эффектов на функциональных поверхностях гидромашин. Исследовались следующие биомиметические проявления: «наросты» на плавниках горбатого кита и гидродинамический эффект «кожи акулы». Для этих эффектов частично были проведены оптимизационные исследования, дана оценка влияния этих эффектов на обтекание канонических областей типа «пластина» и «крыловой профиль», а также рассмотрены некоторые варианты их использования применительно к гидравлическим турбинам и центробежным насосам с целью увеличения их показателей качества. Полученные результаты основываются как на физическом эксперименте, так и на расчётах, проведённых в программных пакетах вычислительной гидродинамики «ANSYS CFX» и «AutoDesk CFD».

Ключевые слова – биомиметика, природоподобные технологии, вычислительная гидродинамика, гидравлическая турбина, центробежный насос, кожа акулы, плавник горбатого кита, обтекание пластины, крыловой профиль

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергетические и кавитационные показатели современных гидромашин достигли сравнительно высокого уровня. Однако, повышение эффективности процесса преобразования гидравлической энергии в механическую и наоборот является актуальной задачей в виду повсеместного использования гидравлических машин. Особенно в этом вопросе стоит учесть стремление современного общества к рациональному природопользованию, как приоритетному направлению развития науки и техники в Российской Федерации.

При рассмотрении динамической гидромашин за частую под её эффективностью подразумевают её общий КПД, который представляет собой интегральную оценку объёмных, гидравлических и механических потерь в машине. Т.е. цель поставленной задачи повышения эффективности заключается в необходимости снижения тех самых потерь в гидромашине. Одним из средств для достижения этой цели является идея заимствования тех или иных эффектов, механизмов или свойств у живой природы. Таким направлением развития технических систем занимается отдельная научная область – биомиметика.

Биомиметика является наукой, которая занимается изучением естественных биологических эффектов, процессов, механизмов, составлением и анализом их математических моделей, а также внедрением и адаптацией полученных моделей в технические системы. Иначе говоря, биомиметика нацелена на создание и развитие природоподобных технологий. В виду повышения общественного внимания к вопросам в области экологии окружающей среды и в связи с растущим энергопотреблением, эта научная область интенсивно развивается и охватывает множество отраслей, где результаты её деятельности успешно применяются. Например, лопасти ветрогенератора или турбины на приливной гидро-

станции, использующие эффект от наростов на плавниках горбатого кита, повысили выработку электроэнергии и улучшили показатели пуска агрегатов [3]. Также, благодаря применению на лопатках паровых турбин винглет, эффект от которых основан на характере парящего полёта некоторых птиц, имеется возможность повышать КПД ступени на 3% [1, 2]. Приведённые примеры ярко характеризуют перспективность применения в гидромашиностроении и смежных областях природоподобных технологий. Помимо повышения КПД за счёт применения различных биомиметических эффектов в гидромашинках можно достичь улучшения и других показателей качества, таких как снижение уровня вибрации и шума или устойчивость к кавитационной эрозии.

В этой работе исследуются два природных эффекта: «плавник кита» и «акуля кожи». Эффект от «плавника кита» обусловлен наростами на его передней кромке, которые позволяют улучшить обтекаемость тела, уменьшая величину вихревых и профильных потерь. Гидродинамический эффект «акульей кожи» за счёт особого рельефа влияет на структуру потока в области пограничного слоя и позволяет снизить гидравлическое сопротивление, а также улучшить виброакустические и кавитационные качества гидравлических машин.

Поскольку рассматриваемые эффекты обладают сложной динамикой процесса, то в первую очередь рассматривается обтекание канонических областей типа «пластина» и «крыловой профиль». С использованием пакетов вычислительной гидродинамики таких, как «ANSYS CFX» и «Autodesk CFD», моделируются процессы обтекания канонических областей с модифицированными поверхностями различных конфигураций, а на лабораторных стендах кафедры Гидромеханики и гидравлических машин им. В.С. Квятковского осуществляются физические эксперименты с целью подтверждения результатов компьютерного моделирования.

2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ «КОЖИ АКУЛЫ»

Тело акулы покрывает плакоидная чешуя, состоящая из пластинок, которые плотно перекрывают друг друга. Эти чешуйки ориентированы по направлению вдоль туловища – от головы к хвосту акулы. Каждая пластинка имеет бороздки на плоской поверхности и острый гребень, которые значительно уменьшают турбулентность приближённого потока и снижают сопротивление воды, образуя увеличенный пограничный ламинарный слой. При движении акулы плакоидные чешуйки приходят в движение и, гармонично взаимодействуя с потоком воды, позволяют хищнику быстро передвигаться в водной среде, причём непрерывно и практически бесшумно, т.к. уменьшение турбулентности потока позволяет снизить величину пульсаций давления и скоростей, что приводит к снижению уровня шума. Эффект чешуи акулы по снижению сопротивления воды неоднократно подтверждался в различных исследованиях [4 - 6].

Также гидродинамический эффект акульей кожи может успешно применяться для пассивного контроля эрозии функциональных поверхностей гребных винтов и гидродинамических машин при кавитации [7]. В указанной работе исследовалось влияние микроструктурированной риблевой твердой поверхности, напоминающей кожу акулы, на динамику схлопывания одиночного пузыря и эрозии, вызванной кавитацией.

Анализ публикаций позволяет сделать вывод, что эффект «кожи акулы» оказывает улучшает динамику процесса обтекания и может найти свое применение в проточных частях динамических насосов и гидротурбин. Например, на лопастях рабочих колёс, где

за счёт этого эффекта могут быть снижены профильные потери и величина гидравлического трения в межлопастных каналах. Однако, полный перенос сложной геометрии плакоидной чешуи на функциональную поверхность гидромашины представляется крайне трудоёмкой задачей, поэтому для достижения поставленной цели было принято решение прибегнуть к созданию имитационной модели «кожи акулы».

В имитационной модели естественная чешуя акульей кожи, имеющая довольно сложную геометрию, заменяется на «чешую», элементы которой представлены более простыми геометрическими формами с сохранением необходимого гидродинамического эффекта. С помощью программы компьютерного 3D-моделирования «SolidWorks» были подготовлены различные модели, имитирующие чешую акулы (рисунок 1). Габаритные размеры исследуемых чешуек, расположенных на обтекаемых пластинах, не превышают 5 мм. Влияние имитационных моделей на обтекание канонических областей оценивалось в пакете вычислительной гидродинамики «ANSYS CFX», который основан на методе конечных объёмов.

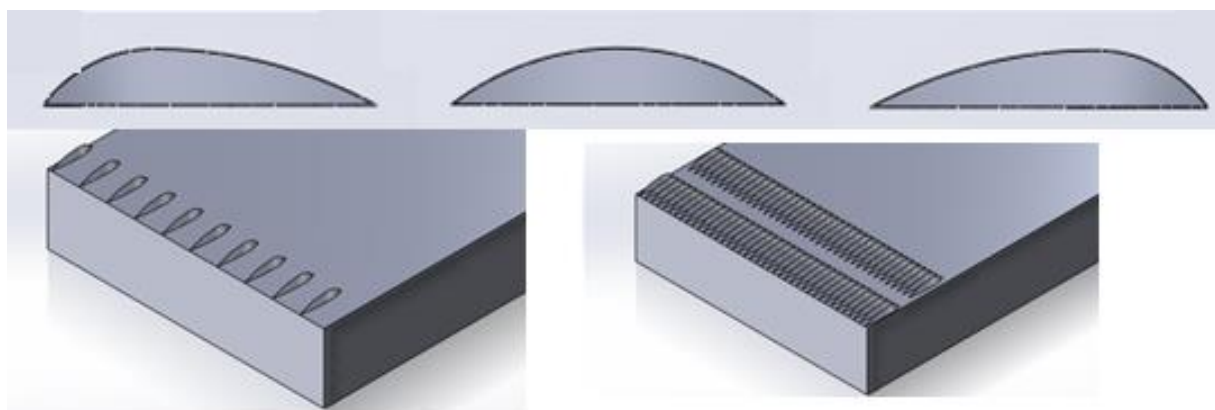


Рис. 1. Модели чешуек, имитирующих эффект «кожи акулы».

По результатам компьютерного моделирования процессов обтекания пластин были определены значения полных давлений на входе и выходе расчётной области. По полученным величинам оценены потери энергии потока при обтекании пластин. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при скоростях потока 10 м/с обтекаемая форма чешуек позволяет добиться снижения потерь энергии до 15% в сравнении с идеально гладкой пластиной.

Аналогичным образом был проведён ряд виртуальных экспериментов по определению влияния расположения чешуек по пластине на потери энергии при её обтекании. В случае с пластиной рассматривались варианты расположения двойного ряда чешуек на входной кромке, на выходной и посередине пластины. Анализ результатов данных экспериментов с пластинами показал, что наиболее эффективным является вариант расположения имитации кожи акулы на входной кромке в виду наличия там наибольшей турбулентности потока. Данный вариант расположения позволяет снизить потери полного давления на 5,4% в сравнении с контрольной гладкой пластиной при числе Рейнольдса около 90 000, а при $Re=900\ 000$ – на 3,9%.

Результаты, полученные в ходе исследования пластин с «кожей акулы» и без позволили перейти к исследованию данного биомиметического эффекта на функциональных поверхностях центробежных насосов. В качестве базового объекта был принят центробежный насос КМ-65-50-160, который широко распространён в современных системах

тепло- и водоснабжения. На рисунке 2 представлены различные варианты модификации рабочего колеса этого насоса. В ходе исследования работы различных рабочих колёс с разными вариантами модификаций было установлено, что максимальный положительный эффект имитация «кожи акулы» проявляет в области входной кромки лопасти насоса. В этом случае гидравлический КПД насоса в номинальном рабочем режиме увеличивается на 1,5%.

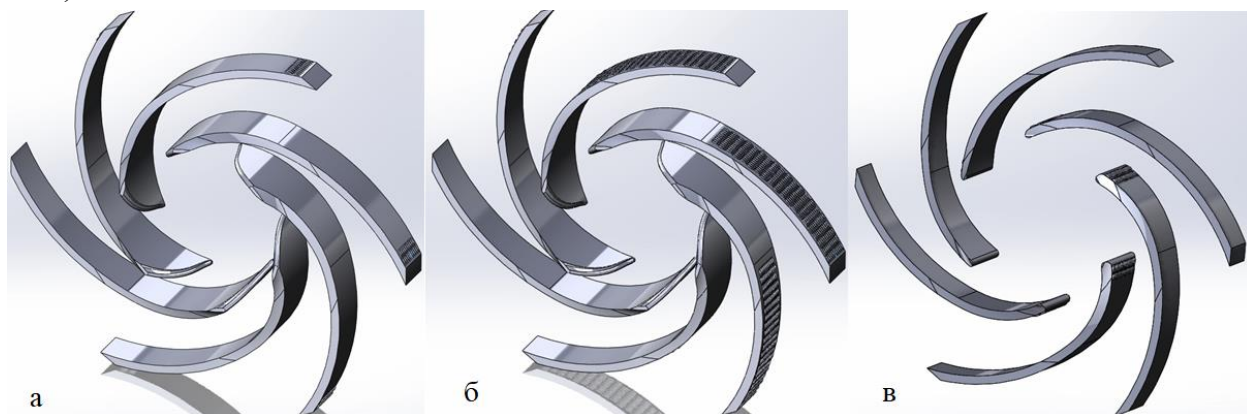


Рис. 2. Различные варианты рабочего колеса насоса КМ-65-50-160 с имитацией «кожи акулы»: а – на выходной кромке лопасти; б – по выпуклой стороне лопасти; в – на входной кромке лопасти.

3. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ «ПЛАВНИКА ГОРБАТОГО КИТА»

Исследования показывают, что наличие наростов на передней кромке, имитирующих наросты на плавниках горбатых китов, может положительно влиять на гидродинамические характеристики различных объектов. Например, представленная в публикации [3, 8] биомиметическая конструкция лопасти турбины, основанная на "бугристых" плавниках горбатых китов, может помочь ветряным электростанциям производить до 20% больше энергии и увеличить поток воздуха до 25% в промышленных вентиляторах и воздуходувках.

В программных пакетах компьютерного моделирования «Autodesk CFD» и «ANSYS CFX» исследовалось обтекание потоком жидкости исходной пластины и пластины с наличием нароста на передней кромке. Было проанализировано распределение скорости в спутном течении за пластиной толщиной 1 мм, а также рассмотрены различные конфигурации наростов (рисунок 3). Анализ полученных результатов показал, что наилучшим эффектом обладают парные наросты диаметром 3 мм со смещением расположения по толщине пластины. В этом случае удалось достичь снижения относительных гидравлических потерь более чем на 3,5%.

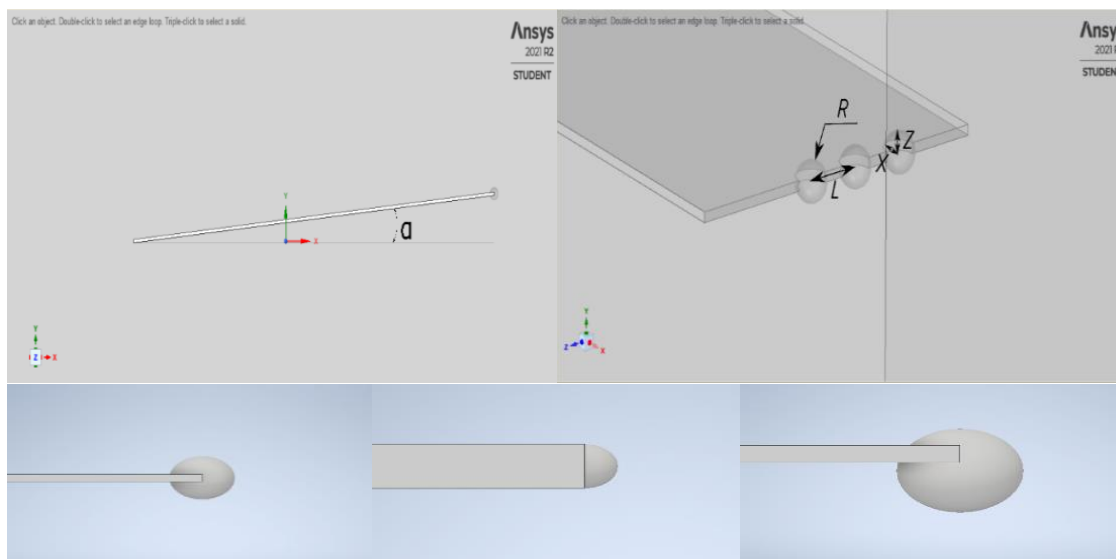


Рис. 3. Варианты форм и расположения наростов на пластине.

На основании полученных результатов по обтеканию пластин был проведен ряд экспериментов по моделированию потока во всасывающем патрубке микро-ГЭС с водоводом в виде сифона. Были рассмотрены две основные модели всасывающего патрубка, представленные в виде прямой трубы и конфузора, как с наличием наростов, так и без них (рисунок 4). Анализ результатов моделирования показывает, что применение наростов, имитирующих входную кромку плавника кита во всасывающем патрубке микро-ГЭС, в значительной степени снижает гидравлические потери. Применение наростов в составе конфузорного патрубка позволяет снизить величину потерь на 2,7%.

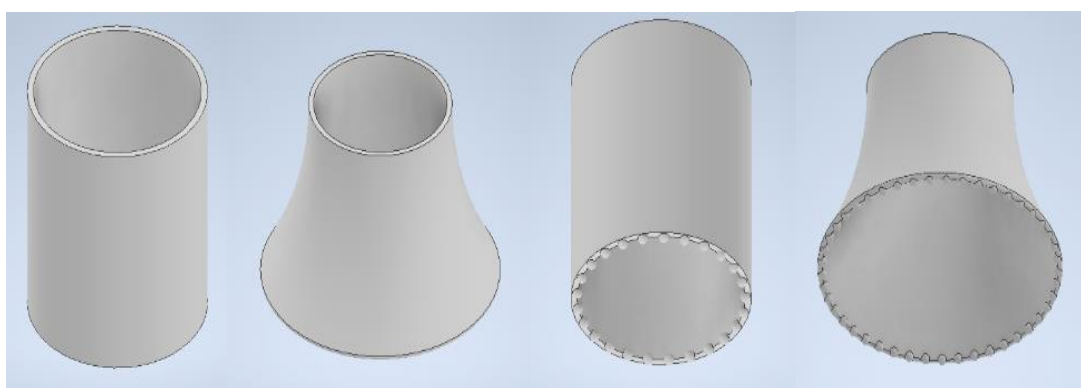


Рис. 4. Модели всасывающего патрубка для микро-ГЭС с водоводом в виде сифона.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая основные тренды развития современного общества, направленные к переходу в Индустрию 4.0, идея внедрения принципов биомиметики в гидромашиностроение имеет достаточно большой потенциал. Так, применение анатомических макро- или микроструктур животных на функциональных поверхностях гидромашин может улучшить качество обтекания лопастных систем, повышая их энергетические и кавитационные показатели в целом.

На примере исследования гидродинамического эффекта «акульей кожи» на пластинах и рабочих колесах центробежных насосов было установлено, что имитация акульей че-

шуи позволяет снизить величину потерь энергии при обтекании пластин до 15-20%, а в случае рабочих колес повысить их гидравлический КПД на 1-1,5%.

Использование наростов схожих с наростами на плавниках горбатого кита позволило снизить общие гидравлические потери при обтекании пластин, а в случае их применения на поверхности всасывающей трубы микро-ГЭС это позволило снизить относительные потери энергии в трубе на 2,7%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **М.Л. Живирихин, А.Е. Ремизов.** Параметрическое исследование винглета небандажированной рабочей лопатки. ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», 2018.

2. **М.Л. Живирихин, А.Е. Ремизов.** Оптимизационное исследование винглета небандажированной рабочей лопатки. ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», 2019.

3. **Weichao Shi, Roslyna Rosli, Mehmet Atlar, Rosemary Norman, Dazheng Wang, Wenxian Yang.** Hydrodynamic performance evaluation of a tidal turbine with leading-edge tubercles // *Ocean Engineering*. 2016 vol. 117. P. 246-253.

4. **Xia Pu, Guangji Li and Hanlu Huang.** Preparation, anti-biofouling and drag-reduction properties of a biomimetic shark skin surface. *Biology Open* (2016) 5, 389-396
doi:10.1242/bio.016899.

5. **Li Wen, J. C. Weaver and G. V. Lauder.** «Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function», *The Journal of Experimental Biology*, 2014, 217, 1656-1666.

6. **Domel, A. G., Saadat, M., Weaver, J. C., Haj-Hariri, H., Bertoldi, K., & Lauder, G. V.** Shark skin-inspired designs that improve aerodynamic performance. *Journal of The Royal Society Interface*, 15(139), 20170828.

7. **Kadivar, E., Moctar, O.E., Skoda, R., Löschner, U.** Experimental study of the control of cavitation-induced erosion created by collapse of single bubbles using a micro structured riblet (2021) *Wear*, 486-487, статья № 204087.

8. **Weichao Shi, Mehmet Atlar, Roslyna Rosli, Batuhan Aktas, Rosemary Norman.** Cavitation observations and noise measurements of horizontal axis tidal turbines with biomimetic blade leading-edge designs // *Ocean Engineering*. 2016 vol. 121. P. 143-155.

О.С. Кузнецова¹, Е.С. Трушин², А.Ю. Лихаева², С.В. Григорьев³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

О СОЗДАНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПЕРЕМЕННОЙ СМАЧИВАЕМОСТЬЮ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК НА НРТ

АННОТАЦИЯ

Одной из основных задач в энергетике является повышение надежности и эффективности теплообменных устройств теплотехнических установок. Теплообменное оборудование с фазовым переходом на низкокипящих рабочих телах (НРТ) широко используется как в традиционной, так и в возобновляемой энергетике. К основным целям повышения эффективности теплообменного оборудования относят уменьшение массогабаритных размеров, увеличение количества передаваемого тепла и снижение потребления электроэнергии на прокачку теплоносителя, которые достигаются за счет внедрения различных способов интенсификации теплообмена в теплообменном оборудовании. В статье предложен способ повышения эффективности теплотехнических устройств, основанный на использовании модифицированных поверхностей теплообмена. Также доказана возможность создания бифильной поверхности конструкционного материала с использованием лазерного оборудования и поверхностно-активного вещества (ПАВ). В результате проведения исследования был получен экспериментальный образец с бифильной поверхностью, у которой значения углов смачивания и скатывания для гидрофобных зон составляют 162° и 5° соответственно, а для гидрофильных зон – менее 10° и 90° соответственно.

Ключевые слова – низкокипящее рабочее тело, бифильность, медная поверхность, лазерная абляция, поверхностно-активное вещество, многомодальный рельеф

1. ОЦЕНКА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК НА НРТ

Одним из способов энергосбережения в энергетике и промышленности является повышение эффективности теплообменных аппаратов. Как правило, таким теплообменным аппаратам характерна высокая металлоемкость и значительные массогабаритные характеристики. Интенсификация теплообменных процессов при конденсации и кипении жидких сред позволяет повысить теплогидравлические и уменьшить массогабаритные характеристики теплообменного оборудования [1, 2].

На сегодняшний день наиболее перспективным способом интенсификации теплообменных процессов различных жидкостей является использование поверхностей теплообмена с переменной смачиваемостью (бифильные поверхности) [3-5]. Несмотря на существующие способы получения бифильных поверхностей [6-9], мировым научным сообществом был предложен и интенсивно развивается способ, основанный на формировании рельефа с использованием лазерного оборудования [10, 11].

Высокий интерес к данному способу вызван тем, что при лазерном воздействии на металлическую поверхность выполняется текстурирование разномасштабного рельефа, а за счет гибкого варьирования параметров лазерного излучения возможно с достаточной точностью контролировать характерные геометрические параметры формируемых текстур, обеспечивающие изменение краевого угла смачивания.

При конденсации теплоносителя на бифильных поверхностях наблюдаются разные режимы конденсации, пленочный и капельный соответственно. Таким образом, разные поверхности выполняют разные функции в процессе теплообмена [8, 9, 12]: на гидрофобной поверхности проходит процесс капельной конденсации, интенсифицирующий теплопередачу, гидрофильная же поверхность выступает в качестве транспорта жидкости, собирая капли с гидрофобной поверхности и не позволяя возникнуть на ней слою конденсата, который в свою очередь будет представлять собой дополнительное термическое сопротивление.

При кипении рабочего агента в испарителе гидрофобные области за счет создания на них рельефа увеличивают количество центров парообразования, гидрофильные же области ограничивают размеры пузырьков, образующихся на гидрофобной поверхности, интенсифицируя теплообмен [10, 11].

Важным аспектом применения различных способов интенсификации теплообменных процессов в теплообменном оборудовании является оценка возможности повышения эффективности их конструкций. Ранее авторами было проведено расчетно-параметрическое исследование изменения коэффициента полезного действия (КПД) ряда установок на НРТ, а именно: для теплонасосной установки (ТНУ), парожидкостной компрессионной установки (ПКХУ) с регенеративным теплообменником и турбины, работающей по органическому циклу Ренкина (ORC) [13]. Данное исследование проводилось для различных НРТ, теплофизические свойства которых определялись с использованием свободной библиотеки CoolProp. В результате выполнения расчетно-параметрического исследования эффективности установок на НРТ за счет интенсификации процессов кипения и конденсации было получено следующее:

- для ТНУ снижение температурного перепада на стенках конденсатора и испарителя на 5°C позволит повысить эксергетический КПД в зависимости от рабочего тела в среднем на 4 %;
- для ПКХУ снижение температурного перепада на стенках конденсатора и испарителя на 5°C приводит к повышению эксергетического КПД для различных НРТ в среднем на 8 %;
- для ORC с температурой НРТ после испарителя в состоянии насыщения, в области перегретого пара и органического цикла Ренкина с регенеративным теплообменником при снижении температурного перепада на стенках конденсатора и испарителя на 9°C – 12 %, 7 % и 10 % соответственно.

Таким образом, при интенсификации теплообменных процессов в конденсаторе и испарителе установок на НРТ достигается повышение эффективности рассмотренных теплотехнических устройств.

2. СОЗДАНИЕ БИФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В ходе проведения исследований были сформулированы основные этапы, последовательное выполнение которых позволяет создать бифильную поверхность. В настоящей работе достижение бифильных свойств поверхности экспериментальных образцов осуществлялось в три этапа:

- 1) Формирование рельефа с использованием лазерного оборудования;
- 2) Снижение поверхностной энергии с помощью формирования молекулярных слоев ПАВ на всей поверхности образца;

3) Локальное увеличение поверхностной энергии за счет локального удаления молекулярных слоев ПАВ с использованием лазерного излучения.

Для проведения исследований по достижению бифильных свойств функциональной поверхности в качестве экспериментальных образцов были использованы пластины размерами 40x40 и толщиной 1 мм, изготовленные из листовой меди М1т х/к. После изготовления медных пластин была выполнена очистка поверхности от различного рода загрязнений, которая осуществлялась с использованием этилового спирта с последующей промывкой дистиллированной водой с целью удаления остатков растворителя.

Формирование рельефа на медной поверхности осуществлялось с использованием лазерного комплекса FMark-20 NS-FB при следующих параметрах: мощность лазерного излучения составляла 15 Вт, частота импульсов была постоянна и составляла 20 кГц, скорость обработки – 100 мм/с. Данные параметры лазерного излучения были выбраны на основании анализа работ.

После процесса лазерной абляции на поверхности экспериментальных образцов с текстурированным рельефом в виде линий были сформированы молекулярные слои ПАВ с помощью разработанной и сконструированной установки, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

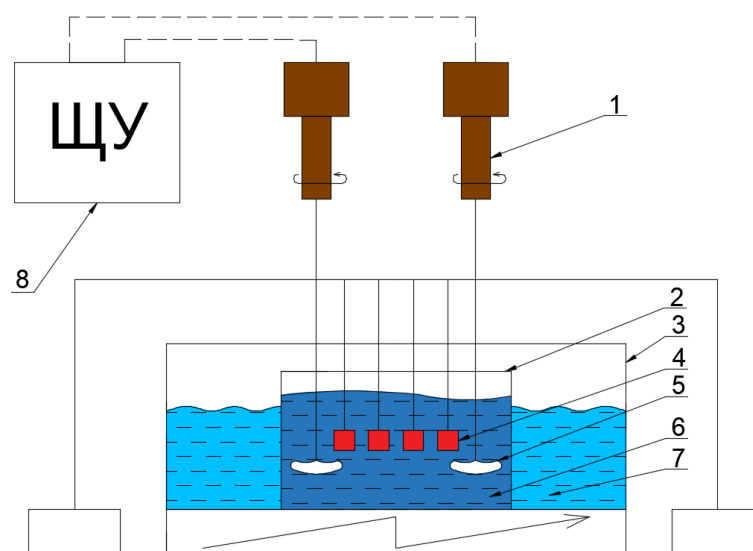


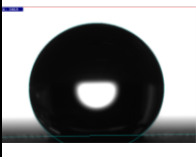
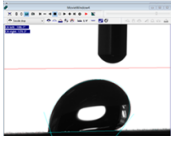
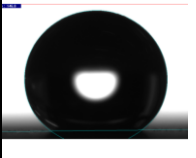
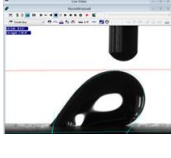
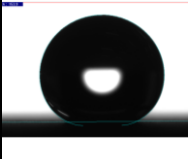

Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для формирования молекулярных слоев ПАВ на поверхности экспериментальных образцов: 1 – ротационное устройство с равномерным вращением, 2 – стеклянная емкость для формирования молекулярных слоев ПАВ, 3 – лабораторная водяная баня с электрическим подогревом жидкости, 4 – экспериментальный образец (медная пластина размерами 40x40x1 мм), 5 – лопатки для перемешивания эмульсии ПАВ, 6 – водная эмульсия ПАВ, 7 – вода дистиллированная, 8 – щит управления (ЩУ) ротационными устройствами

При проведении эксперимента водяная баня посредством электрических ТЭНов нагревается, затем в неё погружается стеклянная емкость, наполненная 3 л дистиллированной воды. При достижении температуры воды в сосуде 80°C [14] добавляется 45 мг октадециламина и активно размешивается с помощью лопаток, соединенных с ротацион-

ным устройством, до однородной эмульсии. После чего в эмульсию опускаются экспериментальные образцы и выдерживаются в течение 20 минут.

После полного высыхания образцов были определены углы смачивания и скатывания. Значения углов смачивания и скатывания были измерены с помощью прибора ОСА 20 (DataPhysics Instruments GmbH, Германия) с использованием капель дистиллированной воды объемом 5 и 30 мкл соответственно. Углы были измерены на трех различных модифицированных участках поверхности, при этом определялось среднее значение угла смачивания и скатывания. Значения углов смачивания и скатывания для гидрофобных участков модифицированных поверхностей экспериментальных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения угла смачивания для гидрофобных участков модифицированных поверхностей экспериментальных образцов

Рельеф	Угол смачивания		Угол скатывания	
	фотоснимок капли	значение, град	фотоснимок капли	значение, град
линии с шагом 100 мкм		162,3		5,03
сетка с шагом 100 мкм		144,4		9,87
сетка с шагом 100 мкм		152,6		7,45

Для создания на модифицированной поверхности экспериментальных образцов гидрофильных участков поверхность была локально текстурирована с использованием лазерного оборудования для удаления слоев ПАВ и получения гидрофильных участков при следующих параметрах лазерного воздействия: мощность лазерного излучения – 10 Вт; частота повторения импульсов – 1 кГц; скорость сканирования – 500 мм/с; шаг между проходами луча – 50 мкм.

С использованием описанного способа были изготовлены экспериментальные образцы, на поверхности которых были созданы гидрофобные и гидрофильные зоны с различными геометрическими характеристиками (см. рисунок 2). Тем самым подтверждена возможность создания гидрофильных участков на гидрофобной поверхности конструкционного материала различных размеров и разнообразной формы.

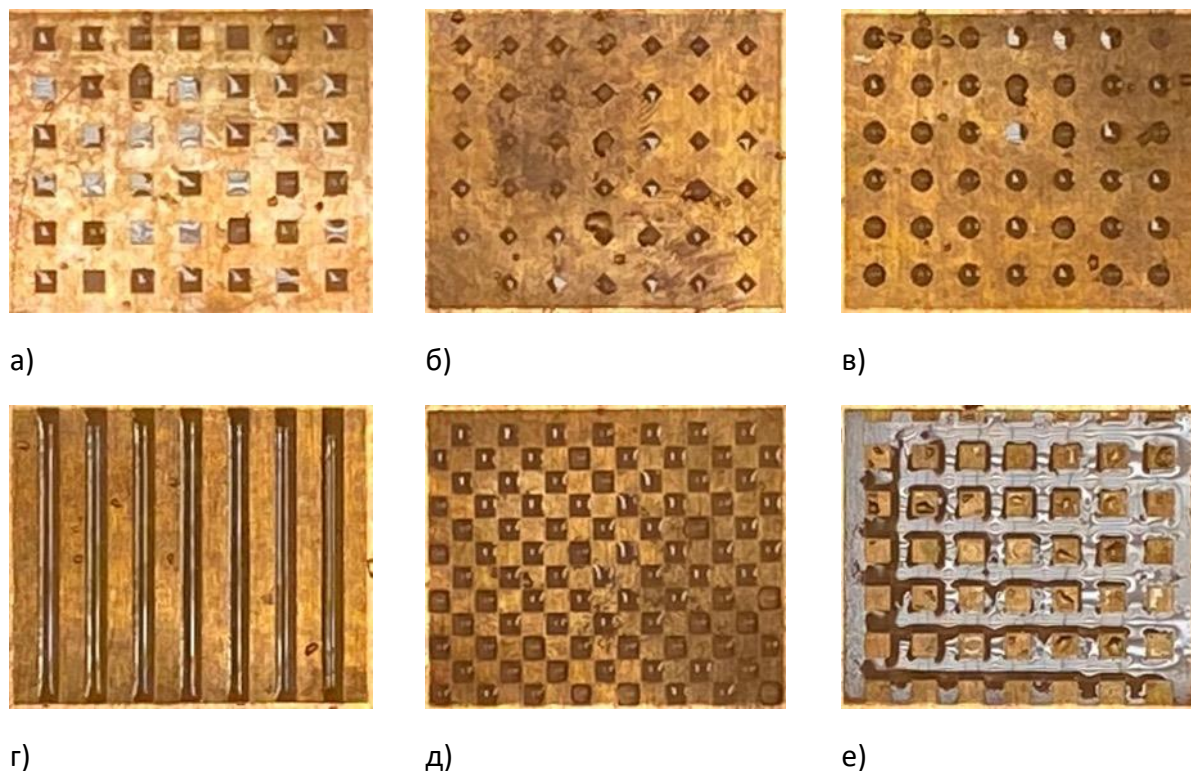


Рисунок 2 – Фотоснимки поверхности экспериментальных образцов №1 - №6 (а - е), полученных с использованием лазерного комплекса и водной эмульсии октадециламина

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования предложен способ повышения эффективности теплотехнических устройств, основанный на использовании бифильных поверхностей теплообмена. Также были сформулированы основные этапы, последовательное выполнение которых позволило создать поверхность с переменной смачиваемостью. Гидрофильные участки бифильной поверхности экспериментальных образцов были созданы при следующих оптимальных параметрах лазерного излучения: мощность лазерного излучения составляет 10 Вт, частота повторения импульсов – 1 кГц, скорость обработки поверхности материала – 500 мм/с и шаг между проходами луча – 50 мкм. Значения угла смачивания и угла скатывания для гидрофобных зон составляет 162° и 5° соответственно, а для гидрофильных зон – менее 10° и 90° соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Quan X., Chen S., Li J., Cheng P.** Enhanced dropwise condensation by oil infused nano-grass coatings on outer surface of a horizontal copper tube // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2018. № 91. P. 11-16.
2. **Wang Y.Q., Luo J.L., Heng Y., Mo D.C., Lyu S.S.** PTFE-modified porous surface: Eliminating boiling hysteresis // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. № 111. P. 104441.
3. **Yuan J., Wang Y., Xu J., Ji X., Xie J.** Convective dropwise condensation heat transfer in mini-channels with biphilic surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. № 134. P. 69-84.

4. **Pontes P., Cautela R., Teodori E., Moita A.S., Georgoulas A., Moreira A.** Bubble Dynamics and Heat Transfer on Biphilic Surfaces: Experiments and Numerical Simulation // *Journal of Bionic Engineering*. 2020. № 17. P. 809–821.

5. **Ryzhenkov A.V., Likhaeva A.Y., Grigoryev S.V., Dasaev M.R., Sokolov I.S.** Ways of Intensifying the Heat Exchange Processes in a Single-Well System for Subsoil Deep Thermal Energy Pickup and Transportation // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2020. № 68.11. P.33–48.

6. **Kofoed-Mandsberg N., Hansen O., Taboryski R.** Generation of micro-droplet arrays by dip-coating of biphilic surfaces; the dependence of entrained droplet volume on withdrawal velocity // *Scientific Reports*. 2017. № 7.

7. **Garimella M.M., Koppu S., Kadlaskar S.S., Pillutla V., Choi A.W.** Difference in growth and coalescing patterns of droplets on biphilic surfaces with varying spatial distribution // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017. № 505. P. 1065-1073.

8. **Xie J., She Q., Xu J., Liang C., Li W.** Mixed dropwise-filmwise condensation heat transfer on biphilic surface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. № 150. P. 119273.

9. **Yang K.-S., Lin K.-H., Tu C.-W., He Y.-Z., Wang C.-C.** Experimental investigation of moist air condensation on hydrophilic, hydrophobic, superhydrophilic, and hybrid hydrophobic-hydrophilic surfaces // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017 № 115, P. 1032–1041.

10. **Hou Y., Shang Y., Yu M., Feng C., Yu H., Yao S.** Tunable Water Harvesting Surfaces Consisting of Biphilic Nanoscale Topography // *ACS Nano*. 2018. № 12. P. 11022–11030.

11. **Ryzhenkov A.V., Dasaev M.R., Grigoriev S.V., Kurshakov A.V., Karandashev A.D., Mednikov A.F.** Experience in developing metal surfaces with controlled wettability and their efficiency estimation in installations based on low-boiling-point working fluid // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. P. 1240-1248.

12. **Shang Y., Hou Y., Yu M., Yao S.** Modeling and optimization of condensation heat transfer at biphilic interface // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. № 122. P. 117–127.

13. **Likhaeva A.Y., Grigoriev S.V., Trushin E.S., Dasaev M.R.** Computational parametric study on efficiency of low boiling point fluid plants under heat exchange process intensification // *E3S Web of Conferences. Energy Systems Research*. 2021. № 289. P. 06003.

14. **Рыженков В.А., Куршаков А.В., Анахов И.П., Калакуцкая О.В.** Пат. № RU2439204C1. Способ защиты поверхностей гидравлических систем от коррозии и накопления отложений. 2012.

*М.А. Бирюлин*¹, *К.Е. Денисов*¹, *А.К. Лямасов*²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

ОСНОВНОЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПОДЗЕМНОЙ ГАЭС ТОННЕЛЬНОГО ТИПА

АННОТАЦИЯ

Аккумуляция энергии является одной из самых важных задач, стоящих перед человечеством. В работе рассматривается новый вид гидроаккумулирующей станции, ее гидравлическая схема, подбор вспомогательного оборудования. Приводятся способы осуществления ремонтных работ и варианты компоновок основного силового оборудования, а также рассматривается способ повышения напора рабочих колес агрегатов ГАЭС с помощью многоярусных лопастных систем.

Ключевые слова – аккумуляция, ГАЭС, подземная гидроэлектростанция, многоярусная лопастная система, биплан, повышение напора

1. ВВЕДЕНИЕ

Аккумуляция энергии имеет очень важное значение для современного общества, так как от него зависит промышленность, экономика и комфорт населения страны. Множество ученых и инженеров трудятся над этой проблемой, изобретая всевозможные способы аккумуляции энергии, от систем сжатого воздуха до перезаряжаемых электрохимических батарей и водородной энергетики. Однако, на сегодняшний день в качестве крупных промышленных аккумуляющих систем все эти методы уступают гидроаккумулирующим электростанциям (ГАЭС) как по объемам запасаемой энергии и значениям циклов заряда/разряда [1], так по научно-техническому заделу [2].

При этом ГАЭС являются объектами энергетики со значительными ограничениями, ввиду имеющихся требований к наличию верхнего и нижнего бьефов, перепада высот, имеются трудности с реализацией проектов на равнинных территориях, к которым относится основная часть Европейской части России.

Чтобы обойти данные ограничения, авторами был предложен проект новой разновидности ГАЭС – подземной ГАЭС тоннельного типа [3]. Этот вид ГАЭС представляет из себя гидротехнический объект, у которого бассейны верхнего и нижнего бьефа располагаются в одном подземном тоннеле, который будет формироваться методом щитовой проходки.

В [3] была разработана математическая модель такой станции, а в [4] предложены альтернативные варианты траекторий тоннеля, но наличие только «рабочего объема» недостаточно для обеспечения работоспособности станции, поэтому в статье предлагается рассмотреть вопросы, связанные с основным и вспомогательным оборудованием, возможностями проведения ремонтных работ.

2. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. Определение конструкций затворов

Так как подземная ГАЭС представляет собой систему, принципиальная гидравлическая схема которой показана на рис. 2, то для обеспечения ее работоспособности возника-

ет потребность в установке затворов, с помощью которых будет происходить разделение участков тоннеля.

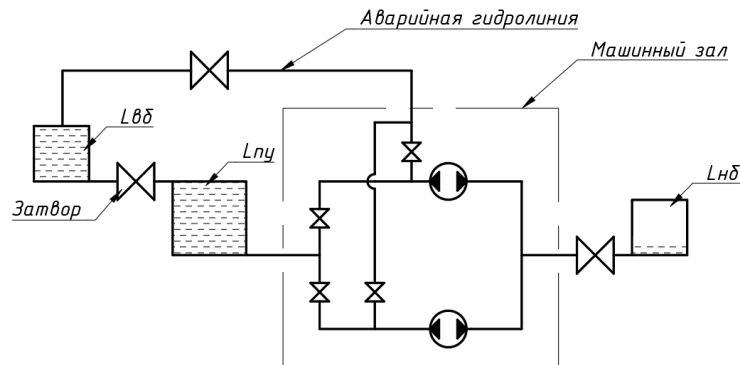


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема тоннельной ГАЭС.

Применяют затворы двух типов – отсечные и регулирующие расход.

Отсечные затворы характеризуются асимметричным изменением проходного сечения и резким изменением поля скоростей потока, что может привести к образованию кавитации, поэтому их рекомендуют применять только в двух положениях «открыт/закрыт». К этому классу относятся шаровые и дисковые конструкции.

Регулирующие затворы, которые относятся к группе цилиндрических, характеризуются симметричным изменением проходного сечения и плавным изменением поля скоростей, поэтому они могут работать продолжительное время в промежуточных положениях, вследствие чего их устанавливают перед агрегатами, нормальная эксплуатация которых предусматривает регулирование расхода затвором [5].

Согласно рабочему режиму, который предъявляется к затворам на ГАЭС, подходящей конструкцией является затвор шаровой с кольцевым клапаном в корпусе затвора (ЗШКк), имеющий среди прочих наименьшие утечки [5].

2.2. Гаситель кинетической энергии

Наличие резервной гидролинии, показанной на рис. 2, предполагает установку успокоителя потока, так как кинетическая энергия, которой обладает перекачиваемая жидкость на выходе из трубопровода, может размывать внутренний слой тоннеля.

Известно множество исполнений гасителей потока. Предлагается выполнить конструктивно наиболее простой, схема которого представлена на рис. 3 [6].

2.2. Плановый и аварийный ремонт

Как и у любой технической системы, компоненты ГАЭС в процессе работы будут выходить из строя и подвергаться износу, поэтому для такого ответственного энергетического объекта необходимо предусмотреть возможности планового и аварийного ремонта.

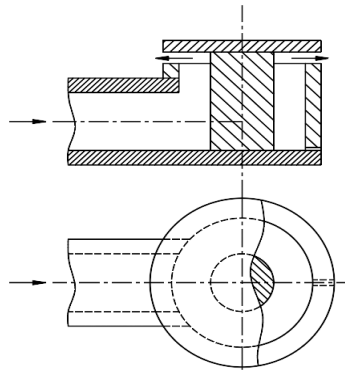


Рис. 3. Принципиальная гидравлическая схема тоннельной ГАЭС.

Плановый ремонт тоннеля и силового оборудования предполагается выполнять следующим образом:

1) Поскольку в исходном состоянии ГАЭС нижний бассейн пуст, то рационально начать параллельное обслуживание агрегатов в машинном зале и участка тоннеля $L_{\text{нб}}$;

2) По окончании ремонтных работ в нижнем бассейне предлагается осушить верхний. Необходимо сработать объем жидкости, находящейся в $L_{\text{вб}}$, и закрыть затвор, разделяющий подводящий участок и верхний бьеф. При этом станция принесет прибыль за счет сработанного объема жидкости, а персонал сможет проводить профилактические работы в тоннеле верхнего бассейна;

3) Для обслуживания подводящего участка $L_{\text{пу}}$ тоннельной ГАЭС в любом случае придется выкачивать жидкость во внешний резервуар на поверхности, так как он превышает суммарную длину обоих бассейнов. Однако для сокращения затрат можно провести следующие действия: наполнить участок $L_{\text{вб}}$ либо обычным способом, либо через аварийную гидролинию; перекрыть затвор между $L_{\text{вб}}$ и $L_{\text{пу}}$; заполнить нижний бассейн за счет части объема $L_{\text{пу}}$; перекрыть затвор между $L_{\text{пу}}$ и $L_{\text{нб}}$; откачать оставшийся объем $L_{\text{пу}}$ на поверхность;

4) После окончания ремонтных работ заполнить тоннель до номинального объема.

Аварийный ремонт агрегатов осуществляется несколькими этапами:

- 1) Требуется перекрыть затворы и доступ жидкости к силовому оборудованию;
- 2) После отключения агрегатов приступить к ремонту.

3. ОСНОВНОЕ СИЛОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. Выбор компоновочной схемы для основного силового оборудования

В соответствии с принципом действия ГАЭС для перекачивания воды из нижнего бьефа в верхний, применяют насосы в совокупности с приводным электродвигателем, а для преобразования кинетической и потенциальной энергии потока в механическую энергию вращения вала - гидротурбины. Крутящий момент с вала гидротурбины передается на вал генератора, где происходит преобразование энергии в электрическую. В зависимости от применяемого оборудования применяются три схемы компоновки машинного зала на ГАЭС [7]:

1) Четырехмашинная схема. Насос и турбина, как и двигатель с генератором — это отдельные машины, что одновременно является преимуществом и недостатком. Дан-

ная схема дает возможность получения максимально возможного КПД, но изначальная стоимость закупки очень высокая;

2) Двухмашинная схема. Основным оборудованием является обратимая гидромашина (насос-турбина), которая подключена к реверсивной электромашине (двигатель-генератор). Такая схема самая компактная по габаритам и самая дешевая, однако имеет меньший КПД, чем четырехмашинная схема;

3) Трехмашинная схема. Функции двигателя и генератора выполняет реверсивная электромашина, находящаяся на одном валу с двигателем и турбиной. Является компромиссом между двухмашинной и трёхмашинной схемами.

При выборе компоновочной схемы в первую очередь необходимо руководствоваться габаритами тоннеля, поэтому четырехмашинная схема в рамках тоннельной ГАЭС мало реализуема. Компоновочные решения для трехмашинной схемы с горизонтальным валом и двухмашинной схемы с вертикальным валом представлены соответственно на рис. 4 и рис. 5.

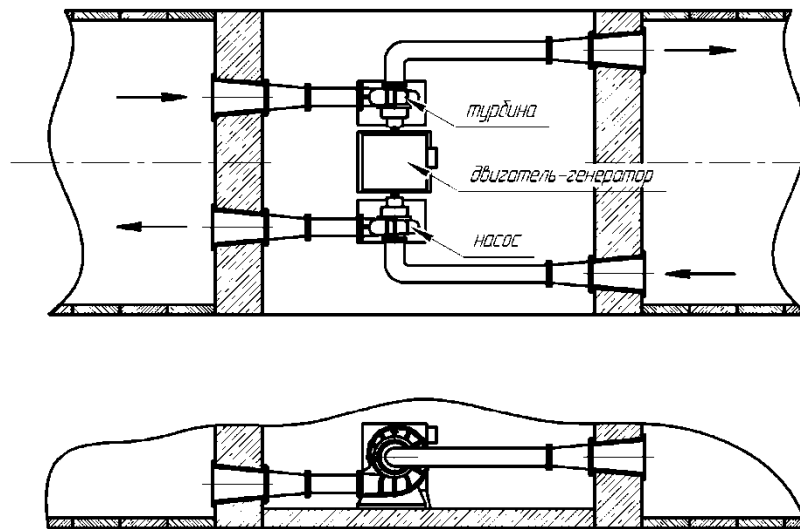


Рис. 4. Схема трехмашинного зала ГАЭС.

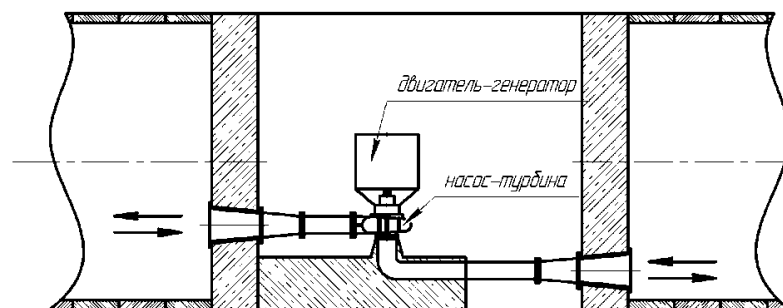


Рис. 5. Схема двухмашинного зала ГАЭС.

3.2. Характеристики агрегатов

С учетом ранее изложенных схем, для станции на параметры 25 МВт рассматривались следующие агрегаты: система насоса ВЦ и радиально-осевой турбины и насос-турбина. Так же использование данных гидромашин зачастую является наиболее экономически целесообразным вариантом в большинстве конфигураций ГАЭС.

Наиболее часто встречающаяся конструкция обратимой насос-турбины - радиально-осевая, обладающая жестколопастной системой. Работа в различных режимах, ввиду раз-

личного влияния гидравлических сопротивлений, приводит к тому, что напор у нее изменяется. Это учитывается при проектировании и определяет как геометрические, так и рабочие параметры. В результате, рассчитанный по насосному режиму максимальный диаметр рабочего колеса не соответствует оптимальной геометрии турбины. При этом именно турбинный режим должен обладать максимальным КПД, так как стоимость пиковой электроэнергии выше стоимости энергии в часы провалов графика суточной нагрузки, соответствующего насосному режиму.

Сравнение характеристик, проектируемых насоса и насос-турбины показаны на рис. 6.

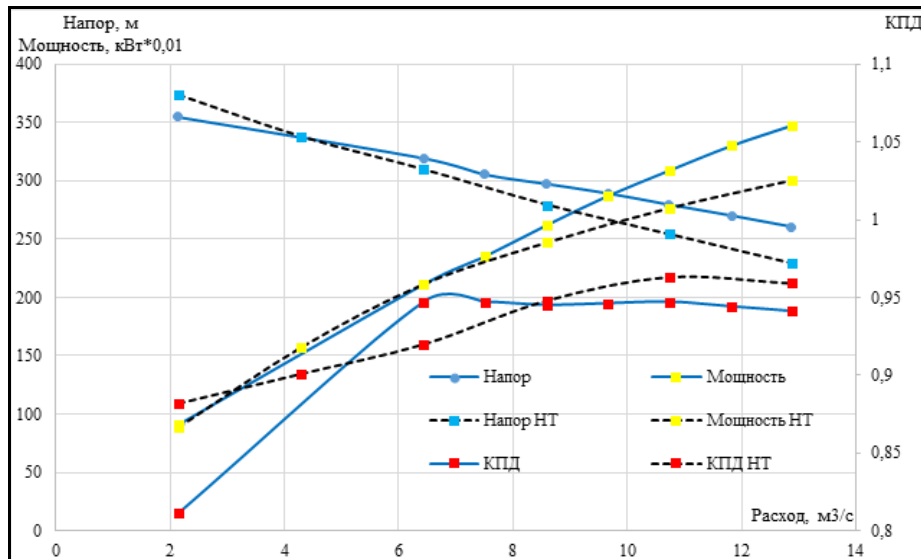


Рис. 6. Насосные характеристики насоса (синие линии) и насос-турбины (черные пунктирные линии)

Видно, что насос-турбина уступает по характеристикам насосу, несмотря на то, что рассчитывается по этому режиму. Одним из решений по повышению напора данной машины является применение многоярусной лопастной системы.

Так при использовании биплана незначительно ухудшился гидравлический КПД в оптимуме, но развиваемый рабочим колесом напор увеличился в среднем на 7-8% (рис.7).

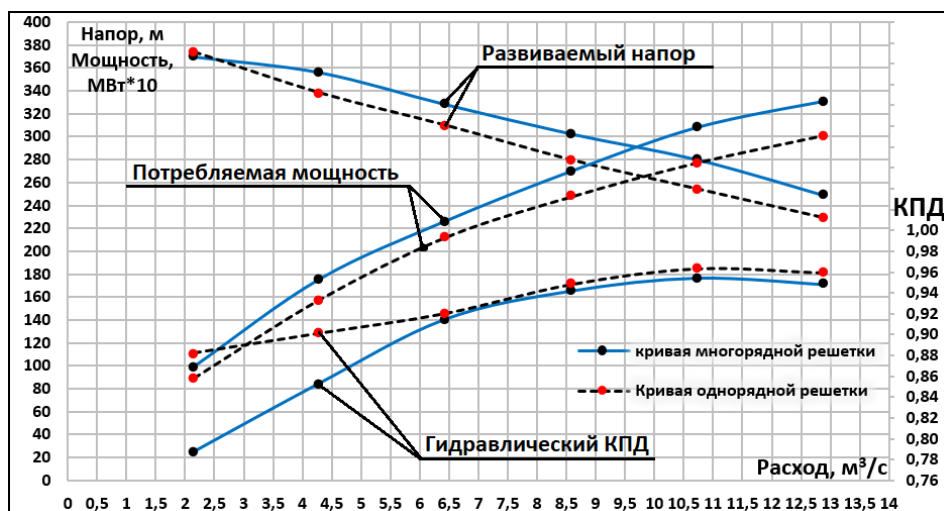


Рис. 7. Насосные характеристики для традиционного колеса и колеса с бипланом.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы для тоннельной ГАЭС подземного типа было указано необходимое вспомогательное оборудование и приведены этапы технического обслуживания как в плановом, так и аварийном режимах.

Показано, что основное силовое оборудование может быть реализовано в различных компоновочных решениях. Исследования продемонстрировали, что для станции мощностью 25 МВт наиболее рациональным является рассмотрение трехмашинной и двухмашинной схемы, в состав которых входит центробежный насос, радиально-осевая турбина и насос-турбина соответственно.

При этом важным является рассмотрение вопросов, связанных с проектированием высоконапорных агрегатов. Так, для обратимой гидромашины были проведены исследования по повышению напорности в насосном режиме с помощью многоярусной решетки. При неизменном рабочем напоре в турбинном режиме многорядная лопастная система позволяет увеличить напор в насосном режиме. Исходя из положения о том, что насосный напор должен быть больше турбинного на величину потерь (эта разница в напорах составляет 10-20% при гидравлическом КПД 90 – 95%), можно сделать вывод о целесообразности дополнительных исследований многорядных лопастных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кулова Т.Л., Николаев И.И., Фатеев В.Н., Алиев А.Ш.** Современные электрохимические способы аккумулирования энергии // KIMYA PROBLEMLERI. 2018. Т. 16. С. 9-34.
2. **Концепция** развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации // Министерство энергетики РФ.
3. **Liamasov A. K., Biriulin M. A., Denisov K. E.** Underground tunnel type PSPP// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 3, Mining, Production, Transmission, Processing and Environmental Protection, Moscow, 2021. – P. 012007. – DOI 10.1088/1755-1315/808/1/012007. – EDN DSPORE.
4. **Liamasov A. K., Biriulin M. A., Denisov K. E.** Calculation methods for different variants of an underground tunnel-type PSPP // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2021, С. 293–296.
5. **Андреев В.Б., Броновский Г.А., Веремеенко И.С. и др.** Справочник по гидротурбинам: Справочник / Под общ. ред. Н.Н. Ковалева. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1984.
6. **Гаситель** энергии потока. Патент SU1786222 A1.
7. **Бабурин Б.Л., Глезин М.Д., Красильников М.Ф., Шейман Л.Б.** Гидроаккумулирующие электростанции / Под ред. Л.Б. Шеймана. - М.: Энергия, 1978.

М.А.Дурова¹, К. Мякота¹ Д.А. Фрей²

1-студент, 2- руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УЧАСТНИКОВ АКТИВНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА РОЗНИЧНЫХ РЫНКАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

АННОТАЦИЯ

Трансформация структуры энергорынков требует разработки новых моделей взаимодействия между субъектами рынка. В работе для создания активного энергетического комплекса (АЭК) проведены исследования взаимосвязей субъектов розничных рынков электроэнергии (мощности). Обоснование перехода к децентрализованной системе должно иметь оценку на основе системного подхода, который ранее реализовался в условиях высокого уровня централизации. На таких же принципах должна строиться оценка развития энергосистемы за счет масштабирования АЭКов, основные из которых: экономическая и технологическая нейтральность для энергосистемы.

В работе сформированы модели денежных потоков участников АЭК в целом, предложены критерии экономической эффективности участия в АЭК, разработана модель прогнозирования цены розничного рынка электроэнергии и объема энергопотребления АЭК.

Ключевые слова: активные энергетические комплексы, АЭК, микросистемы, бизнес-процессы, экономическая модель, системные принципы, денежные потоки

1. ВВЕДЕНИЕ

Постановление Правительства РФ № 320 создало условия для реализации проектов активных энергетических комплексов (АЭК) – новой модели организации энергоснабжения групп промышленных потребителей на базе распределенной генерации [1], [2]. В международных исследованиях признается, что микрогриды считаются одним из наиболее перспективных решений для интеграции распределенной генерации в электроэнергетическую систему [3], [4]. Большая часть исследований посвящена технологическим аспектам работы оборудования. В меньшей степени в статьях зарубежных авторов уделяется внимание проблемам управления микрогридом как бизнес-системой.

Необходимо отметить, что условия функционирования микрогридов в разных странах существенно отличаются, в энергосистемах заложены различные принципы, используются разные типы энергетических установок, бизнес-модели рынков электроэнергии также различны [5]. В России в настоящее время только создаются условия для создания микрогридов-АЭК и не разработаны вопросы функционирования энергосистемы, состоящей из нескольких микросистем.

Существующие подходы к оценке эффективности создания систем распределенной генерации (микрогридов, АЭК) ограничиваются эффективностью для их участников, что не может быть приемлемым в условиях функционирования единой энергосистемы. Таким образом, требуется подготовка к внедрению активных энергетических комплексов в структуру энергосистемы, то есть решение теоретико-методических и практических задач.

2. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭК

2.1. Взаимодействие участников АЭК

Традиционно микросистемы в своей основе имеют генерацию на основе возобновляемых источников энергии, однако более характерной для России является ситуация использования для промышленных потребителей тепловой генерации. Однако, на наш взгляд, необходимо рассматривать гибридные системы, включающие различные виды генерации. Это требует разработки алгоритмов распределения нагрузки между различными генерирующими источниками. Каждый алгоритм имеет разные экономические последствия для микросистемы в целом и, соответственно, для каждого участника. В случае избыточной генерации ВИЭ можно либо продавать ее вовне, либо заряжать систему накопления энергии внутри АЭК. Поэтому важно рассматривать систему, состоящую из теплоэлектроцентрали, солнечной станции, ветроустановки и накопителя энергии. Но, в зависимости от условий, в которых создаются АЭК, состав оборудования может быть различным и не включать все виды. Необходимо отметить, что присутствие накопителя в микросистеме существенно увеличивает капиталовложения.

Бизнес-модели функционирования АЭК различны, например, владеть и управлять генерацией может потребитель, управлять всей системой может гарантирующий поставщик региона, где находится АЭК, но базовой моделью является модель АЭК с управлением Оператором, являющимся независимым юридическим лицом. В [5] исследованы различные варианты организации АЭК.

2.2. Системные принципы при создании АЭК

Функционирование АЭК в энергосистеме должно обеспечить, с одной стороны, получение экономических эффектов для потребителей, и генерации самих активных энергокомплексов, снижение потребления энергии в часы пиковой нагрузки, с другой стороны – технологическую и экономическую нейтральность АЭК для энергосистемы.

Экономическая нейтральность предполагает минимизацию отрицательных системных эффектов, включая приемлемый уровень выпадающих доходов сетевых организаций, приемлемый уровень стоимости замены оборудования для обеспечения функционирования АЭК во внешней энергосистеме. Технологическая нейтральность – отсутствие потребности в установке дополнительного оборудования, или замене действующего во внешней энергосистеме для обеспечения функционирования АЭК.

Предлагается при создании АЭК придерживаться следующих принципов, на основе которых должно планироваться изменение структуры отрасли:

1. Экономическая эффективность работы АЭК в целом.
2. Экономическая эффективность для каждого стейкхолдера, включая потребителей.
3. Экономическая нейтральность для энергосистемы.
4. Технологическая нейтральность для энергосистемы.
5. Выполнение системных ограничений: технологических, экономических, экологических, социальных.

3. МОДЕЛИ ДЕНЕЖНЫХ ПОТОКОВ АЭК

Эффективность проектов при создании объектов оценивается по генерируемому проектом денежному потоку, который формируется по прогнозному отчету о прибылях и убытках. При этом потоки делятся на потоки от операционной, инвестиционной и финансовой деятельности. Наличие или отсутствие какого-то вида потока в свободном денежном потоке определяется типом решаемой задачи, стоящей перед инициатором проекта. Конкретизируем такие задачи для инициаторов проектов создания АЭК.

А. У потребителя имеются различные типы генерации, заключены договоры с гарантирующим поставщиком или независимой энергосбытовой компанией. Задача состоит в оценке сравнительной эффективности деятельности в текущей системе договорных отношений и деятельности в форме АЭК.

Б. У потребителя имеются различные типы генерации, заключены договоры с гарантирующим поставщиком или независимой энергосбытовой компанией. Задача состоит в оценке различных вариантов создания АЭК, нулевым вариантом при этом является деятельность в текущей системе договорных отношений.

В. У потребителя нет генерации, но он заинтересован найти более эффективный способ энергоснабжения. Задача стоит в выборе различных вариантов генерации, накопителей, управляющего оператора. Нулевым вариантом при этом является деятельность в текущей системе договорных отношений, то есть покупка энергии с розничного рынка электроэнергии.

Г. У потребителя имеются различные типы генерации, заключены договоры с гарантирующим поставщиком или независимой энергосбытовой компанией, имеется система АИИСКУЭ. Задача состоит в оценке сравнительной эффективности деятельности в текущей системе договорных отношений и деятельности в форме АЭК.

Д. В рамках функционирующего АЭК осуществляется мониторинг экономической эффективности деятельности в сравнении с покупкой электроэнергии с розничного рынка. Оценка, которая не требует инвестиционных вложений и имеет наиболее простые формы денежных потоков.

3.1 Модель прогнозного денежного потока в целом

С учетом особенностей технологий, применяемых в АЭК для генерации энергии (выбрана генерация на ТЭЦ и ВИЭ, установлен накопитель энергии, задача мониторинга текущей деятельности Д и задача Г), предлагается сформировать модель прогнозного денежного потока АЭК, который имеет разделение на притоки (+) и оттоки (-):

$$ДП^{АЭК} = В^{ТЭЦ} + В^{СЭС} - И_{СНЭЭ}^{ЭЭ} - И^{ТЭЦ} - И_{АЭК}^{сод.сетей} - И_{СЭС}^{экспл.} - И_{СНЭЭ}^{экспл.}, \quad (1)$$

где $В^{ТЭЦ}$ – выручка ТЭЦ; $В^{СЭС}$ – выручка СЭС; $И^{ТЭЦ}$ – издержки ТЭЦ; $И_{СЭС}^{экспл.}$ – выручка СЭС; $И_{СНЭЭ}^{ЭЭ}$ – затраты на зарядку накопителя; $И_{СНЭЭ}^{экспл.}$ – текущие издержки по эксплуатации накопителя; $И_{АЭК}^{сод.сетей}$ – затраты на содержание распределительных сетей внутри АЭК.

При этом отсутствует поток от инвестиционной деятельности.

Критерием экономической эффективности деятельности АЭК в целом будет $ДП^{АЭК} > 0$, что дает абсолютную оценку экономической эффективности.

Для накопителей энергии затраты будут складываться из расходов на электроэнергию, необходимую для зарядки накопителя, собственных нужд, затрат на обслуживание и

ремонт, амортизационных отчислений, заработной платы и социальных отчислений обслуживающего персонала, прочих расходов.

Для солнечных и ветровых станций затраты будут складываться из затрат на обслуживание и ремонт, амортизационных отчислений, заработной платы и социальных отчислений обслуживающего персонала, прочих расходов.

3.2. Модели остаточных денежных потоков

Модель остаточного денежного потока для ТЭЦ будет иметь следующий вид:

$$ДП_{ТЭЦ}^{АЭК} = (П_{ТЭЦ}^{АЭК} - П_{ТЭЦ}^{АЭК} \cdot Н_{п}) + И_{ТЭЦ}^{аморт.}, \quad (2)$$

где $Н_{п}$ -налог на прибыль; $И_{ТЭЦ}^{аморт.}$ - амортизация оборудования ТЭЦ; $П_{ТЭЦ}^{АЭК}$ – прибыль ТЭЦ, участвующей в АЭК.

Прибыль ТЭЦ при работе в АЭК:

$$П_{ТЭЦ}^{АЭК} = V_{отп}^{ЭЭ} \times Ц_{АЭК}^{ЭЭ} + П_{др.потрб} + П_{НЭСК} - И^{ТЭЦ}, \quad (3)$$

где $V_{потр}^{ЭЭ}$ - объем потребления энергии от ТЭЦ; $Ц_{АЭК}^{ЭЭ}$ -договорная цена на электроэнергию в АЭК; $П_{др.потрб}$ -платежи внешних потребителей; $П_{НЭСК}$ -платежи НЭСК; $И^{ТЭЦ}$ -издержки ТЭЦ, включая топливные; $V_{отп}^{ЭЭ}$ - объем отпущенной потребителям АЭК энергии.

Прибыль ТЭЦ при продаже электроэнергии на розничный рынок:

$$П_{ТЭЦ}^{РРЭ} = Ц_{НЭСК} \cdot V_{отпуск\ полезный}^{ЭЭ} - И^{ТЭЦ} - И_{ТЭЦ}^{аморт.}$$

Денежный поток ТЭЦ:

$$ДП_{ТЭЦ}^{РРЭ} = (П_{ТЭЦ}^{РРЭ} - П_{ТЭЦ}^{РРЭ} \cdot Н_{п}) + И_{ТЭЦ}^{аморт.} - П_{ТЭЦ}^{ЭЭ}, \quad (4)$$

где $И_{ТЭЦ}^{аморт.}$ -амортизация ТЭЦ; $П_{ТЭЦ}^{ЭЭ}$ -платежи за купленную с розничного рынка.

Критерием эффективности участия будет положительная разница денежных потоков:

$$ДП_{ТЭЦ}^{АЭК} - ДП_{ТЭЦ}^{РРЭ} > 0$$

Аналогично будут складываться денежные потоки для ВЭС и СЭС.

Критерием экономической эффективности для СЭС будет $ДП_{СЭС}^{АЭК} - ДП_{СЭС}^{РРЭ} > 0$

Критерием экономической эффективности для ВЭС будет $ДП_{ВЭС}^{АЭК} - ДП_{ВЭС}^{РРЭ} > 0$

Для потребителей показателем для оценки эффективности участия в АЭК является цена потребляемой электроэнергии, а критерием эффективности – разница цен при участии в АЭК и цены розничного рынка электроэнергии, транслируемой гарантирующими поставщиками или независимыми энергосбытовыми компаниями потребителям.

$$Ц_{АЭК}^{ЭЭ} - П_{ЭЭ}^{4я,3я} < 0, \quad (5)$$

где $Ц_{АЭК}^{ЭЭ}$ -договорная цена на электроэнергию в АЭК.

$П_{ЭЭ}^{4я,3я}$ – плата участников АЭК, если они покупали бы электроэнергию на розничном рынке (по 3 и 4 ценовой категории).

3.3 Модель прогнозного денежного потока для проекта создания АЭК

Для задач А, Б, В требуются капиталовложения – в объекты генерации, ПАК УИС, поэтому в денежных потоках должны учитываться оттоки от инвестиционной деятельности.

На рисунке (Рис.2) представлен состав притоков и оттоков для оценки проекта создания АЭК в целом.

Для задач, когда генерация уже есть, но нет АИИСКУЭ и накопителя (задачи А и Б), прогнозных денежных поток будет иметь следующий вид:

$$ДП^{АЭК} = В^{ТЭЦ} + В^{СЭС} + П_{АЭК}^{ком.} + И_{СНЭЭ}^{ЭЭ} - И^{ТЭЦ} - И_{АЭК}^{сод.сетей} - И_{ПАК УИС}^{экспл.} - И_{СЭС}^{экспл.} - К_{ПАК УИС} - К_{СНЭЭ} - И_{СНЭЭ}^{экспл.} \quad (6)$$

где $П_{АЭК}^{ком.}$ - платежи по комиссии по управлению АЭК; $И_{ПАК УИС}^{экспл.}$ - затраты на эксплуатацию ПАК УИС; $К_{СНЭЭ}^{экспл.}$ - капитальные вложения в создание накопителя энергии; $К_{ПАК УИС}$ - капитальные вложения в ПАК УИС.

Таким же образом в денежный поток можно добавить компоненты капиталовложений, если необходимо добавлять отсутствующую генерацию, тогда получим денежный поток для задачи В.



Рис. 2 – Модель прогнозного денежного потока АЭК

По прогнозным денежным потокам проекта рассчитывается показатель чистого дисконтированного дохода или чистой текущей стоимости проекта по общепринятым формулам инвестиционного анализа.

При оценке экономической эффективности как для АЭК в целом, так и для участников используется принцип «с проектом-без проекта». Для его реализации в денежных потоках присутствуют расходы потребителей на покупку электроэнергии с розничного рынка.

Для того, чтобы корректно рассчитать денежные потоки, необходимо получить прогноз цен на электроэнергию и мощность в регионе, объемы энергопотребления в АЭК. Показано, что для разных временных периодов прогноза необходимо использовать разные модели прогнозирования временного ряда цен на электроэнергию (мощность) и объемов энергопотребления. Для внутрисуточного планирования лучше подходит модель линейной регрессии, а планирования графиков на месяц и более - модель SARIMA – модель сезонного авторегрессионного интегрированного скользящего среднего. Выбор ее

параметров осуществлялся по информационному критерию Акаике, основанному на определении модели с наилучшим приближением и наименьшим количеством параметров модели одновременно.

В результате работы сформирована пилотная версия платформы, которая будет формировать торговый график и показатели эффективности для участников АЭК.

С помощью выбранной прогнозной модели платформа способна из полученных данных строить торговый график на сутки вперед, тем самым выбирая оптимальные режимы работы генерации, а потребителю транслировать наилучшую цену на электроэнергию и мощность.

$$\text{Торговый график} = V_{\text{ген.}}^{\text{ч}} - V_{\text{потрб.}}^{\text{ч}}, \quad (7)$$

если > 0 , то за счет разницы заряжаются накопители, сверх продается НЭСК или ГП;

если < 0 покупка у НЭСК или ГП

Аналогично можно сформировать из расчетных прогнозных значений прогнозный торговый график в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, разработаны модели прогнозного денежного потока АЭК в целом и денежных потоков отдельных участников для оценки экономической эффективности участия в АЭК. Предложены критерии оценки эффективности участия в АЭК для каждого участника и АЭК в целом. Представлена пилотная версия платформы, в которой на практике применяется предложенная модель прогнозирования по часам цены и объемов для каждого участника АЭК по часам.

Сформулированы системные принципы создания активных энергетических комплексов внутри энергосистемы.

Новизна работы состоит в уникальных моделях денежных потоков и предложении критериев эффективности создания и функционирования АЭК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **D. Khilkin** Digitalization as a premonition. New Business Practices in the Electricity Industry. // EnergyNet infrastructure center (2020)
2. **Decree** of the Government of Russian Federation No 320 dated 21/03/2020.
3. **Eduard Bullich-Massagué, Francisco Díaz-González** Microgrid clustering architectures, Applied Energy, Elsevier, vol. 212(C), pages 340-361 (2018).
4. **R.H. Lasseter, P. Paigi** Microgrid: a conceptual solution, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (2004)
5. **A. Anikeeva, D. Frey, K. Myakota, N. Chumachenko and D. But** Development of NRU MPEI active energy complex calculation model//International Conference of Young Scientists «Energy Systems Research 2021» E3S Web Conf., 289 (2021) 01007

М.А.Дурова¹, К. Мякота¹ Д.А. Фрей²

1-студент, 2-руководитель проекта

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ЦЕН В АКТИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

АННОТАЦИЯ

Современные механизмы управления спросом на рынках электроэнергии, стремление потребителей снизить стоимость потребления энергии приводят к созданию новых организационных форм взаимодействия между субъектами энергорынков. Важнейшим элементом создания цифровых платформ являются прогнозные модели. Эти модели позволяют прогнозировать с различной точностью в различных временных периодах прогнозирования.

В работе на основе моделей денежных потоков АЭК разработана модель прогнозирования цены розничного рынка электроэнергии и объема энергопотребления АЭК.

Ключевые слова: активные энергетические комплексы, АЭК, прогнозирование, денежные потоки, модель линейной регрессии, модель SARIMA

ВВЕДЕНИЕ

Оценка экономической эффективности проектов строится на планировании производственно-хозяйственной деятельности будущего объекта, денежные потоки строятся на основе прогнозных значений факторов внешней и внутренней среды. Для планирования деятельности как производителей, так и потребителей электроэнергии необходимо прогнозировать объемы энергопотребления в различных разрезах – суточном, месячном, годовом. По каждому виду прогнозов допускаются различные значения ошибки. Почасовое планирование необходимо для наибольшей точности расчета платы за электроэнергию, так как оплата мощности на энергорынках определяется в часы пиковых нагрузок энергосистемы и оказывает наиболее существенное влияние на экономическую эффективность создания активных энергетических комплексов. Получение прогноза одинаково высокой точности одной и той же моделью для временных рядов различной длины не представляется возможным [1], поэтому необходимо разработать подход к выбору оптимальной модели для каждого вида прогнозов.

1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМОВ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ЦЕН

1.1. Принципиальная модель функционирования АЭК

Бизнес-модели функционирования АЭК различны, например, владеть и управлять генерацией может потребитель, управлять всей системой может гарантирующий поставщик региона, где находится АЭК, но базовой моделью является модель АЭК с управлением Оператором, являющимся независимым юридическим лицом [2].

Сформируем принципиальную модель бизнес-процессов оператора АЭК (Рис.1) для этого случая. На ней строится управление работой АЭК, включая финансовые расчеты.

В ежедневном режиме все участники АЭК осуществляют почасовое планирование объемов генерации/потребления и направляют почасовые заявки в адрес оператора АЭК. Оператор АЭК на программно-аппаратном комплексе, рассчитывает оптимальные

(наиболее экономически эффективные) режимы работы генерации и накопления электрической энергии для покрытия спроса внутри АЭК. На основании полученных результатов оператор АЭК формирует графики работы генерации и накопления электрической энергии на следующие операционные сутки. В момент фактической поставки оператор АЭК осуществляет оперативное управление генерацией и потреблением АЭК в соответствии со всеми ограничениями. По истечении расчетного периода (календарного месяца) он рассчитывает финансовые обязательства и требования для всех участников АЭК.

Эффективность проектов при создании объектов оценивается по генерируемому проектом денежному потоку, который формируется по прогнозному отчету о прибылях и убытках.

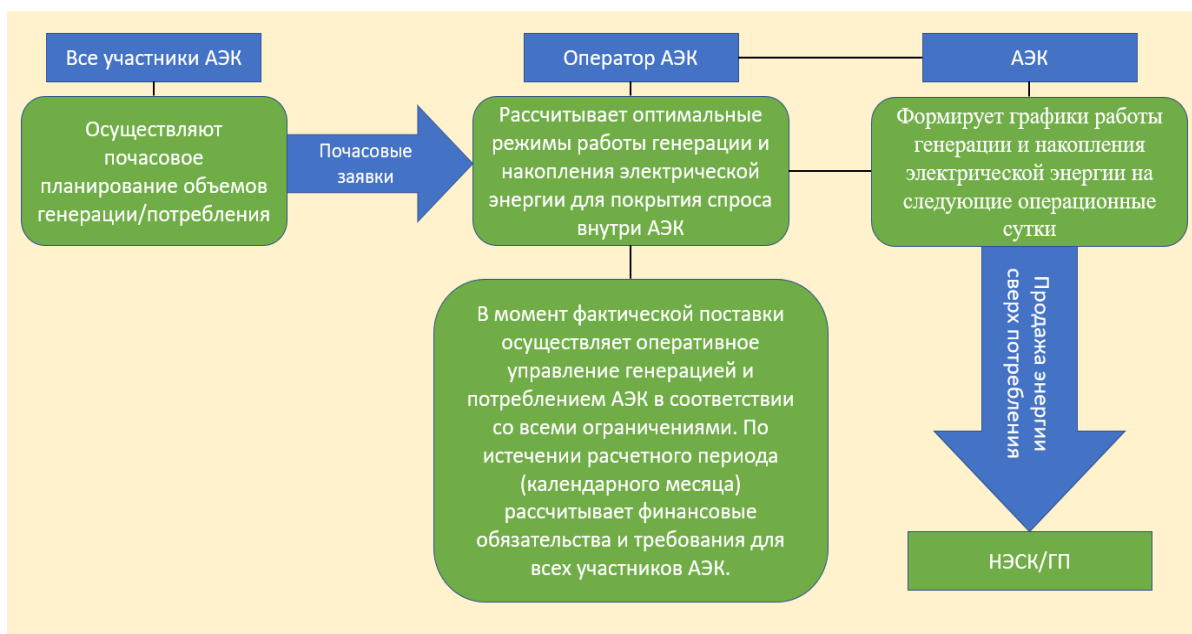


Рис. 1 – Принципиальная модель бизнес-процессов оператора АЭК

При этом потоки делятся на потоки от операционной, инвестиционной и финансовой деятельности. Наличие или отсутствие какого-то вида потока в свободном денежном потоке определяется типом решаемой задачи, стоящей перед инициатором проекта.

По прогнозным денежным потокам проекта рассчитывается показатель чистого дисконтированного дохода или чистой текущей стоимости проекта по общепринятым формулам инвестиционного анализа.

1.2. Прогнозные модели

При оценке экономической эффективности как для АЭК в целом, так и для участников используется принцип «с проектом-без проекта». Для его реализации в денежных потоках присутствуют расходы потребителей на покупку электроэнергии с розничного рынка.

Для того чтобы корректно рассчитать денежные потоки необходимо получить прогноз цен на электроэнергию и мощность в регионе, объемы энергопотребления в АЭК. В работе разработаны модели прогнозирования временного ряда цен на электроэнергию (мощность) и объемов энергопотребления.

1.3. Модель линейной регрессии

В качестве базового варианта прогнозной модели была взята модель линейной регрессии, где в качестве параметров передавался промежуток из n предыдущих реальных (не смоделированных) отсчетов ряда, отстоящих от текущего момента на k отсчетов. Таким образом, величина k задает длину ряда, на которую будет возможно прогнозирование вперед. Программная реализация данной модели принимает на вход два значения – k и $k+n$ (Рис.2).

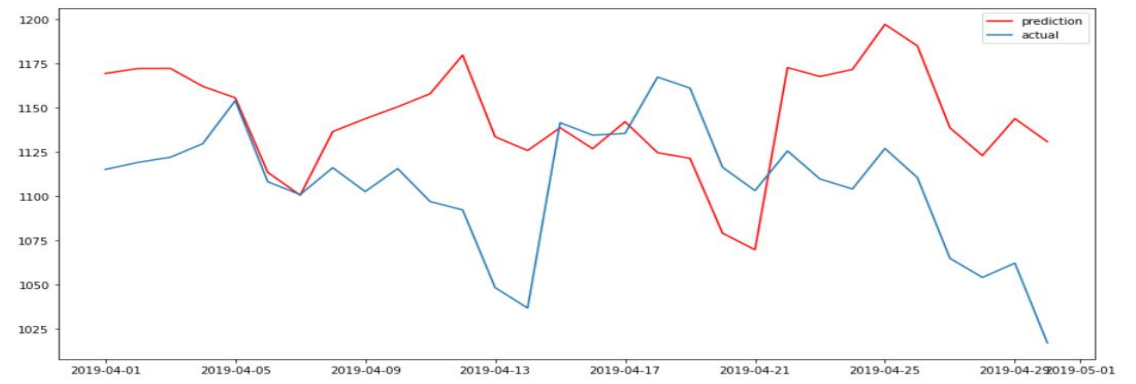


Рис.2 - Результат моделирования методом линейной регрессии

1.4. Модель SARIMA

Кроме модели линейной регрессии была разработана модель SARIMA – модель сезонного авторегрессионного интегрированного скользящего среднего. Модель SARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q) – это линейная комбинация p предыдущих значений ряда, q значений шума в предыдущие моменты времени, P авторегрессионных компонент, взятых с шагом, равным сезонности S (здесь шаг 24) и Q компонент скользящего среднего, к которой было d раз применено обычное дифференцирование и D – сезонное [3]. Выбор ее параметров осуществлялся по информационному критерию Акаике, основанному на определении модели с наилучшим приближением и наименьшим количеством параметров модели одновременно. В результате сравнения полученных моделей была сформирована модель SARIMA (0,1,0) \times (1,1,1) (Рис.3).

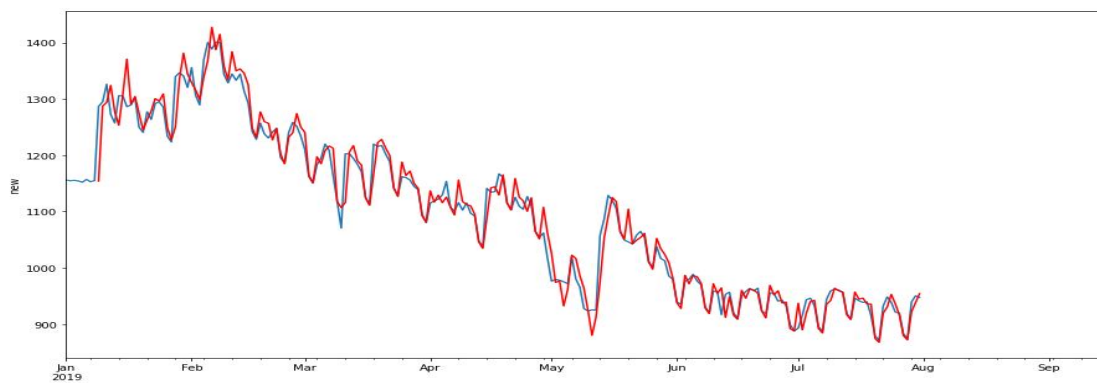


Рис.3 - Смоделированные моделью SARIMA значения среднесуточной цены

2. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Функция ошибок

Так как рассматриваемые в данной работе модели работают с непрерывными значениями (значение потребления электроэнергии в кВт), необходимо рассмотреть и применить существующие функции потерь регрессии[4]. Для выбора подходящих параметров было осуществлено сравнение нескольких конфигураций моделей с помощью функции ошибок MAPE:

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|, \quad (1)$$

где MAPE – Средняя абсолютная ошибка в процентах, n – количество наблюдений, y_i – фактическая координата наблюдения, \hat{y}_i – предсказанная координата наблюдения.

2.2. Кросс-валидация

Кросс-валидация это метод оценки аналитической модели и её поведения на независимых данных с наиболее равномерным использованием имеющихся данных.

В основе метода лежит разделение исходного множества данных на k примерно равных блоков, например $k=5$. Затем на $k-1$, т.е. на 4-х блоках, производится обучение модели, а 5-й блок используется для тестирования. Процедура повторяется k раз, при этом на каждом проходе для проверки выбирается новый блок, а обучение производится на оставшихся.

Таким образом, фиксируется некоторое множество разбиений исходной выборки на две подвыборки: обучающую и контрольную. Для каждого разбиения выполняется настройка алгоритма по обучающей подвыборке, затем оценивается его средняя ошибка на объектах контрольной подвыборки.

В случае применения к модели прогнозирования временного ряда модель можно обучать сначала на небольшом отрезке временного ряда – от начала до некоторого значения t [5]. Затем делается прогноз на $t+n$ шагов вперед и подсчитывается ошибка. Затем обучающая выборка расширяется до $t+n$ значения, а прогноз делается на $t+2*n$ шагов вперед, и так далее – тестовый отрезок ряда продолжит двигаться x раз до тех пор, пока $t+x*n$ элемент не окажется последним в изначальном обучающем датасете.

Поскольку в месяцах неравное количество дней, было принято решение делить датасет не на фиксированное число n , а перебирать несколько заданных последовательных месяцев и для каждого делать такое разделение.

Для оценки качества моделей в целом обычно используют средние значения из нескольких окон валидации, поскольку различия в этих значениях в зависимости от размера обучающей выборки довольно велики (рис.4 и рис.5).

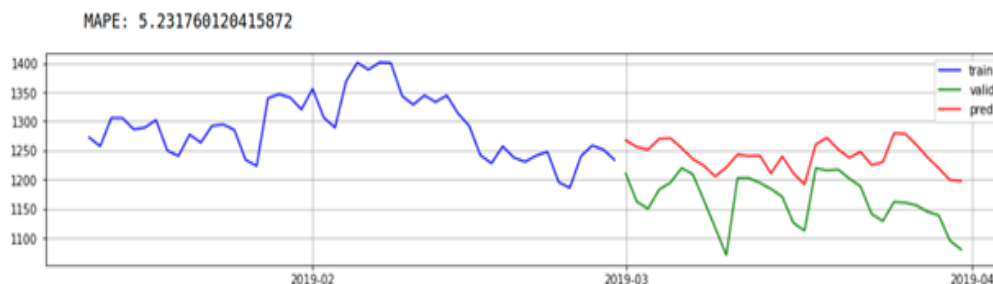


Рис.4 - Кросс-валидация третьего месяца линейной модели



Рис.5 - Кросс-валидация седьмого месяца линейной модели

Среднее значение функции ошибки MAPE для модели линейной регрессии (7,14) составило 4.64%. Среднее значение функции ошибки MAPE для модели SARIMA(0,1,0)x(1,1,1) составило 4.23%.

Кросс-валидация модели SARIMA(0,1,0)x(1,1,1) представлена на рис.6. и рис.7.

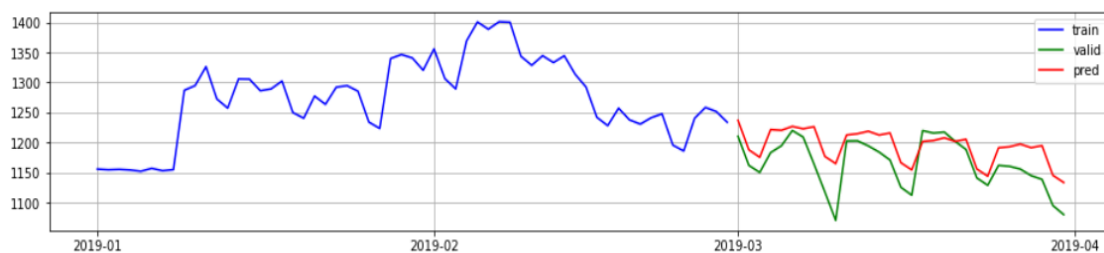


Рис.6 - Кросс-валидация третьего месяца модели SARIMA



Рис.7 - Кросс-валидация седьмого месяца модели SARIMA

2.3. Выбор прогнозной модели

На рисунке (Рис.8) представлено сравнение точности моделей линейной регрессии различной конфигурации и модели SARIMA конфигурации SARIMA(0,1,0)x(1,1,1). Из рисунка видно, что наилучший результат показали модели линейной регрессии с параметрами 1 и 7 и модель SARIMA.

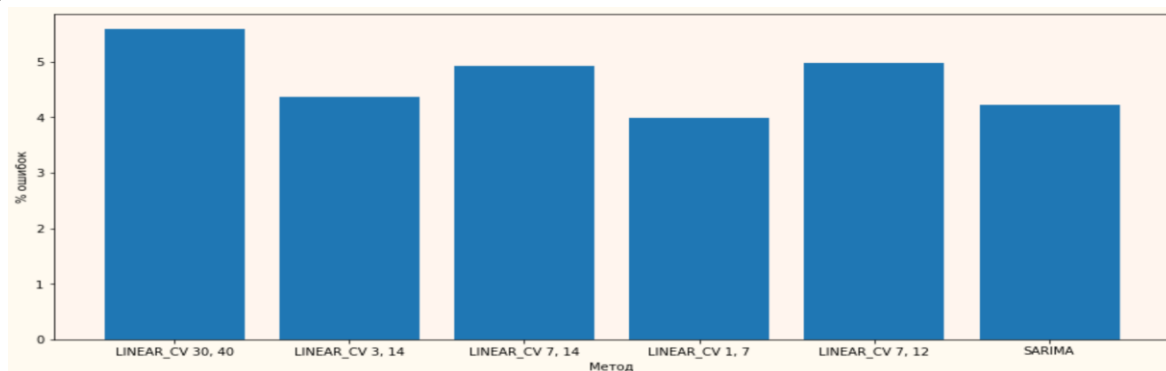


Рис. 8 – Сравнение процента ошибок различных прогнозных моделей

Однако данная конфигурация модели линейной регрессии делает возможным прогнозирование всего на сутки вперед, что делает ее использование в решении поставленной задачи неприменимой для долгосрочного прогнозирования.

Таким образом в качестве прогнозной модели была выбрана модель SARIMA (0,1,0) x (1,1,1). Пример построения прогноза на 4 недели представлен на рис.9.

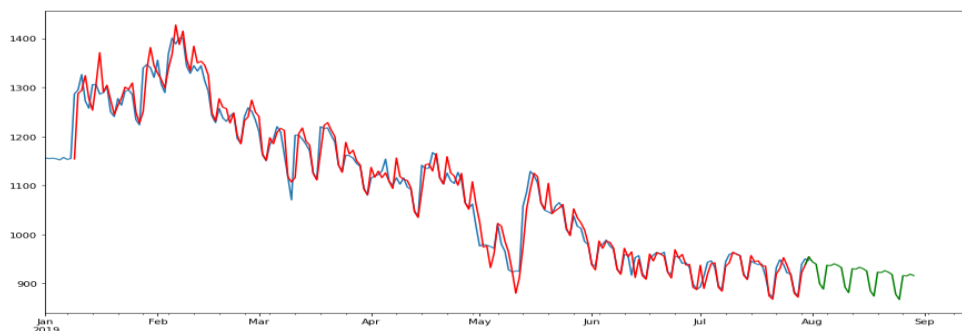


Рис. 9 – Построение прогноза значений временного ряда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, для реализации моделей формирования платы потребителей необходимо прогнозирование цен на розничном рынке электроэнергии, поэтому предложена модель прогнозирования цены, которая так же применима к задаче прогнозирования графика нагрузки.

С помощью выбранной прогнозной модели оператор АЭК из полученных данных может строить торговый график на сутки вперед, тем самым определяя оптимальные режимы работы генерации, а потребителю транслировать наилучшую цену на электроэнергию и мощность. Аналогично можно сформировать из расчетных прогнозных значений прогнозный торговый график и в среднесрочной перспективе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Эйлин Нильсен** Практический анализ временных рядов: прогнозирование со статистикой и машинное обучение / Нильсен Эйлин. — Санкт-Петербург: Диалектика, 2021. — 545 с.
2. **A. Anikeeva, D. Frey, K. Myakota, N. Chumachenko and D. But** Development of NRU MPEI active energy complex calculation model//International Conference of Young Scientists «Energy Systems Research 2021» E3S Web Conf., 289 (2021) 01007
3. **Кричевский А. М.** Прогнозирование временных рядов с долговременной корреляционной зависимостью: специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кричевский Андрей Михайлович. – Санкт-Петербург, 2008. – 19 с.
4. **Рашка С.** Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow-2 / С. Рашка, В. Мирджалили. — 3. — Санкт-Петербург: Диалектика, 2020. — 848 с.
5. **Уэс Маккини** Python и анализ данных / Маккини Уэс. — 2. —: ДМК Пресс, 2020. — 540 с.

А.А. Проскурина¹, Н.В. Лазарева¹, А.А. Сысоев², М.Г. Тягунов³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ СТРОИТЕЛЬСТВА НОВЫХ ГИДРОСТАНЦИЙ В СЛОЖНЫХ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

АННОТАЦИЯ

В данной работе представляется описание и внешний вид программного комплекса с возможностью проведения исследований каскадов со сложной гидрологической схемой. Комплекс позволяет проводить водно-энергетические расчёты каскадов ГЭС, строящихся и модернизируемых ГЭС. С помощью комплекса можно определить энергетический эффект, т.е. увеличение выработки каскада ГЭС за счёт строительства новой станции или модернизации существующей. Комплекс разрабатывается на языке программирования Python с помощью библиотеки PyQt5. Расчёт проводится для стадии предпроектной оценки целесообразности строительства. Комплекс может быть использован в процессе обучения студентов в высших учебных заведениях.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, водно-энергетический расчёт, методы оптимизации, оптимизация режима работы

ВВЕДЕНИЕ

Способ улучшения обучения в высших учебных заведениях для студентов и аспирантов – использование современных методов обучения, применение современных и актуальных программно-технических средств. В Российской Федерации идёт разговор о том, что процесс обучения должен быть выстроен таким образом, чтобы после окончания обучения в институте студент был подготовлен по многим направлениям, и был знаком с решениями различных проблем, и имел разные сценарии работы в изменяющихся внешних условиях. Это может быть достигнуто с помощью корректировки или переработки учебных материалов.

Сейчас многие учебные дисциплины и конкурсы в разных областях претерпели изменения и сделали акцент на работу в команде, где победителем является тот, кто смог найти более оригинальное решение поставленной задачи или проявил свои лидерские свойства. В качестве примера используются команды не более чем из 5 человек, что очень похоже на отдел в компании [1].

Процесс обучения может быть реформирован и переорганизован на работу в дистанционном формате, что обостряет проблему модернизации существующих программных комплексов, используемых для обучения [2].

В России слабо представлены вычислительные комплексы, позволяющие проводить сложные водно-энергетические расчёты для отдельных гидростанций (далее – ГЭС) и каскадов ГЭС с произвольной гидрологической схемой, позволяющие проводить как исследовательские, так и оптимизационные расчёты.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Проект должен быть приспособлен для работы в гидроэнергетических системах с разной гидравлической схемой реализации каскада.

Комплекс должен позволять:

- проведение долгосрочных и среднесрочных водно-энергетических расчётов для систем со сложной гидравлической схемой;
- проведение оптимизационных расчётов для полученных ранее данных;
- расчёт энергетического эффекта от строительства новой или модернизации существующей гидростанции в существующем каскаде.

Основной упор делается на малые гидроэнергетические комплексы, так как:

- для крупных гидроэнергетических каскадов в Российской Федерации уже разработаны различные оптимизационные решения, программы [3-4];
- гидростанции малой мощности имеют меньше индивидуальных особенностей, и их проще представить в виде схемы замещения;
- из-за тенденции на уменьшение установленной мощности объектов и перехода к распределённой энергетике текущая концепция будет более востребована в компаниях, связанных с малыми ГЭС [5].

РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА

Для реализации программного комплекса в виде программы выбран язык программирования Python. Так как комплекс планируется использовать для обучения на кафедре ГВИЭ ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», то необходимо использовать данные из реальных ГЭС. Необходим полный набор данных по проектной и эксплуатационной деятельности. Единственным вариантом их получения является обращение в специализированные организации.

В Российской Федерации для получения такого рода данных необходимо обращаться к ПАО «РусГидро», ПАО «ТГК-1», АО «ЕвроСибЭнерго», и др., но данные представляют собой коммерческую тайну, поэтому предоставляются на основе соглашений. Можно отметить, что основной интерес учёных представляют крупные гидроэлектростанции, расположенные в каскаде и без него [7-8]. Данные по крупным каскадам могут быть представлены ПАО «РусГидро» и АО «ЕвроСибЭнерго». Однако, тогда теряется уникальность проекта. В качестве вариантов могут быть использованы станции, либо располагаемые в каскадах на р. Кубань, либо каскады ГЭС ПАО «ТГК-1».

Для выбора станций был проведён анализ открытых данных по гидроэлектростанциям ПАО «ТГК-1».

Сделана сводка станций, из общего списка выделены станции, подходящие для использования в программе. Данные были сведены в таблицу 1.

Таблица 1 Данные по станциям ПАО «ТГК-1»

Регион	Каскад	Название станции	Нуст, МВт	Выработка, млн. кВт.ч	КИУМ
Ленинградская	Ладожских	Нижне-Свирская ГЭС	99	499,10	0,5755

Регион	Каскад	Название станции	Нуст, МВт	Выработка, млн. кВт.ч	КИУМ
область	ГЭС	Верхне-Свирская ГЭС	160	823,97	0,5879
Республика Карелия	Выгских ГЭС	Маткожненская ГЭС	63	375,00	0,6795
		Выгостровская ГЭС	40	233,00	0,6650
		Беломорская ГЭС	27	131,50	0,5560
		Палакоргская ГЭС	30	165,00	0,6279
	Кемских ГЭС	Путкинская ГЭС	84	396,00	0,5382
		Подужемская ГЭС	48	217,00	0,5161
Кривопорожская ГЭС		180	479,00	0,3038	
Мурманская область	Нивских ГЭС	Нива ГЭС-1	24,9	132,06	0,6054
		Нива ГЭС-2	60	420,88	0,8008
		Нива ГЭС-3	155,5	908,54	0,6670
	Пазских ГЭС	Янискоски ГЭС	30,2	129,13	0,4881
		Раякоски ГЭС	43,2	246,03	0,6501
		Кайтакоски ГЭС	11,2	73,34	0,7475
		Борисоглебская ГЭС	56	288,55	0,5882
		Хевоскоски ГЭС	47	230,79	0,5606

Выбранные каскады станций имеют различную конфигурацию, и в программе могут быть представлены расчёты как для разных конфигураций станций, так и для станций с большим разбросом установленной мощности.

Для получения данных был заключён специализированный договор о сотрудничестве, в рамках которого были запрошены данные:

- притоки реки за последние 10 лет для каждой станции;
- схематичное изображение станции и каскадов с изображением отметок;
- кривые связи верхнего и нижнего бьефов для каждой станции;
- потери станции;
- универсальные характеристики агрегатов станций;
- водно-энергетические расчёты для каскадов ГЭС;
- нормативные документы, определяющие работу каскада станций;

Представленный объём данных, был предоставлен частично.

Таблица 2. Объём предоставленных данных от ПАО «ТГК-1»

Параметры	Ладожских	Выгских	Кемских	Нивских	Пазских
Притоки реки	Нет	Да	Частично	Да	Частично
Схема ГЭС	Да	Да	Частично	Да	Да
Кривые связи	Да	Нет	Частично	Нет	Частично
Потери	Частично	Частично	Нет	Да	Частично
Универсальные характеристики	Частично	Нет	Да	Частично	Частично
Режимы работы каскада	Да	Да	Частично	Да	Да

Параметры	Ладожских	Выгских	Кемских	Нивских	Пазских
ГЭС					
Нормативные документы	Да	Частично	Да	Да	Частично

Исходя из таблицы 2, отсутствуют данные, позволяющие просчитать полностью каскад работы ГЭС целиком в течение 1 года или более короткого срока. Для работы ведётся поиск других каскадов гидростанций.

ФУНКЦИОНАЛ КОМПЛЕКСА

Для проведения исследований и водно-энергетических расчётов необходима реализация комплекса с большим набором функционала. В основном окне представляется информация о реке, имеющихся станциях и небольшая справочная информация по проводимому расчёту. Информация о реке и существующих и станциях каскада вносится с помощью специального окна программы. Ввод данных осуществляется по следующей схеме:

1. Вносятся данные по разрабатываемому каскаду гидроэлектростанции (название, длина, высота отметок, название каскада, количество станций).
2. Вносятся данные по каждой станции (отметка на реке, название станции, отметки НПУ, ФПУ, УМО, потери воды, потери напора, месяцы зимы, приток реки).
3. Вносятся характеристики по каждой станции (кривые связи ВБ и НБ, кривые КПД генератора и турбины).

Ввод кривых осуществляется либо с помощью табличного ввода, либо с помощью ручного ввода значений на предварительно загруженное изображение. По данным таблицы строится расчётная кривая, по функции полинома n степени от 1 до 6. Утверждённые данные сохраняются в базе данных. Внешний вид программы представлен на рис. 1.

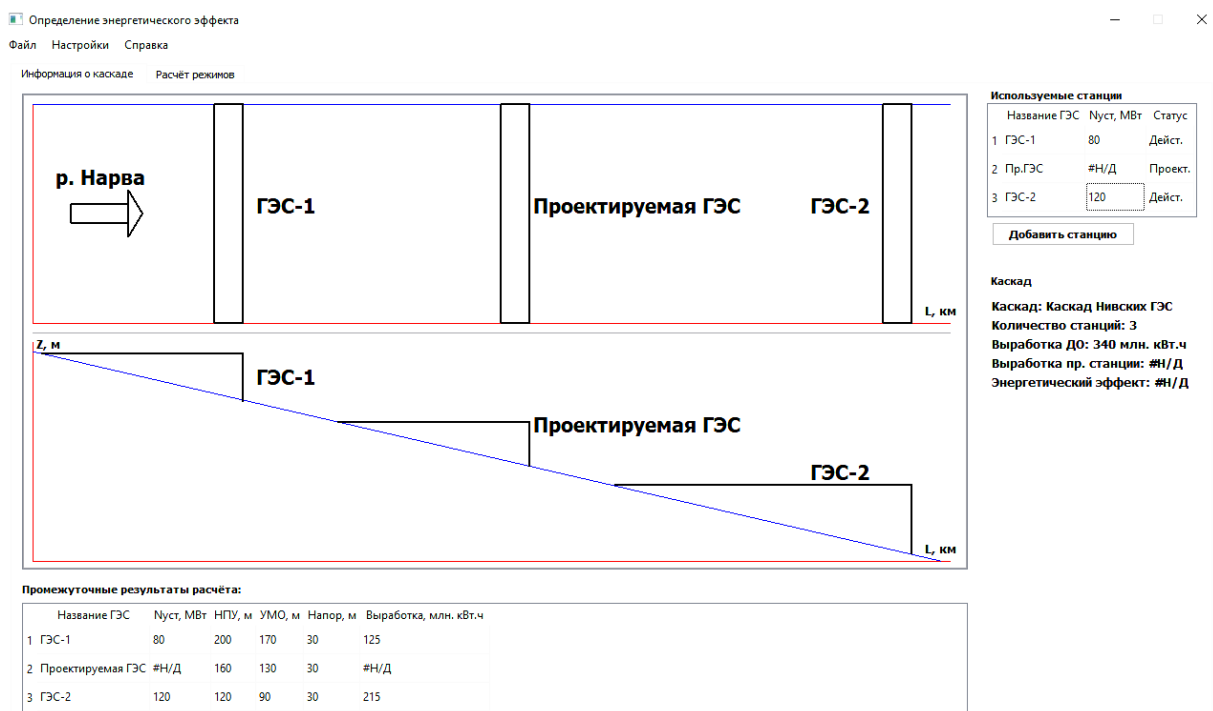


Рис. 1. Внешний вид программы.

Для проведения расчётов осуществляется переход на вкладку «Расчёт режимов». В настоящее время реализована система расчёта водно-энергетического режима одиночной гидроэлектростанции, зависимой по расходам от вышестоящей станции.

После проведения расчётов данные из итоговой таблицы расчёта каждой внесённой станции могут быть экспортированы в таблицу Microsoft Excel.

РАСЧЁТ РЕЖИМА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТА

Для проведения исследования после заданных начальных условий необходимо провести водно-энергетический расчёт. Внешний вид вкладки с расчётом представлен на рис. 2.

Расчёт проводится по алгоритму водно-энергетического расчёта одиночной ГЭС для одного водохозяйственного года [9]. Результат может быть получен либо с помощью ввода конечной отметки за рассматриваемый период, либо с помощью среднего расхода гидроэлектростанции за рассматриваемый период.

Расчёты водно-энергетического режима в комплексе должны быть произведены последовательно от первой станции к последующим станциям каскада. Боковой приток (при его наличии) будет учитываться отдельно.

В текущей версии комплекса реализуется расчёт для одного водохозяйственного года. В качестве величины притока может быть указан либо один из введённых ранее годов, либо программа может провести расчёт обеспеченности притока и выдать эти данные в качестве исходных. После проведения расчёта для всех станций в каскаде определяется энергетический эффект от строительства или модернизации станции. Если станция строится, то её текущая выработка будет добавлена к выработке станции, которые уже есть в каскаде. При модернизации каскада учитываются две версии характеристик.

Определение энергетического эффекта

Информация о каскаде | **Расчёт режимов**

Каскад Нисовоих ГЭС. Расчёт для "Проектируемая ГЭС". Текущий Расчётный период: 1/12

Отметка НПУ: 150 м Текущая ГЭС: Проектируемая ГЭС

Отметка УМО: 120 м

Кривая связи НБ

	85	100	150	200
Q куб.м/с				
Zл, м				
Zз, м				

Кривая связи ВВ

	85	100	150	200
Z, м				
V, млн. куб. м				

Режим ГЭС

Период: 4 | Экспортировать результат

Расход в последующих 3х периодах, млн.куб.м/с: 500 | 800 | 650

Месяц: Январь (зима)

Ввод конечной отметки:

Ввод среднего расхода млн.куб.м/с:

Провести расчёт | Отменить расчёт

На данный момент ошибок в расчёте нет!

№	Месяц	Приток	Сброс в НБ	Zнач	Zкон	Zср	Zнб-ср	Напор	Расход ГЭС	Нгэс	КПД	Эгэс
1	Апрель	1255	1620	85,4	85	85,2	66,4	18,7	1620	269	0,9	64,56
2	Май	8000	6400	85	87	86	66,8	19,8	6400	740	0,91	72,72
3	Июнь	3500	3030	87	89	88	66,8	19,8	3030	520	0,91	177,6
4	Июль	1500	4000	89	88,8	88,9	66,44	22,46	1585	323	0,9	160,5
5	Август	1230	1365	88,80	88,44	88,62	66,08	22,54	1365	279	0,92	240
6	Сентябрь	1200	1300	88,26	88,26	88,35	65,98	22,37	1300	260	0,9	207,5
7	Октябрь	1180	1300	88,26	87,94	88,1	65,98	22,12	1300	260	0,9	126
8	Ноябрь	1050	1300	87,94	87,74	87,84	65,98	21,86	1300	257	0,89	193,44
9	Декабрь	804	1160	87,29	86,23	86,76	65,76	21	1160	230	0,9	61,68
10	Январь	852	1300	86,23	84,75	85,49	65,76	21	1160	220	0,8	61,2
11	Февраль	848	1000	84,75	84,25	84,5	65,5	19	1000	170	0,9	55,4
12	Март	786	850	84,25	84,1	84,13	65,2	18,8	850	143	0,8	106,3

Рис. 2. Внешний вид вкладки для расчёта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена реализованная версия программного комплекса для проведения водно-энергетического расчёта каскада ГЭС и малых ГЭС. В своём текущем исполнении комплекс позволяет проводить расчёты для одного водно-хозяйственного года. Комплекс разрабатывается как учебная программа для проведения лабораторных и курсовых работ на кафедре ГВИЭ МЭИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кондратьева И.Г.**, Современные технологии и трансформация системы обучения // Вестник НЦБЖД – 2017 т.3 №33 с.27-32
2. **Болбат О.Б.** Опыт перехода на дистанционное обучение в период пандемии коронавируса // Международный журнал гуманитарных и естественных наук – 2021 – т.2-1 №53 с 96-98
3. **Труфакин С.С.** Оптимизация долгосрочных режимов ГЭС Ангаро-Енисейского каскада // Энергетика глазами молодежи: сб. докл. конф.: Самара, 2017, с. 173-176
4. **Бубер А.Л.** Имитационное моделирование водохозяйственных систем в режиме оптимизации диспетчерских правил управления на примере уникального природно-технического комплекса «Озеро Байкал – Иркутское водохранилище» // Природообустройство – 2018 – т.3 с.31-39
5. **Носов С.О.** Современное состояние и перспективы развития малой гидроэнергетики в республике Карелия // Энергоэксперт – 2021 – т.2 №78 с. 68-72
6. **Черняев М.В.** Плюсы и минусы развития малой гидроэнергетики: российская действительность и китайский опыт // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: Экономика - 2020 т.28 №2 с. 300-314
7. **Бубер А.А.** Разработка гидродинамической модели р. Ангара для оптимального управления водными ресурсами ангарского каскада ГЭС // Водные ресурсы России: Современное состояние и управление, сб. докл. конф.: Сочи, 2018 с. 128-137
8. **Беляев И.В.** Оптимизация режимов работы станционной сети Волжской ГЭС // Гидроэлектростанции в XXI веке, сб. мат. конф.: Саяногорск, 2015 с. 89-92
9. **Александровский А.Ю., Силаев Б.И.** Гидроэнергетические установки: учебное пособие. // М.: Издат-во МЭИ, 2005.

*Н.Ю. Моздер*¹, *А.Ф. Нарынбаев*², *А.Г. Васьков*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ РАБОТОЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С УЧЁТОМ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПРИХОДА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Для решения задачи оперативной оптимизации автономно работающего гибридного энергетического комплекса (АГЭК), состоящего из дизельной, фотоэлектрической электростанции и системы накопления энергии, разработан описанный в статье программный комплекс. Целевой функцией задачи оптимизации определена минимизация ежедневной суммы эксплуатационных затрат. Ограничениями являются выполнение условия баланса мощности, ограничения по минимальному времени безотказной работы и простоя дизельных агрегатов, доступность диспетчеризации, минимальные и максимальные пределы мощности, а также максимальная глубина разряда аккумуляторной батареи.

Ключевые слова – Солнечная энергетика, распределённая энергетика, управление, мониторинг, солнечное излучение, прогноз

1. ВВЕДЕНИЕ

На территории ДВФО располагается большое количество изолированных населенных пунктов, электроснабжение которых осуществляется от дизельных электростанций (ДЭС). Основная часть топлива для этих станций доставляется наземным транспортом, что повышает стоимость данного топлива и себестоимость производимой электроэнергии – в среднем выше 20 руб/кВтч. Снижение нагрузки на бюджет достигается путём совместного использования ДЭС и солнечных электростанций (СЭС), имеющего ряд преимуществ.

Наиболее эффективное использование ДЭС и СЭС, работающих в составе единого АГЭК, достигается оптимизацией режимов работы имеющегося и планируемого к использованию оборудования (в первую очередь – сокращение удельного расхода топлива на дизельных электростанциях). Реализация управления солнечно-дизельным комплексом с учётом краткосрочного прогноза прихода солнечного излучения безусловно позволит повысить оптимальность использования оборудования АГЭК путём оптимизации состава работающих агрегатов не в режиме реального времени, а загодя.

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СУТКИ ВПЕРЁД

Интеграция энергоустановок на основе возобновляемой энергии в электрическую сеть усложняет процесс управления и обеспечение непрерывности баланса производства и потребления из-за прерывистого и непредсказуемого характера первичных энергоресурсов [1, 2]. Таким образом, прогнозирование выходной мощности солнечных фотоэлектрических установок, которое в свою очередь восходит к проблеме прогнозирования величины солнечного излучения, необходимо для эффективной работы

энергосистемы и для оптимального управления генерируемыми потоками энергии [3].

Анализ имеющихся на сегодняшний день подходов к прогнозированию в солнечной энергетике можно сделать следующий вывод: на горизонтах прогнозирования от 1 часа до 1 суток. Наиболее предпочтительны модели временных рядов (ARMA, ARIMA и т.д.) и модели машинного обучения (ИНС, SVR, RF и т.д.). Для решения задачи прогнозирования СИ на сутки вперед была выбрана статистическая модель на основе искусственной нейронной сети с архитектурой многослойного перцептрона (MLP-модель).

Получение необходимой метеорологической информации обеспечивается системой мониторинга, основным и минимальным требованием к которой является наличие горизонтально установленного пиранометра. Для верификации разрабатываемой методики прогнозирования СИ на солнечной электростанции МЭИ установлена автоматическая метеостанция Vaisala, разработана система мониторинга (рис. 1).

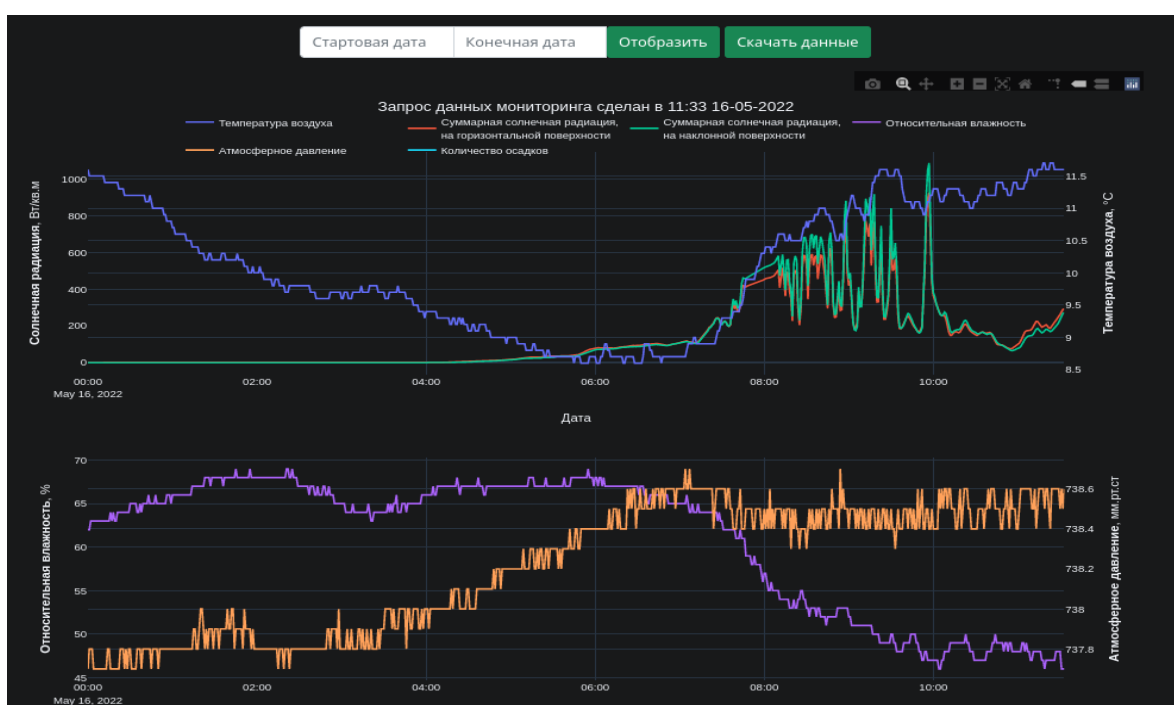


Рис. 1. Внешний вид системы мониторинга метеопараметров.

Для прогнозирования на 24 часа вперед с часовым разрешением использовались ЧПП-прогнозы двух метеопровайдеров — сервисов «Расписание Погоды» и «Clear Outside». Метрики погрешностей для сравнения моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Метрики погрешности

Модель	Метеопровайдер	Метрики			
		MAE, Втч/м ²	MBE, Втч/м ²	RMSE, Втч/м ²	nRMSE, %
MLP-модель	NWP (rp5.ru)	1,04	1,35	-0,13	17,04
	NWP (ClearOutside.com)	1,21	1,59	-0,38	20,16

Солнечная радиация за предыдущий день	-	1,37	1,88	-0,04	23,74
---------------------------------------	---	------	------	-------	-------

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

3.1. Математические модели элементов солнечно-дизельного комплекса

Для моделирования режима работы СДК необходимо наличие верифицированных аддитивных математических моделей его элементов: СЭС, учитывающей влияние внешних факторов; ДЭС с учётом изменения удельного расхода топлива.

Выходная мощность единичного солнечного модуля (СМ) P_{PV} определяется, исходя из его геометрических размеров, КПД и интенсивности солнечного излучения [6]:

$$P_{PV} = \eta_{см} A G, \quad (1)$$

где A , m^2 – площадь одного СМ, используемого в системе, G , Вт/кв. м – интенсивность солнечного излучения, $\eta_{см}$, о.е., – КПД солнечного модуля.

Учёт влияния температуры на эффективность СМ представлен в работах [5, 6, 7], где предлагается нелинейная зависимость:

$$\eta_{см} = \eta_{смref} (1 - \beta_{Tref} (T_c - T_{ref})), \quad (2)$$

где η_{Tref} , о.е. – эффективность СМ при стандартных условиях; β_{Tref} , о.е. – температурный коэффициент; T_{ref} , К – температура в стандартных условиях; T_c , К – температура ячейки солнечного модуля;

Предлагаемые в [8] корреляции обычно выражают T_c как функцию от соответствующих погодных переменных, а именно от температуры окружающей среды T_a , местной скорости ветра V_w и солнечного излучения, падающий на СМ, $G(t)$:

$$T_c = T_a + G \cdot \exp(a + bV), \quad (3)$$

где эмпирические коэффициенты a , b , dT учитывают тип фотоэлектрических элементов и способ монтажа солнечных модулей.

В случае эквивалентирования дизельных генераторов в ДЭС не удаётся определить значения удельного расхода топлива отдельных дизельных установок из-за различий в их индивидуальных энергетических характеристиках. Для более точного моделирования величины удельного расхода топлива необходимо учитывать типоразмеры и количество установленных на ДЭС дизель-генераторов, их нагрузочный режима и износ.

Анализ зависимостей удельного расхода топлива от рабочей мощности дизельного генератора показывает [9], что оптимальная загрузка дизель-генераторных установок ДЭС обеспечивается при максимизации удельной загрузки:

$$P_{дгуд}^{уд} = \frac{P_{дгуд}(t)}{P_{дгуд}^{ном}} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Очевидно, что указанное условие выполняется при удельной загрузке наиболее близкой к 1, т.е. работе дизельных генераторов с мощностью, близкой к номинальной. Кроме того, важной особенностью современных систем управления ДЭС является реализация равномерного распределения удельной загрузки:

$$P_{дгуд1}^{уд} = \dots = P_{дгудn}^{уд} = P_{дэс}^{уд}. \quad (5)$$

Дополнительно рекомендуется учитывать наработку моточасов каждого дизель-генератора.

3.2. Режим работы солнечно-дизельного комплекса

При моделировании режима работы СДК глобальным ограничением является требование выполнения баланса мощности в любой момент времени:

$$\sum P_t^{ДГУ} + \sum P_t^{PV} \pm \sum P_t^{СНЭ} = P_t^{нагр}. \quad (6)$$

В случае поиска оптимальной стратегии диспетчеризации микросети с дизельными генераторами основными параметрами, которые следует учитывать, являются характеристики эффективности и расхода топлива.

При оптимизации режима работы ДЭС дополнительно учитываются следующие ограничения:

- по возможности ограничивается работа генераторов при мощности менее 30 % от их номинальной выходной мощности.
- учитывается минимальное время работы под нагрузкой и минимальное время простоя.

В качестве системы накопления энергии в работе рассмотрена электрохимическая аккумуляторная система.

С точки зрения оптимальной диспетчеризации ключевыми характеристиками системы накопления энергии являются уровень заряда (SOC) и глубина разряда (DOD). Выражение для расчета значения SOC [%] для набора аккумуляторных батарей может быть записано как:

$$SOC_k^{min} \leq SOC_{k,i-1} + 100 \left(\eta_k^{ch} P_k^{ch} + \frac{P_k^{dch}}{\eta_k^{dch}} \right) \frac{\Delta t}{E_k^{bat}} \leq SOC_k^{max}. \quad (7)$$

Дополнительными ограничениями являются максимальная мощность зарядки и разрядки аккумуляторной батареи.

3.3. Результаты моделирования режима работы солнечно-дизельного комплекса

Тестовой площадкой для испытания работоспособности предлагаемых решений по оптимизации режима работы СДК выступает построенный в декабре 2021 года СДК в городе Верхоянск Республики Саха (Якутия). В состав СДК входят:

- ДЭС мощностью 1872 кВт, в составе 2 ДГУ мощностью по 400 кВт и 2 ДГУ мощностью по 536 кВт каждый;
- СЭС мощностью 952 кВт;
- Система накопления энергии емкостью 1400 кВт·ч на основе свинцово-углеродных аккумуляторов и двух двунаправленных батарейных инверторов мощностью по 150 кВт.

Моделирование режима работы проведено для условий майских суток. На рисунке 2 представлены результаты моделирования без учета прогнозирования выработки СЭС с использованием данных типичного метеорологического года (ТМУ) для условий Верхоянска.

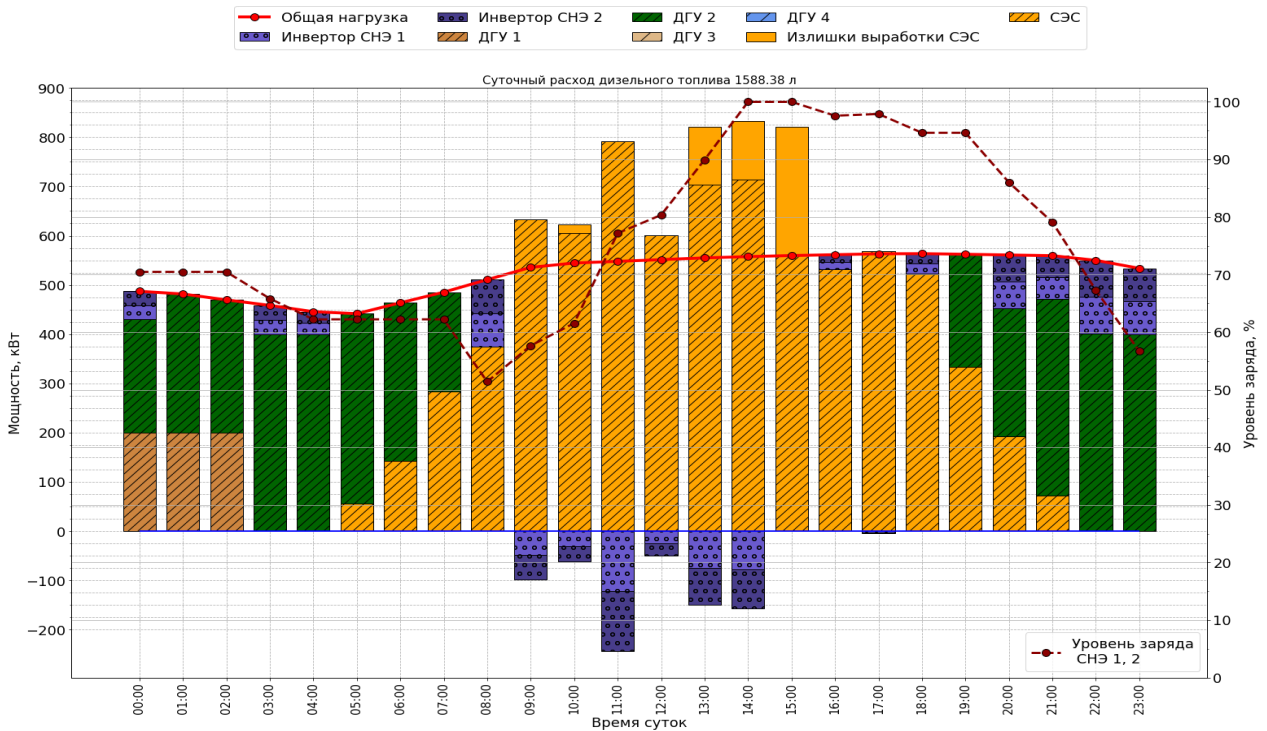


Рис. 2. Результаты моделирования режима работы солнечно-дизельного комплекса без учета прогнозирования выработки СЭС

На рисунке 3 показаны результаты моделирования с учетом прогнозирования выработки СЭС с использованием построенной MLP-модели. Использование прогнозирующей модели позволяет скорректировать результаты моделирования на основе данных ТМУ и встроить спрогнозированные данные по выработке СЭС в рамки условий и ограничений описанной выше оптимизационной задачи.

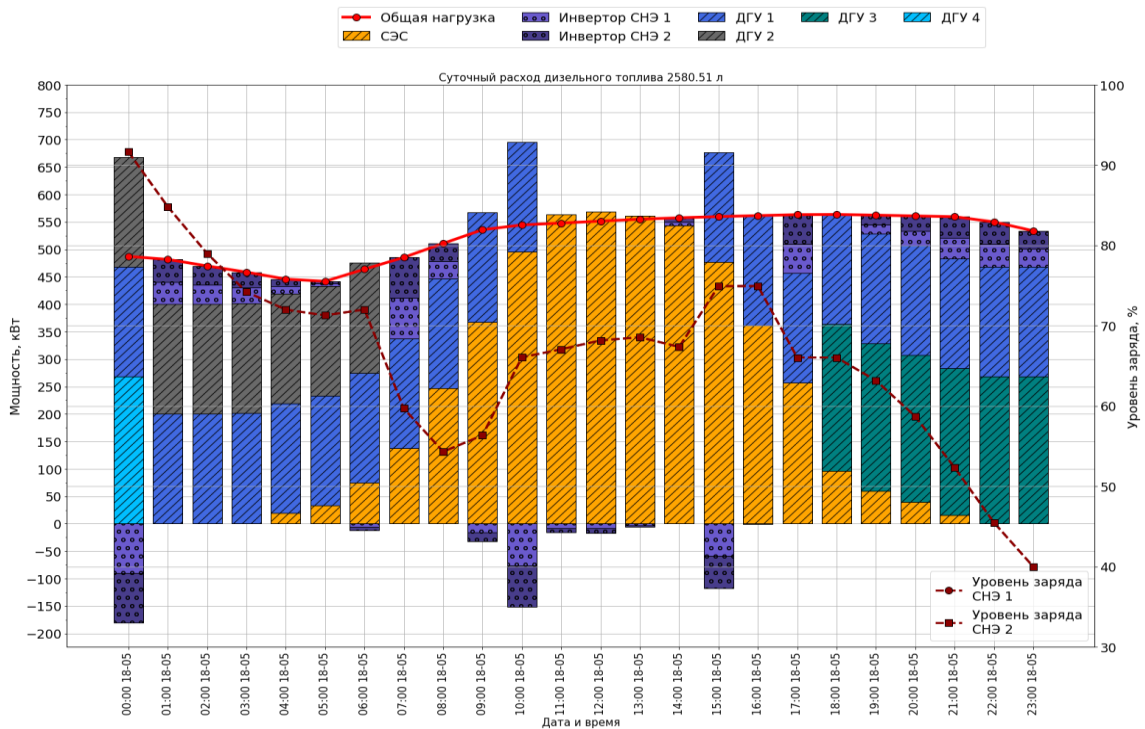


Рис. 3. Результаты моделирования режима работы солнечно-дизельного комплекса с учетом прогнозирования выработки СЭС

Таким образом, с помощью предлагаемого подхода к моделированию режима работы солнечно-дизельного комплекса можно осуществлять оптимальный выбор состава и режима работы генерирующего оборудования СДК на сутки вперед, что сводится к поиску набора решений при минимальном значении целевой функции (суточных эксплуатационных затрат СДК) и соблюдении всех ограничений. Кроме того, результаты, получаемые при помощи вышеописанного моделирования, могут быть полезны при оценке эффекта от внедрения СЭС к существующим ДЭС в топливном эквиваленте.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программный комплекс по моделированию режима работы СДК с учётом прогноза солнечного излучения позволяет в автоматизированном режиме проводить оперативное планирование режима работы СДК на сутки вперёд. При поддержке индустриального партнёра ООО "Группа ЭНЭЛТ" пилотный вариант программного комплекса включён в автоматизированную систему управления СДК в посёлке Верхоянск Республики Саха (Якутия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lara-Fanego V., Ruiz-Arias J.A., Pozo-Vazquez D., Santos-Alamillos F.J., Tovar-Pescador J.** Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain) // *Solar Energy*, Vol. 86, 2012. pp. 2200-2217.
2. **Moreno-Munoz A., De La Rosa J.J.G., Posadillo R., Bellido F.** Very short-term forecasting of solar radiation // 33rd IEEE Photovolt. Spec. Conf. 2008.
3. **Paulescu E., Paulescu M., Gravila P., Badescu V.** Weather Modeling and Forecasting of PV Systems Operation. London: Springer, 2013.
4. **Mariem Smaoui, Achraf Abdelkafi, Lotfi Krichen**, 2015. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind/hydrogen hybrid system supplying a desalination unit. *Solar Energy* 120 (2015) 263–276;
5. **Evans D.L., Florschuetz L.W.**, 1975. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration. *Solar Energy* 19 (1975) 255 — 262;
6. **Karunesh Kant, A.Shukla, Atul Sharma**, Pascal Henry Biwole, 2016. Heat transfer studies of photovoltaic panel coupled with phase change material. *Solar Energy* 140 (2016) 151-161;
7. **Martin János Mayer, Gyula Gróf**, 2020. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting. *Applied Energy* art. 116239
8. **D.L. King, J.A. Kratochvil, W.E. Boyson**, Photovoltaic array performance model Online, 8, 2004, pp. 1-19 doi: 10.2172/919131
9. **Штерн В.И.** Эксплуатация дизельных электростанций - М.: Энергия, 1980. - 120 с.

Секция 4

Интеллектуальные системы распределения и потребления энергии

Руководитель –
к.т.н., **Р.Р.Насыров**

*И.И. Бердышев*¹, *М.В. Бурмейстер*², *Р.В. Булатов*², *Р.Р. Насыров*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ ВИЭ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В работе представлена разработанная методика по определению параметров систем накопления электроэнергии (СНЭ) в составе электростанций (ЭС) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Методика включает в себя выбор алгоритмов для решения задач, возникающих при интеграции ВИЭ в энергосистему, таких как снижение колебаний выходной мощности, максимизация коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) ЭС на базе ВИЭ, обеспечение постоянства выдачи мощности ЭС на базе ВИЭ на различных временных интервалах. Алгоритмы реализованы на языке программирования *Python*, разработан и представлен интерфейс программы, с помощью которой были проведены расчеты на основе данных о реальной энергосистеме, содержащей ЭС на базе ВИЭ.

Ключевые слова – возобновляемые источники энергии, системы накопления электроэнергии, коэффициент состояния заряда, адаптивный линейный нейрон, коэффициент использования установленной мощности

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире и, в частности, в России находят широкое применение ВИЭ. В электроэнергетические системы (ЭЭС) и системы электроснабжения активно внедряется генерация электроэнергии ветроэлектрическими станциями (ВЭС) и солнечными электростанциями (СЭС) [1-2]. Согласно отчету Международного агентства по возобновляемым источникам энергии [1] установленная мощность ЭС на базе ВИЭ в мире в период с 2012 по 2021 увеличилась более чем в два раза с 1443 до 3063 ГВт. Темпы ввода генерирующих объектов ВИЭ на основе ветра и солнца в Российской Федерации в рамках программ ДПМ ВИЭ 1.0 и 2.0 также являются высокими. На основе данных [2] в период с 2014 по 2020 год установленная мощность солнечных и ветровых электростанций выросла с 8 до 2798 ГВт.

Основной проблемой при широком внедрении ЭС на базе ВИЭ в энергосистемы является нестабильность самих источников. Влияние изменения выходной мощности ЭС на базе ВИЭ тем больше, чем выше мощность или доля энергии, производимой такими электростанциями, во всей энергосистеме [3].

Одним из способов решения вышеописанной проблемы является применение СНЭ, при этом разработка методики по определению ее параметров является важной и актуальной задачей, которая позволит увеличить эффективность работы как самих генерирующих источников, так и всей системы.

На основе анализа мирового и отечественного опыта были определены три перспективных направления применения СНЭ в составе ЭС на базе ВИЭ: снижение колебаний

выходной мощности; максимизация КИУМ; обеспечение постоянства выдачи мощности на различных временных интервалах.

Таким образом, в рамках работы было необходимо разработать алгоритмы по определению параметров СНЭ в составе ЭС на базе ВИЭ для каждого из направлений применения, описанных выше, сама же методика включает в себя выбор определенного алгоритма для решаемой задачи при интеграции ВИЭ в существующую энергосистему.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СНЭ В СОСТАВЕ ЭС НА БАЗЕ ВИЭ

В рамках решения задачи снижения колебаний мощности выходной мощности ВИЭ был разработан алгоритм по определению параметров СНЭ [4]. Работа алгоритма состоит из четырех этапов. На первом этапе происходит сглаживание выходной мощности ЭС на базе ВИЭ. На втором этапе выходная мощность корректируется в соответствии с ограничениями на ее изменение. На третьем этапе с помощью коэффициента состояния заряда (КСЗ) определяется мощность и емкость СНЭ. На последнем этапе проводится контроль выходной мощности.

В предлагаемом алгоритме сглаживание графика мощности ВИЭ выполняется с помощью метода адаптивного линейного нейрона ввиду высокого быстродействия, контролируемой точности и простоты реализации. Границы допустимого изменения мощности задаются в зависимости от требований отраслевых нормативных документов [5-7].

На основе анализа мирового и отечественного опыта применения различных типов СНЭ в данном и последующем алгоритмах была выбрана аккумуляторная СНЭ (АСНЭ). Чрезмерный заряд или разряд батареи приводит к сложностям в управлении мощностью заряда-разряда АСНЭ [8], а также наносит ей серьезный ущерб, что приводит к снижению срока службы батареи [9]. В данном алгоритме для устранения негативных последствий от чрезмерного заряда или разряда используется ограничение коэффициента состояния заряда (КСЗ), представляющего собой отношение текущей емкости накопителя к максимальной. При приближении КСЗ к границам полного заряда и разряда с помощью коэффициентов накладываются ограничения на прием/выдачу мощности батареи. Значение коэффициента k в зависимости от режима работы батареи и КСЗ представлена в таблице 1.

Табл. 3. Значение коэффициента, ограничивающего прием/выдачу энергии батареями

$C_{\text{тек}}/C_{\text{макс}}$ о.е.	Значение коэффициента k	
	Заряд	Разряд
0.3	1	0
0.3 – 0.4	1	$1 - (1/0.4) \cdot (0.4 - C_{\text{тек}}/C_{\text{макс}})$
0.4 – 0.6	1	1
0.6 – 1	$1 - (1/0.4) \cdot (C_{\text{тек}}/C_{\text{макс}} - 0.6)$	1

Для определения параметров СНЭ с целью максимизации КИУМ ЭС на базе ВИЭ был разработан алгоритм, представленный в [10]. При его работе на первом этапе происходит определение требуемой мощности и емкости СНЭ для поглощения избыточной мощности ВИЭ. На втором этапе выходная комбинированная мощность ВИЭ и СНЭ, представляющая собой их сумму, корректируется в соответствии с ограничениями на ее изменение. На третьем этапе с помощью коэффициента состояния заряда (КСЗ) коррек-

тируется мощность и емкость СНЭ. На четвертом этапе полученный график выходной комбинированной мощности сглаживается с помощью алгоритма на основе адаптивного линейного нейрона. На последнем этапе проводится контроль выходной комбинированной мощности ВИЭ и СНЭ с учетом всех ограничений.

В рамках решения задачи обеспечения постоянства выдачи мощности ЭС на базе ВИЭ на различных временных интервалах был разработан алгоритм по определению параметров СНЭ, блок-схема которого представлена на рисунке 1.

Работа алгоритма состоит из нескольких этапов. На первом этапе происходит определение диапазона требуемой мощности ВИЭ на временных интервалах (час, день, неделя). На втором этапе выходная комбинированная мощность ВИЭ и СНЭ, представляющая собой их сумму, корректируется в соответствии с диапазоном выдачи мощности. На третьем этапе с помощью коэффициента состояния заряда (КСЗ) корректируется мощность и емкость СНЭ. На последнем этапе проводится итоговый контроль выходной мощности.

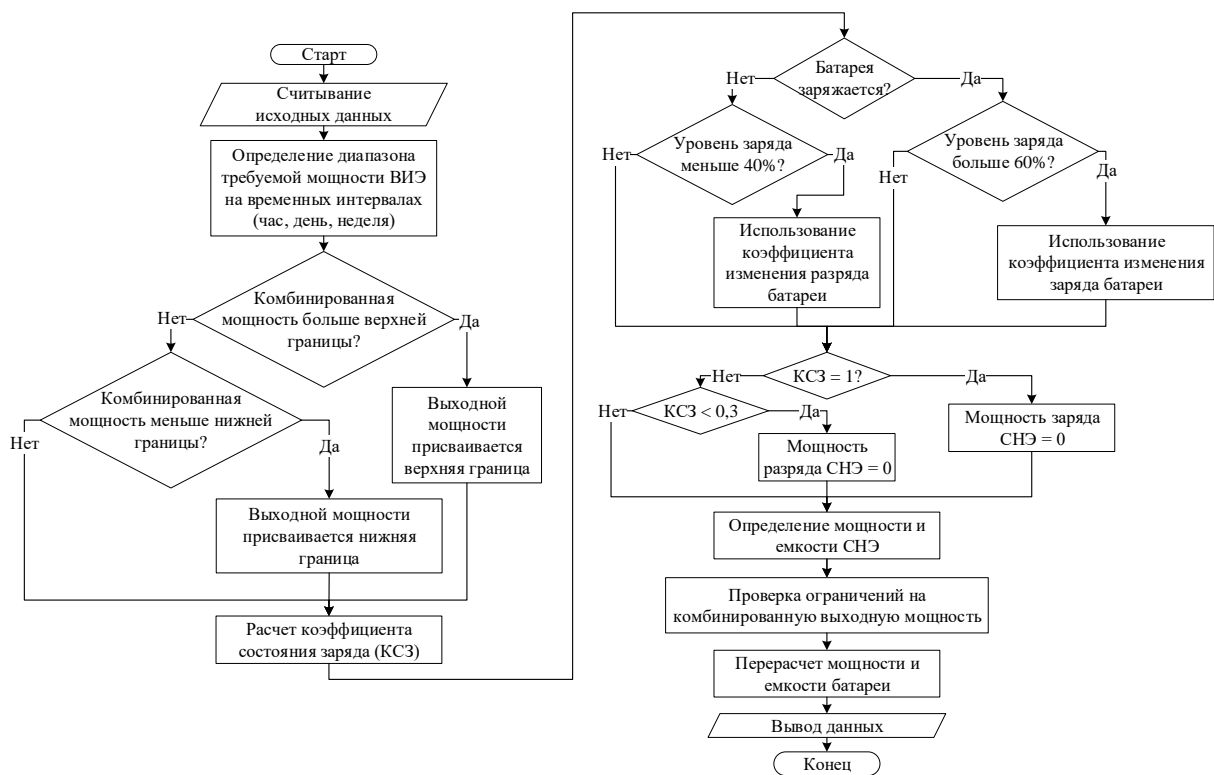


Рис.1. Блок-схема алгоритма по определению параметров СНЭ с целью обеспечения постоянства выдачи мощности эс на базе ВИЭ на различных временных интервалах

5. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ

Вышеописанные алгоритмы были реализованы на языке программирования *Python*. Разработанная программа представлена в виде исполняемого файла формата *.exe*. При работе с программой для каждого выбираемого алгоритма необходимо заполнить исходные данные, к которым относятся: графики выдачи мощности ЭС на базе ВИЭ, графики нагрузки (для работы алгоритма по увеличению КИУМ ЭС на базе ВИЭ), параметры накопителя в части исходного заряда (максимальный и минимальный КСЗ по умолчанию, 100% и 30%, соответственно), стартовой емкости, а также КПД, установленная мощность

ЭС на базе ВИЭ, допустимое изменение мощности ЭС на базе ВИЭ, коэффициент обучения (для алгоритма по сглаживанию мощности).

В результате работы каждого алгоритма в окне программы представляется требуемая мощность и емкость СНЭ для реализации соответствующей задачи применения СНЭ. Также для каждого алгоритма программа формирует графики активной мощности СНЭ, ЭС на базе ВИЭ, комбинированной мощности, мощности нагрузки и мощности, требуемой из системы (для алгоритма по увеличению КИУМ), а также в отдельном окне график изменения КСЗ от времени. Данные графики формируются для наглядности полученных результатов. Помимо этого, программа предусматривает вывод данных в формате *.xlsx* основных и промежуточных данных для их более подробного исследования.

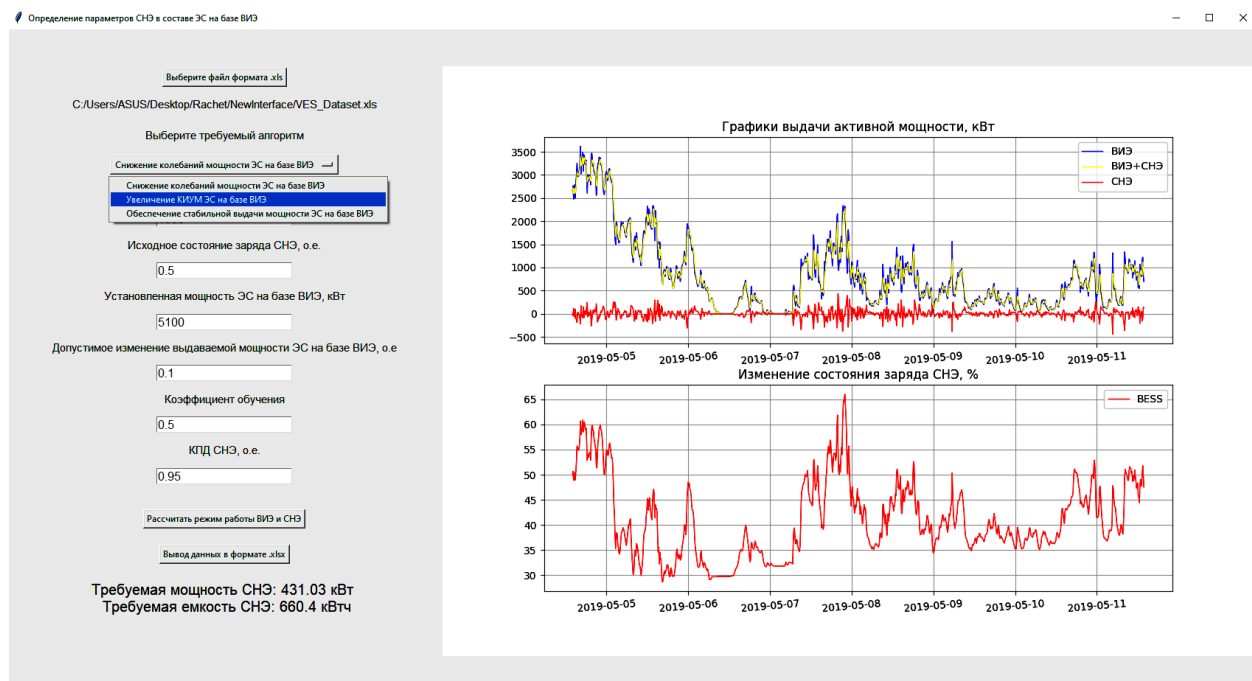


Рис. 2. Внешний вид программы по определению параметров СНЭ в составе ЭС на базе ВИЭ

5. АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ

Разработанные программы и алгоритмы были применены на данных о реальной энергосистеме, содержащей ВЭС. Подробные данные схемы представлены в [4].

В исходном режиме работы ВЭС наблюдалось 62 случая превышения максимального изменения выходной мощности на ВЭУ-1, 44 на ВЭУ-2 и 52 на ВЭУ-3. Для обеспечения не превышения изменения выходной мощности ВЭС, составляющего 10 процентов на 10-минутном интервале, на ВЭУ-1 необходима установка накопителя мощностью 229.2 кВт и емкостью 190 кВт·ч. Для остальных ВЭУ результаты представлены в табл. 2.

Для сравнения эффективности разработанного алгоритма с существующими на имеющихся данных был применен широко распространенный алгоритм на основе фильтра низких частот. Результаты расчётов мощности и ёмкости СНЭ и скорости обучения α приведены в таблице 2.

Табл. 4. Результаты расчётов необходимой мощности и ёмкости СНЭ для ВЭУ 1- при применении разработанного алгоритма и алгоритма на основе фильтра низких частот

№ ВЭУ	1	2	3
<i>Разработанный алгоритм</i>			
α , о.е.	0.51	0.40	0.45
P_{ESS} , кВт	229.2	230.7	429.2
C_{ESS} , кВт·ч	190	100	105
<i>Алгоритм на основе фильтра низких частот</i>			
P_{ESS} , кВт	346.0	274.9	468.4
C_{ESS} , кВт·ч	462	331	360

Для обеспечения максимального КИУМ были проведены расчеты с различными емкостями СНЭ, а также с различным исходным состоянием заряда. Результаты в виде зависимостей КИУМ от емкости СНЭ представлены на рисунке 3.

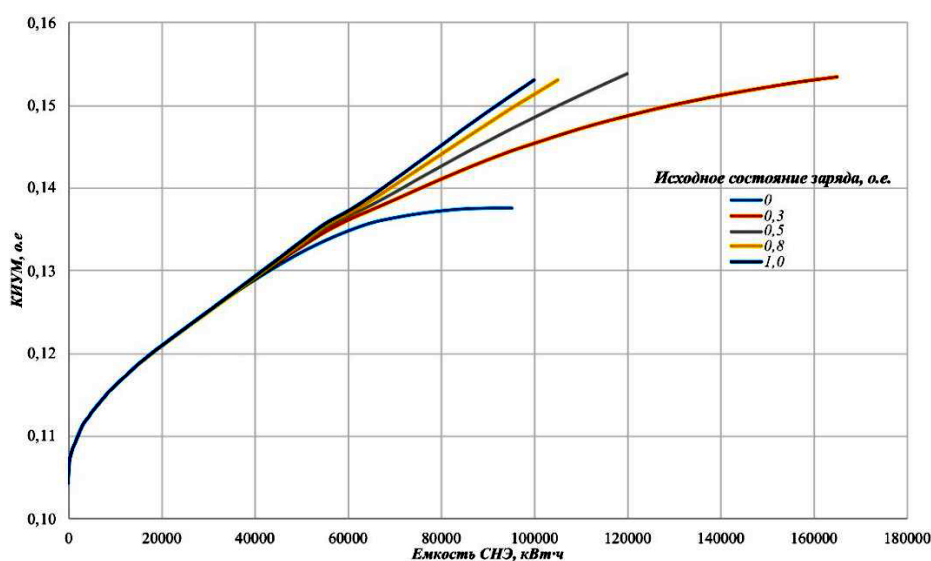


Рис. 2. График зависимости КИУМ от емкости при различных исходных состояниях заряда

Для обеспечения выдачи стабильной мощности на часовом интервале с учетом всех ограничений требуется СНЭ мощностью 750 кВт и емкостью 384 кВт·ч, на дневном интервале СНЭ мощностью 1500 кВт и емкостью 9300 кВт·ч (рисунок 5), на недельном интервале СНЭ мощностью 2500 кВт и емкостью 20000 кВт·ч.

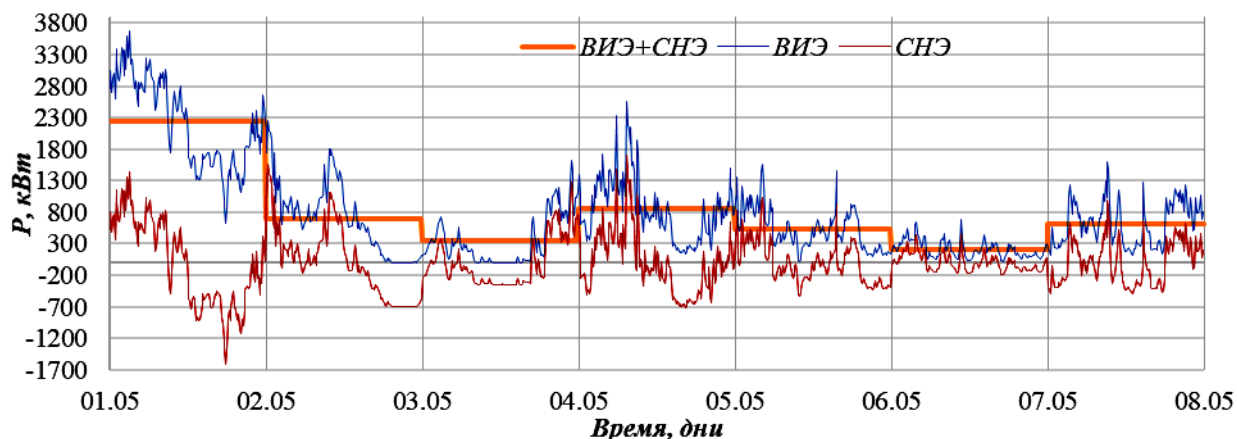


Рис. 3. График выдачи фиксированной мощности ВИЭ в течение суток

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была разработана методика по определению параметров СНЭ в составе ЭС на базе ВИЭ для решения задач снижения колебаний выходной мощности, максимизации КИУМ и обеспечения постоянства выдачи мощности на различных временных интервалах. Разработанные алгоритмы в рамках методики позволяют определять мощность и емкость СНЭ с учетом ограничений, вызванных особенностями работы ЭС на базе ВИЭ и накопителей. В рамках работы были проведены расчеты на основе данных реальной электрической сети, содержащей ВЭС. Методика и сопутствующие ей алгоритмы могут быть использованы при проектировании, реконструкции и новом строительстве электрических сетей, содержащих СНЭ в составе ЭС на базе ВИЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Renewable** capacity statistics 2022. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf
2. **Ассоциация** развития возобновляемой энергетики. <https://reda.ru/> (дата обращения: 16.05.2022).
3. **Liang X.** Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources // Proceedings of 2016 IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting. 2016. P. 1-9.
4. **R. V. Bulatov, R. R. Nasyrov, M. V. Burmeister, M. O. Polyakov, I. I. Berdyshev and T. A. Bidzhiev.** "Application of a Battery Energy Storage System to Reduce Fluctuations in the Power Output of a Wind Farm Integrated into the Power System," 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388034
5. **IEC 61400-21 (2008).** Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, 2nd edn, IEC, Geneva.
6. **MEASNET** guideline: "Power Quality Measurement Procedure of Wind Turbines", MEASNET, 2009.
7. **FGW (Fördergesellschaft Windenergie e.V.),** "Determination of electrical characteristics of power generating units and systems connected to MV, HV and EHV grids", Technical Guidelines for Power Generating Units and Systems, Part 3', <http://www.wind-fgw.de> FGW TR3, 2011.
8. **B. Liu, L. Lin, A. Yin, L. Li, Q. Wang and D. You,** "Control and sizing methodology of BESS in wind farms considering adaptive adjustment of SOC", 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, 2017, pp. 2738-2743, doi: 10.1109/CAC.2017.8243241.
9. **B. Liu, M. Yin, Q. Lin, L. Lin, S. Yuan, J. Ma and T. Guan,** "Control strategy of BESS for smoothing fluctuation of photovoltaic power based on fuzzy control theory", Chinese Automation Congress (CAC), 2017. doi:10.1109/cac.2017.8243242.
10. **Булатов Р.В., Насыров Р.Р., Бурмейстер М.В.** Применение систем накопления электроэнергии для повышения коэффициента использования установленной мощности электростанций на базе возобновляемых источников энергии в составе электрических систем // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ. 2021. № 6(69). С. 74 – 80.

*И.И. Бердышев*¹, *М.В. Бурмейстер*², *Р.В. Булатов*², *Р.Р. Насыров*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЙ УСЛОВИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

В мире активно идёт интеграция возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электроэнергетические системы (ЭЭС). Большинство ВИЭ подключаются к сети при помощи силовой электроники, что имеет негативные последствия для ЭЭС, такие как ухудшение качества переходных процессов и условий устойчивости ЭЭС. Возможным способом решения данных проблем является применение виртуальной синхронной машины (ВСМ). В работе приведено математическое описание ВСМ на основе уравнений синхронного генератора. Выполнено моделирование ВСМ в *Matlab Simulink*[®]. Для проверки модели ВСМ создана тестовая система. В качестве возмущающих воздействий для проверки ВСМ использовались скачкообразные изменения активной мощности в изолированной ЭЭС. В результате исследования определено влияние ВСМ на качество переходного процесса в ЭЭС.

Ключевые слова – виртуальная синхронная машина, виртуальная инерция, трехфазный конвертор, имитационное моделирование, синхронвертер

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире и, в частности, в России находят широкое применение ВИЭ. За период с 2012 по 2021 год мощность выработки электрической энергии с помощью ВИЭ в мире выросла примерно в два раза [1]. Электростанции (ЭС) на основе ВИЭ имеют самые быстрые темпы роста среди всех источников электроэнергии в энергосистемах мира.

Большинство ЭС на основе ВИЭ подключаются к сети с помощью силовых преобразователей – инверторов. Например, ветроэнергетические установки вырабатывают электроэнергию с переменной частотой, поэтому произведенная электроэнергия несовместима с сетью. Солнечные панели генерируют постоянный ток, который необходимо преобразовывать в переменный ток промышленной частоты. Силовые преобразователи необходимы для управления этой генерацией и подключения ВИЭ к сети.

Синхронные генераторы (СГ) являются основными устройствами для поддержания устойчивости параллельной работы генераторов в ЭЭС, соответственно при большой доле ВИЭ в системе их процентное содержание уменьшается. Это негативно влияет на устойчивость ЭЭС, вызывая ухудшение качества переходных процессов и условий устойчивости.

Одним из способов решения вышеописанной проблемы является применение систем накопления электроэнергии (СНЭ) и устройств на их основе, таких как ВСМ [2]. Данный подход основан на управлении силовой электроникой и позволяет интегрировать ВИЭ в традиционную энергосистему. Суть подхода заключается в придании ВИЭ электромеханических свойств синхронных машин (СМ), так как именно их свойства определяют переходные характеристики ЭЭС [3].

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Виртуальная синхронная машина – это комплекс устройств и алгоритмов, выполняющий преобразование постоянного тока в переменный ток промышленной частоты, имитирующий инерционный отклик синхронных машин на ЭЭС на основе уравнений СМ [2]. На рис. 1 показана структурная схема виртуальной синхронной машины, состоящей из трехфазного конвертора на основе *IGBT*-транзисторов [2]. Источником постоянного тока на входной стороне может быть ветряная энергоустановка, фотоэлектрическая панель или аккумуляторная батарея. Для минимизации пульсаций напряжения, вызванных высокочастотным переключением транзисторов, используется фильтр гармоник. Конвертер управляется блоком управления ВСМ, который вырабатывает импульсы для переключения затвора транзисторов инвертора на основе обратной связи по напряжению и току с выходной стороны, получаемых через трансформаторы тока и напряжения.

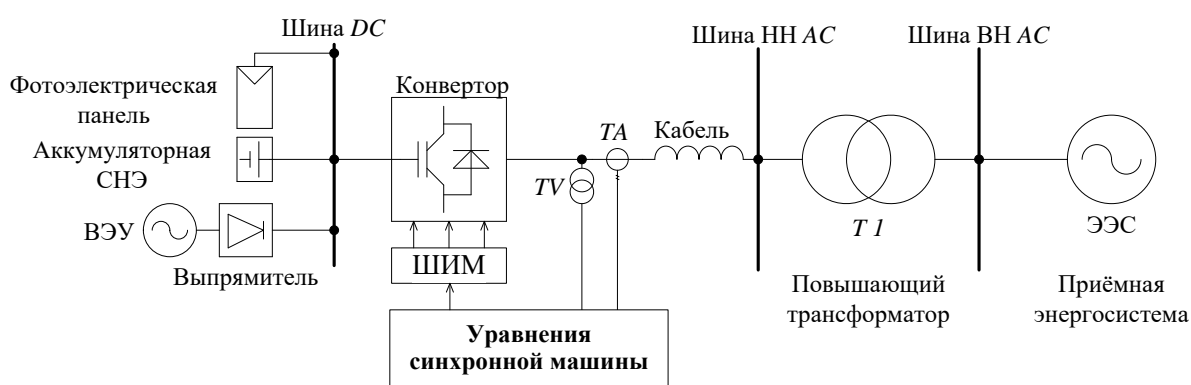


Рис. 1. Принципиальная схема виртуальной синхронной машины

В данной работе математической моделью, используемой для ВСМ, является модель СГ, предложенная в работе [4]. При моделировании использовались следующие упрощения:

- 1) трёхфазная система считается симметричной;
- 2) не учитывается насыщение магнитной цепи статора.

Соответствующие уравнения, необходимые для реализации ВСМ, приведены ниже. Электромагнитный момент T_e , описывается как:

$$T_e = M_f i_f \langle \hat{i}, \widetilde{\sin}(\theta) \rangle \quad (1)$$

где θ - виртуальный угол ротора или фазовый угол генерируемой ЭДС, i_f - воображаемый ток поля, M_f - взаимная индуктивность между воображаемой обмоткой возбуждения и воображаемой обмоткой статора. $\langle \hat{i}, \widetilde{\sin}(\theta) \rangle$ обозначает скалярное произведение векторов токов \hat{i} и $\widetilde{\sin}(\theta)$, где i_a, i_b и i_c - фазные токи статора.

$$\hat{i} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \quad (2)$$

$$\widetilde{\cos}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\widetilde{\sin}(\theta) = \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - 120^\circ) \\ \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ЭДС, возникающая при движении ротора, представлена в виде:

$$E = \frac{d\theta}{dt} M_f i_f \widetilde{\sin}(\theta) \quad (5)$$

Активная и реактивная мощности записываются как:

$$P = \frac{d\theta}{dt} M_f i_f \langle \widetilde{i}, \widetilde{\sin}(\theta) \rangle \quad (6)$$

$$Q = - \frac{d\theta}{dt} M_f i_f \langle \widetilde{i}, \widetilde{\cos}(\theta) \rangle \quad (7)$$

Уравнения (1), (5), (6) и (7), полученные из уравнений синхронной машины, используются в блоке управления виртуальной синхронной машины.

3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВИРТУАЛЬНОЙ МИХРОННОЙ МАШИНЫ

В этом разделе описана реализация управления ВСМ. Для разработки модели ВСМ используется программное обеспечение *Matlab Simulink*[®], данное ПО позволяет моделировать электрические цепи во времени, обладает большой библиотекой электротехнических элементов и функционалом для решения дифференциальных уравнений. Разработанная имитационная модель ВСМ представлена на рис. 2. Тестовая система с источником постоянного тока представлена на рис. 3. Система включает в себя соединительные кабели, фильтр гармоник, нагрузку, приемную ЭЭС, коммутационное оборудование, трансформаторы тока и напряжения, конвертор на основе *IGBT* транзисторов. Параметры элементов тестовой системы приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры элементов тестовой системы

Параметр	Значение	Параметр	Значение
L_s	0.45 мГн	L_g	0.45 мГн
R_s	0.135 Ом	R_g	0.135 Ом
C	22 нФ	Частота	50 Гц
R	1000 Ом	Напряжение DC	42 В
P	100 Вт		

Для преобразования постоянного тока в трехфазный переменный используется двухуровневый трехфазный инвертор. На инвертор подаются управляющие сигналы от блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Силовая часть инвертора с помощью переключения затворов транзисторов имитирует синхронный генератор.

Управляющая часть виртуальной синхронной машины генерирует синусоидальный модулирующий сигнал для управления транзисторами с использованием ШИМ. В блоке управления ВСМ численно решаются уравнения (1), (5), (6) и (7). Уравнение движения ротора реализуется в блоке управления ВСМ для формирования фазового угла ЭДС. Уравнение крутящего момента (1) выдаёт электромагнитный крутящий момент T_e , используя трехфазный выходной ток, взаимную индуктивность между воображаемой обмоткой возбуждения и обмоткой статора и фазовый угол. Механический крутящий момент рассчитывается из механической входной мощности P путем деления её на номинальную угловую скорость. На выходе сигнала угловой скорости используется сбрасываемый интегратор, который сбрасывает интегратор при достижении фазового угла 2π .

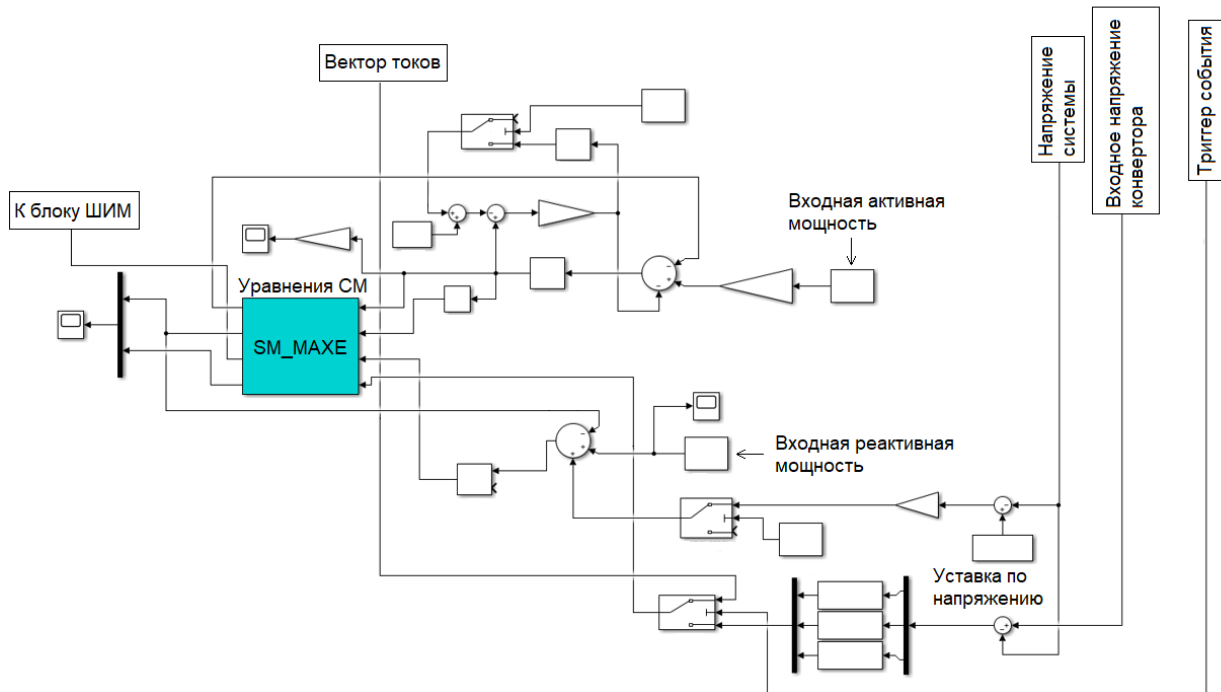


Рис. 2. Модель ВСМ, выполненная в *Matlab Simulink* – алгоритм ВСМ

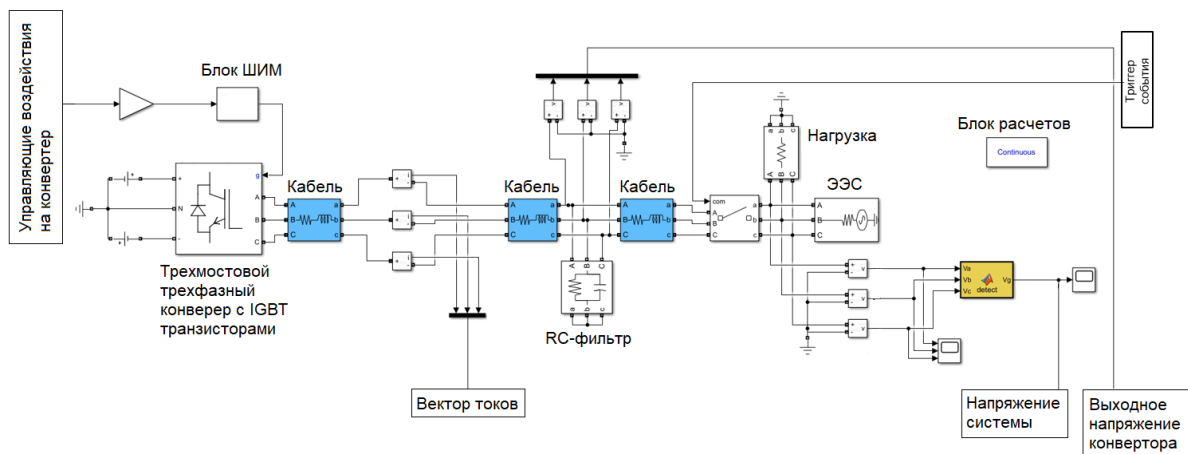


Рис. 3. Модель ВСМ, выполненная в *Matlab Simulink* – силовая часть и блок ШИМ

Характеристики статизма могут быть реализованы в виртуальной синхронной машине путем сравнения опорной угловой частоты $\dot{\theta}_n$ (равной номинальной угловой частоте сети) с виртуальной угловой скоростью θ , а разность умножается на демпфирующий коэффициент (равный D_p) и суммируется с активным крутящим моментом T_m . Он обозначает изменение приложенного крутящего момента на виртуальном роторе изменением угловой частоты.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Имитационный эксперимент проводился на модели сети, показанной на рис. 3. Эффект от применения ВСМ можно оценить на рис. 4 и 5. Опыт заключался в скачкообразном изменении выработки активной мощности на 10% в изолированной ЭЭС. На рис. 4Рис. кривая *A* показывает изменение активной мощности во времени до применения

ВСМ, колебания при этом затухают порядка 2 секунд. Кривая *B* показывает тот же параметр во времени, но уже с применением ВСМ. При этом колебания затухают примерно за 0.2 секунды. Аналогично на рис. 4 представлены изменения реактивной мощности во времени – кривая *C* без применения ВСМ, кривая *D* с применением. Колебания при применении ВСМ также затухают на порядок быстрее.

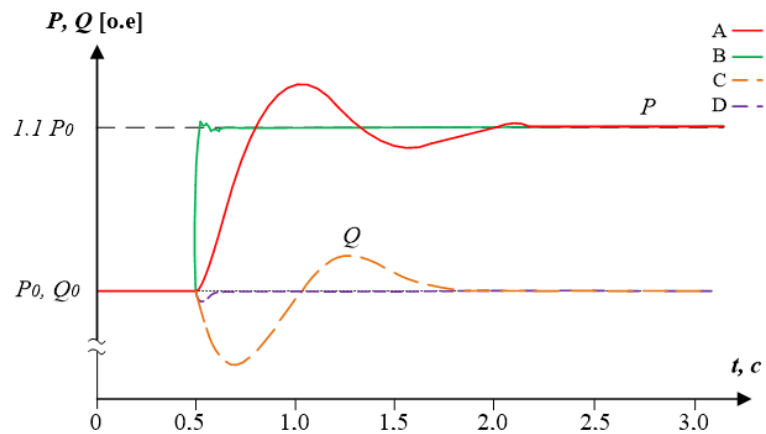


Рис. 4. Изменение переходного процесса по P, Q при применении ВСМ
A, C – до применения ВСМ; *B, D* – после применения ВСМ

На рис. 5 изображен график изменения частоты во времени в изолированной системе при периодическом возмущении. Применение ВСМ значительно ограничило падение частоты (с 0.8 до 0.2 Гц), при этом превышение частоты номинального значения практически не наблюдается.

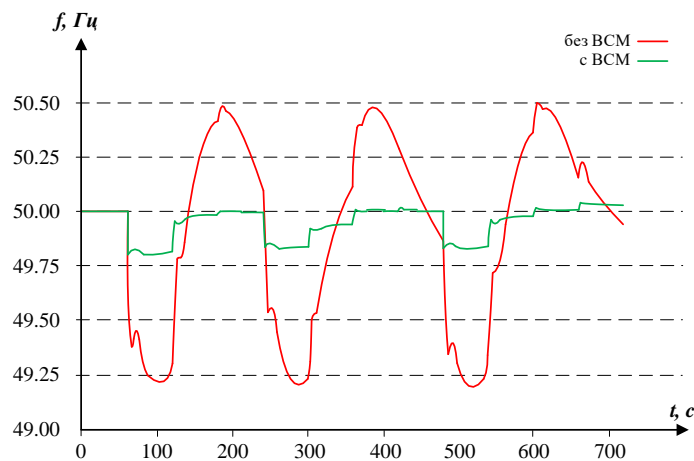


Рис. 5. Изменение переходного процесса по частоте при применении ВСМ

Таким образом, виртуальная синхронная машина позволяет улучшить качество переходных процессов, увеличить запас устойчивости при интеграции возобновляемых источников энергии в существующие электроэнергетические системы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы создан алгоритм управления конвертером, использующий модель ВСМ. Для формирования синусоидального выходного напряжения используется ШИМ. Исследовано качество управления конвертером с помощью широтно-импульсной модуляции. Выбраны параметры фильтра для установки на конвертере со стороны пере-

менного напряжения. Определены настроечные коэффициенты ВСМ для устойчивой работы электростанций. Изучено влияния виртуальной инерции ВСМ на демпфирование колебаний в системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Renewable** capacity statistics 2022. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2022.pdf
2. **М. В. Бурмейстер, Р. В. Булатов, К. А. Блинова.** Применение систем виртуальной инерции для улучшения качества переходных процессов в электроэнергетических системах // Фёдоровские чтения — 2021: LI международная научно-практическая конференция с элементами научной школы, Москва, 17–19 ноября 2021 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2021. – С. 318-324.
3. **Климов В.** Частотно-энергетические параметры ШИМ-инверторов систем бесперебойного питания / В. Климов // Силовая Электроника. — 2009. — № 4. — с. 66–71.
4. **Q. C. Zhong and G. Weiss.** "Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, April 2011.

*А.С. Демиденко*¹, *Г.А. Парфенов*¹, *С.А. Куделина*¹, *Г.В. Шведов*²

1 – студент, 2 – руководитель ВКР, руководитель проекта

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ КВАРТИРЫ И ЖИЛОГО ЗДАНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

АННОТАЦИЯ

В статье обобщены результаты анализа электропотребления квартиры и жилого здания. Продемонстрирован прибор для снятия показаний электропотребления квартиры, построены графики электропотребления квартиры. По результатам измерений получены актуальные графики нагрузки на вводе в дом для различных дней недели. Проведен корреляционный анализ электропотребления квартиры и жилого дома. Показана разработанная программа для получения расчетного максимума средней нагрузки из большого массива данных.

Ключевые слова – электропотребление, умный дом, суточный график нагрузки, расчетная нагрузка

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время треть всей произведенной электроэнергии потребляется домохозяйствами [1].

На стадии проектирования невозможно точно определить, какую нагрузку в определенный момент времени будут потреблять конкретные электроприёмники. Для расчета мощности, потребляемой жилыми зданиями, проектные организации используют нормативные удельные нагрузки [2]. За время, прошедшее с последнего обновления нормативных значений, существенно изменился не только состав, но и энергоэффективность бытовых электроприборов.

В наши дни участились случаи, когда нагрузка, рассчитанная по нормативным документам, значительно отличается от фактической, причем реальные нагрузки меньше расчетных в 1,5-2,5 раза. Поэтому необходимо обеспечить мониторинг электрических нагрузок зданий бытового назначения для своевременной актуализации нормативной документации. Решение данного вопроса позволит сокращать стоимость технологического присоединения к электрическим сетям [3]. Для корректного проектирования как систем электроснабжения (СЭС) городов в целом, так и внутренних СЭС многоквартирных жилых зданий необходимо получение достоверной модели графика электрической нагрузки жилого дома [4]. Использование существующих моделей определения расчетных нагрузок на этапе проектирования приводит в последующем к низкой загрузке распределительных сетей и энергетического оборудования, нерациональным режимам работы сетей, что приводит к понижению энергоэффективности и экономической эффективности электросетевых и генерирующих компаний и тормозит их дальнейшее развитие.

2. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ КВАРТИРЫ

2.1. Разработка прибора для снятия показаний электропотребления группы электроприемников/квартиры

В рамках гранта ПНИ 2020/22 было разработано изобретение «Счетчик электроэнергии с логированием данных» для измерения показаний потребления группы электроприемников и подана заявка на выдачу патента на данное изобретение.

Технической задачей изобретения является обновление элементной базы, расширение функционала посредством добавления программируемой логической цепи и добавление возможности записи показаний за любой промежуток времени. На рисунке 1 представлена модель корпуса измерительного устройства «Счетчик электроэнергии с логированием данных» для установки на DIN-рейку.

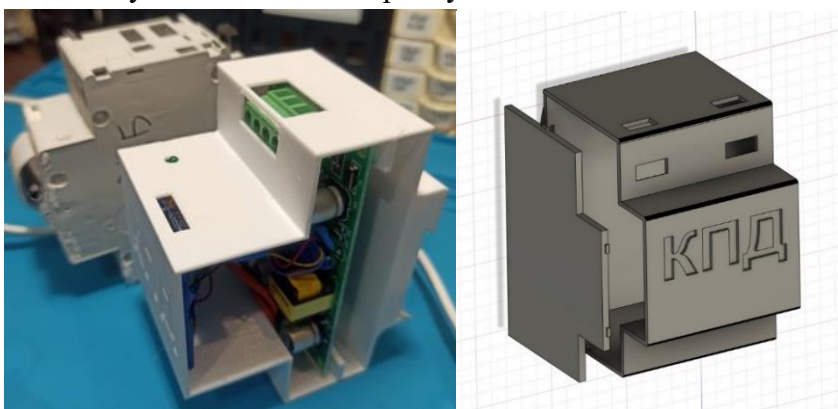


Рис. 1. Модель корпуса измерительного устройства

Преимуществом прибора является расширение функционала ваттметра, который достигается тем, что в схему устройства помимо обыкновенного цифрового ваттметра добавляется программируемый модуль Arduino Nano, модуль часов реального времени DS3231, картридер Micro-SDC использованием данного прибора возможно считывание мгновенных значений показателей, построение графиков с разным периодом осреднения показателей, запись показаний за длительное время, отправка команд на другие устройства умного дома, исходя из текущего потребления квартиры.

2.2. Сбор данных и построение графиков электропотребления квартиры

Для получения экспериментальных данных вышеуказанные приборы были установлены в три квартиры. Данные собирались в течение года с ежедневным измерением. Данные с прибора сохраняются на SD-карте.

Промежуточная обработка данных заключалась в создании файла в MS Excel, способного в автоматическом режиме подгружать данные, записанные на SD-карту разработанного измерительного комплекса. Построение графика осуществляется для определенного времени осреднения, которое можно динамично изменять. Расчетная мощность рассчитывается через суммарно потребленную за некоторые отрезки времени. Суммарная потребленная мощность является регистрируемым параметром данного измерительного комплекса. Таким образом была произведена обработка результатов измерений электропотребления квартир № 1 – 3 и получены графики нагрузки на вводе в данные квартиры. На рисунке 2 в качестве примера приведен график электропотребления квартиры в качестве примера для 02.09.2021 г.

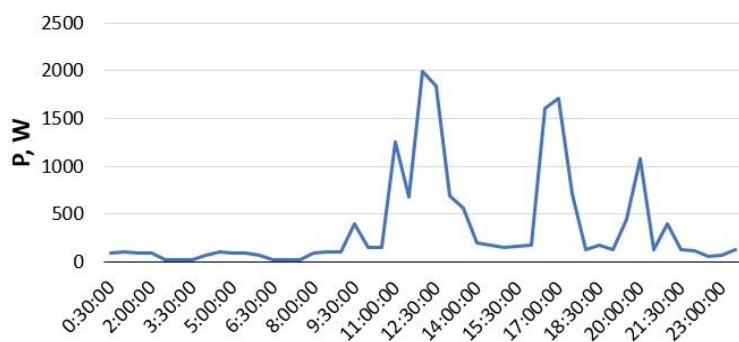


Рис. 2. Суточный график 1 квартиры за 02.09.2021

3. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

3.1. Исходные данные для исследования нагрузки жилых зданий

В качестве исходных данных использованы результаты фактических измерений автоматизированной системы коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ). Измерения проведены в северо-восточной части Московской области, г. Красногорске. Объектами исследования являются 7 типовых жилых зданий, в квартирах которых установлены электрические плиты. Показания счетчиков снимались каждые 30 минут в период с 01.01.2017 по 31.12.2019 гг. для домов № 4-7, для домов № 1-3 в период с 11.11.2017 по 31.12.2019 г.

3.2. Построение суточных графиков электрических нагрузок

Наглядное представление о характере изменения электрических нагрузок во времени дают графики нагрузок, которые отражают динамику потребления активной мощности в течение определенного рассматриваемого периода (от суток и до года).

Рассматривались только показания за декабрь-январь, так как в эти месяцы для зимы наблюдается максимум нагрузки и продолжительность светового дня этих зимних месяцев примерно одинаковая. Статистическая обработка результатов выполнена с использованием MS Excel. Каждый дом рассматривался по отдельности. На рисунке 3 представлены суточные графики нагрузки зимних рабочих дней для семи зданий.

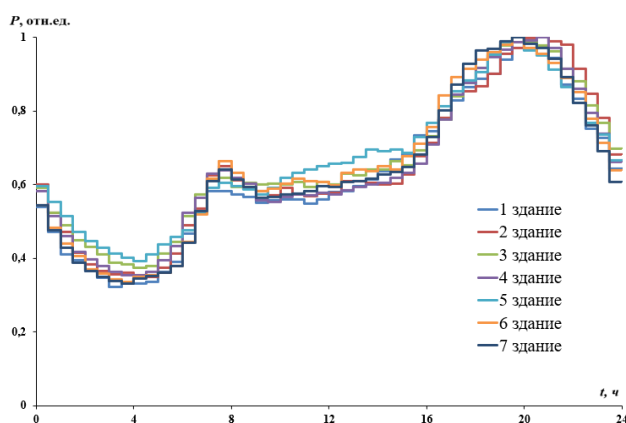


Рис. 3. Суточные графики нагрузки зимних рабочих дней для семи зданий

Для упрощения вычислений при расчетах параметров передачи электроэнергии применим систему относительных единиц. За базовую величину в относительных единицах принимается максимальная мощность каждого суток. Для субботних и воскресных дней графики были построены аналогично.

3.3. Актуализированные суточные графики нагрузки зимних дней

На рисунке 4 представлены суточные графики нагрузки зимних дней жилого здания.

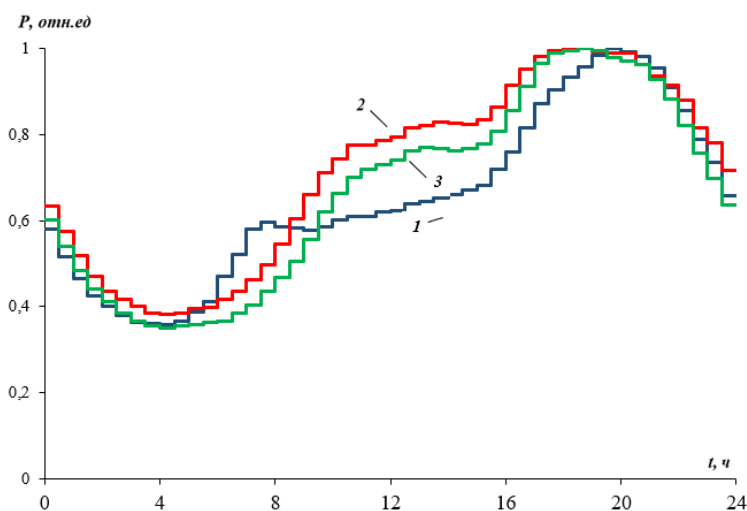


Рис. 4. Суточные графики нагрузки зимних дней жилого здания с электроплитами (линия 1 – график рабочих дней, линия 2 – график субботы, линия 3 – график воскресенья)

Графики нарисованы на одних осях для наглядности и удобства сравнения их конфигураций.

После ночного провала нагрузка постепенно продолжает увеличиваться до дневного максимума, который в субботний день наблюдается с 13:30 до 14:00 ч, а в воскресный – с 13:00 до 13:30 ч. Дневной провал на графиках выходных дней незначительный и наблюдается с 14:30 до 15:00 ч в субботний день и с 14:00 до 14:30 ч в воскресный.

4. КОРЕЛЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ КВАРТИРЫ И ЗДАНИЯ

На рисунках 5-7 представлены наложенные суточные графики нагрузки квартиры и жилого здания для рабочих дней, субботы и воскресенья.

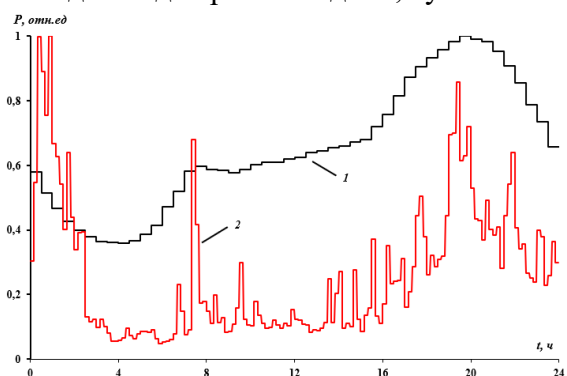


Рис. 5. Суточные графики нагрузки зимних рабочих дней (линия 1 – график жилого здания, линия 2 – график квартиры).

Коэффициент корреляции для графиков рабочих дней равен 0,412, для графиков субботы – 0,491, для графиков воскресенья – 0,339. Так как значения коэффициентов корреляции положительные, то можно судить об однотипной тенденции роста и снижения нагрузки.

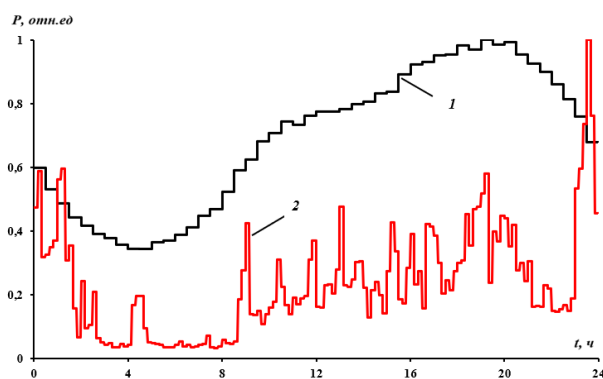


Рис. 6. Суточные графики нагрузки зимних субботы (линия 1 – график жилого здания, линия 2 – график квартиры)

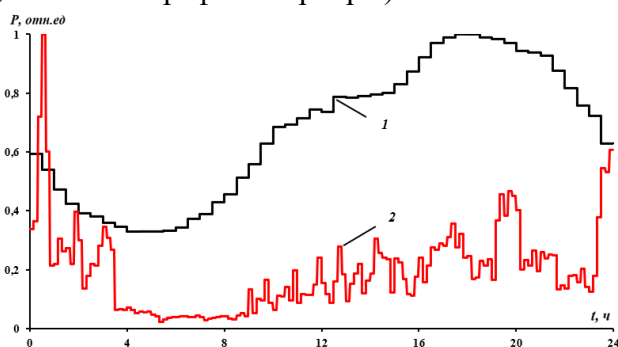


Рис. 7. Суточные графики нагрузки зимних воскресенья (линия 1 – график жилого здания, линия 2 – график квартиры)

5. ПРОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В рамках гранта ПНИ 2020/22 был разработан программный продукт «Программа АРМН (Автоматизированный расчет максимума средних нагрузок) и подана заявка на регистрацию данной программы. На рисунке 8 представлен интерфейс программы АРМН.

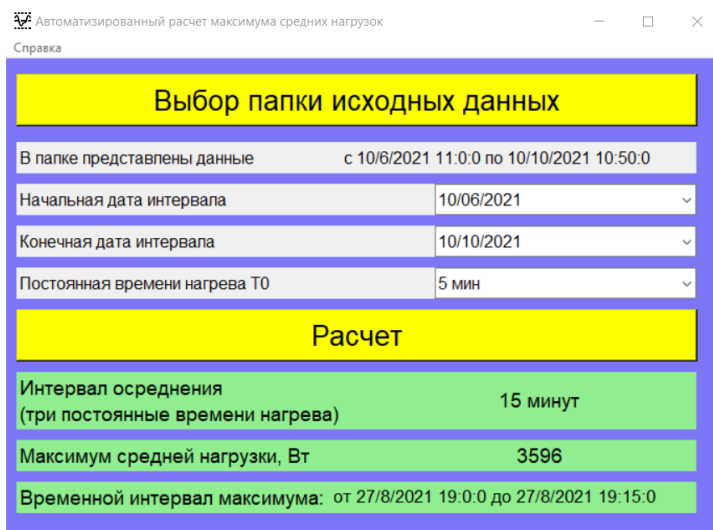


Рис. 8. Интерфейс программы АРМН

Программа предназначена для определения расчетных электрических нагрузок элементов СЭС, таких как воздушные и кабельные линии и понижающие трансформаторы.

Расчетная величина нагрузки определяется как максимум средней нагрузки за три постоянные времени нагрева элемента СЭС за рассматриваемый интервал времени. В таблице 1 приведены результаты тестирования, где продемонстрированы изменения значения максимума средней нагрузки и временного интервала максимума при различных интервалах осреднения.

Таблица 1. Значения максимумов средней нагрузки при различных интервалах осреднения для 1 квартиры в период с 10.06.2021 по 10.10.2021

Интервал осреднения	Максимум средней нагрузки, Вт	Временной интервал макс.
15 минут	3596	с 19:00 до 19:15, 27.08.21
30 минут	2722	с 18:50 до 19:20, 27.08.21
45 минут	2344	с 18:30 до 19:15, 20.09.21
1 час	2293	с 18:40 до 19:40, 26.09.21
1 час 15 минут	1980	с 18:35 до 19:50, 26.09.21
1 час 30 минут	1670	с 18:35 до 20:05, 26.09.21
3 часа	1169	с 10:35 до 13:35, 05.09.21

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы. На суточных графиках зимних субботы и воскресенья отсутствуют утренние максимумы, а на графике рабочего дня – дневной максимум.

Утренний и вечерний максимумы четко совпадают у суточных графиков рабочих дней квартиры и дома. Для здания в воскресенье характерен вечерний максимум нагрузки, а для квартиры – ночной пик.

С увеличением интервала осреднения в 5 и более раз значение максимума средней нагрузки уменьшается практически в 2-3 раза. Максимум средней нагрузки является оценкой вклада отдельных электроприемников или квартиры в общее электропотребление и принимается за расчетную нагрузку, поэтому важно корректно выбрать интервал осреднения. Опираясь на актуализированные результаты, в дальнейшем можно наиболее эффективно перейти к массовому внедрению концепции «умного дома».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **E. Proedrou.** A Comprehensive Review of Residential Electricity Load Profile Models, in IEEE Access, vol. 9, P. 12114-12133, 2021.
2. **Инструкция** по проектированию городских электрических сетей. РД 34.20.185–94 (с изменениями и дополнениями от 29 июня 1999 г.).
3. **Солуянов, Ю. И.** Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания / Ю. И. Солуянов, А. Р. Ахметшин, В. И. Солуянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 47-57.
4. **Zhe Wang Tianzhen Hong.** Generating realistic building electrical load profiles through the Generative Adversarial Network (GAN). Energy and Buildings Volume 224, 1 October 2020.

Р.Ю. Гоенко¹, В.М. Королев², А.Д. Чернышева², А.С. Ванин³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ КЛАССА 6-10/0,4 КВ В ЦИФРОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассмотрен вопрос разработки алгоритмов управления регуляторами напряжения распределительных трансформаторов 6-10/0,4 кВ. Продемонстрированы основные технические требования к алгоритмам управления для обеспечения их корректной работы. Проведена разработка структуры алгоритма, а также его тестирование на модели реального фидера распределительной сети.

Ключевые слова - распределительные электрические сети, автоматическое регулирование напряжения, качество электрической энергии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Распределительные электрические сети (РЭС) 0,4-20 кВ составляют в среднем 60-70% от суммарной протяженности линий электропередачи электроэнергетической системы [1]. Постоянно увеличивающаяся мощность нагрузки, внедрение распределенной генерации, а также растущие требования потребителей к качеству и бесперебойности электроснабжения представляют серьезный вызов для электросетевых компаний. Вместе с этим, появляющиеся интеллектуальные устройства управления электрическими сетями, такие как регуляторы напряжения трансформаторов 6-10/0,4 кВ, позволяют более эффективно эксплуатировать электрические сети. Также появляется необходимость разработки алгоритмов управления такими регуляторами.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ КЛАССА 6-10/0,4 КВ В ЦИФРОВЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

2.1. Технические требования к алгоритмам управления регуляторами напряжения трансформаторов 6-10/0,4 кВ

Под техническими требованиями к алгоритмам управления регуляторами напряжения трансформаторов 6-20/0,4 кВ понимаются изменяемые параметры, которые можно изменить в любое время и которые определяют алгоритмы работы регулируемого устройства. Основные параметры:

Желаемый уровень напряжения

Основной параметр регулятора напряжения. Данное значение может быть фиксированной величиной или задаваться функцией от влияющих факторов. Поскольку желаемый уровень напряжения не может поддерживаться с абсолютной точностью устройствами с дискретным регулированием, должно быть задано допустимое отклонение напряжения от желаемого значения.

Верхнее и нижнее напряжение срабатывания

Эти два значения определяют, насколько напряжение может отклониться от желаемого значения вверх или вниз до того, как будет выполнено переключение. Данные значе-

ния могут задаваться в абсолютных или относительных величинах, а также в виде отклонений от желаемого значения.

Выдержка времени T_1 , с

Этот параметр определяет время ожидания перед переключением после того, как напряжение вышло за верхнее или нижнее напряжение срабатывания. Только если после выдержки времени напряжение все еще находится за пределами зоны нечувствительности, выполняется переключение.

Помимо перечисленных основных параметров регулятора напряжения могут использоваться другие дополнительные параметры, некоторые из которых приведены ниже.

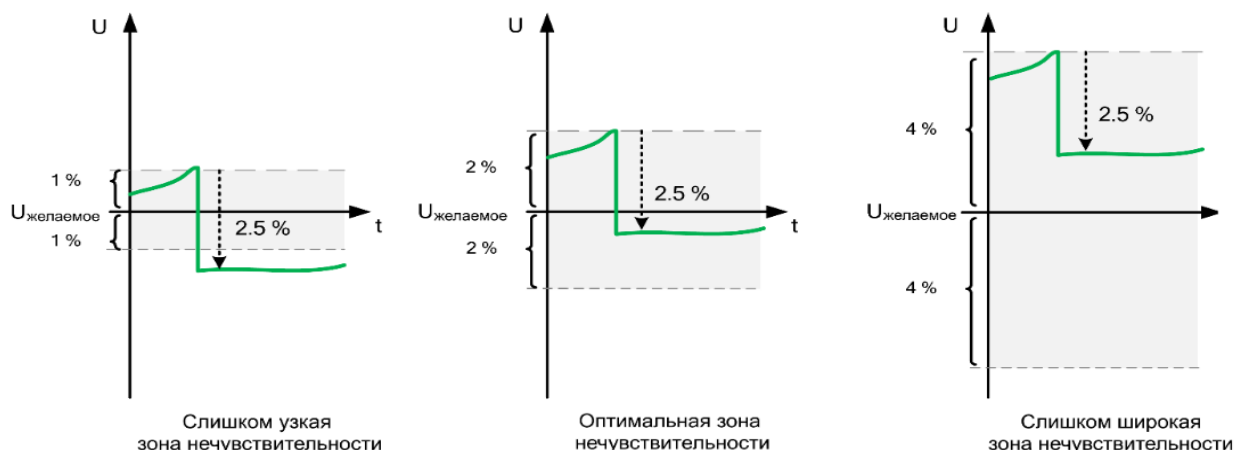


Рисунок 1 - Зона нечувствительности регулятора напряжения

Переключение без выдержки времени

При больших отклонениях напряжения может применяться переключение без выдержки времени. Это позволяет быстро отреагировать на значительные изменения напряжения вызванные, например, включением или отключением крупной нагрузки или генерации. Переключение без выдержки времени задается верхним и нижним напряжением срабатывания без выдержки времени. Напряжение срабатывания без выдержки времени должно находиться за пределами зоны нечувствительности.

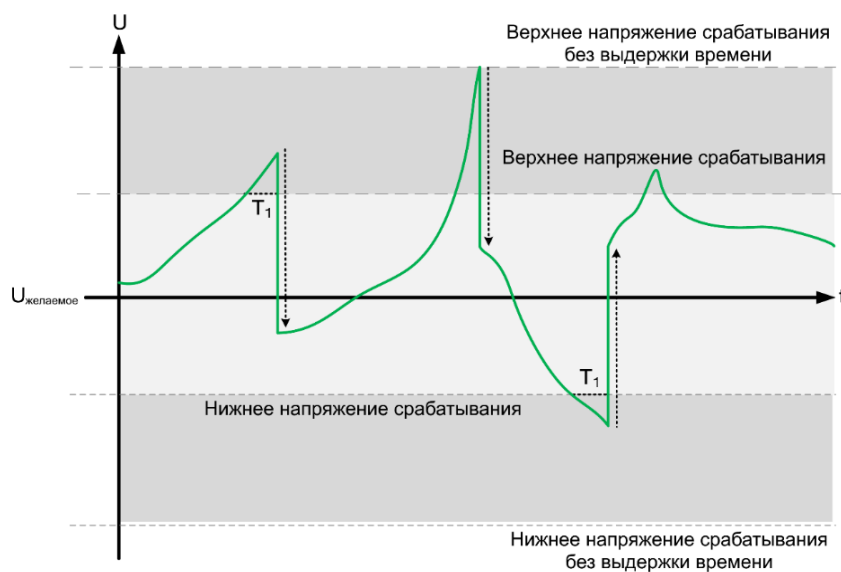


Рисунок 2 - Пример переключения без выдержки времени

2.2. Формирование алгоритма управления регуляторами напряжения трансформаторов класса 6-10/0,4 кВ в цифровых распределительных сетях

За основу разрабатываемого алгоритма был взят механизм переключения отпаек устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) (рисунок 3).

Используемые параметры и их описание представлены в таблице 1 [2].

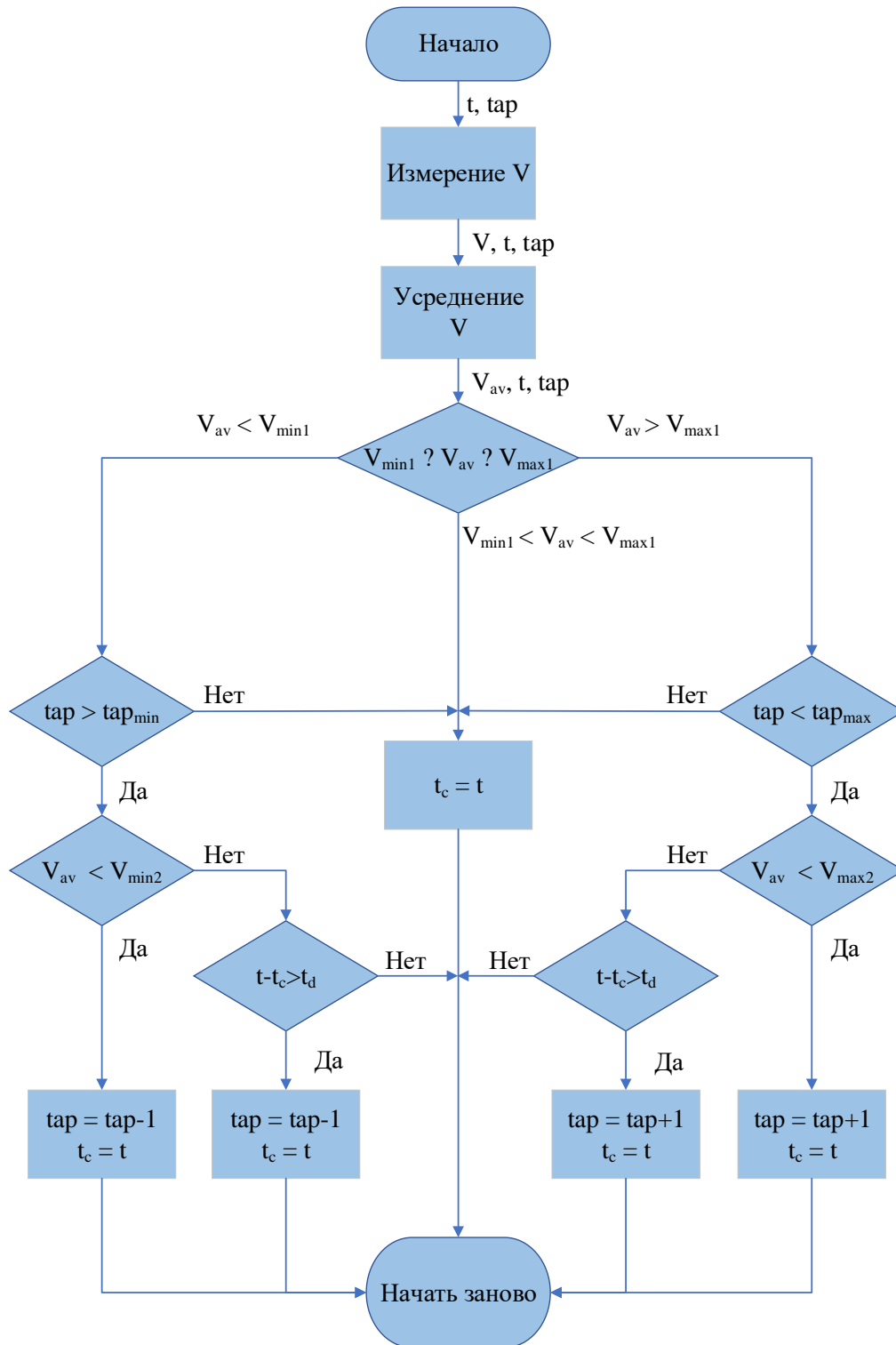


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма управления регулятором напряжения

Таблица 1 – Используемые параметры

Параметр	Описание
V	Текущее измеренное напряжение на клеммах вторичной обмотки
V_{av}	Усредненное значение напряжения
V_{max2} / V_{min2}	Пороговое максимальное/минимальное значение напряжения для переключения без выдержки времени
V_{max1} / V_{min1}	Пороговые максимальное/минимальное напряжения для переключения с выдержки времени
tap	Текущее положение отпайки
tap_{max} / tap_{min}	Крайние максимальное/минимальное положение отпайки
t	Текущее время
t_c	Фиксация времени для проверки выдержки времени переключения отпайки
t_d	Выдержка по времени для переключения отпайки
dn	Степень регулирования РПН

Работа механизма РПН пошаговая [3]. При каждом переключении ответвлений происходит скачок положительного или отрицательного напряжения dn .

Параметры, используемые в алгоритме, ограничиваются требованиями нормативной документации [4,5] и техническими характеристиками регуляторов напряжения. В случае наличия у потребителей особых требований, к примеру более узкий диапазон регулирования напряжения, в сравнении с требованиями ГОСТ [4,5], параметры алгоритма могут быть персонифицированы под конкретного потребителя.

2.3. Тестирования алгоритмов управления регуляторами напряжения трансформаторов класса 6-10/0,4 кВ в цифровых распределительных сетях

Программа тестирования алгоритмов управления регуляторами напряжения была реализована на схеме реального фидера.

Параметры расчетной схемы

номинальное напряжение	10 кВ
питающий трансформатор	110/10 кВ
уставка АРН РПН	10,85±0,15 кВ
устройства ПБВ ТП 10/0,4 кВ	5 положений по 2,5 %

Параметры нагрузок фидера

наименьшая нагрузка (август)	783 кВА
наибольшая нагрузка (август)	2785 кВА
cos φНБ	0,95

Все расчеты выполняются на основе объединенных недельных измерений с интервалом осреднения 10 минут, проведенных в ноябре и августе. На питающем трансформаторе 110/10 кВ обеспечивается автоматическое регулирование напряжения в режиме стабилизации с уставкой 10,85±0,15 кВ. Все распределительные трансформаторы оборудованы устройствами переключения без возбуждения (ПБВ) с пятью положениями регулятора и шагом регулирования 2,5%. Суммарная длина до наиболее удаленного потребителя составляет 19,9 км, линии выполнены сечением 70 мм². Для нагрузки данной сети характерна резкая сезонная и суточная неравномерность.

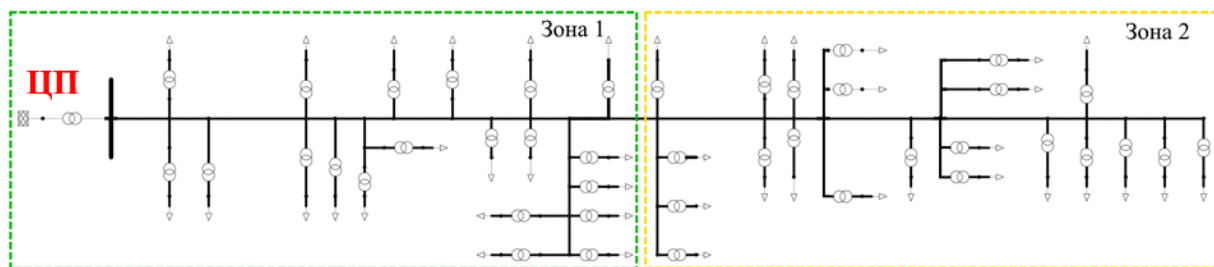


Рисунок 4. Зоны распределительной сети по диапазону изменения напряжения

В представленном варианте расчетной схемы автоматическое регулирование напряжения осуществляется только на центре питания.

Уровень напряжения ниже $U_{ном}$ на ТП 10/0,4 кВ не желателен, поскольку может привести к нарушению допустимой нижней границы по напряжению у конечного потребителя 0,4 кВ, особенно при наличии протяженной сети 0,4 кВ. С учетом потерь напряжения в сети, минимально допустимое напряжение на стороне 0,4 кВ ТП составляет 95% $U_{ном}$.

Напряжение на ТП, находящихся в Зоне 1 (рисунок 4) возможно поддерживать в диапазоне 95-110 % $U_{ном}$ только за счет работы устройств РПН на ЦП, переключение анцапф ПБВ на трансформаторах ТП не требуется. В Зоне 2 возможно поддержание напряжения в диапазоне 95-110 % $U_{ном}$ (рисунок 4) при регулярном изменении положения анцапф ПБВ трансформаторов 10/0,4 кВ.

Для проверки работы алгоритма будет рассмотрен наиболее удаленный потребитель Зоны 2.



Рисунок 5. График напряжения на стороне 0,4 кВ в наиболее удаленной точке сети

Применение разработанного алгоритма управления полупроводниковыми устройствами регулирования напряжения трансформаторов позволяет обеспечить требуемый уровень напряжения (0,95 - 110% $U_{ном}$) на всех ТП 10/0,4 кВ Зоны 2 во всех режимах работы (рисунок 5).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были рассмотрены технические требования к алгоритмам управления регуляторами напряжения трансформаторов 6-20/0,4 кВ. На основании технических тре-

бований была проведена разработка самого алгоритма. Работа алгоритма была протестирована на фидере реальной сети.

Результаты тестирования показали корректность разработанного алгоритма

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Годовой отчет.** Публичное акционерное общество «РОССЕТИ», 2018.
2. **M. Thomson**, “Automatic voltage control relays and embedded generation (part 1),” IEE Power Engineering Journal, pp. 71–76, April 2000.
3. **Beckwith Electric Co. Inc.**, “M-0067E tap changer control,” instruction book, Florida, USA, 1999.
4. **ГОСТ Р 57382-2017** «Стандартный ряд номинальных и наибольших рабочих напряжений»
5. **Гост 32144-2013** «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

П.А. Бордадын¹, Я.А. Маринов¹, К.В. Шии¹, М.А. Силаев²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

ОЦЕНКА УРОВНЕЙ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЙСЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УЗЛАХ РЕАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена перемежающейся несимметрии (ПН) напряжений в сетях, питающих тяговую нагрузку. Представлены результаты динамического моделирования несимметричных режимов фрагмента реальной сети в MATLAB Simulink. Разработанная модель позволяет оценить влияние электрифицированных железных дорог на качество электроэнергии (КЭ) в части несимметрии напряжений, в частности, перемежающейся.

Ключевые слова – качество электроэнергии, перемежающаяся несимметрия, электроподвижной состав

1. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение допустимых уровней несимметрии напряжений является одной из приоритетных задач в электрических сетях, питающих тяговую нагрузку. Частным случаем несимметрии напряжений является перемежающаяся несимметрия, оказывающая на потребителей негативное влияние. Причиной ее возникновения являются электроподвижные составы (ЭПС). ПН характеризуется не только коэффициентом несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , но и изменением угла между симметричными составляющими напряжения β_U [1].

Ранее были разработаны модели одиночных тяговых подстанций (ТПС), позволяющие оценить уровень влияния тяговой нагрузки на показатели ПН [2,3]. При этом остается нерешенным вопрос об оценке уровней ПН в реальной сети, осуществляющей электропитание электрифицированных железных дорог. В связи с этим целью данной работы стал расчет и анализ показателей перемежающейся несимметрии напряжений во фрагменте реальной электрической сети. Наиболее важными задачами при достижении данной цели являются:

- оценка взаимной компенсации помех от различных ТПС;
- анализ характера изменения K_{2U} и β_U в зависимости от точки сети;
- оценка влияния поочередного изменения порядка подключения фаз трансформаторов к фазам ЛЭП на показатели перемежающейся несимметрии.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕАЛЬНОМУ УЧАСТКУ СЕТИ

Для проведения оценки уровней ПН напряжения, создаваемой группой ТПС, был выбран участок Забайкальской железной дороги длиной 224,6 км с одной опорной и пятью промежуточными подстанциями, питающимися от двухцепной ЛЭП классом напряжения 220 кВ. Исходными данными являлись:

- график движения ЭПС по расчётному участку и массы поездов;
- координаты расположения постов секционирования (ПС) и ТПС (таблица 1);
- схемы тягового и внешнего электроснабжения (рис. 1);
- параметры ЛЭП и тяговых трансформаторов;

– зависимость полного тока ЭПС от координаты (рис. 2).

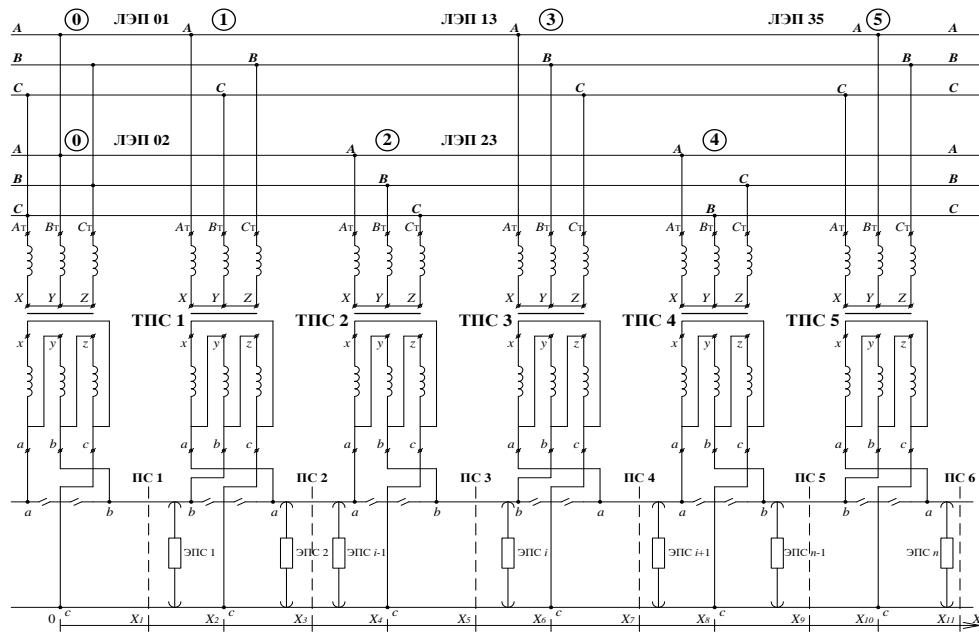


Рис. 1. Схема расчётного участка железной дороги: ПС 1 – ПС 6 – посты секционирования; X – ось координат; в кружках приведены номера узлов сети.

Таблица 1. Координаты тяговых подстанций и постов секционирования на расчётном участке железной дороги

Объект	Опорная подстанция	ТПС 1	ТПС 2	ТПС 3	ТПС 4	ТПС 5	ПС 6
Координата X, км	0	48.3	89.0	128.7	163.6	200.9	224.6

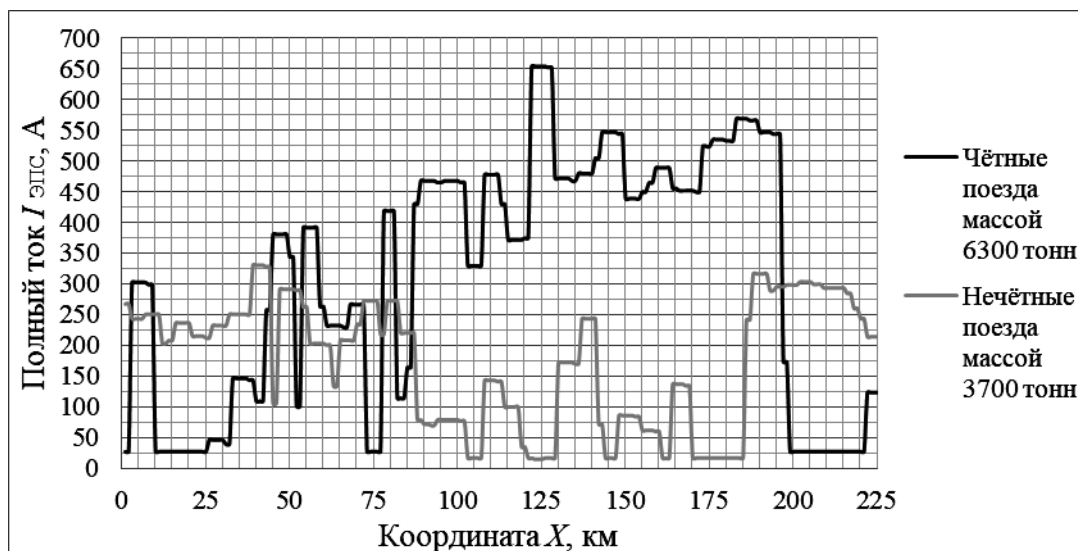


Рис. 2. Зависимость полных токов чётных и нечётных ЭПС от координаты расчётного участка с учётом продольного профиля железной дороги: $I_{\text{ЭПС}}$ – полный ток, потребляемый электроподвижным составом, А.

В соответствии с графиком движения средняя скорость чётных поездов $\vartheta_{\text{Ч}} = 67.8$ км/ч, а нечётных – $\vartheta_{\text{НЧ}} = 60.0$ км/ч. Для четных поездов движение осуществ-

ляется в прямом направлении, для нечетных – в обратном. В прямом направлении поезда начинают движение с интервалом в $t_{ИНТ1} = 35$ минут. Первый поезд начинает движение в направлении от опорной ТПС (присоединяется к узлу 0 на рис. 1) с нулевой координаты ($X = 0$ на рис. 1) в начальный момент времени, а через $t_{ИНТ2} = 20$ минут появляется первый состав в обратном направлении (координата $X = X_{11}$ на рис. 1). Продолжительность расчётного периода, в течение которого производилось моделирование, составляет $t_{СУМ} = 360$ минут. Текущие координаты чётных и нечётных поездов вычислялись в соответствии со следующими выражениями:

$$X_{Ч} = \vartheta_{Ч} \cdot \frac{t - (i_{Ч} - 1)t_{ИНТ1}}{60} \quad (1)$$

$$X_{НЧ} = X_{11} - \vartheta_{НЧ} \cdot \frac{t - t_{ИНТ2} - (i_{НЧ} - 1)t_{ИНТ1}}{60}, \quad (2)$$

где $X_{Ч}$, $X_{НЧ}$ – текущие координаты соответственно чётных и нечётных ЭПС, м; X_{11} – координата конца расчётного участка (см. рис. 1), м ; t – текущий момент времени, с; $i_{Ч}$, $i_{НЧ}$ – номер текущего чётного (нечётного) поезда.

Для расчета активных и реактивных составляющих токов ЭПС было задано случайное распределение коэффициентов реактивной мощности поездов $\text{tg}\varphi_{ЭПС}$ в зависимости от координаты в диапазоне 0.4 до 1.5.

В соответствии с полученными зависимостями координат и коэффициентов реактивной мощности от времени производится расчет комплексных токов, потребляемых электроподвижными составами в соответствующие моменты времени.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки показателей перемежающейся несимметрии напряжений в узлах электрической сети на основе ранее полученных имитационных моделей [2,3] была выполнена модель приведенного выше фрагмента сети в MATLAB Simulink (рис. 3).

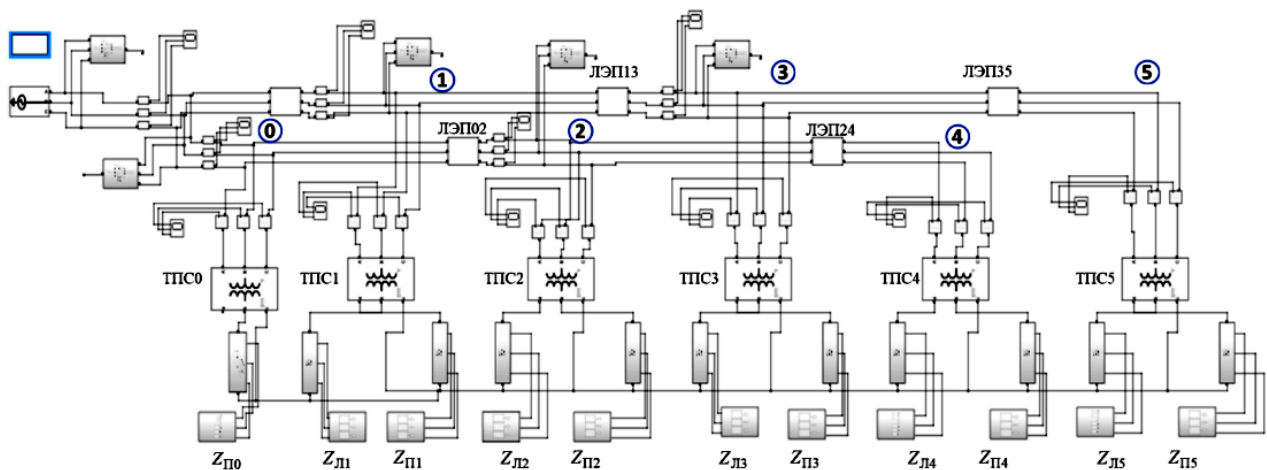


Рис. 3. Модель электрической сети в MATLAB Simulink, $Z_{П0}, Z_{Л1}, Z_{П1} \dots Z_{Л5}, Z_{П5}$ – нагрузки правых и левых фидерных зон ТПС.

Для имитации изменения положения ЭПС в соответствии с графиком движения задается динамическая нагрузка. В данной модели она реализована с помощью блока управ-

ляемых сопротивлений (рис. 4). Зависимости значений сопротивлений от времени получены в соответствии с зависимостью комплексов токов чётных и нечётных ЭПС от времени. Для получения данных зависимостей рассчитываются токи фидерных зон ТПС.

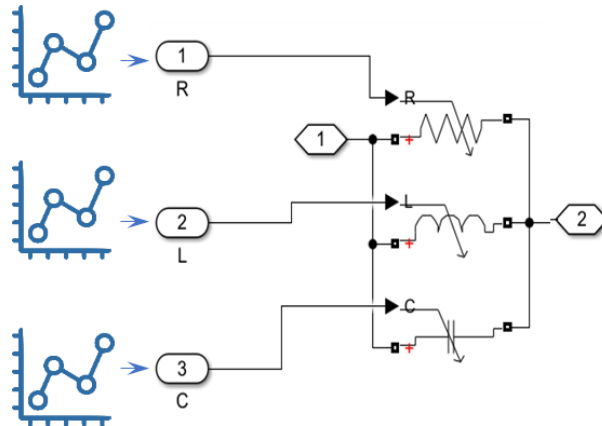


Рис. 4. Блок управляемых сопротивлений.

В качестве примера расчета закона изменения сопротивлений рассмотрим фидерную зону между ТПС 1 и ТПС 2, по которой движется n поездов (рис. 5).

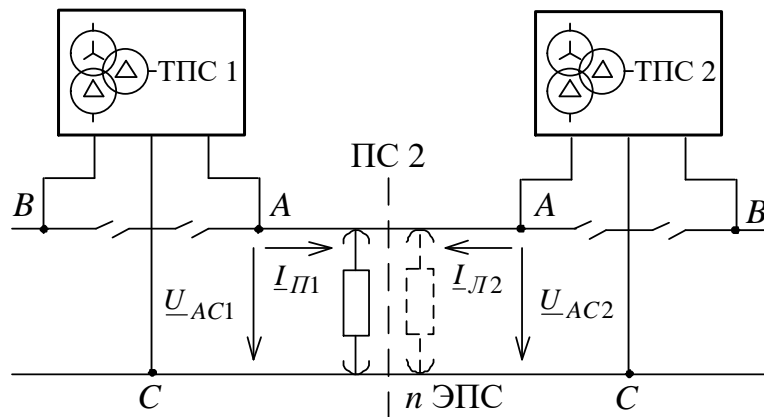


Рис. 5. Схема тяговой сети для расчёта токов фидерной зоны между ТПС 1 и ТПС 2.

При этом поезда потребляют ток $I_{П1}$ от первой подстанции и ток $I_{Л2}$ от второй. Эти токи меняются в зависимости от расположения и количества составов, движущихся по фидерной зоне. Схему на рис. 6 можно преобразовать в простейшую схему замещения (рис. 6).

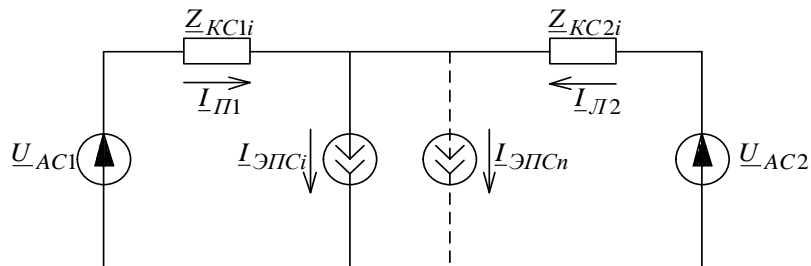


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема для расчёта токов фидерной зоны между ТПС 1 и ТПС 2.

Принято допущение, что напряжения контактной сети \underline{U}_{AC1} и \underline{U}_{AC2} равны, и с обеих сторон относительно поста секционирования контактная сеть имеет одинаковые погонные сопротивления. Тогда токи ТПС 1 и ТПС 2 вычисляются по методу наложения с использованием законов Кирхгофа:

$$\underline{I}_{Л1} = \sum_{i=1}^n \underline{I}_{ЭПСi} \cdot \frac{L_{KC2i}}{L_{KC1i} + L_{KC2i}}, \quad (3)$$

$$\underline{I}_{Л2} = \sum_{i=1}^n \underline{I}_{ЭПСi} \cdot \frac{L_{KC1i}}{L_{KC1i} + L_{KC2i}}, \quad (4)$$

где i – номер ЭПС; n – суммарное количество ЭПС в пределах рассматриваемой фидерной зоны; $\underline{I}_{ЭПСi}$ – комплексный ток i -ого ЭПС, А; L_{KC1i} – длина контактной сети от ТПС 1 до i -ого ЭПС, м; L_{KC2i} – длина контактной сети от i -ого ЭПС до ТПС 2, м.

Полученные зависимости комплексов токов позволяют получить закон изменения эквивалентных сопротивлений нагрузок фидерных зон:

$$\underline{Z}_{Л1} = \frac{\underline{U}_{AC1}}{\underline{I}_{Л1}}, \quad (5)$$

$$\underline{Z}_{Л2} = \frac{\underline{U}_{AC2}}{\underline{I}_{Л2}}, \quad (6)$$

Помимо блоков сопротивлений в модели присутствуют следующие элементы:

- трехфазный источник напряжения с внутренним сопротивлением, соответствующим току короткого замыкания 4 кА;
- модель линии электропередачи, выполненные проводом марки АС 300/39;
- модуль измерения K_{2U} и β_U ;
- трансформаторы ТДТНЖ-40000/220;
- осциллографы для визуализации кривых напряжения и тока.

В качестве результатов моделирования были получены графики изменения с течением времени коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности и угла между симметричными составляющими напряжения в узлах сети 220 кВ (рис. 7, рис. 8).

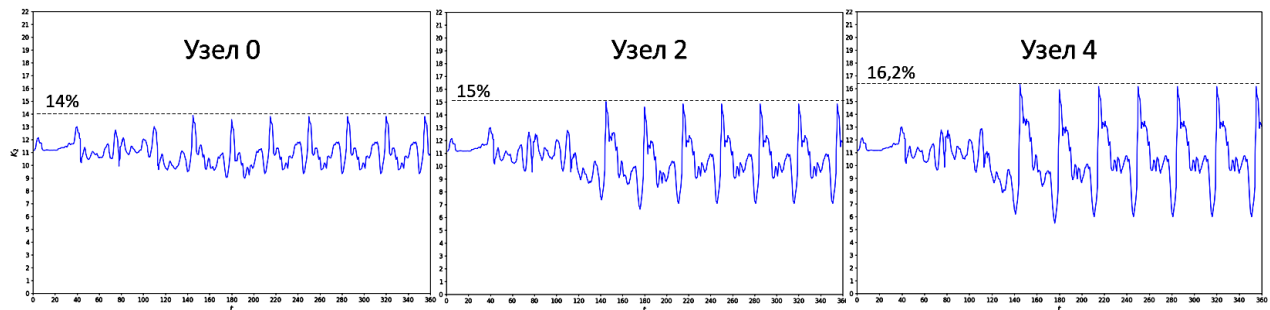


Рис. 7. Графики изменения коэффициента несимметрии по обратной последовательности K_{2U}

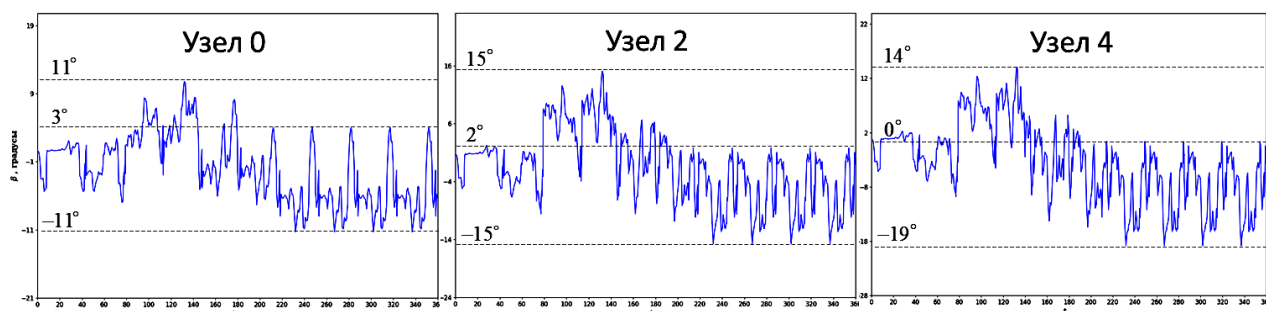


Рис. 8. Графики изменения угла между симметричными составляющими напряжения β_U .

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать ряд выводов:

1. Поскольку диапазон изменения K_{2U} и β_U значителен, несимметрия имеет характер перемежающейся. Взаимная компенсация помех не обеспечивает приемлемого уровня ПН в сети.

2. Максимальные значения и диапазоны изменения K_{2U} и β_U увеличиваются при удалении от источника питания.

3. Поочередное присоединение фаз трансформаторов к различным фазам ЛЭП не позволяет устранить несимметрию напряжений в узлах сети.

Полученные результаты моделирования в дальнейшем могут быть использованы для разработки мер по защите потребителей от воздействия перемежающейся несимметрии напряжений. Кроме того, планируется применение разработанных моделей в учебном курсе «Спецвопросы электроэнергетики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Силаев М.А.** Исследование перемежающейся несимметрии напряжений в электрических сетях: дис. ... канд. Техн. Наук: 05.14.02 / М. А. Силаев. – М., 2019. – 129 с
2. **Р. Bordadyn, Y. Marinov, K. Shish, M. Silaev and S. Palis**, "Application with a Traction Substation Interface for Evaluating the Indicators of Intermittent Current Unbalance," 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2021, pp. 985-989.
3. **Анализ** влияния схемных решений тяговых подстанций на несимметрию токов / П. А. Бордадын, Я. А. Маринов, К. В. Шиш, М. А. Силаев // Технологии будущего: IV Национальная научно-техническая конференция. Сборник тезисов докладов, Москва, 05–09 апреля 2021 года. – Москва: Издательство ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ", 2021. – С. 39.

С.А. Зенин ¹, П.В. Мешалова ¹, А.В. Шишкин ¹, Ю.В. Яворовский ²

1- студент, 2- руководитель проекта

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕПЛОВОЙ СЕТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрено создание цифрового двойника экспериментального стенда, моделирующего работу тепловой сети, с использованием различных программных комплексов (ZuluThermo, Matlab Simulink, SimInTech). Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных на стенде.

Ключевые слова - цифровой двойник, имитационная модель, тепловая сеть, централизованное теплоснабжение, тепло-гидравлические процессы, математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Цифровой двойник тепловой сети, включающий алгоритмы обработки и анализа данных и их программную реализацию, способен решить следующие задачи:

- сопоставление в режиме близком к реальному времени (с заданной дискретностью) фактического режима работы тепловой сети с модельным;
- прогнозирование показателей работы сети при изменении режима работы;
- автоматическое формирование рекомендаций по изменению режима работы тепловой сети и мероприятий по поддержанию оборудования в надлежащем техническом состоянии;
- определение и анализ динамики постепенно развивающихся отклонений в работе оборудования.

Ключевым аспектом создания цифрового двойника для сети централизованной системы теплоснабжения является построение математической тепло-гидравлической модели, которая в точности могла бы описывать тепло-гидравлические режимы и процессы, происходящие в реальной тепловой сети.

2. ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Главной задачей при создании расчётной модели цифрового двойника является описание параметров реального объекта с высокой точностью. Для этого требуется сделать рациональный выбор расчётного ядра, позволяющего добиться хорошей сходимости результатов моделирования и экспериментальных данных.

В рамках нашей работы, для решения такой задачи, был разработан экспериментальный стенд – физическая модель, уменьшенной в масштабе, районной тепловой сети, схема которого показана на рис. 1. Функции источника выполняет пеллетный котёл. Три теплообменных аппарата имитируют потребителей тепловой энергии (два водоводяных пластинчатых теплообменных аппарата и один калорифер), а ещё один теплообменный аппарат предназначен для возможности моделирования тепловых потерь.

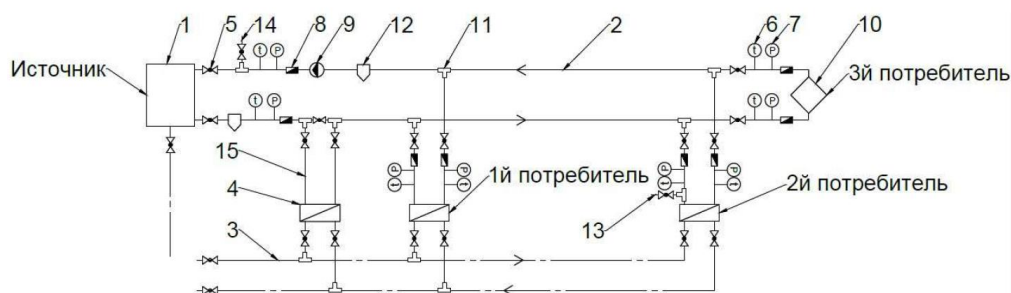


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 – пеллетный котел, 2 – контур отопления, 3 – контур охлаждающей воды, 4 – водоводяной пластинчатый теплообменник, 5 – задвижка, 6 – датчик температуры, 7 – датчик давления, 9 – циркуляционный насос, 10 – калорифер, 11 – тройник, 12 – грязевик, 13 – патрубок для имитации утечки на одном из потребителей, 14 – патрубок для имитации утечки в магистрали теплоснабжения, 15 – байпас для имитации тепловых потерь.

Ключевыми особенностями экспериментального стенда являются:

- малый совокупный масштаб экспериментальной физической модели в сравнении с реальными тепловыми сетями централизованного теплоснабжения, что существенно снижает инерционность процессов;
- короткие линейные участки, благодаря чему местные сопротивления сильно превосходят линейные и вносят большое влияние в гидравлические режимы экспериментальной модели.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА В СРЕДЕ ZULUTHERMO

В рамках нашего исследования было принято решение построить статическую модель в отечественном программном комплексе ZuluThermo. Программа предназначена для выполнения инженерных расчетов системы централизованного теплоснабжения.

Отметим некоторые положения, вызвавшие трудности в создании нашей математической модели исследовательского стенда: данная программа используется для построения тепловых сетей в крупных масштабах, поэтому приходится детально описывать все исходные данные по всем элементам модели (источник, потребитель, участки), программа способна только на расчёт стационарных режимов работы системы.

Для достижения необходимых результатов была создана модель, имитирующая стационарный режим работы системы.

Графическая иллюстрация схемы математической модели стенда, построенного в программе ZuluThermo представлена на рис. 2.

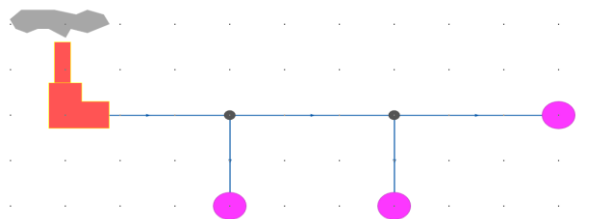


Рис. 2. Графическая иллюстрация схемы модели экспериментального стенда

Проведя настройку параметров элементов модели, мы достигли значений, приближённых к экспериментальным данным, которые мы получили в ходе испытаний на стенде.

Результаты расчёта математической модели представлены на рис. 3.

Источник ID=1 источник:

Количество тепла, вырабатываемое на источнике за час	0.006, Гкал/ч
Расход тепла на систему отопления	0.006, Гкал/ч
Суммарный расход в подающем трубопроводе	0.374, т/ч
Суммарный расход в обратном трубопроводе	0.374, т/ч
Суммарный расход на подпитку	0.000, т/ч
Суммарный расход на систему отопления	0.374, т/ч
Расход воды на утечки из систем теплоснабжения	0.00045, т/ч
Давление в подающем трубопроводе	21.000, м
Давление в обратном трубопроводе	20.000, м
Располагаемый напор	1.000, м
Температура в подающем трубопроводе	80.000, °C
Температура в обратном трубопроводе	64.497, °C
Суммарные затраты на тепловую энергию	0.000 руб/час
Затраты на тепловые потери в трубопроводах	0.000 руб/час

Рис. 3. Результаты расчёта параметров магистральной линии математической модели в программе ZuluThermo

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Изучению динамических процессов, непрерывно происходящих в системе теплоснабжения, долгое время уделялось недостаточное внимание. Это может быть изменение режимов, вызванных изменением параметров теплоносителя на источнике теплоснабжения, изменения в работе сети теплоснабжения, обусловленные местным регулированием на потребителях тепловой энергии или развивающиеся аварийные режимы, также вызывающие изменения ключевых параметров тепловой сети. Временная характеристика таких процессов может оказаться очень полезной в некоторых ситуациях. Для моделирования подобных процессов необходимо применение специализированных программно-расчетных комплексов, позволяющих моделировать динамические процессы и решать динамические задачи. Для исследования и анализа динамических переходных процессов, возникающих в тепловой сети, было принято решение смоделировать схему экспериментального стенда, которая представлена в предыдущих разделах на рис. 1, в современных программно-расчетных комплексах для динамического моделирования. В текущей работе были использованы две программы, обладающие необходимым функционалом для полноценного теплогидравлического расчета заданной динамической модели – это Matlab Simulink и SimInTech.

4.1 Моделирование экспериментального стенда в среде Matlab Simulink

Основным инструментом программного комплекса Matlab Simulink является большой набор настраиваемых библиотек элементов (блоков). Для анализа динамических процессов, происходящих в централизованных системах теплоснабжения, практически полностью предназначена библиотека Thermal Liquid Library. Графическая иллюстрация структуры динамической модели экспериментального стенда, построенной в среде Matlab Simulink приведена на рис. 4.

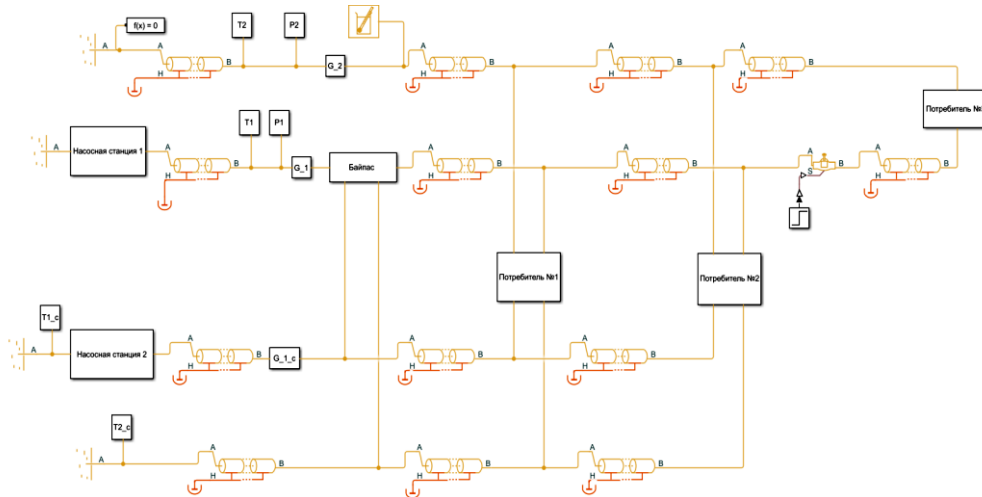


Рис. 4. Графическая иллюстрация структуры динамической модели экспериментального стенда

В качестве динамического сценария была смоделирована ситуация, позволяющая отследить взаимное влияния потребителей теплоты при регулировании ими собственной тепловой нагрузки. Результаты моделирования изображены на рис. 5.

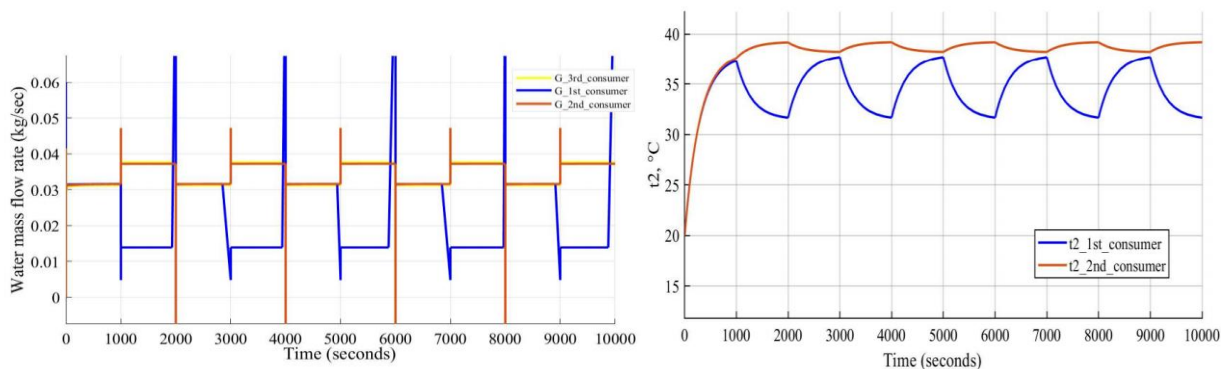


Рис. 5. Изменение расхода теплоносителя и температуры обратной сетевой воды в контурах потребителей №1, №2 и №3

В работе рассматривалась возможность моделирования динамических тепло-гидравлических режимов централизованных систем теплоснабжения. Время моделирования рассматриваемого динамического сценария на компьютере с процессором Intel Core i5 9300h в среднем составила от одной до двух минут. Можно предположить, что для расчета динамических сценариев реальных тепловых сетей в среде Matlab Simulink потребуется огромная вычислительная мощность, а длительность моделирования будет составлять часы и даже десятки часов. Поэтому возникает вопрос целесообразности применения такого программно-расчетного комплекса для расчета и анализа ситуаций, возникающих в реальных централизованных системах теплоснабжения.

4.2 Моделирование экспериментального стенда в среде SimInTech

В качестве альтернативы Matlab Simulink было принято решение создать модель стенда в отечественном программном комплексе SimInTech, так как данное программное обеспечение позволяет рассчитывать процессы как стационарные, так и динамические, к тому же скорость получения результатов в данной программе превышает время развития процесса в реальном времени, что также важно для быстроты получения данных [1].

Графическая иллюстрация построенной динамической модели в среде SimInTech приведена на рис. 6.

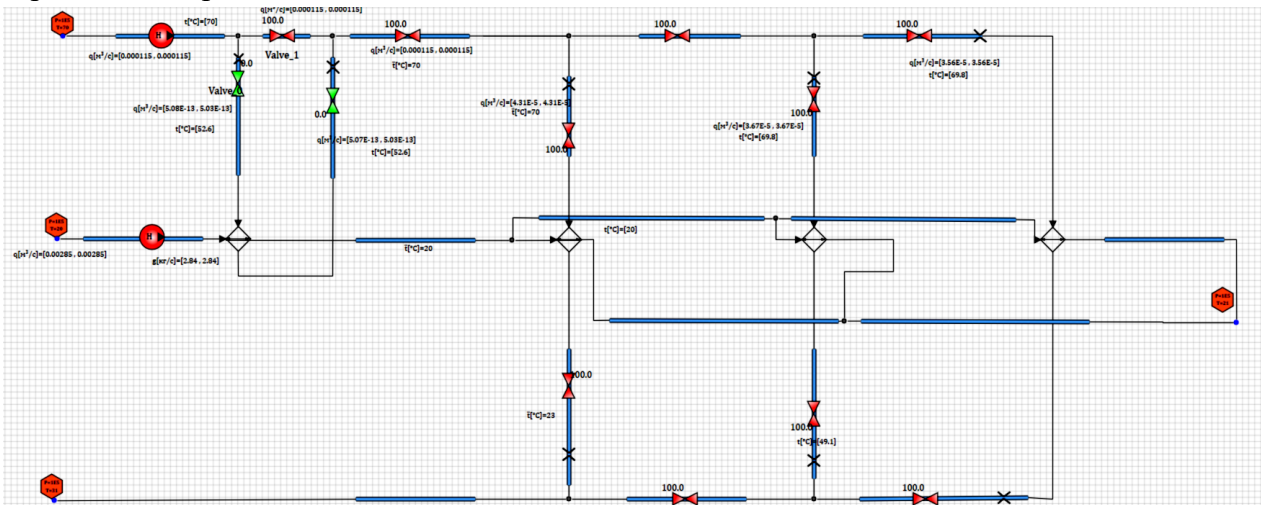


Рис. 6. Графическая иллюстрация динамической модели экспериментального стенда

Таблица 1. Результаты верификации моделей, построенных в SimInTech и ZuluThermo

Расходы на потребителя №	Экспериментальные данные, м ³ /час	SimInTech, м ³ /час	ZuluThermo, м ³ /час	Отклонение SimInTech, %	Отклонение ZuluThermo, %
Стационарный режим					
1	0,152	0,155	0,119	1,935	21,711
2	0,128	0,132	0,128	3,030	0
3	0,146	0,128	0,127	14,063	13,013
Стационарный режим (с закрытием задвижки) перед третьим потребителем					
1	0,177	0,174	—	1,724	—
2	0,212	0,224	—	5,357	—
3	0,00021	0,0002	—	5,000	—
Открытие задвижки, динамический сценарий*					
1	0,177	0,170	—	4,118	—
	0,159	0,162		1,852	
	0,156	0,155		0,645	
2	0,212	0,206	—	2,913	—
	0,181	0,171		5,848	
	0,141	0,135		4,444	
3	0,033	0,027	—	22,222	—
	0,076	0,077		1,299	
	0,130	0,126		3,175	

*Периодичность снятия показаний – раз в четыре секунды.

Для рассмотрения динамических процессов был произведен расчет в режиме синхронизации с реальным временем. Постепенно изменяли степень закрытия задвижки на третьем потребителе и смотрели, как менялись параметры потребителей при этом. Нами было зафиксировано четыре промежутка времени, представленных в таблице 1.1., с целью

определения скорости восстановления стационарного режима (когда задвижки на всех потребителях были открыты) и для сравнения с результатами, полученными в ходе испытания экспериментального стенда. График изменения расходов на потребителях представлен на рис. 7.

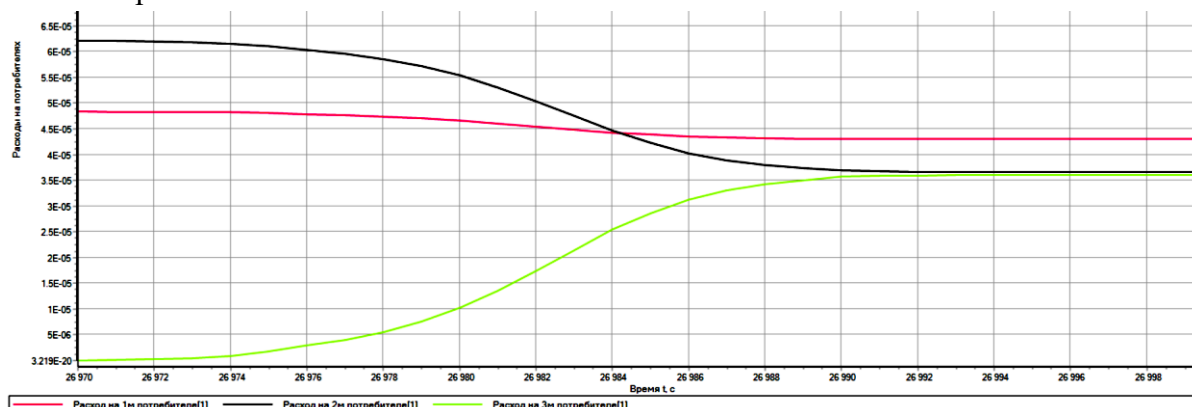


Рис 7. График изменения расходов на потребителях

Полученные временные зависимости динамических процессов могут быть применены для анализа работы регулирующей автоматики, расположенной на потребителях тепловой энергии и ее настройки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все три рассмотренные программы, имеют свои особенности как достоинства, так и недостатки. Менее подходящим для поставленных задач моделирования централизованных систем оказался программный комплекс Matlab Simulink из-за длительного времени расчета и требовательности к вычислительным мощностям компьютера. ZuluThermo хорошо подходит для расчета систем большой размерности. Скорость расчета и удобный функционал позволили программе стать лидером в области проектирования систем централизованного теплоснабжения. Результаты верификации результатов расчета представлены в таблице 1. Однако ZuluThermo не позволяет проводить расчет динамических процессов и изменять параметры построенной модели в режиме реального времени. С этими задачами прекрасно справилась программа SimInTech. В совокупности с высокой скоростью расчета параметров моделируемого объекта и гибкой настройкой характеристик его составных частей программа показала хорошее совпадение результатов расчета статических и динамических режимов (таблица 1). Программа также позволяет в режиме реального времени изменять параметры и конфигурацию системы, что отражается на результатах расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электронный ресурс** // help.simintech.ru: информ.-справочный портал URL: https://help.simintech.ru/#spravochnaya_sistema_i_ee_nastrojka/DIR_nachalo_raboty_so_spravочноj_sistemoj.html (дата обращения: 10.01.2022).

А.П. Софроницкий¹, А.А. Сесин¹, С.В. Гужов²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОФИСНОГО ЗДАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье описаны результаты разработки модульных тестов для разработанной базы данных и программного блока по расчёту надёжности систем теплоснабжения. Описаны реализованные тесты для графического интерфейса разработанного прототипа программной системы. Результаты проверки и запуска всех разработанных тестов успешны.

Рассмотрен пример выполнения с помощью реализованного прототипа расчёта показателей энергетической эффективности и надёжности для упрощённой схемы теплоснабжения офисного здания iCUBE в г. Москве. Рассчитанные показатели соответствуют полученным экспертным оценкам.

Ключевые слова – надёжность, энергетическая эффективность, прогнозирование, энергетический баланс

1. ВВЕДЕНИЕ

Система теплоснабжения здания предназначена для обеспечения тепловой энергией (теплотой) его инженерных систем, требующих для своего функционирования подачи нагретого теплоносителя. Подача теплоты от внешнего источника (теплосети) в здание осуществляется через оборудование теплового пункта. Существуют различные виды тепловых пунктов. В разрабатываемой программной системе рассматриваем здания с индивидуальными тепловыми пунктами (ИТП). ИТП — тепловой пункт, предназначенный для присоединения систем теплоснабжения одного здания или его части [1] — это сложная система с большим количеством элементов совместно работающего оборудования, которое служит для подачи необходимого количества теплоты в системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Теплоэнергетическая эффективность индивидуального теплового пункта зависит от качества функционирования оборудования, входящего в его состав. В рамках настоящей статьи будем рассматривать следующие показатели качества: энергетическая эффективность, надёжность.

2. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ИТП

В общем случае ИТП снабжает тепловой энергией систему отопления, систему вентиляции, систему горячего водоснабжения (ГВС). Система расчёта индекса надёжности зданий с ИТП отображена на рис. 1. Схема представляет собой блок из трёх параллельно соединённых линий типа «запорная арматура — теплообменный аппарат — запорная арматура», который последовательно соединён с насосом. При этом к каждому теплообменнику в этом блоке на каждой линии параллельно подключена каждая из основных систем теплоснабжения здания.

В разрабатываемом ПО принимаются допущения о реализации в рассматриваемом здании закрытой, независимой системы теплоснабжения. Надёжность индивидуального теплового пункта целесообразно рассчитывать по входящим в неё элементам, объединён-

ных в целое. Такой метод позволяет сравнивать узлы агрегатов по их надёжности для возможности совершенствования их эксплуатации. Радиаторы отопления, расположенные на одном этаже, рассматриваются как последовательно соединённые элементы, а этажи, в свою очередь, считаем соединёнными между собой параллельно.

Тепловой пункт состоит из множества элементов, входящих в него, что делает расчёт каждого из них процессом со многими недоступными нам неизвестными. Поэтому для оценки надёжности теплового пункта сделано допущение об известности компоновки ИТП.

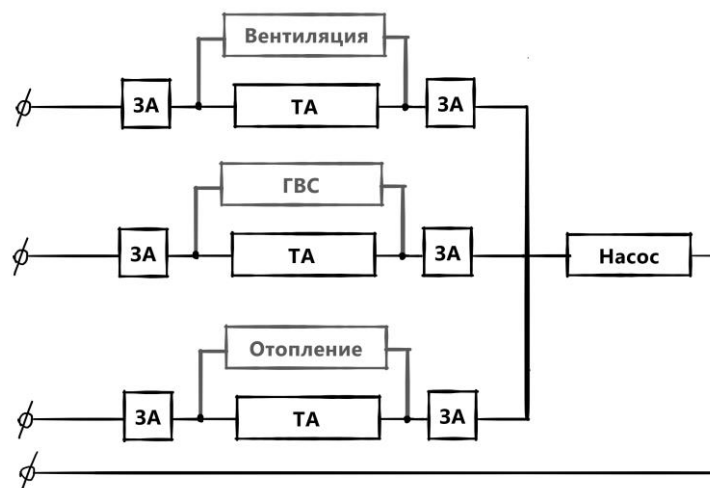


Рис. 1. Принципиальная схема для расчёта индекса надёжности зданий с ИТП: ЗА – запорная арматура; ТА – теплообменный аппарат; ГВС – горячее водоснабжение.

Под индексом энергетической эффективности будем понимать относительную величину снижения потребления тепловой энергии за счёт внедрения решений по энергосбережению, выраженную в относительных единицах. Алгоритм расчёта индекса энергетической эффективности подробно рассмотрен в [2] и не приводится в рамках настоящей статьи.

Одним из методов расчёта индекса энергетической эффективности является расчёт индекса технического состояния по части энергетической эффективности по долям составляющих систем: отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Алгоритм расчёта данным методом состоит из следующих этапов:

1. Сбор фактических значений потребления тепловой энергии со счётчиков обследуемого здания за исследуемый период (обычно это последние несколько лет).
2. Выявление долей систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения в балансе здания от общего потребления тепла.
3. Составление пересчёта потребления тепловой энергии на эти доли.
4. Проведение анализа и определение эффективности возможных изменений в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения.
5. Определение индекса энергетической эффективности системы.

Расчёт индекса энергетической эффективности системы выполняется по формуле:

$$I_{эфф} = \frac{Q_{отоп} \cdot K_{неизм}^{отоп} + Q_{вент} \cdot K_{неизм}^{вент} + Q_{ГВС} \cdot K_{неизм}^{ГВС}}{Q_{отоп} + Q_{вент} + Q_{ГВС}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{отоп}}$, $Q_{\text{вент}}$ и $Q_{\text{ГВС}}$ — доля систем отопления, вентиляции и горячего водоснабжения соответственно в тепловом балансе потребления здания, Гкал;

$K_{\text{отоп}}$, $K_{\text{вент}}$ и $K_{\text{ГВС}}$ — степени неизменности в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения соответственно.

Обозначим события безотказной работы участка системы отопления, вентиляции и ГВС $A_{\text{отоп}}$, $A_{\text{вент}}$ и $A_{\text{ГВС}}$ соответственно. Поскольку данные участки работают независимо друг от друга, то на основе принципа независимости событий получим следующую формулу безотказной работы (надёжности) системы теплоснабжения здания [3]:

$$I_{\text{надёжность}} = P(A) = 1 - (1 - P(A_{\text{отоп}})) \cdot (1 - P(A_{\text{вент}})) \cdot (1 - P(A_{\text{ГВС}})) \quad (2)$$



Рис. 2. Схема замещения системы подключения одного радиатора отопления

Алгоритм расчёта надёжности системы отопления можно разбить на следующие подэтапы:

- I. расчёт надёжности схемы замещения подключения одного радиатора отопления (рис. 2) на k -ом этаже i -го подъёма j -го опуска;
- II. расчёт надёжности параллельного соединения радиаторов отопления (по схеме замещения этапом ранее) на каждом из этажей для i -го подъёма j -го опуска;
- III. расчёт надёжности последовательного поэтажного (получены этапом ранее) соединения каждого опуска на i -ом подъёме;
- IV. расчёт надёжности параллельного соединения между собой всех опусков (получены этапом ранее) на каждом подъёме;
- V. расчёт надёжности параллельного соединения всех подъёмов (получены этапом ранее) между собой.

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ

Для взаимодействия с базой данных применяется язык SQL (Structured Query Language) [4]. Пользователь отправляет запрос на языке SQL посредством некоторого специального интерфейса. СУБД [5], в свою очередь, должным образом интерпретирует его и выполняет запрос, посылая в ответ пользователю результат его выполнения. В качестве основного языка запросов используется язык Transact-SQL, являющийся совместной разработкой компаний Microsoft и Sybase. Используемая технология создания графических интерфейсов пользователя в ОС Windows – Windows Presentation Foundation (WPF) [6]. WPF является частью экосистемы .NET. Кроме того, она лежит в основе технологии Silverlight, которая распространяет WPF на Сеть и мобильные устройства [7].

Основные преимущества WPF [8, 9, 10]:

- использование традиционных языков платформы .NET — C# и VB.NET для создания логики приложения;

- возможность декларативного определения графического интерфейса с помощью специального языка разметки XAML;
- независимость от разрешения экрана пользователя, т. к. все элементы измеряются относительных величинах;
- добавление новых возможностей по созданию различных приложений по сравнению с Windows Forms (например, привязка данных, создание стилей, шаблонов, тем и т. д.);
- аппаратное ускорение графики.

При разработке web-сайта по расчёту индексов использовались языки HTML/CSS [11] и JavaScript с использованием библиотеки jQuery [12]. Информация о текущем объекте хранится в JS-объекте `this_build`, который хранит все необходимые для расчёта характеристики здания. Интерфейс позволяет загружать и сохранять настройки конфигурации параметров характеристик зданий с помощью JSON-файлов.

При разработке базы данных выделены следующие базовые информационные объекты, данные о которых должны содержаться в проектируемой базе данных: труба, насос, радиатор отопления, теплообменник, калорифер, вентиль запорный, кран водораздаточный, терморегулятор. С помощью данных объектов определяется конфигурация трёх основных систем теплоснабжения: отопления, вентиляции и горячего водоснабжения, на основе которых и формируется модель здания. Кроме того, в разрабатываемой базе данных необходим информационный объект для хранения данных о потреблении тепловой энергии. Таким образом, к приведённым выше информационным объектам добавляются следующие: здание, система отопления, система вентиляции, система горячего водоснабжения, данные потребления тепла для расчёта эффективности.

4. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Рассмотрим пример выполнения расчёта интегрального индекса на примере упрощённой схемы теплоснабжения офисного здания iCUBE в г. Москве. Основные параметры схемы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры упрощённой схемы теплоснабжения офисного здания iCUBE [13]

<i>Параметр</i>	<i>Значение параметра</i>
Количество этажей	11
Год постройки	2013
Запорная арматура	запорный вентиль винтовой
Насос в ИТП	Насос с ЧРП
Теплообменник в ИТП	теплообменник пластинчатый «вода-вода»
Трубопровод	трубы пластиковые
Калорифер	калорифер 1-го типа
Терморегулятор	терморегулятор
Радиаторы отопления	биметаллические
Количество радиаторов на этажах	91..105
Водораздаточные краны	сенсорные с аэратором

Количество кранов на ветвях	18..27
Потребление теплоты за отопительный период, Гкал	2098,158
Доли потребления (вентиляция, отопление, ГВС)	0,2; 0,6; 0,2
Коэффициенты неизменности (вент., отопл., ГВС)	0,96; 0,92; 1
Удельный расход (вентиляция, отопление, ГВС), $\frac{\text{кВт}\cdot\text{ч}}{\text{м}^2}$	6,46; 30,73; 65,8

Тестирование является важным этапом в процессе разработки программных продуктов. Применённый модульный (автономный) тест вызывает тестируемую единицу работы и затем проверяет её конечный результат [14].

Таблица 2. Основные результаты расчёта

Наименование параметра	Результат расчёта в ПО	Результат эталонного расчёта	Расхождение результатов, %
ИТС _{НАДЁЖНОСТЬ}	0,95782	0,95782	0
Q _{СТЕНЫ} , Гкал	1185,91538	1185,91538	0
Q _{ПОЛ} , Гкал	30,64090	30,64090	0
Q _{ДВЕРЬ} , Гкал	86,06494	86,06494	0
Q _{суммарные} , Гкал	1702,89597	1702,89597	0
ИТС _{ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ}	0,87342	0,87342	0
ИТС _{ИНТЕГРАЛЬНЫЙ}	0,91562	0,91562	0

После внесения первичной конфигурации здания в ПО производится расчёт индексов энергосистем зданий. Значения, рассчитанные в ПО, идентичны значениям, полученным в эталонном расчёте расчёте, проведённом вручную (табл. 2). Следовательно, автономный тест завершился удачно.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан рабочий прототип программной системы расчёта интегрального индекса энергосистем зданий на основе показателей их энергетической эффективности и надёжности. В процессе работы успешно выполнены поставленные задачи: проанализирована работа системы теплоснабжения; изучены методики расчёта индексов эффективности и надёжности на основе имеющихся данных о конфигурации здания; разработана архитектура базы данных взаимосвязей основных систем теплоснабжения с её базовыми элементами. Реализовано WPF-приложение для интерактивного взаимодействия пользователя с базой данных, с возможностью изменения конфигураций зданий и расчёта индексов эффективности, надёжности и интегрального. Успешно выполнено тестирование и отладка прототипа системы и рассмотрен пример расчёта показателей индексов на имеющихся реальных данных об офисном здании в г. Москве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Певной, П.** Современное здание. Инженерные системы. / П. Певной. – Донецк, 2006. – 82 с.
2. **Андреева, Т.Ю.** Индекс энергетической эффективности офисных зданий в г. Москва / Т.Ю. Андреева, А.П. Софроницкий, С.В. Гужов // VII Международная научно-практическая конференция "Advances of science-2021". – Москва, 2021.

3. **Софроницкий, А.П.** Индекс надёжности офисных зданий в г. Москва / А.П. Софроницкий, Т.Ю. Андреева, С.В. Гужов // VII Международная научно-практическая конференция "Advances of science-2021". – Москва, 2021.

4. **MS SQL Server и T-SQL | Введение:** сайт. – 2012. – URL: <https://metanit.com/sql/sqlserver/1.1.php>

5. **Пушников, А.Ю.** Введение в системы управления базами данных. Часть 1. Реляционная модель данных: Учебное пособие / А.Ю. Пушников. – Уфа: Изд-е Башкирского ун-та. – Уфа, 1999. – 108 с.

6. **Натан, А.** WPF 4. Подробное руководство. – Пер. с англ. / А. Натан. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 880 с.

7. **WPF и C# | Введение:** сайт. – 2012. – URL: <https://metanit.com/sharp/wpf/1.php>

8. **IDE Visual Studio 2019 — программное обеспечение для Windows:** сайт. – 2021. – URL: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/vs/>

9. **Ошероув, Р.** Искусство автономного тестирования с примерами на C#. 2-е издание / пер. с англ. Слинкин А.А. // Р. Ошероув – М.: ДМК Пресс, 2014. – 360 с.

10. **Аббаров Р.Д.** Тестирование графического интерфейса (GUI testing) / Р.Д. Аббаров, В.О. Пак // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – №3.1 (5.1). – с. 3–4. — URL: <https://moluch.ru/th/8/archive/62/2630>

11. **Маран, М.М.** Программирование на языке C# в среде Microsoft Visual Studio 2005: учебное пособие / М.М. Маран. – М.: Издательство МЭИ, 2007. – 92 с.

12. **Петкович, Д.** Microsoft SQL Server 2012. Руководство для начинающих: Пер. с англ. / Д. Петкович. – СПб.: БХВ-Петербург, 2013. – 816 с.

13. **Guzhov, S.V.** Forecasting the integral index of the technical state of the group's power systems and the demand for heat energy by office buildings using artificial neural networks / S.V. Guzhov, T.Y. Adreeva, A.P. Sofronitsky // Международная конференция «Энергетические системы» (ICES). – Белгород, 2020.

14. **Сидорова, Н.П.** Базы данных. Методические указания к курсовому проектированию. / Н.П. Сидорова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 40 с.

Р. Биткулов¹, Д.Д. Умурзаков¹, И.Д. Витлинский², Г.Ч. Чо³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

АННОТАЦИЯ

Развитие технологий накопления электроэнергии в химических источниках тока позволяет находить применение систем накопления электроэнергии (СНЭ) в электроустановках потребителей для решения комплекса задач. Одной из них является снижение затрат на электроэнергию и мощность. В исследовании проведен факторный анализ целесообразности применения СНЭ с учетом старения литий-ионных аккумуляторов. Расчеты проведены для актуальных и перспективных цен на электроэнергию и мощность. Для актуальных цен на электроэнергию установлено, что снижение затрат на электроснабжение путем смещения потребления в зону низких цен за счет использования СНЭ дает положительный эффект лишь на тарифах с резкой неравномерностью – при коэффициенте неравномерности 0,1 и менее. Снижение затрат на мощность путем срезания пиков потребления разрядом СНЭ целесообразно лишь при малых уровнях ограничения – до 2 % от максимальной мощности потребления.

Ключевые слова – старение батареи, циклическое старение, календарное старение, система накопления энергии, литий-ионный аккумулятор, арбитраж электроэнергии.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий накопления электроэнергии в химических источниках тока позволяет находить применение систем накопления электроэнергии (СНЭ) в электроустановках потребителей для решения комплекса задач. Одной из них является снижение затрат на электроэнергию и мощность. При эксплуатации СНЭ возникает ускоренное старение аккумуляторов (АБ) СНЭ, которое приводит к необходимости преждевременной замены [1]. Календарное старение происходит в течение всего срока службы [2]. Циклическое старение происходит во время циклического повторения непрерывного разряда, которое и обуславливает ускоренное старение СНЭ [3].

Актуальным представляется задача оценки целесообразности применения СНЭ в электроустановках потребителей для снижения затрат на электроэнергию и мощность. Для этого сформирован набор факторов, оказывающих влияние на технико-экономические показатели, и проведен анализ их влияния на снижение затрат с учетом ускоренного старения литий-ионных аккумуляторов в процессе эксплуатации.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлась электрическая сеть промышленного предприятия, состоящая из нагрузки, СНЭ на базе литий-ионных аккумуляторов, подключаемой к шинам 0,4 кВ, и сетевого источника питания.

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе была разработана расчетная модель режимов работы СНЭ в составе электроустановки промышленного по-

требителя. Модель позволяет формировать режим работы СНЭ путем решения оптимизационной задачи по минимизации потребления электроэнергии из сетевого источника в периоды высоких цен на электроэнергию. Кроме того, модель ограничивает потребление электроэнергии из сети в часы максимальных значений нагрузки. На втором этапе проведены экспериментальные исследования характеристики циклического старения литий-ионного аккумулятора, и по его результатам произведен обоснованный выбор аналитической модели старения аккумулятора, использованной в расчетной модели режимов работы СНЭ. На третьем этапе проведен факторный анализ снижения затрат на электроэнергию за счет арбитража путем смещения потребления энергии из сети в зону низких цен. На четвертом этапе проведен факторный анализ эффективности применения СНЭ для ограничения максимальной мощности потребления из сети.

Расчетная модель режимов работы СНЭ реализована в программном комплексе Python. Оптимизация режима работы СНЭ произведена с помощью нелинейного метода внутренней точки. Описание модели режимов работы СНЭ, включая расчет режимных параметров электроустановки и СНЭ, приведено в [4].

Для корректного учета циклического старения был проведен анализ литературы, из которой выявлены несколько подходов к учету циклического старения Li-ion аккумулятора, предполагающих использование различных моделей [5, 6, 7]. Однако, при использовании одной из данных моделей стоит учитывать, что процесс циклического старения зависит от множества факторов [5]. Таким образом, модели, разработанные при одних условиях, могут быть неприменимы в других. Для определения подходящей характеристики было проведено экспериментальное исследование зависимости ёмкости аккумулятора от числа совершенных циклов заряда/разряда.

Объектом экспериментального исследования был аккумулятор типа ROBITON LiFe26650, с катодами из LiFePO₄ (LFP). Испытания проводились по ГОСТ Р МЭК 62620. В ходе испытаний аккумулятор в течение 58 дней подвергался контрольным измерительным циклам с токами заряда и разряда 1С для снятия емкости полностью заряженного аккумулятора. Всего было проведено 393 цикла заряда-разряда. Для проведения измерений использовался прибор ЗКЕ «ЕВС-20А», обеспечивающий погрешность измерения напряжений и токов $\pm 0,5$ %. Произведен пересчет энергии в полные эквивалентные циклы заряда-разряда аккумулятора (FEC), соответствующие удвоенной номинальной ёмкости аккумулятора. Полученные значения наносились на график в координатах (FEC ; C). Характеристика циклического старения построена с использованием линейной регрессии. В качестве базисных были приняты функции, встречающиеся в статьях [1-3], представляющих зависимости вида:

$$C_{fade} = c \cdot FEC; C_{fade} = c \cdot \sqrt{FEC}; C_{fade} = a \cdot FEC^2 + b \cdot FEC + c \cdot \sqrt{FEC} \quad (1)$$

Сравнение базисных моделей проводилось на основе их коэффициентов детерминации, равных $R^2(FEC^2) = 0,66$; $R^2(FEC^1) = 0,547$; $R^2(FEC^{1/2}) = 0,22$. Таким образом, модель FEC^2 лучшим образом описывает результаты эксперимента, что подтверждает вид характеристик на рисунке 1.

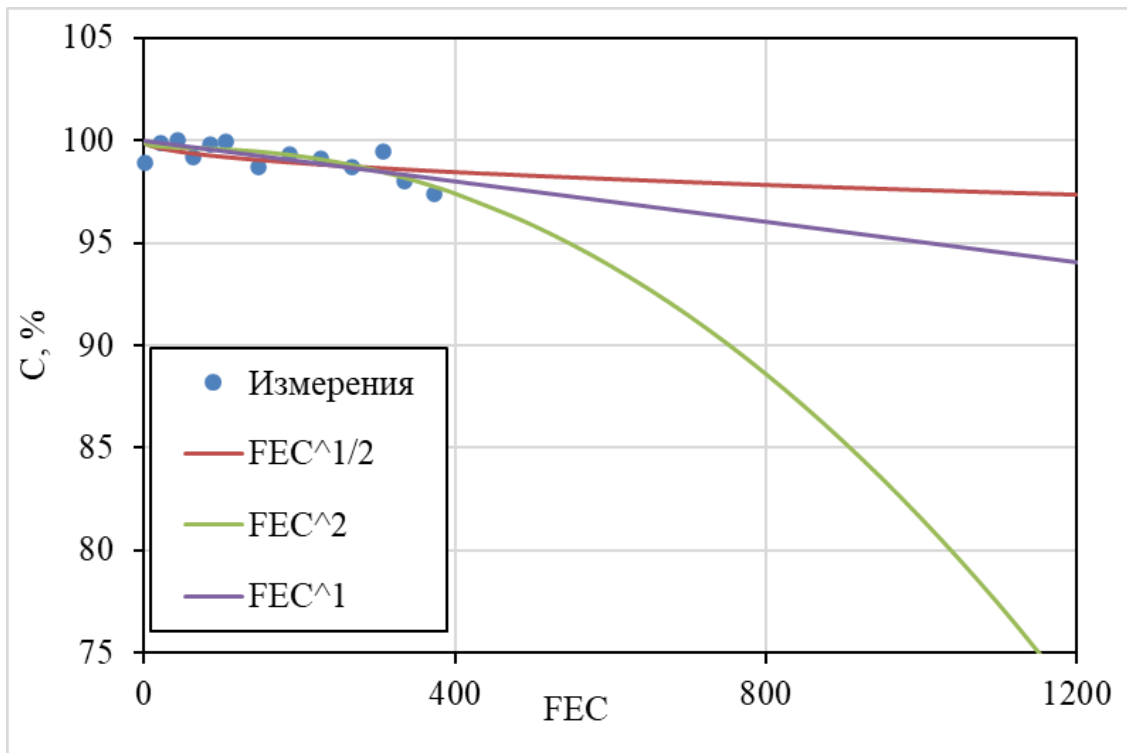


Рисунок 1. Полученные зависимости

Использование нелинейной модели позволяет более точно отражать процесс старения аккумулятора, что незаменимо в задачах прогнозирования остаточного срока службы. Однако, расчеты показали, что разница между затратами при использовании линейной модели и нелинейной не превосходит 2%. При этом использование нелинейной модели усложняет программу и повышает время расчета. По этим причинам было принято решение дальнейшего использования линейной модели:

$$C_{fade}^{cyc} = 0,5 \cdot \frac{|\sum_t P_{ESS,t}|}{SOC_{max} \cdot N_{cyc}} \quad (2)$$

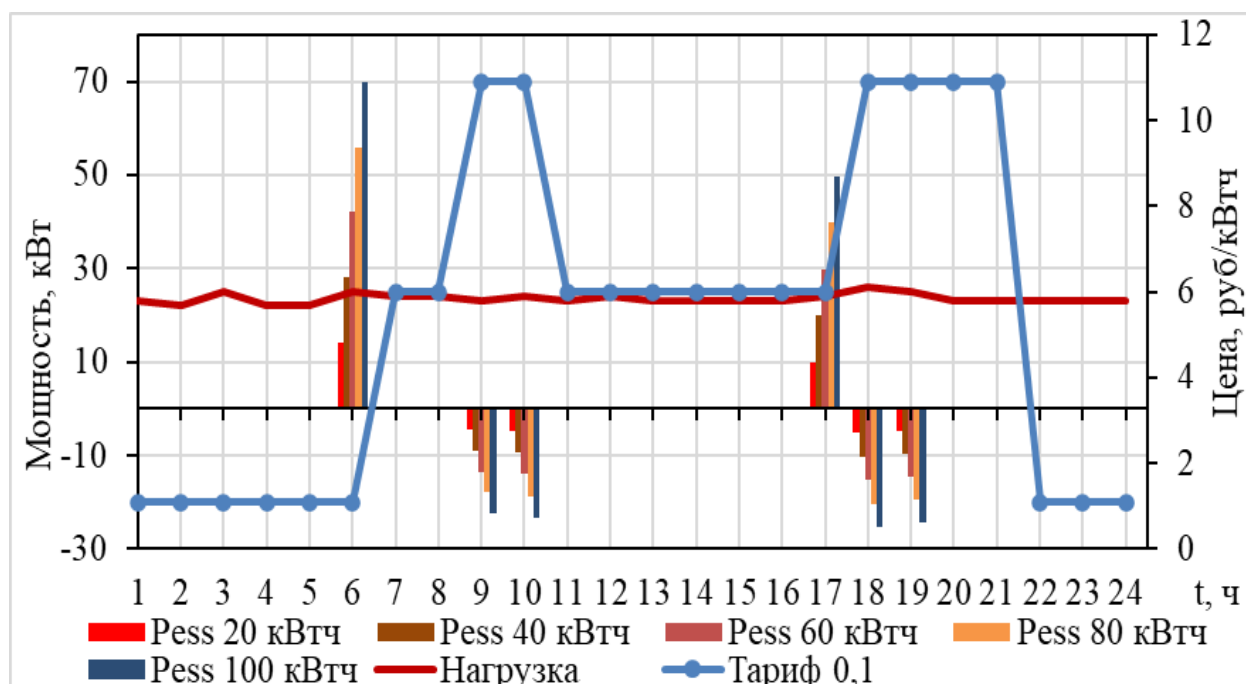
где N_{cyc} – число циклов, на которое рассчитан накопитель.

3. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Произведена оценка следующих факторов: формы графика нагрузки, неравномерности тарифа на электроэнергию и номинальная емкость СНЭ.

Неравномерность тарифа задавалась рядом коэффициентов неравномерности от 0,1 до 0,9 с шагом 0,1. Минимальная цена в каждом тарифе принималась равной 1,09 руб/кВт·ч – цена тарифа ЦК2 по данным Мосэнергосбыта за январь 2021 года. Кроме того, рассмотрены тарифы с перспективой роста минимальной цены на 20 и 40%. Номинальная емкость СНЭ варьировалась в диапазоне от 20 до 100 кВт·ч с шагом 20 кВт·ч.

Из графика режима работы СНЭ, представленного на рисунке 2, можно увидеть, что СНЭ заряжается до максимальной емкости в 6-ом часу во время низкой цены и разряжается в 9-10-ых часах во время высокой. Также в конце дня в 17 часов производится заряд СНЭ во время локального минимума цены с последующим разрядом в 18-19 часах. Также можно отметить, что при изменении емкости СНЭ режим работы не меняется, изменяется только количество запасаемой энергии, которая пропорциональна емкости СНЭ.


 Рисунок 2. Режим работы СНЭ для тарифа с $K_{нт} = 0,1$

Также из результатов работы модели, представленных в таблице 1, можно отметить, что изменение емкости СНЭ не влияет на экономические результаты применения СНЭ. Например, для емкости 20 кВт·ч срок окупаемости и ВНД составило 6 лет и 3% соответственно, как и для остальных значений емкости. Также неизменным остается срок службы СНЭ, составляющий 11 лет с учетом ускоренного циклического и календарного старения аккумуляторов. Это объясняется тем, что несмотря на различие в режимах работы СНЭ разных номинальных емкостей на рисунке 2, одинаковым остается отношение энергии, переносимое из зоны высокой цены в зону низкой цены, к номинальной емкости аккумуляторов.

 Таблица 1. Результаты расчета СНЭ для тарифа с $K_{нт} = 0,1$

Параметр	Значения параметров при СНЭ с номинальной емкостью, кВт*ч				
	20	40	60	80	100
Утрата емкости, %	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34
Снижение затрат, млн.руб.	0,075	0,150	0,226	0,301	0,376
Срок окупаемости СНЭ	6	6	6	6	6
Срок службы СНЭ	11	11	11	11	11
ВНД, %	3	3	3	3	3

Из результатов расчета, приведенных на рисунке 3, можно отметить, что с уменьшением неравномерности тарифа модель не использует СНЭ для арбитража ЭЭ. Об этом свидетельствует отсутствие разрядов СНЭ, Pess 0,2, в течение суток. Это объясняется тем, что положительный эффект от арбитража на тарифе с $K_{нт}=0,2$ нивелируется отрицательным эффектом от ускоренного старения аккумуляторов, обеспечивающих смещение потребления в зону низких цен.

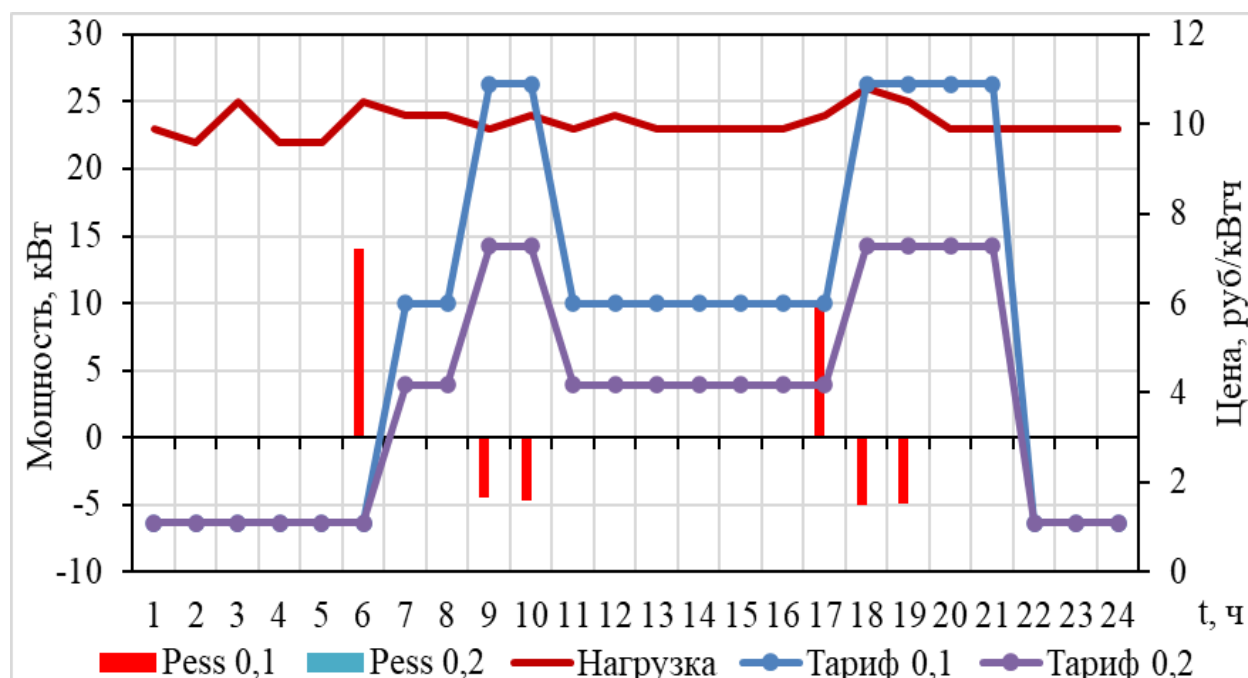


Рисунок 3. Режим работы СНЭ для тарифов с $K_{нт} = 0.1$ и $K_{нт} = 0.2$

Анализ влияния формы графика нагрузки произведен для двух графиков разной формы. Расчеты проводились для тарифа с коэффициентом неравномерности 0,1 и номинальной емкостью СНЭ 20 кВт·ч. По результатам расчета установлено, что изменение графика нагрузки потребителя незначительно влияет на режим работы СНЭ. Влияние вызвано изменением продолжительности разрядов СНЭ в связи с особенностями календарного старения аккумуляторов.

Также была проведена серия расчетов для сетки тарифов с перспективой роста цен на 20 и 40% при неизменных $K_{нт}$ и емкости СНЭ 20 кВт·ч. Из результатов расчета можно отметить, что с увеличением цены на электроэнергию на 40 % срок окупаемости СНЭ не превышает срок службы СНЭ с учетом ускоренного старения уже на тарифе с $K_{нт} 0.15$. Тарифы с более равномерным изменением цены дают отрицательный результат даже с учетом перспективного роста цен.

4. ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ СНИЖЕНИЯ ЗАТРАТ НА МОЩНОСТЬ

Произведена оценка следующих факторов: значения ограничения мощности и номинальной емкости СНЭ. Для исследования использовался тариф на мощность 814,7 тыс. руб за 1 МВт по данным Мосэнергосбыта за январь 2021 года. Емкость СНЭ варьировалась в диапазоне от 5 до 40 кВт·ч.

Результаты расчета показали, что значение номинальной емкости СНЭ оказывает влияние на срок окупаемости СНЭ за счет изменения затрат потребителя на мощность. Для каждого значения ограничения мощности существует значение номинальной емкости СНЭ, при которой срок окупаемости будет минимальным. Например, для наибольшего из рассмотренных ограничений в 4 % это значение составляет 30 кВт·ч, а для ограничения в 1% наиболее целесообразно использовать СНЭ емкостью 5 кВт·ч. Меньшие предпочтительные значения номинальной емкости СНЭ при меньших значениях ограничений вызваны тем, что СНЭ большей емкости не задействуют всю полезную емкость в процессе ограничения пиковой мощности вследствие заданного значения ограничения. Снижение

допустимого значения потребляемой мощности приводит к увеличению необходимой оптимальной емкости СНЭ, увеличению срока окупаемости СНЭ, снижению ВНД при почти неизменном сроке службы. Кроме того, снижение допустимого значения мощности обуславливает большее количество срезаемых пиков на графике мощности потребления. Это приводит к росту циклического старения аккумуляторов и сокращению ожидаемого срока их службы. Однако, это влияние незначительно в сравнении с эффектом от снижения затрат на мощность потребления.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неравномерность графика изменения цены в тарифе оказывает основное влияние на эффективность снижения затрат на ЭЭ от арбитража. При актуальных ценах положительный эффект достигается лишь на тарифах с большой неравномерностью $K_{нт} \leq 0.1$. С учетом перспективного роста цен на ЭЭ на 40 % интерес представляют и тарифы с $K_{нт} \leq 0.15$. Установлено, что форма графика нагрузки и номинальная емкость СНЭ, предположительно, не оказывают влияния на срок окупаемости СНЭ и соответствуют одинаковым ожидаемым срокам службы аккумуляторов с учетом ускоренного старения.

Применение СНЭ для ограничения пиков на графике потребляемой мощности показывает положительный эффект лишь на небольших ограничениях на уровне до 2 % от максимального значения мощности. Существенное влияние оказывает номинальная емкость СНЭ. Значение номинальной емкости СНЭ, обеспечивающее наименьший срок окупаемости за счет снижения затрат на потребляемую мощность, можно определить расчетным путем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **González D.D., R. Diosi R.** Accelerated life testing and life prediction of lithium ion batteries connected to wind turbine (Master Thesis), Aalborg: Aalborg University.
2. **Sarasketa-Zabala E., Laresgoiti I., Alava I., Rivas M., Villarreal I., Blanco F.** Validation Of The Methodology For Lithium-Ion Batteries Lifetime Prognosis // 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, pp. 8.
3. **Soltani M., Ronsmans J., Mierlo J.V.** Cycle life and calendar life model for lithium-ion capacitor technology in a wide temperature range // J. of Energy Storage, 2020, Vol.31, pp.1-12.
4. **Vitlinsky I.D., Cho G C., Smotrov N.N., Bitkulov K.R., Umurzakov D.D.** Utilization of the Energy Storage System for the Energy Arbitrage and Peak Shaving. // 4th 2020 REEP, Moscow, Russia, 2022, pp. 8.
5. **Naumann M., Spingler F., Jossen A.** Analysis and modeling of cycle aging of a commercial LiFePO₄/graphite cell // J. of Power Sources, 2020, Vol. 451, pp. 12.
6. **Rechkemmer S., Zang X., Zhang W., Sawodny O.** Calendar and cycle aging study of a commercial LiMn₂O₄ cell under consideration of influences by cell progress // J. of Energy Storage. 2020, Vol.30, pp.12.
7. **Martins R., Hesse H., Jungbauer J., Vorbuchner T., Musilek, P.** Optimal Component Sizing for Peak Shaving in Battery Energy Storage System for Industrial Applications // Energies. 2018, No.11, Vol.8, pp.22.

Н.А. Каримов ¹, И.С. Зубкова ², Д.А. Аверьянов ², О.Н. Кузнецов ³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГЛОБАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Создание и описание технологии по управлению Глобальным энергообъединением (ГЭО) позволит обеспечить устойчивую работу всех объектов энергетики, входящих в состав объединения. В докладе представлена расчётная модель ГЭО в среде программно-вычислительного комплекса (ПВК) «ЕТАР». Проведён выбор комплекса устройств для обеспечения нормального и переходного режима электропередач большой протяженности связываемых подсистем. Описаны основные положения методики управления устойчивостью ГЭО.

Ключевые слова – глобальное энергообъединение, динамическая устойчивость, трансформация энергетических систем, электропередачи переменного и постоянного тока, динамическое эквивалентирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальное энергообъединение является энергетической системой самой большой установленной мощности с самой протяжённой структурой, содержащей значительную долю возобновляемых источников энергии. В случае же глобального энергетического объединения этот вопрос ещё не разрешен, что определяет необходимость разработки методов управления устойчивостью такой энергосистемы, в которой ключевую роль будет играть энергосистема России, выполняя роль связующего звена между энергосистемами Азиатского региона, Дальнего Востока, Европы и Ближнего Востока.

Результаты исследования устойчивости и разработка методики управления устойчивостью необходимая для обеспечения работоспособности ГЭО даёт возможность повышения надежности, экономической эффективности и экологической безопасности электроэнергетики, а строительство глобального энергетического объединения обеспечит развитие экономики России через увеличение производства электротехнических и конструкционных изделий для нужд электроэнергетики, а также увеличения доходов от продажи электрической энергии и оказания системных услуг в рамках глобального энергетического объединения.

Расчёт переходного процесса электроэнергетической системы большой размерности (несколько тысяч узлов) в ПВК занимает длительное время, а при ещё большей размерности задачи решение с помощью ПВК получено быть не может. Отладка такой модели также является трудно решаемой задачей, требующей значительных временных ресурсов. Подход более компактного представления расчётной модели энергосистемы, с сохранением оригинальных участков энергосистемы и электрических связей между её подсистемами представлен в [1].

Ввиду происходящей в мире трансформации энергетических систем, в статье [2] отражены принципы управления устойчивостью энергообъединения с преобладающей долей генерации от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Описанные принципы

управления позволяют осуществить выбор комплекса устройств для обеспечения нормального и переходного режима электропередач большой протяженности связываемых подсистем.

2. СОЗДАНИЕ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ГЭО НА БАЗЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКВИВАЛЕНТОВ ПОДСИСТЕМ

Динамический эквивалент должен воспроизводить динамические характеристики полной модели энергосистемы. Создание расчётной модели глобального энергообъединения, состоящего из национальных энергосистем стран мира, обуславливает необходимость решения вопросов разработки динамических эквивалентов энергосистем и эквивалента глобального энергетического объединения в целом. На основании подхода динамического эквивалентирования, представленного в [2] было положено начало создания расчётной модели ГЭО. Схематичный вариант интеграции развивающейся ЕЭС России в глобальную суперсеть был представлен в работе [3]. На основании анализа характеристик мировых энергосистем, предложена расчётная схема глобального энергообъединения из 23 динамических эквивалентов.

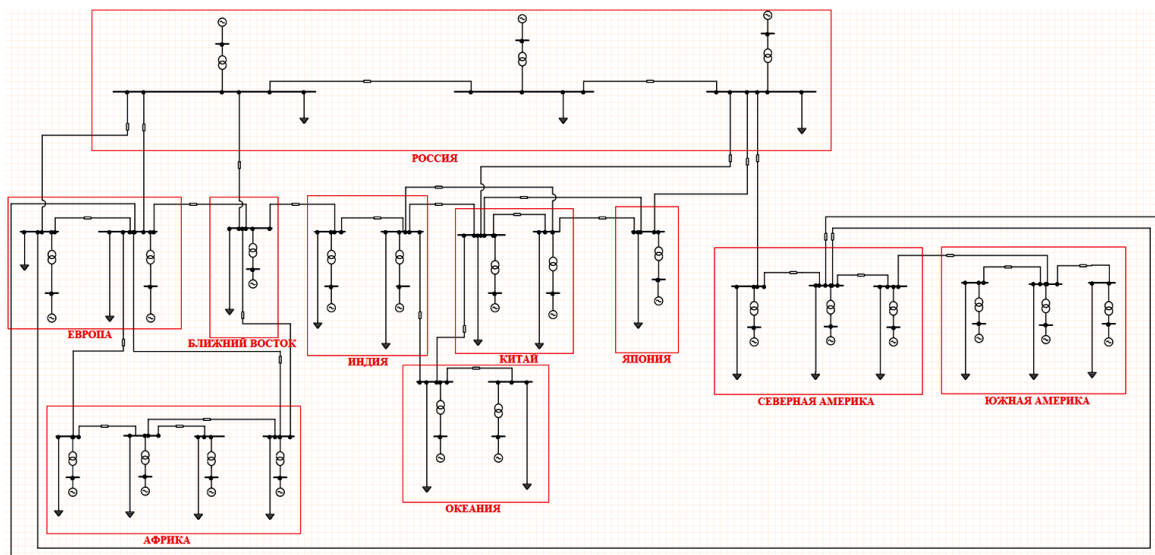


Рис. 1. Расчетная модель ГЭО на базе динамических эквивалентов подсистем

Для расчета параметров эквивалентов были приняты следующие данные:

1. структура генерирующих мощностей энергосистем, которые входят в энергообъединение,
2. мощность нагрузки энергосистем,
3. установленная мощность энергосистем.

Ввиду отсутствия полного объема данных по энергосистемам стран мира динамический эквивалент глобального энергетического объединения для проведения качественных расчетов устойчивости может быть составлен с учетом разработанной схемы глобальной суперсети и по обобщенным данным энергосистем, таких как структура их генерирующей мощности и мощность нагрузки.

3. ВЫБОР КОМПЛЕКСА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО И ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

3.1 Выбор комплекса устройств для обеспечения нормального режима электропередачи переменного тока большой протяженности

Рассмотрены характерные установившиеся режимы работы электропередачи номинального напряжения 500 кВ: наибольшей (НБ) и наименьшей (НМ) передаваемой мощности. Задачами расчётов режимов являются определение значений реактивной мощности, стекающей с участков линии электропередачи в её начале и конце, и решение вопроса о необходимости компенсации имеющихся дефицитов или избытков, а также выбор мощности компенсирующих устройств (КУ), предназначенных для потребления либо генерирования реактивной мощности. В таблице 1 представлены типы, количество и мощность КУ, позволяющих скомпенсировать полученные значения реактивных мощностей по концам электропередачи в режиме НБ и обеспечить её нормальный режим работы.

Таблица 1. Компенсирующие устройства по концам линий

$U_{\text{ном}}$, кВ	Режим	Тип КУ	Место установки	400 км	800 км	1200 км	1450 км
500	НБ	БСК	Начало	11×100 Мвар	–	–	–
			Конец	30×100 Мвар	10×100 Мвар	1×52 Мвар	–
		УШР	Начало	–	Перепад U	4×180 Мвар	7×180 Мвар
			Конец	–	–	–	3×180 Мвар

Для потребления избыточной реактивной мощности по концам электропередачи необходимо устанавливать шунтирующие реакторы (ШР) и управляемые шунтирующие реакторы (УШР), для дополнительной генерации реактивной мощности необходимо устанавливать батареи статических конденсаторов (БСК).

Так же были проведены расчёты послеаварийного режима. В качестве послеаварийного рассматривается наиболее тяжелый режим, возникающий при отключении одной цепи линии. Проведена оценка пропускной способности электропередачи в случае, когда сохраняется выдача энергии от передающей станции. Если коэффициент запаса по статической устойчивости в послеаварийном режиме оказывается меньше нормативного значения 8%, то устанавливались переключательные пункты (ПП) на участках электропередачи. Результаты расчётов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Передаваемая по одной цепи ВЛ мощность и количество переключательных пунктов

$U_{\text{ном}}$, кВ		Длина, км			
		400	800	1200	1450
500	P , МВт	1868	1023	801	764
	$N_{\text{ПП}}$	5	5	5	4

3.2. Выбор комплекса устройств для обеспечения переходного режима электропередачи переменного тока большой протяженности

Расчёт переходных режимов выполнялся для схемы, моделирующей объединение двух энергосистем(ЭЭС) большой мощности с помощью электропередачи переменного тока. Длина и передаваемая мощность по электропередаче соответствует данным таблицы 2. Расчёты проведены с учетом компенсирующих устройств, выбранных для установки на электропередаче в соответствии с расчётом установившегося режима. Без установки дополнительных компенсирующих устройств наблюдалось снижение предельного времени отключения короткого замыкания. В результате расчётов предельное время отключения короткого замыкания для линий длиной свыше 400 километров ниже верхней границы нормативного времени отключения КЗ основной защитой. Таким образом для более длинных электропередач расчёт переходного режима осуществлялся с учётом установки на линии устройства продольной компенсации(УПК). Помимо дополнительных компенсирующих устройств, для сохранения устойчивости в некоторых вариантах было увеличено количество переключательных пунктов. В таблице 3 представлены результаты определения степени компенсации УПК и дополнительное количество необходимых к установке ПП.

Таблица 3. Комплекс устройств для обеспечения переходного режима

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$ \ / \ $L, \text{км}$	400	800	1200	1450
500	1 ПП	2 ПП + УПК с $k_c = 0,25$	2 ПП + УПК с $k_c = 0,5$	2 ПП + УПК с $k_c = 0,6$

С учётом количества ПП, установленных для обеспечения требуемого уровня коэффициента запаса по апериодической статической устойчивости в послеаварийном режиме, итоговое значение переключательных пунктов представлено в таблице 4.

Таблица 4. Итоговое количество переключательных пунктов

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$ \ / \ $L, \text{км}$	400	800	1200	1450
500	6	7	7	6

3.3. Условия устойчивой работы электропередачи постоянного тока

Электропередача постоянного тока (ППТ) позволяет обеспечить несинхронное соединение частей ЭЭС и частей, работающих с разной частотой. Наличие звена постоянного тока позволяет обеспечить независимость работы соединяемых частей системы в части синхронности по переменному напряжению и току, что наряду с возможностью несинхронной работы позволяет разрешить вопрос динамической устойчивости взаимного движения соединяемых частей.

Условия устойчивости системы, содержащей электропередачу постоянного тока, определяются условиями устойчивости соединяемых подсистем переменного тока. Причём, в подсистеме, где возникло короткое замыкание, определяются условия синхронной динамической устойчивости, а в смежной подсистеме условия устойчивости регулирования частоты. В случае возникновения короткого замыкания на линии постоянного тока, определяются условия устойчивости регулирования частоты с учётом действия автоматической частотной разгрузки или автоматики предотвращения повышения частоты в соот-

ветствии с требованиями стандартов по регулированию частоты в электроэнергетической системе.

4. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ГЭО

Методика управления устойчивостью ГЭО определяет направленное на регулирование условий устойчивости, в том числе обеспечение устойчивости системы, путём обоснованного применения технических способов и средств. Обеспечение устойчивости электроэнергетической системы при больших возмущениях нацелено на обеспечение устойчивого взаимного движения вращающихся масс системы, связанных между собой электромагнитным взаимодействием. Обеспечение устойчивости выполняется двумя путями: исключением природы неустойчивого движения (устойчивость по углу) и через управление характеристиками электромагнитной связи вращающихся масс (управление параметрами пропускной способности электрических связей).

4.1. Принципы обеспечения устойчивой параллельной работы энергосистем (связанных электропередачами переменного и постоянного тока)

Принципиально обеспечение динамической устойчивости ГЭО выполняется за счёт применения технических способов и средств:

1. исключающих возможность нарушения синхронной устойчивости (по углу).
2. определяющих величину и скорость изменения пропускной способности электрических связей.

В первую группу входят следующие принципы обеспечения устойчивости:

- выбор типа электропередачи (переменного или постоянного тока),
- применение преобразователей напряжения при критических снижениях напряжения при КЗ.

Во вторую группу:

- организация управления переходным режимом (противоаварийное управление),
- установка устройств компенсации сопротивления и реактивной мощности электропередачи переменного тока,
- сооружение переключательных пунктов ВЛ переменного тока.

4.2. Положения методики управления устойчивостью ГЭО

Уровень устойчивости ГЭО определяется параметрами нормативных возмущений, при которых система должна сохранять устойчивость, то есть возвращаться в исходный режим при приложении возмущения или режим, допустимый по условиям эксплуатации. Принятие в качестве нормативных возмущений более тяжёлых видов возмущений требует более интенсивных управляющих воздействий и, как следствие, более капиталоемких технических устройств для их реализации, что требует технико-экономического обоснования уровня функциональной надёжности ГЭО по условию динамической устойчивости.

Устойчивость ГЭО обеспечивается:

1. выбором состава и параметров силового оборудования для решения основной задачи ГЭО в нормальных и послеаварийных установившихся режимах;
2. выбором технических способов и средств обеспечения динамической устойчивости в соответствии с принципами обеспечения устойчивости.

При реализации принципов обеспечения устойчивости ГЭО, как сложной системы, необходимо учесть иерархичность её построения и выбрать конкретные технические способы и средства обеспечения устойчивости, исходя из иерархичности движения: движение системы, которое возникает в результате инициирования переходного процесса, будет устойчиво при обеспечении устойчивости внутреннего движения (в подсистемах) и взаимного движения подсистем (системы в целом).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбраны и обоснованы параметры комплекса устройств обеспечения устойчивости электроэнергетической системы с электропередачами переменного тока большой протяженности.

Разработаны основные положения методики и принципы обеспечения динамической устойчивости глобального энергетического объединения. Реализация принципов обеспечения устойчивости выполняется с учётом иерархии построения ГЭО: подсистемы – система.

Устойчивость ГЭО может быть обеспечена при применении в качестве межсистемных связей электропередач переменного и постоянного тока при выборе соответствующих параметров компенсации параметров электропередач переменного тока и обеспечения условий функционирования преобразователей передач постоянного тока.

При применении положений методики обеспечения устойчивости путём реализации технических способов и средств обеспечивается динамическая устойчивость глобального энергетического объединения в соответствии с обосновываемым уровнем функциональной надёжности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Эквивалент** энергосистемы глобального энергетического объединения для расчётов динамической устойчивости/ О.Н. Кузнецов, И.С. Зубкова, Д.А. Аверьянов // Электротехника. 2022. № 1. С. 47-53.

2. **Zubkova I.S., Kuznetsov O.N. and Averyanov D.A.** Ensuring the transient stability of the energy interconnection considering a share of RES connected to the electric grid-based inverters // 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2022. P. 1-5.

*А.С. Гудожников*¹, *М.П. Тибряев*¹, *М.А. Рашевская*²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ НН ПРИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ДУГОВЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

АННОТАЦИЯ

Данная статья содержит общее описание проведённого исследования в рамках гранта ПНИ 20/22. Статья демонстрирует характеристики, полученные при экспериментальном изучении свойств дугового пробоя. Получение характеристик дуги обеспечило создание имитационной компьютерной модели, которая легла в основу разработки программного комплекса по расчёту токов аварийного режима.

Ключевые слова – электрическая дуга, последовательный и параллельный дуговой пробой, гармоники тока, имитационная модель Matlab/Simulink, моделирование режимов дугового замыкания, программа для расчёта аварийных токов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Перспективы изучения электрического пробоя растут с каждым годом. В условиях развития промышленности, появления всё большего количества бытовых приёмников вопрос безопасности от возникновения пожаров вследствие дуговых замыканий стоит особенно остро. Также возникновение новых цифровых устройств намного расширяет возможности в разработке идентификационных методов, позволяет усложнить и увеличить точность способов как идентификации дугового пробоя в реальной сети, так и расчёта токов аварийных режимов, возникающих при пробоях. Целью и задачей разработки стало исследование характерных свойств дугового пробоя, а также построение имитационной модели с интерфейсом для расчёта аварийных режимов, в том числе и дуговых коротких замыканий.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДУГОВОГО ПРОБОЯ

2.1. Построение экспериментального стенда

Для практического изучения дугового пробоя требовалось построение специальной установки (рис.1), на которой можно было бы зажигать электрическую дугу, снимать показания тока и напряжения дугового пробоя, а затем подвергать их аналитическим исследованиям. Наибольшую ценность представляют исследования идентификации дуговых пробоев при последовательных повреждениях, так как на них не реагируют аппараты токовых защит, поэтому было принято решение моделировать именно последовательное повреждение на низких нагрузочных токах бытовых приборов.

Питание установки осуществляется источником 220 В переменного тока. В качестве проводников используются одножильные проводники с медной жилой сечения 4 мм². Для включения однофазной нагрузки различных мощностей предусмотрено 3 розетки. Лампа накаливания, подсоединённая к вводному выключателю, сигнализирует о наличии питающего напряжения. В качестве генератора дуги используется два электрода – медный и

угольный с электрододержателями. Вращение ручки специального механизма позволяет увеличивать или наоборот уменьшать расстояние между электродами.

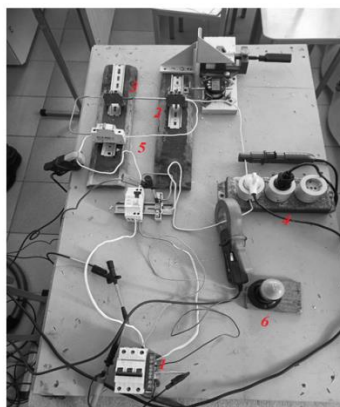


Рис. 1. Общий вид стенда для исследования дугового пробоя. 1 – вводной выключатель, 2 – медный электрод с электрододержателем, 3 – угольный электрод с электрододержателем, 4 – блок питания однофазной нагрузки, 5 – шунт генератора дуги, 6 – индикатор наличия напряжения на вводе.

В качестве измерительной аппаратуры используются осциллограф Fluke 190-20, а также прибор для анализа качества электрической энергии Circutor AR5-L. Приборы поддерживают возможность выгрузки данных на компьютер для дальнейшей обработки и анализа с помощью программы Matlab/Simulink.

2.2. Опыты с линейной нагрузкой

Для анализа величин искажений тока, вносимых дуговым пробоем, дуга моделировалась в условиях питания линейных приёмников – 2 обогревателя мощностью 800 Вт. Результатом моделирования дуги стало получение следующих графиков тока и напряжения генератора дуги. (рис. 2)

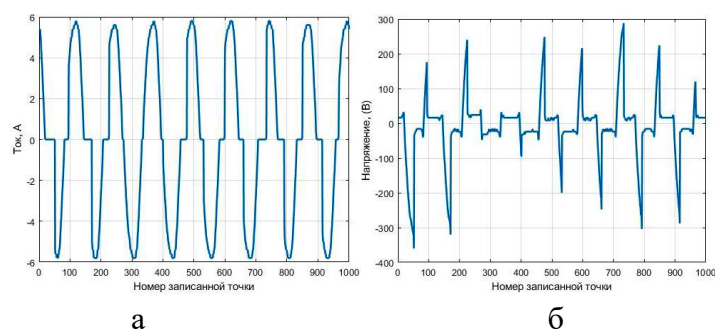


Рис. 2. Формы кривых тока (а) и напряжения (б) генератора дуги при питании линейных приёмников.

Форма кривой тока соответствует графикам, полученным исследователем [1]. В токе имеется 2 характерные черты – нулевые площадки тока и области высокой скорости нарастания величины тока. Нулевые площадки образуются из-за недостаточной величины напряжения для поддержания горения дуги. Области высокой скорости нарастания являются следствием резкого снижения сопротивления воздушного промежутка при пробое по окончании нулевой площадки тока.

Для получения картины гармонического состава тока кривая подвергалась разложению с помощью оконного преобразования Фурье. Гармонический состав (Рис. 3) показы-

вает, что дуговой ток сильно насыщен высшими гармониками, особенно велико содержание гармонических составляющих, кратных 3-м. Чётные гармонические составляющие находятся также на довольно высоких уровнях, особенно 2-ая.

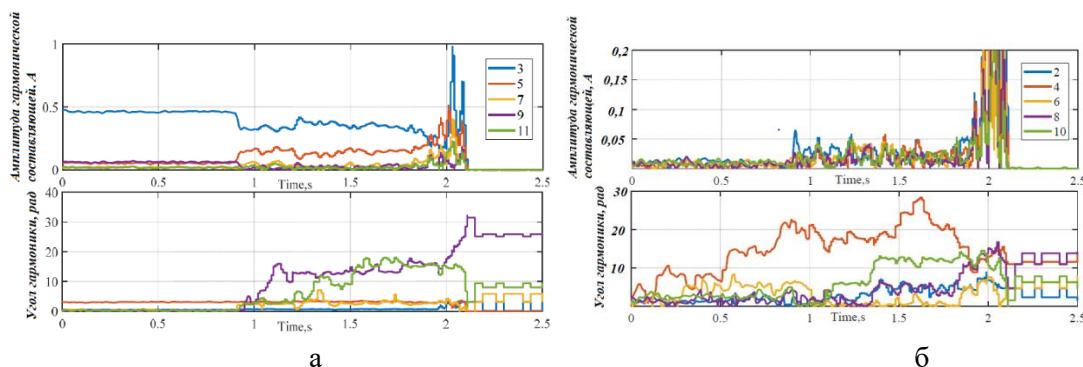


Рис. 3. Результаты анализа оконным преобразованием Фурье спектров тока дуги.

2.3. Изучение маскирующего эффекта

При идентификации последовательного дугового пробоя следует учитывать искажения, вносимые другими нелинейными приёмниками. При этом нет необходимости моделировать работу приёмников с дугой, так как искажения, вносимые электрической дугой, будут накладываться на искажения от нагрузки по принципу суперпозиции. Так, был проведён ряд экспериментов по изучению гармонического состава тока при питании различных бытовых приёмников (Рис. 4)

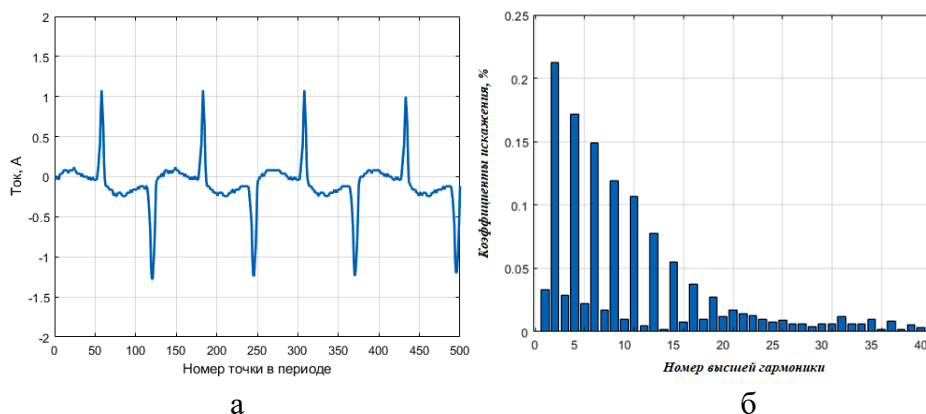


Рис. 4. Эксперимент со светодиодными светильниками. а) Форма тока б) Гармонический состав

Исследование гармонического состава тока при питании светодиодных светильников, компьютеров, индукционной плиты, пылесоса выявило высокое содержание гармоник, кратных 3-м. Поэтому идентифицировать дугу по данным составляющим довольно затруднительно. Вместе с тем, уровень чётных составляющих нелинейных приёмников довольно низок по сравнению с дуговым током. Исходя из этого, было сделано заключение, что дугу можно идентифицировать с высокой точностью по чётным составляющим

3. ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СЕТИ НН

Имитационная модель сети может быть использована для моделирования как нормальных, так и аварийных режимов работы, например металлических коротких замыканий. В [5] даётся довольно подробное описание нашей построенной модели, а также демонстрируется её работоспособность.

После разработки компьютерной модели сети НН необходимо было разработать мо-

дель дугового пробоя, дабы использовать её для более точных расчётов установившихся режимов с дугой. За основу было взято исследование [3], в котором автор довольно точно описал принципы работы своей модели. Прежде чем использовать её в собственном исследовании, необходимо было определить статические характеристики дуги, такие как постоянная напряжения, напряжение зажигания, сопротивление дуги. Все эти параметры представляется возможным определить только при построении соответствующей вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Для построения ВАХ проводился ряд экспериментальных исследований, в ходе которых было построено семейство ВАХ токов дуги при питании линейных приёмников мощностью 400, 800, 1000, 1400, 2400 и 2800 Вт (рис. 7).

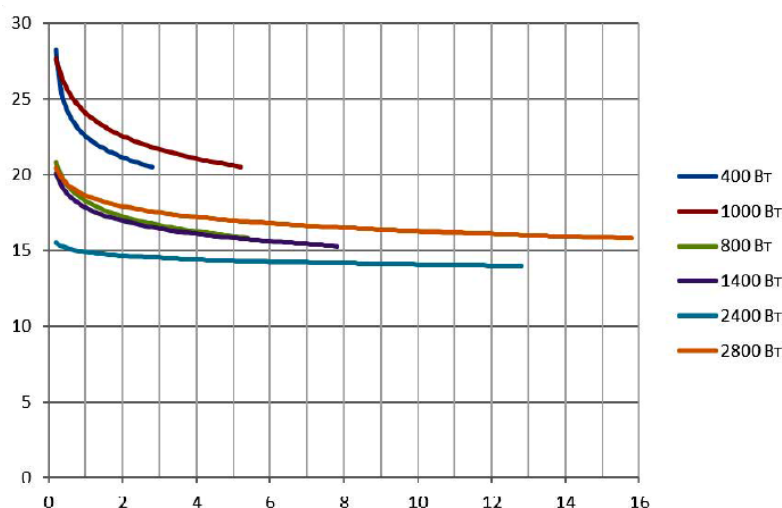


Рис. 6 Семейство вольт-амперных характеристик электрических дуг при питании линейных приёмников.

Результаты исследования показали, что ВАХ электрической дуги при питании приёмников с мощностями от 400 до 2800 Вт имеют очень схожие зависимости. Это позволяет сделать вывод о том, что в наших целях можно использовать усредненную характеристику ВАХ (1).

$$U(I) = 14,6547 + \frac{6,5819}{(I + 0,9676)^{1,670}} \quad (1)$$

Согласно данной характеристике, напряжение зажигания $U_3 = 21$ В, постоянная напряжения $U_0 = 15$ В. Статическое сопротивление дуги определить довольно сложно, поэтому для этого было решено обратиться к исследованию [4], согласно которому сопротивление дуги R_d находится в зависимости от величины протекающего тока I_d по формуле:

$$R_d = \frac{0,78}{I_d^{0,76}} \quad (2)$$

Модель дуги (рис.7) состоит из двух основных частей – силового блока и блока управления. Силовой блок включает в себя активно-индуктивное сопротивление, идеальные ключи, диоды, постоянные источники напряжения. Блок управления построен на принципе сравнения входного напряжения дуги с конкретным значением напряжения зажигания. Пока напряжение на выводах больше модуля напряжения зажигания, ключи замкнуты, а ток протекает. Если же напряжение по модулю менее напряжения зажигания, оба ключа разомкнуты, что соответствует нулевой площадке тока.

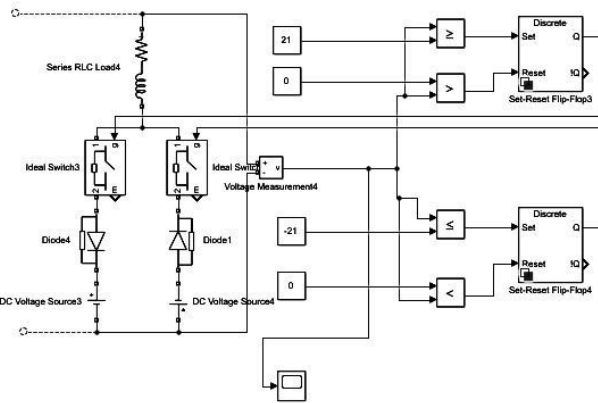


Рис. 7. Модель дугового пробоя в программе Matlab/Simulink.

4. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ С ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ РАСЧЁТА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ.

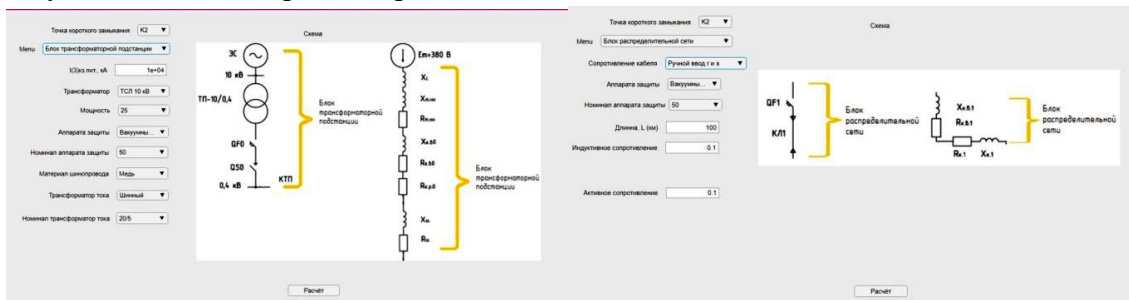
4.1 Моделирование режимов работы

Сравнение форм токов дуги, полученных при компьютерном моделировании и экспериментальным путём, показало совпадение результатов с точностью до 4 %.

Получение рабочей модели дугового замыкания обеспечило возможность проведения компьютерного моделирования в различных режимах работы электрической сети. Так, имитационная модель показала довольно высокую точность в расчёте поперечных и продольных дуговых пробоев при питании приёмников как линейных, так и нелинейных.

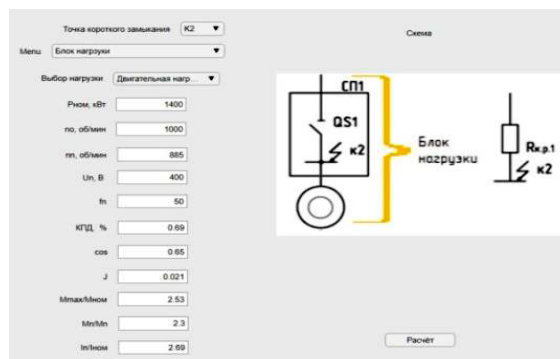
4.2 Разработка интерфейса программы

Вся структура интерфейса подразделяется на 3 блока – блок трансформаторной подстанции, блок распределительной сети, а также блок нагрузки (Рис. 8). Каждый блок обладает уникальным алгоритмом работы.



а

б



с

Рис. 8. Блоки интерфейса: а) Блок подстанции б) Блок распределительной подстанции с) Блок нагрузки

Блок трансформаторной подстанции включает в себя сопротивления различных элементов подстанции (трансформатор, шины, выключатели, измерительные трансформаторы и т. п.), а также сопротивление питающей системы. Интерфейс запрашивает пользователя о характерных параметрах подстанции для выбора её из общей библиотеки, либо предоставляет возможность самому вручную задавать параметры сопротивлений.

Блок распределительной сети включает в себя сопротивления в первую очередь проводников, отходящих от подстанции. Этот блок запрашивает пользователя о необходимых данных, а затем просчитывает по известным формулам сопротивления, например, кабельной линии. Данный блок также включает в себя сопротивления выключателей, находящихся в силовых щитах, от которых питается непосредственно нагрузка.

Блок нагрузки включает в себя несколько разновидностей нагрузочного сопротивления. Предусмотрена возможность питания линейных RLC – приёмников, асинхронной двигательной нагрузки или выпрямительной нагрузки. Пользователь задаёт необходимые каталожные параметры, а блок пересчитывает их в необходимые для работы имитационной модели Matlab/Simulink.

После задания и пересчёта необходимых параметров данные направляются в соответствующие блоки имитационной модели, после чего можно запускать симуляцию.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характеристики дугового пробоя во многом носят случайный характер. Вместе с тем, в ходе разработки удалось получить характеристики дугового пробоя на низком напряжении при питании бытовых приёмников, а затем и внедрить целый блок дугового пробоя в имитационную модель для более точного расчёта токов КЗ. Данная разработка имеет серьёзные перспективы для улучшения в области моделирования переходных процессов. Учёт переходных процессов совместно со статическим установившимся режимом станет новым этапом в повышении точности расчётов токов коротких замыканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **P. Muller, S. Tenbohlen, R. Maier and M. Anheuser**, «Artificial Low Current Arc Fault for Pattern Recognition in Low Voltage Switchgear,» *2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2009, pp. 15-21
2. **ГОСТ 28249-93** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчёта в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 1993.
3. **J. LEZAMA, P. SCHWEITZER, S. WEBER, E. TISSERAND and P. JOYEUX**, «Appliances Modeling And Simulation: A Virtual Platform Applied For Arc Fault Testing,» *2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA)*, 2018, pp. 1-5
4. **Сопротивление** низковольтной электрической дуги для расчета коротких замыканий в расширенном диапазоне токов/ Ю.П. Гусев, Е.В. Шелковой // Вестник ИГЭУ – 2018. - №6. – с. 38-47..
5. **М. Rashevskaya, A. Kulikov, M. Tibrayev and A. Gudoghnikov**, «Arc Faults in Low-Voltage Distribution Networks,» *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 2021, pp. 1-5

О.И. Игнатьев¹, В.В. Кох¹, Д.В. Мостовой², П.А. Рашитов³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИММЕТРИРУЮЩИМ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

АННОТАЦИЯ

В статье представлена структура системы управления симметрирующим вольтодобавочным устройством, описаны алгоритмы работы каждой части системы управления, проведен анализ работы предложенной структуры системы управления, приведены результаты математического моделирования, а также результаты работы системы управления на физическом макете симметрирующего вольтодобавочного устройства.

Ключевые слова: симметрирующее вольтодобавочное устройство, система управления, алгоритмы управления, качество электроэнергии, симметрирование, вольтодобавка.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из наиболее развивающихся направлений устройств силовой электроники является разработка полупроводниковых устройств, направленных на повышение качества электроэнергии в распределительных линиях электропередачи [4]. Одним из таких устройств является симметрирующее вольтодобавочное устройство (далее бустер балансировщик). Бустер балансировщик выполняет две функции: симметрирование токов линии электропередачи и стабилизацию напряжения на заданном уровне в точке подключения устройства [1-3]. Таким образом данное устройство решает две проблемы в распределительных линиях электропередачи: проблему несимметрии токов генераторов и проблему просадок напряжения у потребителей, отдаленных от центров питания. На рисунке 1 показана функциональная схема бустера балансировщика [3]. Анализируя схему бустера балансировщика, можно заметить, что устройство состоит из двух функциональных частей: симметрирующая и вольтодобавочная часть. Симметрирующая часть бустера балансировщика представляет собой схему активного фильтра [3], которая формирует токи (I_{PA}, I_{PB}, I_{PC}) так чтобы компенсировать токи обратной и нулевой последовательности токов нагрузки (I_{nA}, I_{nB}, I_{nC}). Таким образом система токов сети (I_{SA}, I_{SB}, I_{SC}) имеет только ток прямой последовательности т.е. обеспечивается симметрирование токов на входе устройства.

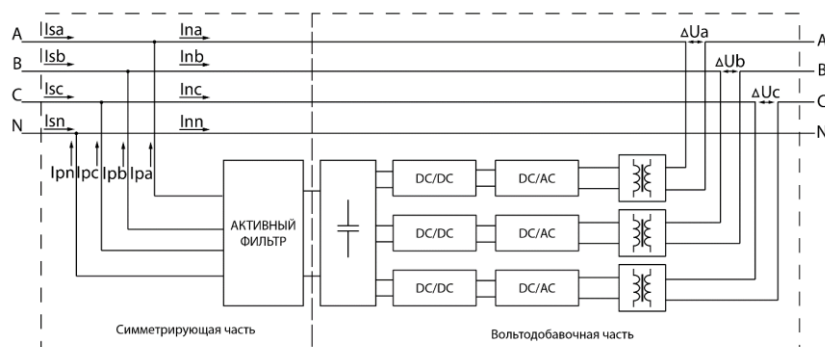


Рис. 1. Структурная схема симметрирующего вольтодобавочного устройства.

Вольтодобавочная часть бустера балансировщика, используя энергию, накопленную в конденсаторе C , формирует вольтодобавочное напряжение такой величины, чтобы выполнялось условие ($U_{вх} + \Delta U = 230V$). Таким образом вольтодобавочная часть поддерживает напряжение на заданном уровне (230V).

2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БУСТЕРА БАЛАНСИРОВЩИКА

Симметрирующее вольтодобавочное устройство, как и любое другое устройство силовой электроники, требует наличие сложной системы управления, которая может обеспечить качественную и надёжную работу устройства. Для этого система управления должна оперативно обрабатывать входные данные, рассчитывать управляющее воздействие на объект управления (в данном случае на сеть), обеспечивать рассчитанное управляющее воздействие и предотвращать/реагировать на аварийные ситуации. Современные системы управления устройствами строятся в основном на базе микропроцессорных систем. Подходы к построению систем управления различаются и зависят как от топологии устройства, так и от требуемой функциональности устройства и системы управления.

Одним из различий в подходах к построению систем управления на микропроцессорных системах является следующее: создавать систему управления на одной многофункциональной плате (микроконтроллере) с большой вычислительной мощностью или разбивать систему управления на несколько плат (микроконтроллеров) с меньшим функционалом и вычислительной мощностью - так называемая многоуровневая система управления. Каждый из этих подходов имеет как положительные, так и отрицательные моменты. Построение системы управления на одной плате предпочтительно, если устройство выполняет одну функцию и если топология его силовой части не имеет чётко выделенных, независимых или заменяемых функциональных блоков. Применение многоуровневой системы управления более рационально, если топология силовой части устройства подразумевает наличие модульности и обширный список функций и задач как самого устройства, так и системы управления.

Система управления симметрирующим вольтодобавочным устройством должна выполнять множество различных функций [1,3], таких как: мониторинг показателей качества электроэнергии, расчёт несимметричности токов сети, расчёт вставок для симметрирующей и вольтодобавочной частей, отслеживание аварийных режимов и т.д. Поэтому система управления симметрирующего вольтодобавочного устройства разделена на два уровня: система управления верхнего уровня и система управления нижнего уровня.

На рисунке 2 представлена схема предлагаемой структуры системы управления бустером балансировщиком.

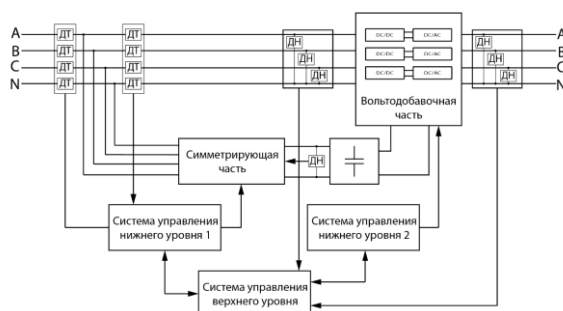


Рис. 2. Функциональная схема системы управления симметрирующим вольтодобавочным устройством.

Следует отметить, что для выбранной топологии симметрирующего вольтодобавочного устройства систем управления нижнего уровня две: одна система управления симметрирующей частью, вторая для управления вольтодобавочной частью. Таким образом, система управления симметрирующим вольтодобавочным устройством состоит из трёх основных блоков: система управления нижнего уровня симметрирующей части, система управления нижнего уровня вольтодобавочной части и система управления верхнего уровня вольтодобавочной части. Каждая из систем управления имеет свои функции и задачи. Системы управления нижнего уровня отвечают за работу своей части устройства, а система управления верхнего уровня контролирует работу устройства в целом.

3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НИЖНЕГО УРОВНЯ СИММЕТРИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ

Сама по себе система управления (СУ) симметрирующей частью является независимой от системы управления верхнего уровня, она получает уставку об уровне напряжения на стороне постоянного тока (напряжение на конденсаторе C), а системе управления верхнего уровня передаёт информацию с датчиков тока. Далее СУ симметрирующей частью работает согласно заложенным в неё алгоритмам управления.

Система управления симметрирующей частью, построенная на цифровом процессоре, позволяет оцифровывать следующие аналоговые сигналы: токи нагрузки, токи преобразователя и фазные напряжения.

Токи нагрузок фаз А, В, С преобразуются в цифровом виде с помощью преобразования Парка-Горева, которые представляют из себя прямую, обратную и нулевую последовательности. При несимметричной нагрузке в сети появляются обратная и нулевая последовательности токов сети. Для компенсации этих составляющих необходимо отфильтровать полученные данные прямой последовательности с помощью фильтра высших частот, затем сделать обратное преобразование Парка-Горева. Итогом данного преобразования является задание токов фаз А, В, С для компенсации обратной и нулевой последовательностей. Ещё одной важной особенностью преобразований Парка является то, что с их помощью можно компенсировать не только несимметричность токов, но ещё и несинусоидальность токов [5].

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НИЖНЕГО УРОВНЯ СИММЕТРИРУЮЩЕЙ ЧАСТИ

Микропроцессорная система управления нижнего уровня вольтодобавочной частью получает три уставки от системы управления верхнего уровня - величины вольтодобавки для фазы А, В и С. Данная СУ следит за уровнем напряжения на конденсаторе C и, исходя из уровня напряжения на конденсаторе и заданном уровне вольтодобавки для каждой фазы, рассчитывает параметры вольтодобавочной части. К этим параметрам относятся: напряжения на выходе каждого однофазного DC/DC и DC/AC преобразователя. Исходя из рассчитанных параметров, формируются ШИМ сигналы для каждого преобразователя.

5. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ

Система управления верхнего уровня бустера балансировщика контролирует работу устройства в целом. Данная система управления осуществляет мониторинг за

двумя показателями качества электроэнергии в четырёхпроводной распределительной линии электропередачи: коэффициентом несимметрии по току и уровнем фазных входных напряжений. Обработывая данные с датчиков токов нагрузки, система управления рассчитывает коэффициенты несимметрии по току обратной и нулевой последовательности и определяет, является ли текущий режим работы сети симметричным или нет. Если режим работы не симметричный, то система управления верхнего уровня рассчитывает уставки для симметрирующей части устройства, которые обеспечат симметричный режим работы сети. Так же эта система управления определяет отклонения фазных напряжений на входе устройства от номинального значения (230В) и рассчитывает величины вольтодобавок для вольтодобавочной части устройства такими, чтобы напряжение на выходе было равно номинальному (230В). Ещё одной функцией системы управления верхнего уровня является сбор данных о токах и напряжениях в точке подключения устройства и передача этой информации системе управления более высокого уровня, например, оператору АСУ ТП.

6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предложенная структура системы управления была реализована и опробована на физическом макете бустера балансировщика (рисунок 3 а,б). Экспериментальные исследования на макете симметрирующего вольтодобавочного устройства подтвердили работоспособность созданной системы управления рисунок 3 в,г.

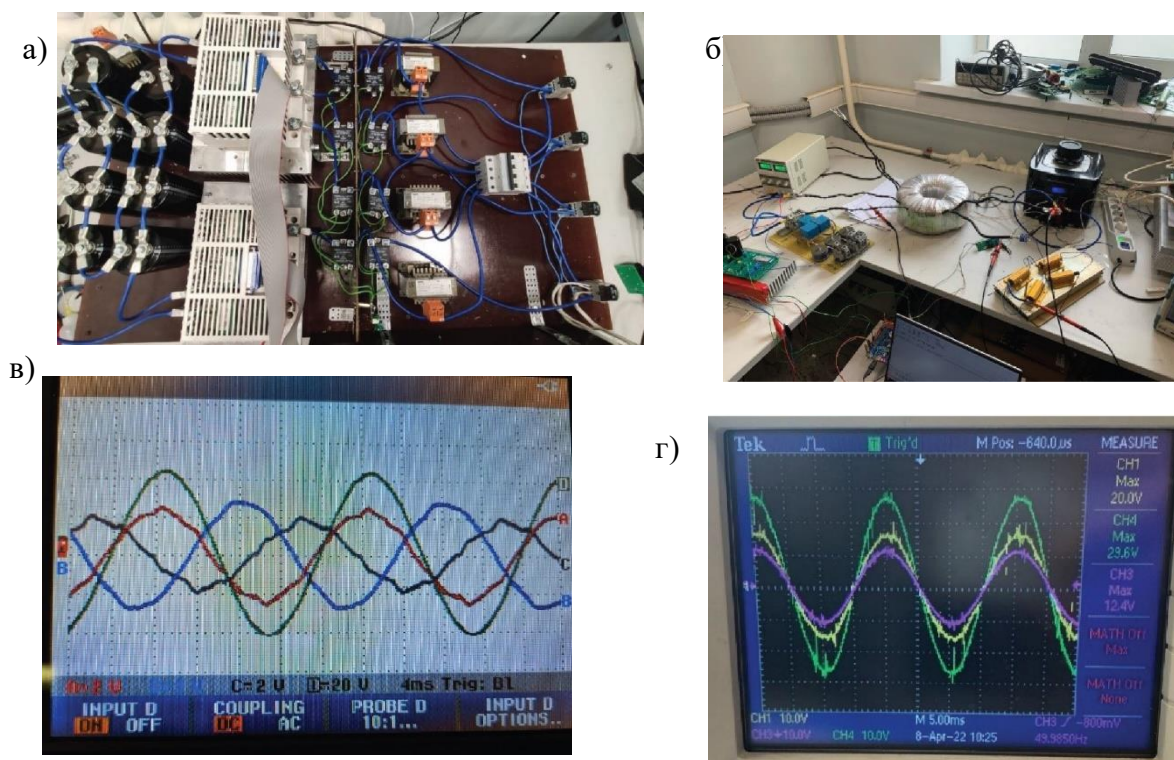


Рис. 3. Экспериментальные исследования на макете бустера балансировщика: а) симметрирующая часть б) вольтодобавочная часть в) осциллограммы токов сети при работе устройства г) осциллограммы работы вольтодобавочной части.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена структура двухуровневой системы управления симметрирующего вольтодобавочного устройства. Представлены обоснования выбора именно многоуровневой структуры системы управления. Наличие многоуровневой системы управления дополняет модульность симметрирующего вольтодобавочного устройства. Например, топология вольтодобавочной части может меняться, при этом должна поменяться и система управления вольтодобавочной частью. Но изменение в системе управления нижнего уровня вольтодобавочной части не приводит к изменениям в системе управления нижнего уровня симметрирующей части и системе управления верхнего уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Р.А. Rashitov, D.V. Mostovoy, D.A. Seregin**, "Comparative analysis of devices for improvement quality of power supply in 0.38 kV distribution networks in rural area and inner suburbs." 2020
- [2] **Viktor V. Kokh; Michail I. Petrov; Dmitry V. Mostovoy**, «Thyristors Balancing Voltage Regulator with Boost Voltage» \ 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559603
- [3] **Pavel A. Rashitov; Oleg I. Ignatyev; Maria I. Fedorova**, «Topology of a Boost Balancing Device in a Three-Phase Distribution Network» \ 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 10.1109/UralCon52005.2021.9559419
- [4] **М.Г. Асташев, Д.И. Панфилов, Д.А. Серегин, А.А. Чернышев**. Анализ режимов работы автономного последовательного регулятора потоков мощности для воздушных линий электропередачи, ФГУП Издательство «Наука» (Москва), 2017, стр. 39-52.
- [5] **Е.Е. Чаплыгин**. Инверторы напряжения и их спектральные модели: учеб. пособие, М.: Издательство МЭИ, 2003, 64с.

Секция 5

Водородная энергетика

Руководитель –
К.Т.Н. **А.С. Маленков**

*М.В. Козлова*¹, *С.И. Бутрим*¹, *М.А. Соловьев*¹, *С.А. Григорьев*², *И.В. Пушкарева*³,
*А.С. Пушкарев*³

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта, 3 – консультант

**ПРИМЕНЕНИЕ ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА,
МОДИФИЦИРОВАННОГО ГЕТЕРОАТОМАМИ АЗОТА, В КАЧЕСТВЕ
НОСИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРА ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С
ТВЕРДЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ**

АННОТАЦИЯ

В работе описываются методы синтеза восстановленного оксида графена (ВОГ) и его допирования азотом, а также наночастиц платины на поверхности данных графеноподобных материалов. Полученные наноструктурные электрокатализаторы охарактеризованы комплексом структурных и электрохимических методов и испытаны в составе мембранно-электродных блоков топливных элементов с твердым полимерным электролитом. Показано, что применение модифицированного атомами азота ВОГ в качестве носителя электрокатализатора позволило повысить характеристики топливного элемента по сравнению с его аналогами на основе носителей Vulcan XC-72 и ВОГ.

Ключевые слова – электрокатализатор, носитель электрокаталитически активных наночастиц платины, восстановленный оксид графена, топливный элемент с твердым полимерным электролитом

1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянно возрастающая потребность в энергии является важнейшим вызовом, стоящим перед человечеством. Современной энергетике удастся обеспечивать потребности населения планеты, но это происходит, главным образом, за счет сжигания ископаемых топлив, запасы которых ограничены. Цены ископаемых топлив нестабильны и подвержены сильным колебаниям, а их сжигание оказывает негативное воздействие на окружающую среду, которое может приводить к глобальному потеплению [1]. В процессе работы традиционных устройств преобразования энергии, таких как двигатели внутреннего сгорания, образуется огромное количество парниковых газов, что оказывает пагубное влияние на окружающую среду.

Водород может служить альтернативным энергоносителем, который подходит для снабжения энергией бытовых и промышленных потребителей, а также может использоваться в качестве топлива для транспортных средств [2]. Топливные элементы (ТЭ) являются одними из наиболее перспективных экологически чистых альтернативных источников энергии, поскольку имеют практически нулевой выброс углерода. Большое внимание привлекают топливные элементы с твердым полимерным электролитом (ТЭ с ТПЭ), благодаря их низким рабочим температурам, высокой удельной мощности и КПД, быстрому отклику на изменение нагрузки, низкому уровню шума и простоте конструкции [3]. Эти качества делают ТЭ с ТПЭ многообещающим кандидатом в качестве основного источника питания будущего для транспортных, стационарных и портативных систем [4].

В качестве электрокатализаторов реакции восстановления кислорода (РВК) в ТЭ с ТПЭ широко используются электрокаталитически активные наночастицы Pt, нанесенные

на поверхность углеродного носителя [5]. Различные углеродные наноматериалы, включая сажу, углеродные нанотрубки (УНТ), графен и их производные используются в качестве носителей электрокатализаторов [6]. Среди вышеописанных углеродных материалов графеноподобные материалы в последнее время привлекают большее внимание. Это связано, прежде всего, с тем, что графен имеет ряд преимуществ по сравнению с другими аллотропными модификациями углерода [7]. Например, превосходная подвижность электронов в графеноподобных материалах облегчает перенос электронов во время каталитических реакций, повышая их каталитическую активность. Также к преимуществам таких материалов можно отнести: высокую коррозионную стойкость, химическую стабильность, высокие тепло- и электропроводность и механическую прочность [8]. Графеноподобные материалы, в т.ч. модифицированные гетероатомами, могут быть получены по относительно низкой цене в больших количествах путем использования графита, оксида графита и его производных в качестве исходных материалов [9–11].

Для многих электрохимических приложений, включая ТЭ с ТПЭ, практический интерес представляют дисперсные производные графена, такие как трехмерный восстановленный оксид графена (ВОГ). Благодаря преимущественно sp^2 -гибридизированной углеродной структуре химическая и электрохимическая стабильность производных графена достаточно высока и эти материалы рассматриваются в качестве альтернативных носителей электрокаталитически активных наночастиц Pt [9]. Однако, базальная поверхность графена инертна и не имеет достаточно дефектов, которые могли бы выступать в качестве активных центров электрохимических реакций или зарождения наночастиц [7].

Модифицирование углеродных материалов гетероатомами азота оказывает существенное влияние на электрохимические свойства носителя путем перераспределения плотности заряда на соседних атомах углерода, что облегчает хемосорбцию кислорода и/или промежуточных продуктов РВК и перенос заряда, что приводит к повышенной каталитической активности РВК [5].

В данной работе были рассмотрены структурные и электрохимические свойства электрокатализаторов на основе ВОГ и ВОГ, модифицированного азотом (ВОГ-N), полученных ранее в работе [10], а также проведены их исследования в составе мембранно-электродного блока ТЭ с ТПЭ.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходный оксид графита был получен по модифицированному методу Хаммерса, который представлен в работе [11], а дальнейшее его восстановление осуществлялось термическим методом.

Модифицирование ВОГ азотом осуществлялось методом аммонолиза, описанным в работе [10].

Фазовый состав катализаторов исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре SmartLab SE (Rigaku SmartLab, Токио, Япония) с использованием $Cu\ K\alpha$ -излучения с длиной волны 0.154 нм сканированием по точкам. Данные дифракции катализаторов Pt^{40}/C , $Pt^{40}/ВОГ$, $Pt^{40}/ВОГ-N$ фиксировали для 2θ углов от 5° до 120° . Средний размер кристаллитов Pt (d) определяли с помощью уравнения Шеррера:

$$d = \frac{K * \lambda}{\beta * \cos\theta}, \quad (1)$$

где K – постоянная Шеррера (для сферических частиц 0.94); λ – длина волны рентгеновского излучения; β – ширина рефлекса на полувысоте; θ – угол дифракции.

Электрокаталитические чернила были получены путем гомогенизации 16 мг катализатора и 8 мл воды с помощью ультразвукового гомогенизатора 500 W Sonication Processor (Cole Parmer, Иллинойс, США) в течение 20 секунд с последующей обработкой в ультразвуковой ванне в течение 40 мин. Аликвота каталитических чернил объемом 5 мкл наносилилась на поверхность рабочего электрода для формирования тонкопленочного активного слоя.

Электрохимические измерения проводились в трехэлектродной ячейке с помощью потенциостата Solartron 1285 (AMETEK inc., Бервин, США), используя в качестве рабочего электрода – стеклоуглеродный электрод. Исследования проводились в деаэрированном водном растворе 0.5 М H_2SO_4 при температуре 20 °С. В качестве электрода сравнения использовали хлоросеребряный электрод сравнения Ag/AgCl/KCl (насыщ.) (ХСЭ), а в качестве вспомогательного электрода – платиновая проволока.

Для проведения испытаний каталитических слоев в составе ТЭ с ТПЭ изготавливали мембранно-электродный блок, в котором в качестве ТПЭ использовали мембрану Nafion[®] 115 (DuPont Inc., Уилмингтон, США) и Sigracet 39BB (SGL Group GmbH, Висбаден, Германия) в качестве анодного и катодного газодиффузионных слоев (ГДС). Полученные катализаторы с массовым содержанием Pt ок. 20 % использовали в качестве катода, а в качестве анода использовали Pt⁴⁰/C, содержание Pt в анодных и катодных электрокаталитических слоях составило 0.4 мг/см². Каталитические слои были сформированы на поверхности ГДС методом распыления каталитических чернил [12], содержащих 29.5 мас. % протонообменного полимера Nafion[®] (Ion Power, Наварро, США). Компоненты МЭБ сжимались в круглой титановой ячейке с рабочей площадью 1.13 см² и выдерживались 2 часа при температуре 90 °С для обеспечения прочного связывания компонентов МЭБ [13].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дифрактограммы катализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N были получены методом РФА и представлены на рис. 1. Дифракционные пики характеризуются выраженными максимумами при углах отражения, которые соответствуют значениям 38.7°, 46.3°, 66.4°, 81.9° и 85.2°, соответствующие плоскостям (111), (200), (220), (311) и (222) гранецентрированной кубической структуре кристаллитов Pt, соответственно [11]. Максимум при угле отражения 24.1° относится к грани (002) кристалла графита и свидетельствует о многослойной структуре носителя. Средний размер кристаллитов был рассчитан для пика (220), т.к. он далек от сигнала фона углеродного носителя. Средние размеры кристаллитов электрокатализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N составили 3.5, 3.9 и 3.1 нм, соответственно.

Циклические вольтамперограммы образцов, позволяющие оценить электрохимическую активную площадь (ЭАП) поверхности электрокатализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N, представлены на рис. 2. Ярко выраженные характерные пики, наблюдаемые в диапазоне потенциалов от –0.15 до 0.2 В, в некотором приближении соответствуют десорбции и адсорбции монослоя атомов водорода, а затраченный заряд – числу активных центров Pt, которые обеспечивают протекание РВК [14]. Значения электрохимически активной площади поверхности электрокатализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N состави-

ли 53.2, 46.9 и 64 м² г⁻¹, соответственно, что позволяет предположить, что образец на основе ВОГ-N является более предпочтительным для дальнейшего использования в качестве электрокатализатора РВК по сравнению с другими катализаторами. Из литературы известно, что внедрение функциональных групп азота способствует улучшению дисперсии наночастиц Pt на поверхности носителя, что в свою очередь повышает ЭАП электрокатализатора и его стабильность [11].

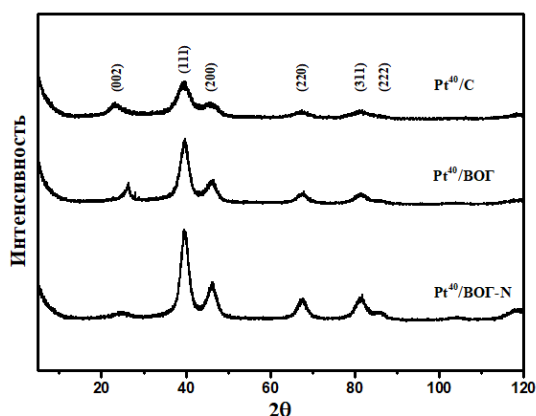


Рис. 1. Дифрактограммы электрокатализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N.

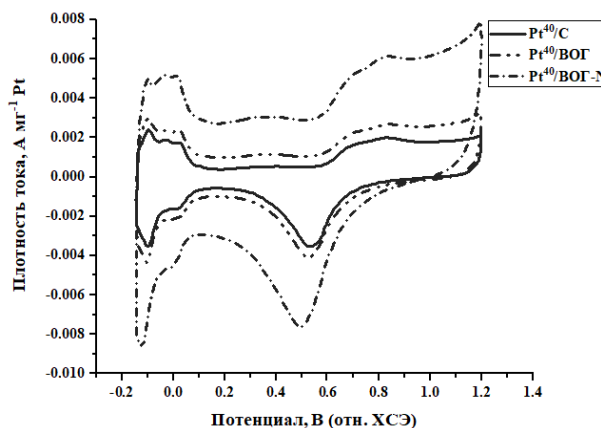


Рис. 2. Циклические вольтамперограммы электрокатализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N в насыщенном аргонном водном растворе 0.5 М Н₂SO₄ при скорости сканирования 20 мВ/с. Температура 20 °С.

Следует отметить, что электрохимические исследования в жидком электролите проводятся с использованием тонких электрокаталитических слоев, которые не вполне соответствуют активному слою в МЭБ ТЭ с ТПЭ. В частности, полученные значения площади ЭАП представляют собой максимальное значение, достигаемое при равной доступности всех активных центров в слое [9]. Поэтому электрокатализаторы Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ, Pt⁴⁰/ВОГ-N были испытаны в составе мембранно-электродного блока водородно-кислородного ТЭ в качестве катодных электрокатализаторов реакции восстановления кислорода. Вольт-амперные и ватт-амперные характеристики ТЭ с ТПЭ приведены на рис.3.

Согласно результатам, приведенным на рис. 3, напряжение ТЭ при плотности тока 0.5 А см⁻² составило 0.612, 0.621 и 0.638 В при использовании катализаторов Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/ВОГ и Pt⁴⁰/ВОГ-N, соответственно. Максимальная удельная мощность, выдаваемая электрокатализатором Pt⁴⁰/ВОГ-N составляет 0.401 Вт см⁻² при 0.5 В, что в 1.1 раз выше 0.360 Вт см⁻² при 0.489 В, полученной при использовании электрокатализатора Pt⁴⁰/C.

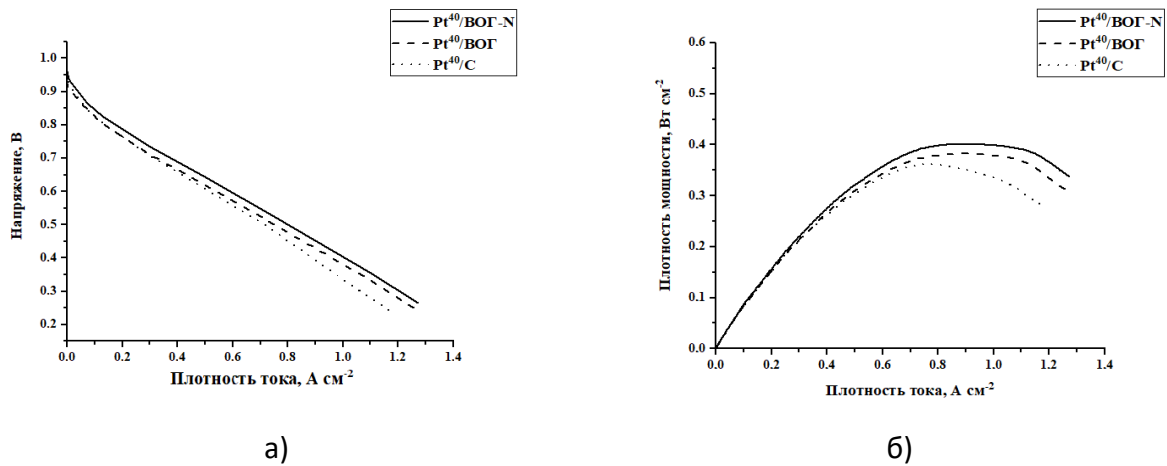


Рис. 3. Вольт-амперная (а) и ватт-амперная (б) характеристики МЭБ ТЭ с катализаторами Pt⁴⁰/C, Pt⁴⁰/VOГ и Pt⁴⁰/VOГ-N на катоде (Pt=0.4 мг см⁻², 29.5 масс. % Nafion). Анодный катализатор: Pt⁴⁰/C (Pt=0.4 мг см⁻², 29.5 масс. % Nafion). Мембрана Nafion 115. Температура 60 °С.

Применение ВОГ, допированного азотом, в качестве носителя позволило существенно улучшить характеристики ТЭ. Более высокая производительность электрокатализатора на основе ВОГ-N может быть обусловлена внедрением азотных функциональных групп в носитель. Из литературы известно, что модифицирование азотом ВОГ позволяет усилить электрон-акцепторные свойства носителя, что, в свою очередь, повышает электропроводность электрокатализатора, и, соответственно, его активность и стабильность [15].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании были получены электрокатализаторы на основе графеноподобных материалов, в том числе допированный азотом восстановленный оксид графена, и исследованы в составе мембранно-электродного блока топливного элемента с твердым полимерным электролитом. Было продемонстрировано, что допирование азотом методом аммонолиза значительно повышает электрохимическую активную площадь поверхности электрокатализатора за счет меньшему размеру наночастиц и более высокой проводимости, вызванной внедрением азота в структуру носителя. Также было выявлено, что применение модифицированного атомами азота ВОГ в качестве носителя электрокатализатора позволило повысить максимальную плотность мощности топливного элемента с твердым полимерным электролитом и улучшить его характеристики при высоких плотностях тока, по сравнению с его аналогами на основе Vulcan XC-72 и ВОГ.

Работа выполнена в рамках проекта «Модифицированные углеродные наноматериалы для электродов топливных элементов с твердым полимерным электролитом» при поддержке гранта НИУ "МЭИ" на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и IT» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Filippov S.P. and Yaroslavtsev A.B.** Hydrogen energy: development prospects and materials // Russian Chemical Reviews. 2021, V. 90, P. 627–643.

2. **Barthelemy H., Weber M. and Barbier F.** Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, V. 42, No 11, P. 7254–7262.
3. **Abdelkareem M.A., Elsaid K., Wilberforce T., Kamil M., Sayed E.T. and Olabi A.** Environmental aspects of fuel cells: A review // *Science of The Total Environment*. 2021, V. 752, P. 141803.
4. **Chandesris M., Vincent R., Guetaz L., Roch J.S., Thoby D. and Quinaud M.** Membrane degradation in PEM fuel cells: From experimental results to semi-empirical degradation laws // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, V. 42, P. 8139–8149.
5. **Antolini E.** Carbon supports for low-temperature fuel cell catalysts // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2009, V. 88, No 1–2, P. 1–24.
6. **Grigor'ev S.A., Pushkarev A.S., Kalinichenko V.N., Pushkareva I.V., Presnyakov M. \Y. and Fateev V.N.** Electrocatalytic layers based on reduced graphene oxide for fabrication of low-temperature fuel cells // *Kinetics and Catalysis*. 2015, V. 56, P. 689–693.
7. **Hossain S., Abdalla A.M., Suhaili S.B.H., Kamal I., Shaikh S.P.S., Dawood M.K. and Azad A.K.** Nanostructured graphene materials utilization in fuel cells and batteries: A review // *Journal of Energy Storage*. 2020, V. 29, P. 101386.
8. **Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S. and Geim A.K.** The electronic properties of graphene // *Reviews of modern physics*. 2009, V. 81, P. 109–162.
9. **Şanlı L.I., Bayram V., Yazar B., Ghobadi S. and Gürsel S.A.** Development of graphene supported platinum nanoparticles for polymer electrolyte membrane fuel cells: Effect of support type and impregnation–reduction methods // *Int. Journal of Hydrogen Energy*. 2016, V. 41, P. 3414–3427.
10. **Kozlova M.V., Butrim S.I., Solovyev M.A., Pushkarev A.S., Pushkareva I.V., Kalinichenko V.N., Akelkina S.V., Grigoriev S.A.** Structural and Electrochemical Characteristics of Platinum Nanoparticles Supported on Various Carbon Carriers // *C-Journal of Carbon Research*. 2022, V. 1, P. 8.14.
11. **Pushkareva I.V., Pushkarev A.S., Kalinichenko V.N., Chumakov R.G., Soloviev M.A., Liang Y., Millet P. and Grigoriev S.A.** Reduced Graphene Oxide-Supported Pt-Based Catalysts for PEM Fuel Cells with Enhanced Activity and Stability // *Catalysts*. 2021, V. 11, P. 256.
12. **Баранов И.Е., Николаев И.И., Соловьев М.А., Григорьев С.А.** Автоматизация и управление процессом формирования электрокаталитических слоев с использованием двумерного координатного распылителя // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022, Т. 23, № 5, стр. 246-255.
13. **Pushkarev A.S., Pushkareva I.V., Grigoriev S.A., Kalinichenko V.N., Presniakov M.Yu., Fateev V.N.** Electrocatalytic layers modified by reduced graphene oxide for PEM fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015, V. 40, P. 14492–14497.
14. **Pozio A., Francesco M.De., Cemmi A., Cardellini F., Giorgi L.** Comparison of high surface Pt/C catalysts by cyclic voltammetry // *Journal of Power Sources*. 2002, V. 105, P. 13–19.
15. **Erickson K., Erni R., Lee Z., Alem N., Gannett W. and Zettl A.** Determination of the Local Chemical Structure of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide // *Advanced Materials*. 2010, V. 22, P. 4467–4472.

А.А. Гаврилюк¹, С.В. Курочкин¹, В.Н.Кулешов², Н.В. Кулешов³

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта, 3 – профессор

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВОЙ ПЕНЫ

АННОТАЦИЯ

В настоящее время щелочной электролиз воды широко используется во многих отраслях промышленности. Для создания полностью отечественных щелочных электролизных батарей требуется разработка собственной элементной базы. Помимо современных газоплотных диафрагм с высокой удельной электропроводностью требуется разработать высокоэффективные электроды. В качестве основы для таких электродов в данной статье предлагается использовать никелевую пену, поверхность которой модифицируют путём электроосаждения катализаторов на основе никеля. Полученный катализатор продемонстрировал высокую каталитическую активность, значительно снизив перенапряжения выделения водорода и кислорода.

Ключевые слова – щелочной электролиз воды, катализаторы, никелевая пена

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день для устойчивого развития отечественных технологий, напрямую связанных с использованием водорода в промышленности, требуется обеспечить полный цикл производства и дальнейшего обслуживания данного типа оборудования по получению, хранению и использованию водорода на территории Российской Федерации. Среди всех методов по производству особо чистого водорода традиционно выделяют электролиз воды. Данный метод уже длительное время освоен в промышленности. К его несомненным плюсам можно отнести относительно небольшую металлоёмкость полностью готовой установки, возможность быстрого запуска и остановки без дополнительного проведения каких-либо трудоёмких технологических операций, а также достаточно высокую чистоту производимого водорода без вспомогательных многоступенчатых систем очистки [1].

Наибольшее распространение получил низкотемпературный электролиз воды. В низкотемпературной технологии производства электролизного водорода существует электролиз воды с твёрдополимерным и щелочным электролитом. В последнее время внутри щелочного электролиза начали выделять электролизёры с анионообменными мембранами. Твёрдополимерный электролит в электролизных установках получил широкое распространение наряду с началом его активного применения в топливных элементах с середины 50-ых годов прошлого столетия в странах запада. Наиболее известным представителем данного вида мембран является первторированная сульфокатионная мембрана Nafion от компании DuPont, производимая на территории США. За прошедшие более чем 70 лет отечественная промышленность так и не смогла предложить коммерчески доступный аналог своей протонпроводящей мембраны. Одной из самых успешных попыток по созданию отечественного аналога до сих пор остаётся мембрана МФ-4СК от компании Пластполимер, расположенной в Санкт-Петербурге. Однако в данный момент данный тип мембран не доступен для массового применения в промышленных установках. В связи с

этим любые попытки организации производства электролизных батарей с твёрдополимерным электролитом, полностью или частичнокупаемым за рубежом, вызовет лишь ещё большую зависимость от санкционной политики ряда недружественных стран. Помимо этого, электролиз с протонпроводящей мембраной требует использования в составе мембранно-электродных блоков в качестве катализаторов дорогостоящие металлы платиновой группы. Основой для биполярных пластин и электродов также служит титан. На все эти недостатки накладываются ограничения по работе в условиях отрицательных температур из-за возможности кристаллизации электролита с разрушением мембранно-электродных блоков [2].

Альтернативой может служить щелочной электролиз воды. Данная технология уже известна более 100 лет, и с тех пор претерпела существенные изменения. В своём развитии он прошёл от простейшей конструкции «ящичного типа» до батарей фильтрпрессного типа с биполярным включением электродов и интегрированными в них электродно-диафрагменными блоками. Длительный промежуток времени производственной площадкой полного цикла обладал Уральский завод химического машиностроения, где серийно выпускались щелочные электролизёры марок СЭУ и ФВ с объёмной производительностью по водороду до 500 нм³ в час. В роли диафрагмы выступал диафрагменный материал на основе хризотилового асбеста, что не позволяло достигнуть высоких значений по чистоте электролизных газов. Также данный материал не позволяет обеспечить безопасную и устойчивую работу электролизной батареи при перепадах давлений между анодной и катодной камерами. Данное обстоятельство привело к практически полному вытеснению электролизёров данного типа их зарубежными аналогами, которые использовали в качестве диафрагмы полимерные материалы на основе полисульфона, устойчивого к концентрированным растворам щелочей [3]. С целью решить данную проблему была разработана полностью отечественная диафрагма на основе полисульфона, где электропроводящей добавкой может служить диоксид титана или диоксид циркония, а суммарная пористость регулируется добавлением порообразователя – поливинилпирролидона [4].

Другой важной составляющей любой электролизной батареи служат электроды. Именно на их поверхности идёт электрохимическая реакция по выделению газообразного водорода и кислорода. Дополнительно, с целью снижения электрохимических перенапряжений, возникающих в процессе работы, поверхность электрода покрывают различными композициями каталитических слоёв.

К катализаторам применяют следующий ряд требований: простота технологии получения катализатора, её воспроизводимость в условиях промышленного применения; невысокая стоимость способа его нанесения на поверхность электрода; высокая устойчивость к коррозионным процессам, возникающим под действием выделяющегося чистого кислорода; высокая адгезия к электроду; низкая стоимость. К данным требованиям наиболее подходят катализаторы на основе никеля [5-6].

Среди всех существующих технологий нанесения каталитических слоёв наиболее близкой к промышленному применению уже многие столетия остаётся гальваническое покрытие. Например, в отличие от чрезмерно дорогостоящего магнетронного напыления, данный способ может быть легко масштабирован. При этом для каждой методики электроосаждения конкретного вида катализатора требуется отдельно подбирать наиболее оптимальную плотность тока, pH электролита, его температуру и микрорассеивающую

способность. Только строгий контроль за данными технологическими параметрами позволит обеспечить воспроизводимость каталитических покрытий [7].

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе всех вышеперечисленных данных в рамках исследовательского проекта была начата разработка катализаторов, нанесённых на никелевую пену. В последнее время наблюдается рост публикационной активности многочисленных научных групп, где в качестве основы для нанесения каталитических слоёв используется никелевая пена. Данный материал универсален, его поверхность обладает достаточной адгезией для осаждения катализаторов на основе никеля. При этом сама никелевая пена обладает уже широко развитой поверхностью за счёт своей высокопористой структуры волокон.

В качестве катализатора выступал никелевый порошок марки ПНК-ОТ2, осаждаемой на поверхность никелевой пены. Для этого готовили стандартную ванну Уотса, состав электролита которой состоит из 350 г/л Ni_2SO_4 ; 60 г/л NiCl_2 ; 30 г/л H_3BO_3 , а также ряда модифицирующих добавок. В данный электролит добавляли никелевый порошок в количестве 50 г/л. Гальваническая ванна постоянно термостатировалась при помощи термостата ELMITW-2, температура электролита составляла 60 °С. Электроосаждение проводили в течение 30 минут при плотности тока 100 mA/cm^2 , затем в течение 90 минут плотность тока составила 500 mA/cm^2 .

На протяжении всего процесса электроосаждения в растворе электролита постоянно проводился барботаж для равномерного нанесения порошка. На втором этапе эксперимента на поверхность никелевой пены наносился каталитический слой, состоящий из Ni-Fe. Для этого отдельно готовился раствор электролита, состоящий из 40 г/л $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$; 40 г/л NiCl_2 ; 20 г/л H_3BO_3 . Электролит нагревался также до температуры 60 °С. При плотности тока 100 mA/cm^2 на контрольные образцы никелевой пены осаждался данный тип катализатора.

Измерения электрохимической активности полученных каталитических покрытий проводилось в трёхэлектродной ячейке при помощи потенциостата Ellins P-40X. В качестве вспомогательного электрода выступал платиновый электрод, а электродом сравнения служил окисно – ртутный электрод. В трёхэлектродную ячейку заливался 6М раствор КОН, который нагревался до температуры 90 °С. Снятие поляризационных кривых проводилось в диапазоне тока от 1 до 1000 mA/cm^2 при скорости развёртки 10 mA/c .

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате серии проведённых электроосаждений удалось добиться плотного и равномерно нанесённого каталитического покрытия. Для дальнейших обсуждений будут рассматриваться 4 контрольных образца: 1 – никелевая пена; 2 – никелевая пена, покрытая никелевым порошком; 3 – никелевая пена, покрытая сплавом Ni-Fe; 4 – никелевая пена, покрытая никелевым порошком, дополнительно модифицированным сплавом Ni-Fe. На рисунке 1 представлены Тафелевские кривые исследуемых электродов. В реальных промышленных электролизёрах воды плотность тока никогда не опускают ниже значения 100 mA/cm^2 . Для удобства представления данных все дальнейшие значения по уменьшению поляризационных потерь в анодной и катодной областях будут даны относительно никелевой пены, так как она показала наименьшую каталитическую активность.

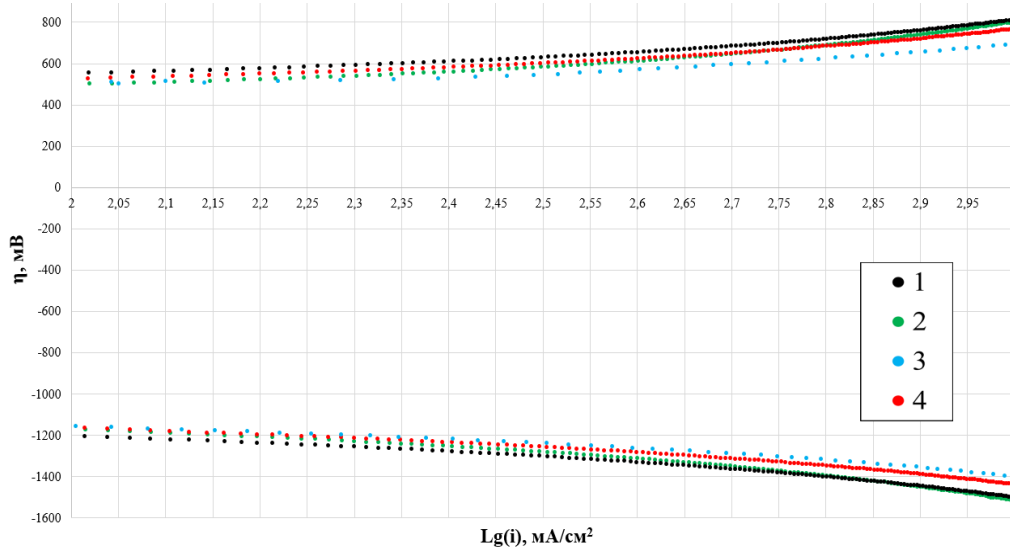


Рис. 1. Тафелевские кривые исследуемых электродов. 1 – Ni пена; 2 – Ni пена+Ni порошок; 3 – Ni пена+Ni порошок+Ni-Fe; 4 – Ni пена+Ni-Fe.

В области выделения водорода нанесение никелевого порошка позволило снизить перенапряжение примерно на 25-30 мВ в области малых плотностей тока. Но в области высоких плотностей тока данный каталитический эффект не наблюдается, что можно объяснить чрезмерно высокой загазованностью внутренней структуры волокон никелевой пены. При этом, нанесение сплава Ni-Fe на никелевую пену позволило снизить перенапряжение ещё на 50-60 мВ относительно предыдущего электрода.

Самым активным оказался электрод, где на никелевую пену сначала наносили никелевый порошок, а только затем модифицировали поверхность сплавом Ni-Fe. Данный образец позволил снизить перенапряжения до 100 мВ при высоких плотностях тока и до 50 мВ при низких плотностях. Это можно объяснить тем, что данный электрод обладает наиболее развитой и активной электрохимической поверхностью. В данном случае никелевый порошок дополнительно развивает поверхность электрода, а сплав Ni-Fe уже непосредственно осаждается на эту подложку. В результате этого данная структура имеет больший доступ к электролиту в условиях высокой загазованности.

В анодной области наибольшие значения перенапряжений также продемонстрировал электрод из никелевой пены. Электроосаждение никелевого порошка позволило снизить перенапряжения до 48 мВ при низких плотностях тока относительно никелевой пены. Но с ростом плотности тока также увеличивалась загазованность, в результате чего выигрыш по перенапряжению составил всего порядка 5-10 мВ. Электрод, покрытый сплавом Ni-Fe, во всех областях плотностей тока продемонстрировал снижение перенапряжения от 20 до 42 мВ. Наилучшие результаты имеет электрод, поверхность которого состоит из никелевого порошка, модифицированного тонким слоем Ni-Fe. Данный состав каталитического покрытия электрода продемонстрировал снижение поляризационных потерь от 50 до 122 мВ, что выгодно его отличает от всех предыдущих образцов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённая серия экспериментов по работе с электроосаждением различных каталитических покрытий на никелевую пену подтвердили перспективность использования данного материала в качестве основы для анодов и катодов современных

щелочных электролизных батарей. Данный материал обладает отличной коррозионной стойкостью в условиях промышленного щелочного электролиза воды, а его развитая структура, включая внутренний объём матрицы электрода, позволила провести электроосаждение никелевого порошка и сплава Ni-Fe, получив высокие значения каталитической активности. Приведённый график Тафельских кривых полностью подтверждает возможность использования данных электродов в электролизных ячейках, предназначенных для получения низких удельных энергозатрат при выработке электролизного водорода.

Помимо этого материал показал хорошую адгезию к исследуемым катализаторам. В результате экспресс тестов работы электродов при высоких плотностях тока отсутствовали следы осыпания катализатора. Пористая структура никелевой пены позволяет свободно отводить генерируемые электролизные газы с тыльной стороны, не создавая избыточное давление газов на диафрагму, что может говорить об уменьшении риска кроссовера газов из катодной камеры в анодную и наоборот, а механические свойства никелевой пены позволяют создавать конструкции с «нулевым зазором», обеспечивая надёжный токоподвод от биполярных пластин к электродам.

Исследования проведены в рамках Программы научных исследований «Энергетика» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», секция 5 «Водородная энергетика». Проект «Высокоэффективный электролизер с системой хранения генерируемых газов для энергоустановок на базе возобновляемых источников с водородным циклом накопления энергии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Korolev S.P., Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Larin A.P., Loban B.M., Prunov D.P., Stepanov G.M., Terentev I.P., Tumanin E.N. and Scherbakov A.N.** High Pressure Water Electrolyzer for Ungravity Space // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering Journal, 2019. № 2. P. 68–78.
2. **Hae In Lee, Muhammad Mehdi, Sang Kyung Kim, Hyun Seok Cho, Min Joong Kim, Won Chul Cho, Young Woo Rhee and Chang Hee Kim.** Advanced Zirfon-type porous separator for a high-rate alkaline electrolyser operating in a dynamic mode // J Membr Sci, 2020. № 616. P. 118541.
3. **W Ju., Heinz MVF., Pusterla L., Hofer M., Fumey B., Castiglioni R., Pagni M., Battaglia C. and Vogt UF.** Lab-Scale Alkaline Water Electrolyzer for Bridging Material Fundamentals with Realistic Operation // ACS Sustain Chem Eng, 2018. № 6. P. 173-179.
4. **Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Dovbysh S.A., Kurochkin S.V., Udris E.Y. and Slavnov Y.A.** Polysulfone-Based Polymeric Diaphragms for Electrochemical Devices with Alkaline Electrolyte // Russ J Appl Chem, 2018. № 9. P. 930–933.
5. **Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Dovbysh S.A., Udris E.Y., Grigorev S.A., Slavnov Y.A. and Korneeva L.A.** Polymeric composite diaphragms for water electrolysis with alkaline electrolyte // Russ J Appl Chem, 2016. № 89. P. 618-621.
6. **Kuleshov V.N., Kuleshov N.V. and Kurochkin S.V.** High Efficiency Electrodes for Alkaline Electrolysis of Water // Russ J Appl Chem, 2020. № 93. P. 1146–1151.
7. **Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Dovbysh S.A., Grigoriev S.A., Kurochkin S.V. and Millet P.** Development and performances of a 0.5 kW high - pressure alkaline water electrolyser // International Journal of Hydrogen Energy, 2019. № 44. P. 29441–29449.

*В.Ю. Наумов*¹, *Т.П. Карев*¹, *А.С. Маленков*²

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АММИАКА В ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются возможности повышения эффективности процесса хранения и транспортировки водорода на большие расстояния в больших объемах при использовании аммиака в качестве носителя водорода. Предложена конструкция аппарата, обеспечивающего термическое разложение (диссоциацию) аммиака с целью выделения водорода, проведен расчет его теплообменных поверхностей. Представлены результаты исследования процессов горения аммиака при его использовании в качестве топлива и разработанная конструкция аммиачной камеры сгорания.

Ключевые слова – аммиак, водород, диссоциация аммиака, горение аммиака, аммиачная камера сгорания, хранение водорода.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач для развития и широкого внедрения технологий водородной энергетики является выбор эффективных способов транспортировки и хранения водорода. Альтернативой наиболее известным способам хранения водорода (в сжатом виде, в сжиженном виде) является его химическое связывание с помощью металлгидридов, жидких органических носителей или преобразование водорода в аммиак [1]. При этом одним из наиболее перспективных носителей является аммиак вследствие высокого удельного содержания водорода (объемная плотность хранения водорода в виде аммиака превышает объемную плотность хранения водорода в сжиженном виде). Однако на данный момент не существует инфраструктуры для крупномасштабного использования аммиака как носителя водорода [2]. Представленные в публикации материалы базируются на полученных в ходе выполнения работ по проекту «Технологический комплекс для производства и хранения водорода в составе углекислотных энергетических циклов» программы научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и ИТ», «Технологии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 годах (НИУ «МЭИ») результатах.

2. АППАРАТ ДИССОЦИАЦИИ АММИАКА

2.1. Расчет химической кинетики

В качестве катализатора процесса разложения аммиака был принят Ni/Al₂O₃, который на данный момент активно применяется в реакторах для паровой конверсии метана с температурами реакции 750-1000°C. В России на основе никеля производится катализатор НИАП-03-01 для использования в трубчатых печах паровой конверсии.

На данный момент существует достаточно большой объем экспериментальных данных по определению химической кинетики реакции разложения аммиака. Скорость реакции возможно рассчитать по уравнению Темкина–Пыжева. Наиболее близкие значения давления к рассматриваемым условиям (табл. 1) имеют данные, приведенные в публикации [4], в которой делается вывод о применимости с достаточной точностью уравнения

(1) при использовании катализатора на основе никеля при температурах выше 520°C и давлениях выше 13 кПа. В расчётах энергия активации принималась равной $E_a = 46,897$ ккал/моль, а константа скорости реакции $k_0 = 3,639 \cdot 10^{10}$ моль $\text{NH}_3/(\text{ч} \cdot \text{бар} \cdot \text{г кат.})$.

$$X_{\text{NH}_3} = 1 - e^{-k \cdot \left(\frac{W}{F}\right)}, \quad (1)$$

где X_{NH_3} – степень превращения аммиака, доли; k – скорость реакции, моль $\text{NH}_3/(\text{ч} \cdot \text{г кат.})$; W – масса катализатора, грамм; F – расход аммиака, моль $\text{NH}_3/\text{ч}$.

3.2. Расчет аппарата диссоциации аммиака

В качестве прототипа конструкции диссоциатора принята печь парового риформера аммиака. Тепловой расчет печей с радиационным и конвективным теплообменом в химической промышленности осуществляется по методике Н.И. Белокопя [5]. Внешняя температура металла труб подбиралась для обеспечения необходимой тепловой мощности топки. Для определения ожидаемой степени преобразования аммиака в диссоциаторе был проведен позонный расчет реактора. Подобный подход рекомендуется в литературе при расчете реакторов вытеснения и реализован в отраслевых программных продуктах. Общая длина обогреваемой секции трубы была разделена на 10 зон. Использовалась модель реактора идеального вытеснения, иногда называемого трубчатым реактором непрерывного действия. Реактор моделировался в виде серии связанных областей, каждая из которых имеет однородный состав, движущихся в осевом направлении реактора, причем каждая область имеет состав, отличный от соседних. Ключевое допущение состоит в том, что при протекании через рассматриваемую область смесь полностью перемешивается в радиальном направлении, но не в осевом. Каждая область рассматривается как отдельный объект, т.е. фактически малый реактор непрерывного действия с перемешиванием.

Расчет был реализован в программном продукте Excel с использованием метода итеративных вычислений. Свойства рабочей среды рассчитывались с помощью базы данных CoolProp с дополнительным расчетом свойств смесей с помощью NIST REFPROP [6]. Исходные данные и граничные условия для расчета теплообмена в топке приведены в табл. 1 [7].

Таблица 1. Исходные параметры расчета топки

Параметр	Единицы измерения	Значение
Расход аммиака на входе	кг/с	16
Температура аммиака на входе	°C	500
Давление аммиака на входе	МПа	1,5
Скорость аммиака на входе	м/с	1,5
Длина обогреваемой части труб	м	12
Внешний диаметр труб	мм	125
Толщина труб	мм	12

3.2. Результаты расчета аппарата диссоциации аммиака

По результатам позонного расчета диссоциатора были получены значения параметров работы диссоциатора по сечениям (рис. 1). В действительной установке распределение тепловых потоков может отличаться от рассчитанного из-за наличия неравномерно-

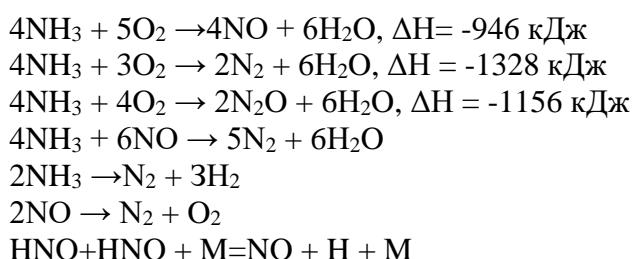
хранения и транспортировки из-за узкого предела воспламеняемости. Этот же предел обуславливает снижение характеристик горения, в частности скорости распространения пламени. Для комплексного анализа процессов горения аммиака и проектирования аммиачной камеры сгорания выполнен ряд задач:

- 1) анализ особенностей использования аммиака в качестве топлива, его характеристик, а также установок, в которых он применим как топливо;
- 2) разработка методики проектирования и проектирование камеры сгорания, использующей аммиак в качестве топлива;
- 3) моделирование процессов горения в разработанной камере с использованием программных инструментов для конечно-элементного анализа.

3.1. Особенности использования аммиака в качестве топлива

Опубликовано достаточное количество результатов исследований процессов горения аммиака, в частности уравнения изменения ламинарной скорости горения аммиачно-воздушных смесей. Проводились исследования по сравнению различных химических кинетических моделей сгорания аммиака в воздухе с целью определения наиболее подходящих механизмов расчета горения. Наибольшее влияние на обеспечение стабильного горения и параметры продуктов сгорания оказывают скорость распространения пламени и адиабатическая температура. Наилучшее совпадение с экспериментальными данными было продемонстрировано механизмом Матъе [8].

Ниже приведены (2) возможные механизмы реакции окисления аммиака и последующих продуктов:



2)

За последние годы число разрабатываемых экспериментальных установок по исследованию горения аммиака превысило 15, что говорит об актуальности данного направления [9], например, эксперимент по сжиганию аммиака в вихревой горелке описан в работе [10].

Получаемый при горении уровень температур позволяет рассматривать аммиак в качестве перспективного источника тепловой энергии для двигателей внутреннего сгорания.

3.2. Проектирование и моделирование аммиачной камеры сгорания

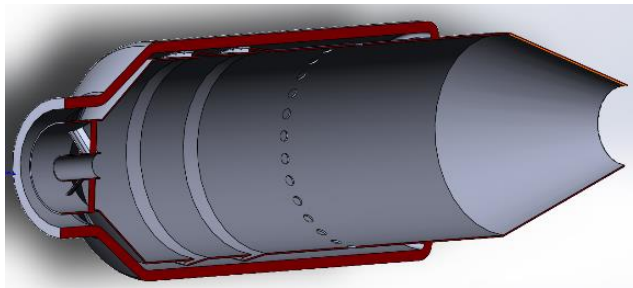
За прототип выбрана трубчатая камера сгорания, обладающая рядом эксплуатационных преимуществ, – малые размеры, удобство ремонта и осмотра во время эксплуатации, простота замены. У данной конструкции существуют также недостатки: неравномерность поля температур на выходе из камеры сгорания; сложность создания силовых элементов, соединяющих турбину и компрессор, для обеспечения жёсткости. К потенциальным потребителям разрабатываемой камеры сгорания возможно отнести судоводную технику, работающую на паротурбинных и турбинных установках на мазуте. В качестве прототипа

выбрана камера сгорания Mitsubishi Power [11] для турбинной установки серии H-25 мощностью до 40 МВт. Для снижения температуры у стенок жаровой трубы и в ядре потока к продуктам сгорания по контуру охлаждения добавлялся балластирующий компонент – вода. Исходные данные, выбранные для проектирования, представлены в табл. 2.

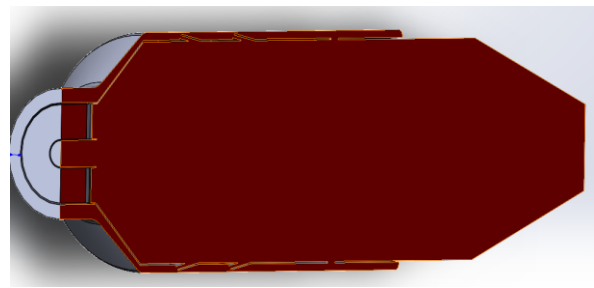
Таблица 2. Исходные данные для проектирования камеры сгорания

Параметр	Величина
Мощность ГТУ, $N_{ГТУ}$, МВт	40
Тепловая мощность камеры сгорания $Q_{КС}$, МВт	114,3
КПД ГТУ, $\eta_{ГТУ}$	0,35
Низшая теплота сгорания аммиака q_{NH_3} , кДж/кг	17401
Давление аммиака на входе в КС, $p_{NH_3}^{вх}$, МПа	3
Давление воздуха на входе в КС, $p_{воздуха}^{вх}$, МПа	3
Давление воды на входе в КС, $p_{вода}^{вх}$, МПа	3

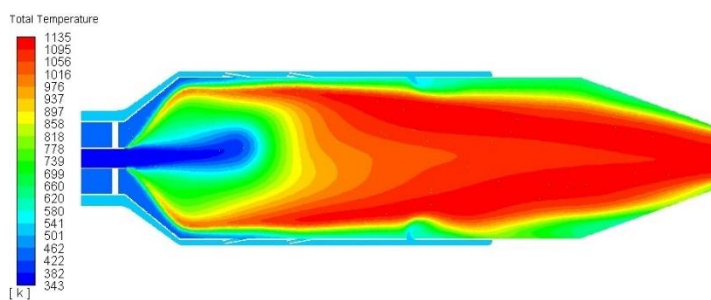
Полученные геометрические размеры для предельной степени разбавления γ , равной 0,5, позволили построить в САПР SolidWorks твердотельную модель камеры сгорания и модель (рис. 3а и 3б). Результаты моделирования процессов горения и тепломассообмена в камере сгорания приведены на рис. 3в и 3г.



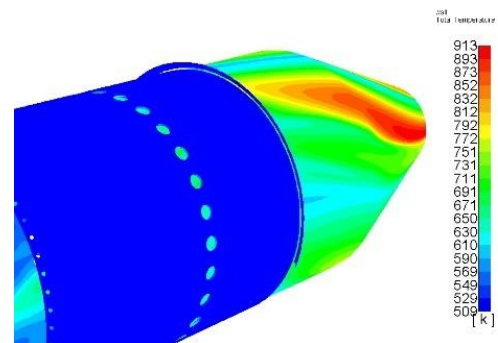
а) модель корпуса



б) модель потоков



в) в поперечном сечении



г) по внутренней стенке газосборника

Рис. 3. Модель камеры сгорания (а, б) и распределение температур (в, г)

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проектирования и расчета диссоциатора аммиака получены распределения: температуры рабочей среды, подведенной теплоты и молярных концентраций в смеси по длине обогреваемой части трубы аппарата. Максимальная степень преобразова-

ния аммиака составила 96,4% при длине обогреваемой части трубы 12 м и скорости аммиака на входе 1,5 м/с.

По результатам проектирования и расчета аммиачной камеры сгорания максимальная температура в зоне активного горения составила 1135 К при степени разбавления γ водяным паром в зоне активного горения. Наиболее теплонапряженной оказалась стенка газосборника, так как там отсутствует отвод теплоты охладителем от наружной поверхности стенки жаровой трубы. Максимальная температура стенки неохлаждаемой части газосборника составила 913 К, что является допустимой температурой для работы деталей традиционных камер сгорания ГТУ. Спроектированная камера сгорания удовлетворяет требованиям, предъявляемым к камерам сгорания традиционных ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rivard E., Trudeau M., Zaghbi K.** Hydrogen Storage for Mobility: A Review: 12 // *Materials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019. Vol. 12, № 12. P. 1973.
2. **Giddey S.** et al. Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2017. Vol. 5, № 11. P. 10231–10239.
3. **Obradović A., Likožar B., Levec J.** Steam Methane Reforming over Ni-based Pellet-type and Pt/Ni/Al₂O₃ Structured Plate-type Catalyst: Intrinsic Kinetics Study. *American Chemical Society*, 2013.
4. **Chellappa A.S., Fischer C.M., Thomson W.J.** Ammonia decomposition kinetics over Ni-Pt/Al₂O₃ for PEM fuel cell applications // *Applied Catalysis A: General*. 2002. Vol. 227, № 1–2. P. 231–240.
5. **Справочник азотчика** (в 2-х томах) Автор: Мельников Е.Я. (ред.) Издательство: М.: Химия Год: 1986 - 1987 - 2-е изд., перераб. 512 с.
6. **Bell I.H.** et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. Vol. 53, № 6. P. 2498–2508.
7. **Tran A.** et al. Temperature balancing in steam methane reforming furnace via an integrated CFD/data-based optimization approach // *Computers & Chemical Engineering*. 2017. Vol. 104. P. 185–200.
8. **Mathieu O., Petersen E.L.** Experimental and modeling study on the high-temperature oxidation of Ammonia and related NO_x chemistry // *Combustion and Flame*. 2015. Vol. 162, № 3. P. 554–570.
9. **Berwal P., Kumar S., Khandelwal B.** A comprehensive review on synthesis, chemical kinetics, and practical application of ammonia as future fuel for combustion // *Journal of the Energy Institute*. 2021. Vol. 99. P. 273–298.
10. **Ilbas M., Kekul O., Karyeyen S.** Investigation into Thermal-Fluid interaction of ammonia turbulent swirling flames under various Non-Premixed burner conditions // *Fuel*. 2022. Vol. 312. P. 122967.
11. **Mitsubishi Power | H-25 Series** [Electronic resource]. URL: <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/h25> (accessed: 04.05.2022).

С.А. Дронов¹, В.Э. Панарин¹, Д.В. Сёмин¹, А.В. Федюхин²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГАЗОРЕГУЛЯТОРНЫХ ПУНКТОВ НА БАЗЕ РОТОРНОГО ДЕТАНДЕР- ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Основной целью работы является изучение возможности полезного использования перепада давлений транспортируемого природного газа в газораспределительных системах при помощи детандер-генераторного агрегата малой мощности для покрытия собственных нужд ГРП. Главная цель работы разделена на подзадачи, решением которых является выбор технологической схемы включения ДГА в ГРП, а также выбор конструктивного исполнения ДГА. Проведена наладка отдельных узлов системы автоматизации на экспериментальном стенде при работе ДГА на воздухе. Разработано руководство по эксплуатации и технические условия на ДГА. Выполнено моделирование технологической схемы установки с ДГА в программном комплексе Aspen One и Ansys.

Ключевые слова – роторный детандер-генераторный агрегат, роторные расширительные установки, автономный источник энергии, блок газорегулирования, расширительные машины, детандер, энергоэффективность.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вследствие повышения спроса на различные энергоресурсы большое внимание к себе привлекает проблема рационального использования энергии [1,2], что в свою очередь влечет за собой и проблемы, связанные с энергосбережением в различных сферах энергетической деятельности, в том числе и в системах газотранспорта и газораспределения [3-5], а также использования нетрадиционных источников энергии. Говоря о программах энергосбережения, следует отметить, что одной из ключевых мер по энергосбережению является рациональное использование вторичных энергоресурсов (ВЭР) [6-9].

По данным Министерства энергетики Российской Федерации по состоянию на 01.01.2020, добычу природного и попутного нефтяного газа на территории страны осуществляет 251 добывающее предприятие, в том числе:

- 80 входящих в состав вертикально-интегрированных нефтяных холдингов (ВИНК);
- 15 дочерних компаний в составе Газпром;
- 9 структурных подразделений НОВАТЭК;
- 144 независимых нефтегазодобывающих компании;
- 3 предприятия, работающие на условиях соглашений о разделе продукции (операторы СРП).

В 2019 году суммарная добыча природного и попутного нефтяного газа в Российской Федерации увеличилась на 1,7% (+12,4 млрд м³ к 2018) и достигла рекордного за последние 19 лет уровня – 737,8 млрд м³.

Для транспорта «голубого топлива» тому или иному потребителю существуют газораспределительные станции (ГРС), газораспределительные пункты (ГРП), компрессорные станции (КС) и т.д., которые в совокупности образуют единую газотранспортную систему (ГТС).

Одним из решений задачи энергосбережения в системах газоснабжения является использование детандер-генераторного агрегата (ДГА), устанавливаемого вместо дросселирующих устройств на ГРП или ГРС, в этом случае детандер будет являться генератором так называемой бестопливной электроэнергии, получаемой в электрогенераторе [10-11]. Детандер-генераторные агрегаты, являющиеся утилизаторами избыточной энергии транспортируемого природного газа на ГРС или ГРП, также могут применяться и в роли газового двигателя. Эксплуатация ДГА возможна не только в схемах ГРС или ГРП, а также и на компрессорных станциях. К явному положительному аспекту применения данного способа редуцирования природного газа можно отнести то, что газ после прохождения через детандер, в котором он используется лишь в качестве рабочего тела, поступает далее по газопроводам к потребителю, он не сжигается, следовательно, наблюдается полное отсутствие вредных выбросов в окружающую среду [12-17].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Создание трехмерной модели продукта проекта

Адаптированная 3D-модель должна отвечать следующему ряду требований:

- включает в себя только проточную часть (например, для стакана это область внутри стакана без его стенок и дна);
- отсутствие интерференции;
- отсутствие зазоров.

На данном этапе на основе полученной адаптированной 3d-модели необходимо построить сеточную модель, которая будет состоять из множества элементов, заполняющих область течения рабочего тела.

Как видно из рисунка 1, размер элементов может отличаться. Это связано с тем, что в областях, где ожидается значительное изменения параметров рабочего тела за малый промежуток времени, сетка мельче, для большей точности расчета.

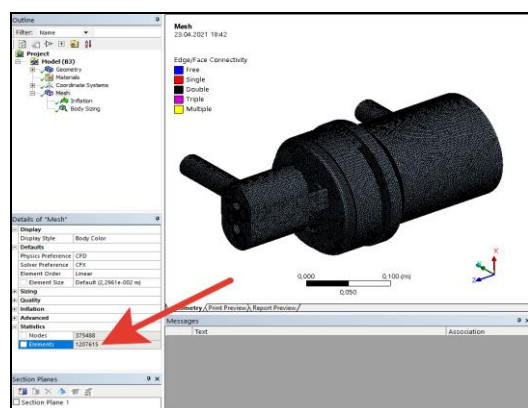


Рис. 1. Сеточная модель Ansys

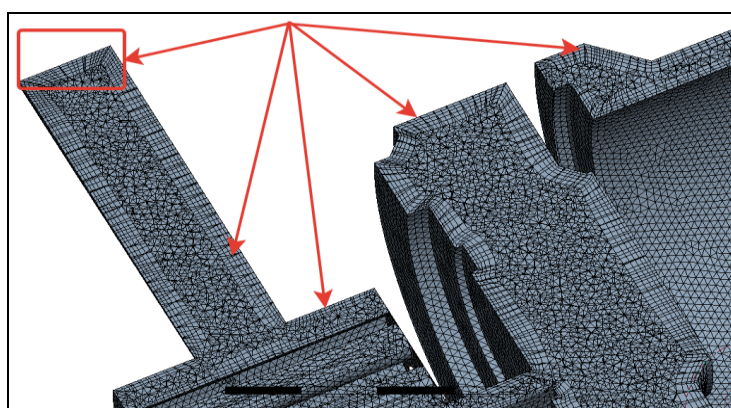


Рис. 2. Пристеночный слой со структурированной сеткой

На рисунке 2 отчетливо видны ячейки сетки, расположенные вдоль стенок.

Так как для построения исследуемой модели в качестве рабочего тела был выбран метан, из набора термодинамических пакетов выбирается пакет *Peng-Robinson*. Данный термодинамический пакет - один из рекомендуемых для расчета углеводородов.

Модель для статического режима имеет аналогичный вид, отличие лишь в отсутствии окна управления регулирующим клапаном.

2.3. Изготовление опытного образца роторного ДГА мощностью 1 кВт для автономного электроснабжения газорегуляторных пунктов

Опытный образец ДГА (рис.4) должен обеспечивать выработку электрической энергии и обладать следующими основными техническими характеристиками:

- Номинальная электрическая мощность - 1 кВт;
- Номинальное напряжение - 28 В (постоянного тока);
- Номинальное напряжение на выходе автономного инвертора напряжения - 230 В
- Номинальное давления природного газа (воздуха) на входе в детандер - 0,3...0,6 МПа;
- Расход газа через детандер при номинальной нагрузке - 80-120 куб. м/ч
- Частота вращения роторов детандера при номинальной электрической нагрузке – 5000 об/мин.

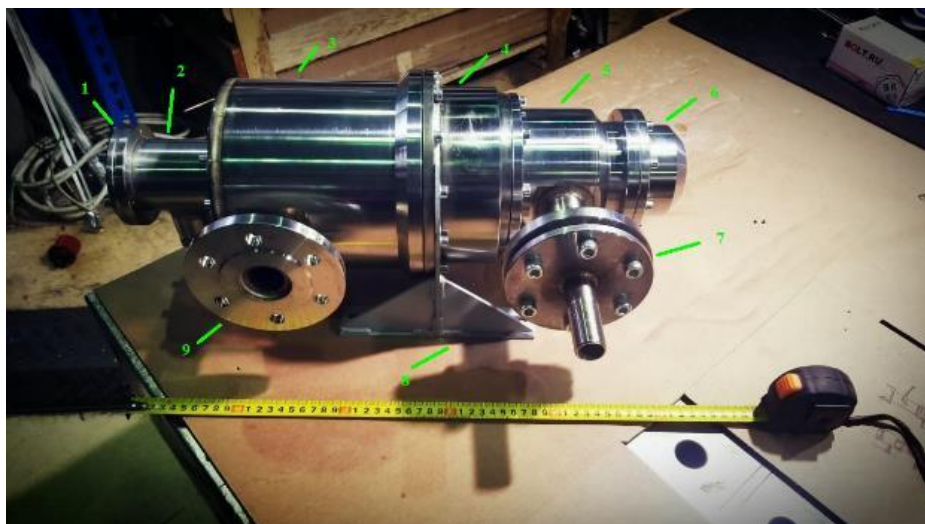


Рис. 4. Внешний вид опытного образца роторного ДГА в сборе. 1 – крышка электрической распределительной коробки; 2 – электрическая распределительная коробка; 3 – корпус генератора; 4 - переходной корпус (корпус муфты привода); 5 – корпус детандера; 6 – крышка полости шестерен синхронизатора вращения роторов; 7 – впускной патрубок; 8 – кронштейн крепления ДГА; 9 – выпускной патрубок.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

3.1. Моделирование в ANSYS

В работе показан процесс CFD-расчёта течения газа внутри камеры расширения газового детандера и после неё, определены изменения параметров газа в различных областях по мере его движения от входа к выходу.

Пошагово представлены этапы формирования задачи. Даны ключевые пояснения шагов от создания геометрической модели и сетки КЭ до организации расчёта. В результате получены поля распределения скорости, температуры и давления по моделируемой обла-

сти.

3.2. Моделирование в Aspen HYSYS

Используя созданную модель, можно увидеть, как будет меняться соотношение долей газового потока, разделенного в Mix2, в зависимости от требуемого количества электроэнергии, вырабатываемой в ДГА. Получена зависимость между мощностью N , генерируемой в ДГА, и долей основного потока, подаваемого по линии в ДГА, созданная с использованием инструмента, встроенного в HYSYS.

3.3. Тестирование прототипа роторного ДГА

Прототип ДГА был протестирован на работоспособность с использованием сжатого воздуха, в качестве электрической нагрузки использовались галогенные лампы накаливания мощностью 1 кВт. Во время испытания прототип ДГА стабильно работал в течение 60 минут, разница давлений между входом и выходом ДГА составляла $1 \div 3$ кгс/см², расход воздуха через ДГА находился в диапазоне 100-120 м³/ч. Электрическая мощность, вырабатываемая генератором, составляла 1000 Вт при частоте вращения ротора генератора 5000 мин⁻¹, напряжении на клеммах генератора 28,0 В и токе потребления электрической нагрузки 36,0 А.

В результате теста было установлено, что

- Прототип ДГА полностью работоспособен, обеспечивает заявленные технические характеристики и соответствует требованиям конструкторской документации и технических условий.
- Прототип ДГА может быть одобрен для стендовых испытаний на работоспособность на природном газе.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный прототип представляет собой автономный источник электропитания на базе роторного детандер-генераторного агрегата. Изделие планируется использовать в качестве автономного или резервного источника энергии, интегрированного в систему электроснабжения технологических объектов газораспределительных организаций ПАО "Газпром", ОАО "Мособлгаз", ОАО "Мосгаз", а также независимых газораспределительных компаний. Основные конкурентные преимущества разработанного агрегата основаны на его технико-экономических характеристиках:

- Нет никаких затрат на выработку электроэнергии по сравнению с другими автономными системами электроснабжения. Свободная энергия от уменьшения расхода газа используется для выработки электроэнергии;
- Работоспособность при низком потреблении газа через ДГА обеспечивает круглогодичное бесперебойное электроснабжение;
- Компактная конструкция позволяет интегрировать источник питания как в подавляющее большинство существующих ГРП, так и в ГРП нового поколения на стадии проектирования;
- Прототип имеет значительно более низкую стоимость по сравнению с агрегатами турбинного типа аналогичной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Оцисик М.Н.** Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976. 661 с.

2. **Современная флексографическая печать**/Ф.С. Савицкий, В.М. Тремут, С.Б. Михайлов, В.Б. Мартынов. М.: Радуга, 1982. 391 с.
3. **Теплообмен** и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю.И. Давыдов, Б.В., Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др.; под ред. В.М. Иевлева. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
4. **Суржиков С.Т.** Перенос излучением в неоднородных слоях // ТВТ. 1997. Т. 35. № 3. С. 35–38.
5. **Пластинин Ю.А.** Влияние вращательной структуры молекулярных полос // Динамика излучающего газа: Тр. 4-й Всес. конф. М.: МГУ, 1981. Т. 2. С. 36.
6. **Белоусов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И.** Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Под ред. Н.И. Белоусова. — 5-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. **Экспериментальное** исследование теплопроводности He-3 / В.В. Царев, К.К. Иванов, А.А. Сидоров, Б.Б. Петров // Научн.тр. МГТУ. М.: Изд-во МГТУ. 1995. № 73. С. 185–190.
8. **Vidal F., Veitra J.A. and Maza J.** Deconstruction and the limits of sense // Essays in criticism. Oxford, 1991. No 3. P. 281–292.
9. **Белинский А.** Инфраструктура газопроводов и экономический рост российских регионов: панельный анализ коинтеграции, 2019, E3S Web of Conferences 102,02002
10. **Буранов М.Д., Муколянец А.А., Сотникова И.В.** Выработка электрической энергии на газопроводах с использованием технологического перепада давления транспортируемого природного газа, 2019, Веб-конференция E3S, 139 01089
11. **С.А. Дронов, А.В. Федюхин, В.Э. Панарин, А.С. Черных, Ю.В. Яворовский, В.Г. Хромченков и А.В. Мартынов** Моделирование автономного источника питания для газораспределительной станции с использованием ASPEN HYSYS // Третья конференция "Проблемы теплофизики и энергетики" 1683 (2020) 052037.
12. **Ишков А.Г., Пыстина Н.Б., Хворов Г.А., Юмашев М.В.** Стратегия формирования методов управления энергосбережением // Газовая промышленность-2013. - № 8. - С. 88 - 92.
13. **Артемович М.А., Давронович Б.М., Владимировна С.И., Муминовна.** Анализ влияния входных параметров на эффективность работы блока генератора детандера в системе газовой сети Республики Узбекистан. 2020, Веб-конференция E3S, 216 01130.
14. **Строгонов К.В., Здравов А.А.** Энергосбережение высокотемпературных процессов путем интенсивной дегазации расплава. Журнал физики: Серия конференций, 2020, 1683(5), 052029.
15. **Даниэли П.; Карраро Г.; Лаззаретто А.** Термодинамическая и экономическая целесообразность рекуперации энергии со станций снижения давления в сетях распределения природного газа. Энергии 2020, 13, 4453.
16. **В. Карасевич, В. Ли, Р. Кашлаев, А. Федюхин** Автономное энергоснабжение распределенных / изолированных деревень в России с использованием комбинации СПГ / КППГ / сжиженного газа / дизельного топлива и возобновляемых источников энергии. Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия, Том 643 (2019) 012047.
17. **Фокин Г.А.** Методика создания автономных турбинных источников электрической энергии с использованием энергии сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы России: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Науки. – Санкт-Петербург, 2015. - 456 с.

Секция 6

Электроника, радиотехника и IT

Руководитель –
к.т.н. **А.А. Кальщиков**

Д.В. Софурев¹, Ш.Ш Усманова², Н.М. Скорнякова³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО МЕТОДА

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена разработке алгоритма автоматизированной обработки изображения лазерного интерференционного метода. Приведено подробное описание принципа работы алгоритма, а также представлены результаты апробации алгоритма на экспериментальных изображениях, полученных лазерным интерференционным методом при диагностике газожидкостного потока, сформированного с помощью аквариумного аэратора в кювете с водой.

Ключевые слова - лазерный интерференционный метод, автоматизированная обработка изображения, фильтрация изображения

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухфазные пузырьковые и газокапельные потоки встречаются в различных технических устройствах, среди которых форсунки топлива, паровые системы, гидродинамические системы и другие. Для оптимизации работы этих систем необходимо обладать информацией о структуре используемого двухфазного потока, в частности, векторным полем скоростей и размерами частиц. Работа посвящена продолжению разработки оптико-электронного комплекса диагностики двухфазных потоков, построенного на методах анемометрии по изображению частиц (АИЧ), в англоязычной литературе Particle Image Velocimetry (PIV) и лазерном интерференционном методе (ЛИМ), в англоязычной литературе Interferometric Particle Imaging (IPI). Такой комплекс позволяет получать одновременно информацию как о векторном поле скоростей газожидкостного потока форсунки, так и о распределении капель по размерам. Цель работы – разработка модулей автоматической обработки изображений лазерного интерференционного метода.

2. МОДУЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАМЕРА КАПЕЛЬ ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА

2.1. Лазерный интерференционный метод

Принцип работы лазерного интерференционного метода заключается в регистрации камерой изображения исследуемого объекта в расфокусированном излучении [1]. При этом оптически прозрачная шарообразная неоднородность на полученных снимках будет иметь вид окружностей с интерференционной картиной (ИК) внутри. Образование такого распределения строго решается теорией Ми, но в случае крупных частиц результат можно получить в рамках геометрической оптики, рассматривая интерференцию отраженного и первого преломленного лучей (рис. 1).

Диаметр пузырька определяется по формуле (1) [1]:

$$d = \frac{2 \lambda N}{n \alpha} \cdot \left(\cos \left(\frac{\theta}{2} \right) - \sin \left(\frac{\theta}{2} \right) / \sqrt{n^2 - 2 n \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) + 1} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $n = n_1/n_2$ – относительный показатель преломления, n_1 – показатель среды, n_2 – показатель преломления пузырька, λ – длина волны излучения, α – угол обзора камеры, θ – угол рассеяния, N – число интерференционных полос.

Установка для применения ЛИМ состоит из пяти элементов, среди них: лазер, оптическая система, формирующая лазерную плоскость, исследуемый образец с неоднородностями в виде пузырьков газа или капель жидкости, камера, а также электронно-вычислительное устройство (рис. 1.)

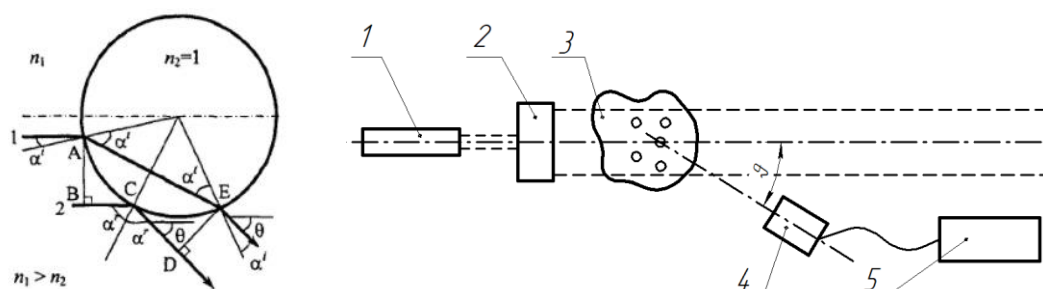


Рис. 1. Ход лучей в пузырьке воздуха и схема установки ЛИМ: 1 – лазер, 2 – оптическая система, образующая лазерную плоскость, 3 – исследуемый образец, 4 – камера, 5 – электронно-вычислительное устройство [1].

2.2. Элементы модуля

Модуль оптико-электронного комплекса, предназначенный для измерения распределения капель по размерам, включает в себя приемную оптическую систему, систему формирования оптической плоскости и источник лазерного излучения.

В качестве приемного устройства была выбрана высокоскоростная камера Fastec Imaging HiSpec 2G Mono. Камера имеет КМОП матрицу с размером активной зоны 22,9 мм по диагонали и способна регистрировать до 506 кадров в секунду при максимальном разрешении (1280x1024). Также камера имеет светочувствительность 3200 ISO для монохромной версии и минимальную экспозицию кадра 2 мкс.

В качестве источника излучения был использован лазерный модуль компании MZLASER с длиной волны 450 нм и мощностью 50 мВт.

Для проверки работоспособности разработанного модуля были проведены соответствующие исследования на тестовом объекте, представляющим собой стеклянную пластину с неоднородностями в виде пузырьков воздуха. Измерения проводились при угле 55° . В ходе обработки десяти экспериментальных интерференционных картин были определены диаметр пузырька и относительная погрешность, которые составили: $d_{IP1} = 0,807$ мм, $\delta d = 0,154$. Также диаметр выбранного для исследования пузырька воздуха был измерен на оптическом компараторе ИЗА-2 с точностью 10 мкм и составил 0,954 мм.

3. ПРОГРАММА ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН

3.1. Программное обеспечение

Программное обеспечение реализовано на языке программирования Python 3. Данный язык выбран благодаря простоте синтаксиса и большому количеству открытых в об- щий доступ библиотек.

Для основных манипуляций с изображением используется библиотека компьютерного зрения OpenCV [2]. Так как изображение представляется в виде массива, для некоторых обработок удобно использовать библиотеку NumPy [3]. Библиотека Matplotlib используется для сравнения промежуточных результатов в виде изображений и построении графиков при статистической обработке данных.

3.2. Сегментация

Разрабатываемое программное обеспечение должно быть способно обрабатывать экспериментальные изображения, снятые по потоку частиц, в таком случае на изображении будет несколько окружностей с ИК, каждая из которых соответствует определенной неоднородности. Для определения диаметров каждой из них необходимо рассматривать каждую ИК отдельно, для этого производится сегментация. Для реализации данной задачи предлагается использовать преобразование Хафа для поиска окружностей. Для более корректной работы метода используется предварительная обработка картины, которая состоит из:

- 1) вычитание темнового кадра, что позволяет убрать шумы матрицы;
- 2) обрезание части картины, не имеющей полезных сигналов, подобная процедура позволяет сократить время работы программы, за счет обработки изображений меньших размеров;
- 3) пороговая обработка картины, позволяет устранить некоторые шумы, оставшиеся после вычитания темнового кадра, при этом не ухудшит полезный сигнал, так как предполагается, что яркости последнего гораздо больше, чем выбранный порог;
- 4) использование пространственных фильтров низких частот, в частности можно использовать как фильтры среднего значения, так и гауссов или медианный фильтр.

После такой обработки получается размытое изображение с очертаниями окружностей. Применив поиск окружностей с помощью преобразования Хафа, возможно получить координаты и размеры окружностей с ИК. Используя эти данные необходимо разбить целое изображение на малые, содержащие только одну ИК, с целью временной оптимизации программы за счет меньшего количества обрабатываемых данных, а также изолированной обработке каждой из картин.

На рис. 3 приведен результат работы описанного в данном пункте алгоритма, примененного к экспериментальному изображению пузырьков воздуха в воде, полученному по методике ЛИМ.

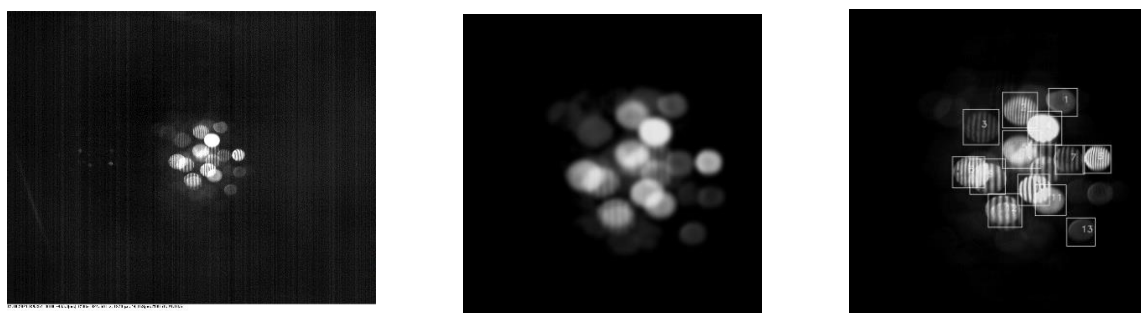


Рис. 3. Пример результата работы части программы, описанной в пункте 3.2

3.3. Фильтрация и поворот ИК

Полезный сигнал от каждой частицы имеет чередующийся характер и занимает большую часть изображения. Таким образом фильтрацию ИК возможно выполнить с помощью частотной фильтрации. Эту задачу удобно реализовать с помощью библиотеки NumPy, в частности с помощью функции двумерного Фурье преобразования. В результате применения данной функции получается Фурье образ изображения, на котором имеются максимумы, соответствующие пространственным частотам распределения яркости в ИК. Выполнив обратное Фурье преобразование, предварительно выделив с помощью маски небольшие окрестности около центрального максимума и двух максимумов, соответствующих частотам ИК, возможно получить картину без высокочастотных шумов и различных низкочастотных участков, которые не несут полезной информации.

В общем случае ИК могут быть повернуты относительно вертикальной оси, поэтому для верного подсчета количества полос, необходимо предварительно осуществить поворот ИК. Использование именно двумерного Фурье преобразования позволяет по положениям максимумов определить угол поворота картины относительно вертикальной оси. Для ИК с вертикальными полосами в смещенном на центр Фурье образе, оба нецентральных максимума находятся на горизонтальной линии, проходящей через центральный максимум. При повороте ИК, поворачивается и спектр, вследствие чего максимумы поворачиваются вокруг центрального на такой же угол, на который повернуты полосы относительно вертикали. Поворот изображения на вычисленный угол осуществляется с помощью аффинных преобразований.

Пример работы алгоритма с промежуточными результатами представлен на рис. 4.

3.4. Поиск количества полос

Определение количества полос предлагается реализовывать подсчетом локальных максимумов вдоль линии, проходящей перпендикулярно интерференционным полосам. Этот способ имеет преимущества по сравнению с подсчетом переходов через среднее значение, так как на него не влияют локальные повышения яркости. Однако для уменьшения ошибок необходимо задавать пороговое значение максимума полосы и минимальное расстояние между максимумами полос.

4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для апробации работы программы обработки ИК на реальных изображениях был проведен соответствующий эксперимент. В качестве объекта исследования были рассмотрены пузырьки воздуха, образованные с помощью аквариумного аэратора в кювете с водой. В результате измерений, проведенных лазерным интерференционным методом, были получены фотографии ИК потока пузырьков, подобные изображению, приведенному на рис. 3. Далее полученные изображения поочередно обрабатывались согласно вышеописанному алгоритму, при этом основные результаты (название изображения, количество найденных полос и соответствующий диаметр) фиксируются в текстовых файлах.

Для наглядной демонстрации работы программы ниже приведен результат обработки одного из экспериментальных изображений (рис. 3.) в виде таблицы 1. При этом следует отметить, что ИК, у которых не были корректно определены количества полос имеют слабо выраженный контраст полос, либо большей частью пересекаются с другой ИК. Полученные количества полос имеют погрешность в среднем в 1 полосу, из-за краевых эффектов и неточностей сегментации.

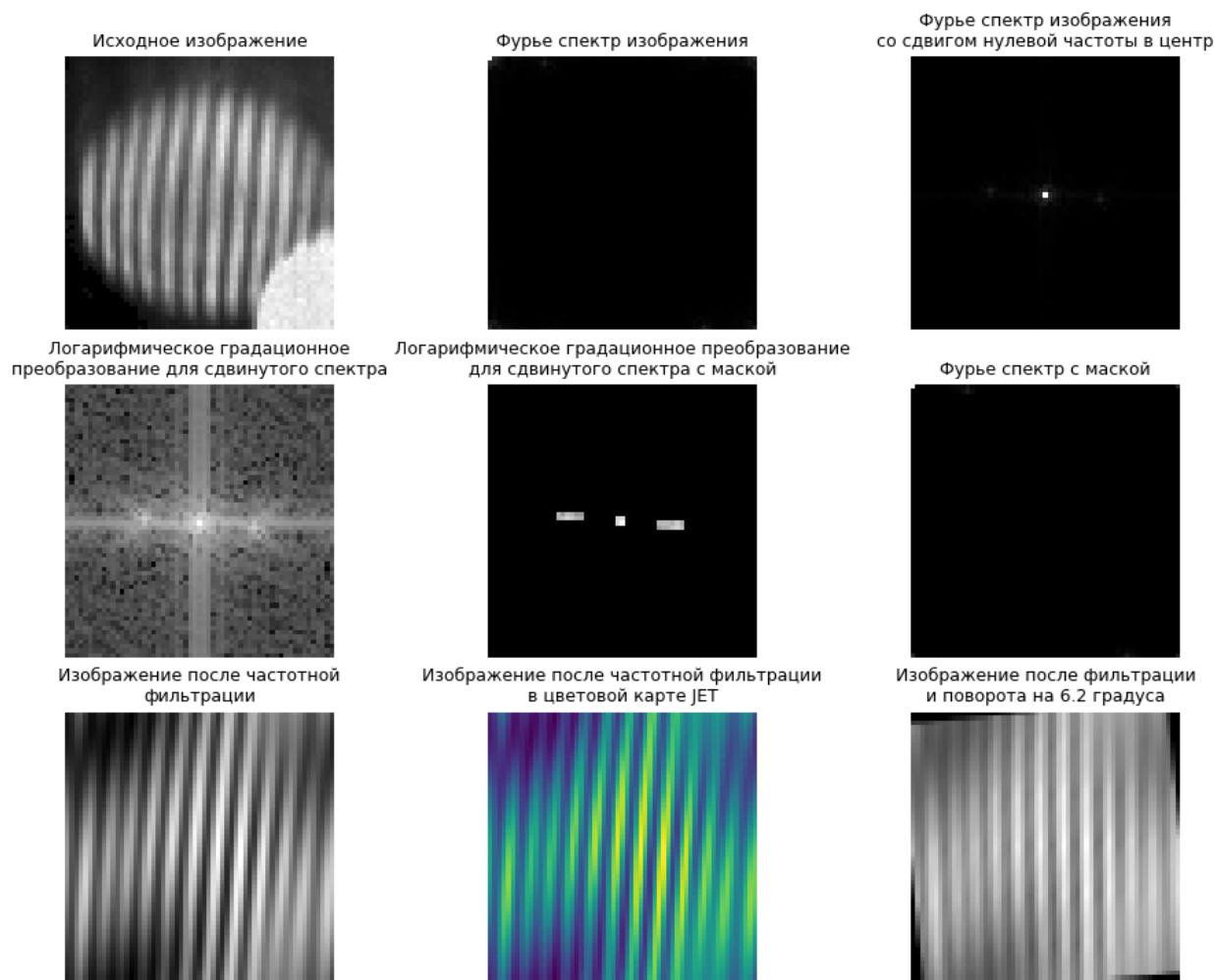


Рис. 4. Результат работы части программы, описанной в пункте 3.3 на одной ИК.

Таблица 1. Результаты работы алгоритма

Номер ИК в соответствии с рис. 3	Угол поворота ИК от вертикали, °	Количество найденных полос	Определенный диаметр пузырька, мм
1	0	6	0,324
2	5,2	12	0,647
3	0	7	0,378
4	0	6	0,324
5	0	5	0,270
6	5,7	11	0,593
7	0	6	0,324
8	0	11	0,593
9	0	5	0,270
10	0	9	0,486
11	0	6	0,324
12	0	7	0,378
13	5,7	11	0,593

В результате обработки ста экспериментальных фотографий были собраны статистические данные количества пузырьков в соответствие с их размерами, эти данные представлены в виде столбчатых диаграмм на рис.6.

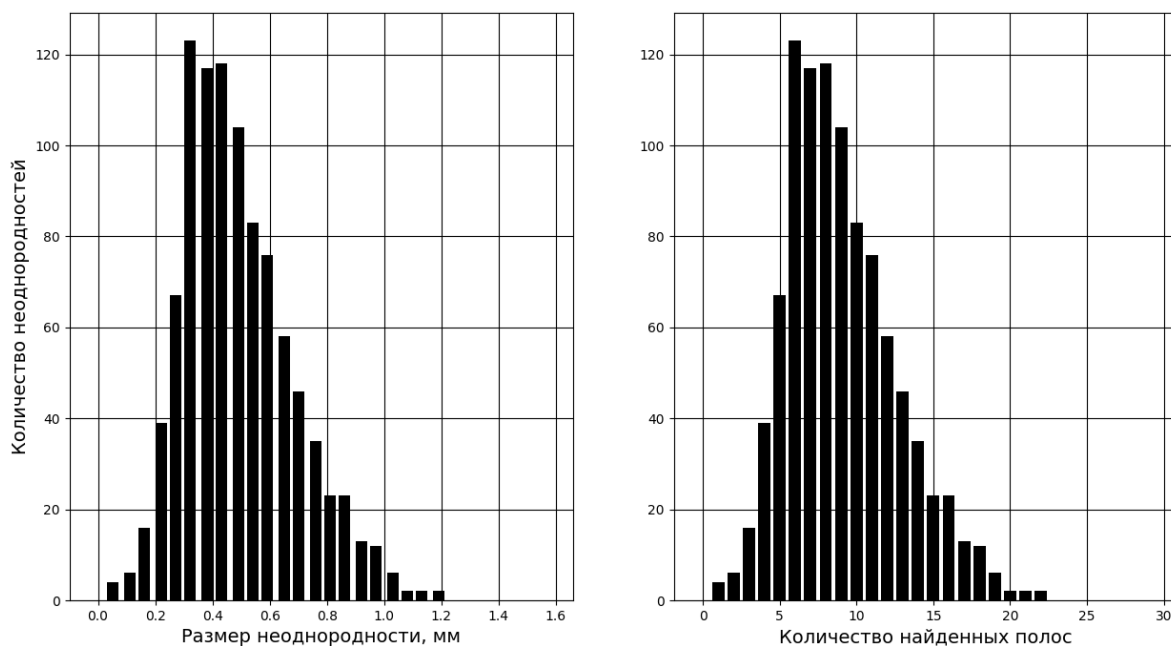


Рис. 6. Гистограмма распределения пузырьков по размерам.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе подробно описан принцип работы алгоритма автоматизированной обработки изображений, полученных лазерным интерференционным методом. Приведены промежуточные и итоговые результаты работы апробации алгоритма на экспериментальных изображениях, полученных при диагностике газожидкостного потока, сформированного с помощью аквариумного аэратора в кювете с водой. Приведена гистограмма распределения пузырьков по размерам в исследуемой области, полученная с помощью разработанного алгоритма.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка оптико-электронного комплекса для комплексной диагностики газожидкостных потоков» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Электроника, радиотехника и ИТ» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михалев А.С.** Оптико-электронный комплекс одновременного измерения параметров движущихся пузырьков газа или капель жидкости, 2009. 138 с.
2. **Bradski G. and Kaehler A.** Learning OpenCV // O'Reilly Media. Sebastopol, 2008. First Edition. 556 p.
3. **Bressert E.** SciPy and NumPy // O'Reilly Media. Sebastopol, 2012. First Edition. 57 p.

В.В. Пинчуков¹, А.Д. Богачев¹, Е.В. Шматко², А.Ю. Поройков³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕННЫХ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

АННОТАЦИЯ

Оптические методы измерения формы поверхности широко применяются в научных исследованиях и в промышленности. Большая часть таких методов основана на триангуляции набора двухмерных точек на изображениях, соответствующих одним и тем же трехмерным точкам объекта в пространстве. Одной из проблем, возникающих при применении такого подхода, является изменение калибровочных параметров системы в условиях повышенных вибрационных нагрузок. Это приводит к увеличению погрешности измерений. В работе показан подход к решению задачи увеличения точности измерений фотограмметрическим методом с применением алгоритма кросскорреляционной обработки и алгоритма оптимизации калибровочных параметров.

Ключевые слова – фотограмметрия, измерение формы поверхности, метод корреляции фоновых изображений, повышенные вибрационные нагрузки, разработка алгоритмов и программного обеспечения

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача диагностики деформации поверхностей часто встречается в автомобильной промышленности, строительстве и авиации. Такую диагностику обычно проводят с помощью ближней фотограмметрии – это метод измерения, который используется для определения геометрии, смещения и деформации конструкций с использованием фотографий или цифровых изображений. Для получения трехмерной формы поверхности обычно используются две видеокамеры (стереосистема) для получения пары изображений.

Фотограмметрия и корреляция цифровых изображений значительно развились за последние три десятилетия. Примерами их применения на практике являются измерения деформаций крыла [1–2] и вращающихся винтов [3] летательных аппаратов и деформаций поверхностей металлических конструкций [4].

В условиях натурных испытаний камеры стереосистемы для измерения формы исследуемой поверхности могут быть разнесены на большое расстояние, и углы наклона относительно поверхности могут значительно различаться. Это приводит к тому, что изображения, формируемые камерами, сильно отличаются и не могут быть напрямую обработаны кросскорреляционными алгоритмами. Для решения этой проблемы предлагается проводить поиск соответствующих точек в два этапа. Первый этап – первоначальная оценка смещения изображений друг относительно друга. Он выполняется с помощью поиска кодовых маркеров [5]. Вторым этапом является классическая кросскорреляционная обработка, определяющая смещения участков изображений с различных камер друг относительно друга. Суммарное смещение участков за два этапа позволяет определить координаты соответствующих точек для последующей триангуляции.

Измерения с помощью фотограмметрических систем часто могут проводиться в условиях повышенных вибрационных нагрузок. Это приводит к изменению взаимного положения камер стереосистемы, а также к изменению направления линии их зрения относительно времени калибровки системы. В результате такой декалибровки стереосистемы камер увеличивается погрешность измерения. При проектировании измерительной системы предпринимаются все возможные меры для минимизации влияния декалибровки на результаты измерений, но полностью исключить ее невозможно.

Смещение камер относительно друг друга можно исправить проведением процедуры рекалибровки, заключающейся в оптимизации параметров калибровочной матрицы для минимизации ошибки триангуляции. Такой подход уже используется в других задачах. В работе [6] описывается рекалибровка для системы технического зрения, состоящей из нескольких камер. В работе [2] приведены результаты летных измерений деформаций крыла летательного аппарата VUT100 Cobra. В ходе испытаний продемонстрировано влияние декалибровки камер стереосистемы во время полета на рост погрешности измерений. На основе экспериментальных изображений была проведена процедура рекалибровки, которая позволила в значительной мере снизить ошибку триангуляции.

2. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

2.1. Алгоритм измерения формы поверхности

Алгоритм измерения формы поверхности [7] состоит из двух частей. Первая часть – калибровка стереосистемы видеокамер. Ее целью является определение внутренних (фокусное расстояние и искажения, вносимые оптической системой) и внешних (относительное положение одной камеры стереосистемы относительно второй) параметров. Для проведения калибровки записывают серию изображений калибровочной мишени в разных положениях (различное расстояние до камеры и углы наклона к ней) и проводят стандартную процедуру калибровки.

Вторая часть алгоритма – определение смещений точек фонового экрана и триангуляция найденных соответствующих точек. Из-за того, что кросскорреляционная функция не инвариантна к повороту, то необходимо выполнить предварительное совмещение изображений. Для этого применяются кодовые маркеры. В данной работе в качестве кодовых маркеров были выбраны метки ArUco. Они представляет собой чёрный квадрат с ярко выраженными границами, внутри которого располагается черно-белый узор, идентифицирующий его номер. На изображениях производится поиск меток и их сопоставление с помощью идентификационных номеров. Далее происходит выбор четырех меток так, чтобы площадь четырехугольника, составленного из них, была максимальной. По координатам этих меток рассчитывается проективное преобразование. И изображение с одной камеры трансформируется для совмещения с изображением с другой камеры.

Совмещенные изображения подвергаются стандартной процедуре кросскорреляционной обработки. Изображения разбиваются на небольшие участки, для которых и происходит расчет функции нормированной корреляции. Координаты максимума функции находятся с субпиксельной точностью. Они позволяют оценить смещения участков друг относительно друга [8].

Алгоритм цифровой обработки изображений был реализован в программном обеспечении DeformVision на языке программирования C#. Расчет функции корреляции, поиск

маркеров и другие операции с изображениями осуществляется с помощью библиотек Math.Net Numerics и OpenCV (OpenCVSharp).

2.2. Оптимизация калибровочных параметров стереосистемы

Для решения проблемы декалибровки предлагается использовать методы многомерной оптимизации для определения действующих значений калибровочных параметров стереосистемы во время эксперимента [9]. В данной работе для процесса рекалибровки был выбран алгоритм Нелдера-Мида. Это наиболее известный метод среди методов, не использующих стратегию движения по направлениям. Он основан на том, что экспериментальным образцом, содержащим наименьшее количество точек, является симплекс. Его достоинства: простота, малое количество заранее установленных параметров, простая стратегия поиска, вычисление только значений функции, небольшой объём требуемой памяти. Недостатки метода: метод работает эффективно при $N \leq 6$, алгоритм основан на циклическом движении по координатам. Это может привести к вырождению алгоритма в бесконечную последовательность исследующих поисков без поиска по образцу.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1 Компьютерное моделирование декалибровки и рекалибровки

Для оценки возможности оптимизации калибровочных параметров стереосистемы необходимо оценить вносимые декалибровкой погрешности в измерение трехмерных точек. Для этого было применено компьютерное моделирование. Процесс моделирования декалибровки заключается в следующем:

1. Задаются параметры камер как внутренние, так и внешние. Все эти параметры определяются в эксперименте из этапа калибровки камер.
2. Формируется объект измерения, как набор точек в 3х мерном пространстве.
3. Без смещения (декалибровки), путём проецирования 3х мерных точек на плоскость изображения камер, рассчитываются 2х мерные точки, которые выступают в роли действительно получаемых изображений с камер.
4. Вносится известное смещение (декалибровки) в вектор смещения или поворота камер друг относительно друга.
5. С учётом смещённых внешних параметров камер и полученных в п. 3 2х мерных точек рассчитываются, путём триангуляции, 3х мерные точки объекта.
6. Полученные 3х мерные точки снова проецируются на плоскость изображения камер, в результате чего получаем перепроецированные 2х мерные точки.
7. Дальше сравнивая исходные 2х мерные точки и перепроецированные, оценивается величина ошибки репроекции.

На рис. 1 приведён пример зависимостей ошибок репроекции от смещения по оси x и поворота вокруг оси x без оптимизации и с оптимизацией. Вертикальная ось (среднее квадратичное отклонение (СКО) в пикселях) отображена в логарифмическом масштабе, красным – результат без оптимизации, а зелёным – результат с оптимизацией. Оптимизация выполнялась методом Нелдера-Мида.

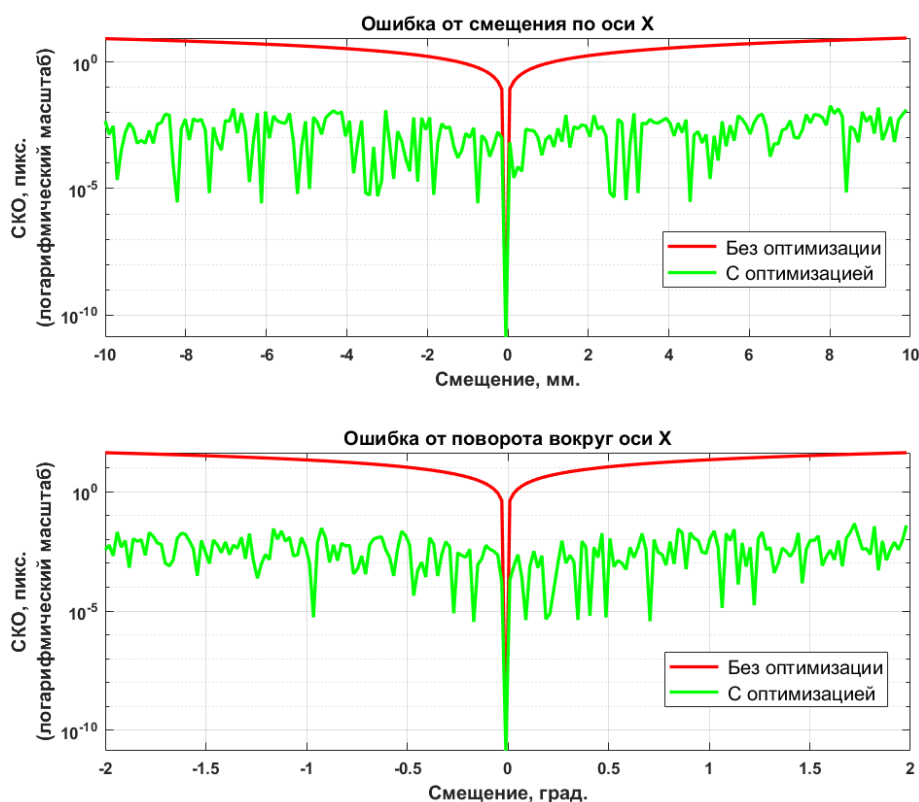


Рис. 1. Зависимость ошибки репроекции от смещения без оптимизации и с оптимизацией.

Из рис. 1 видно, что ошибка репроекции в результате оптимизации значительно уменьшилась, примерно на два порядка. Рассчитывать на такое же уменьшение ошибки при физическом моделировании не стоит, т.к. ошибка репроекции без смещений в реальных случаях значительно выше. Однако полученный результат говорит о возможности использования алгоритма рекалибровки в экспериментальных исследованиях.

3.2 Физическое моделирование определения формы поверхности

Для экспериментальной проверки алгоритма оптимизации была разработана экспериментальная установка (рис. 2), предназначенная для физического моделирования процесса декалибровки стереосистемы видеокамеры. Декалибровка выполняется путем перемещения одной из камер с помощью линейных моторизованных модулей перемещения, управляемых с персонального компьютера [10].

Подвижная камера закреплена на 3х-осевом позиционере, состоящем из 3 отдельных миниатюрных моторизованных линейных модулей перемещения X-LSM050A фирмы Zaber. Модули имеют следующие характеристики: диапазон хода 50 мм, погрешность положения 20 мкм и шаг смещения менее 0,1 мм.

В экспериментальных исследованиях была использована тестовая установка, описанная в [11]. Она позволяет задавать случайную трехмерную поверхность. Стереосистема с двумя видеокамерами Basler piA2400-17gm с разрешением 2456×2058 пикселей, размером пикселей 3,45×3,45 мкм и разрядностью 12 бит использовались для получения стереопар изображений. В качестве объективов использовались Fujinon HF25HA-1B с фокусным расстоянием 25 мм и относительным отверстием 1:1.4.

На рис. 3 сплошными линиями показаны ошибки репроекции без оптимизации, а штриховыми линиями — с оптимизацией; красный цвет соответствует смещению по оси x , зеленый — по оси y , синий — по оси z . Измерения проводились для различных форм поверхности объекта, на рис. 3 приведен один пример полученной зависимости.

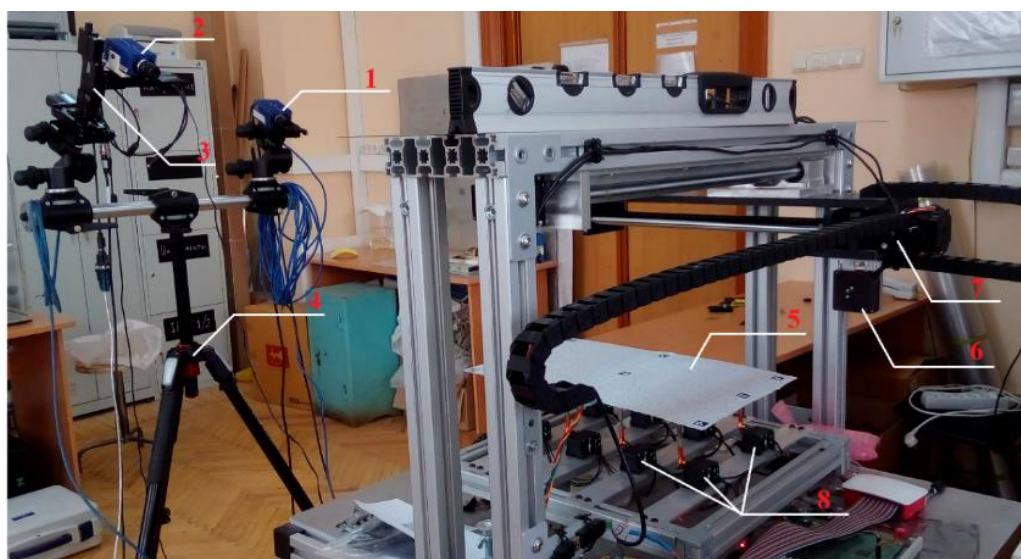


Рис. 2. Экспериментальная установка для физического моделирования декалибровки: 1 – неподвижная камера; 2 – подвижная камера; 3 – 3-осевой позиционер; 4 – штатив стереосистемы; 5 – объект измерения; 6 – лазерный датчик расстояния; 7 – двухкоординатный лазерный позиционер; 8 – сервоприводы деформации поверхности объекта.

Из полученных данных можно сделать вывод, что для всех трех форм поверхности видна одинаковая зависимость ошибки репроекции без оптимизации по осям x , y и z . Смещение по оси y оказывает наибольшее влияние, немного меньше по оси x , а смещение по оси z мало влияет на ошибку. Во всех трех случаях декалибровка позволила значительно уменьшить ошибку репроекции.

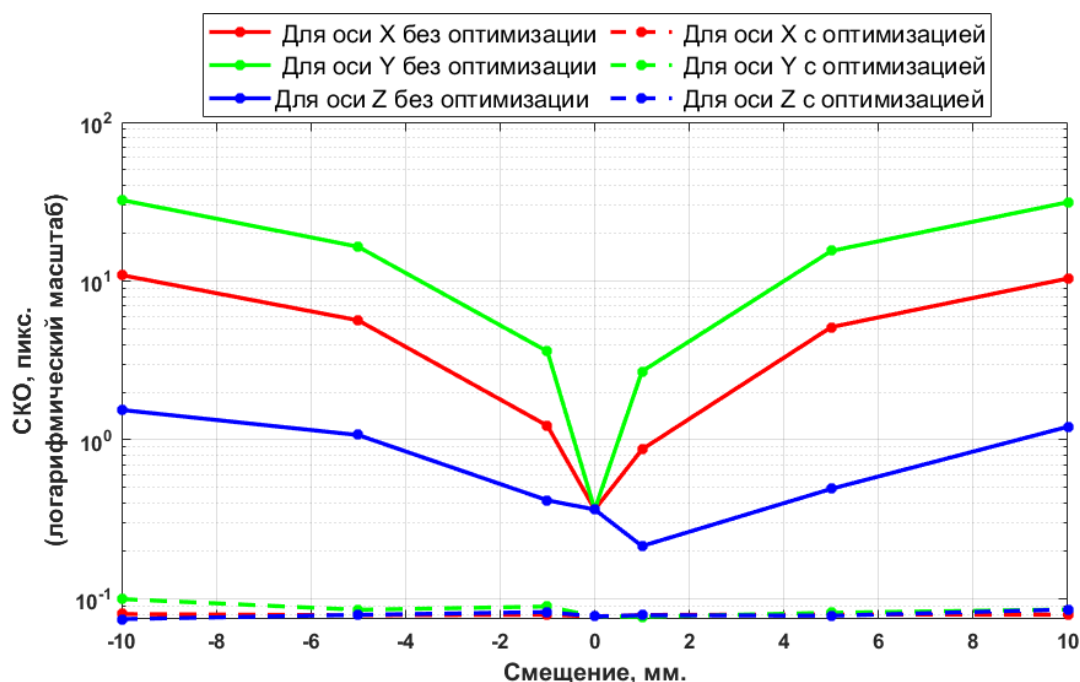


Рис. 3. Зависимости ошибки репроекции от перемещений камеры.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм кросскорреляционной обработки изображений для восстановления формы поверхности с использованием маркеров AgUso. Продемонстрирован один из подходов к оптимизации функции ошибки репроекции для нахождения действующих параметров калибровки стереосистемы. Оптимизация проводится с помощью алгоритма Нелдера-Мида по функции шести переменных: амплитуд смещения и углов поворота по трем осям. Точностную характеристику алгоритма напрямую определить невозможно, т.к. она зависит от множества факторов, но возможно оценить по достигаемым значениям целевой функции в результате оптимизации.

В работе было проведено компьютерное и физическое моделирование процесса декалибровки с последующим применением процедуры рекалибровки. В ходе последней ошибка репроекции значительно снизилась.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кулеш В.П.** Измерения деформации адаптивной носовой части крыла в аэродинамической трубе методом видеограмметрии // Учёные записки ЦАГИ, Том 45, №6, 2014. С. 100–109.
2. **Kirmse T.** Recalibration of a stereoscopic camera system for in-flight wing deformation measurements // Meas. Sci. Technol. 2016. V. 27. № 5. P. 054001.
3. **Boden F.** et al. In-flight measurements of propeller blade deformation on a VUT100 cobra aeroplane using a co-rotating camera system // Meas. Sci. Technol. 2016. Vol. 27, № 7.
4. **Chen B.** et al. Measurement of weld-induced deformations in three-dimensional structures based on photogrammetry technique // Journal of Ship Production and Design. 2011. Vol. 27. P. 52-62.
5. **Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J.** Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion // Pattern Recognition. 2014. Vol. 47. P. 2280–2292.
6. **Hermans C., Dumont M. and Bekaert P.** Extrinsic recalibration in camera networks // 4th Canadian Conf. on Computer and Robot Vision. 2007 1 P. 3–10.
7. **Li L.G., Liang J., Guo X., Guo C., Hu H. and Tang Z.Z.** Full-field wing deformation measurement scheme for in-flight cantilever monoplane based on 3D digital image correlation // Meas. Sci. Technol. 2014. Vol. 25. P. 065202.
8. **Shmatko E.V., Pinchukov V.V., Bogachev A.D. and Poroykov A.Yu.** Crosscorrelation image processing for surface shape reconstruction using fiducial markers // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2127. P. 012030.
9. **Шматко Е.В., Пинчуков В.В., Богачёв А.Д., Поройков А.Ю.** Разработка фотограмметрической системы измерения формы поверхности для условий повышенных вибрационных нагрузок // Технологии будущего. IV Национальная научно-техническая конф. Сборник тез. докл. Изд-во: МЭИ, 2021. С. 56.
10. **Pinchukov V.V., Shmatko E.V., Bogachev A.D., Poroykov A.Yu.** Optimization of the stereo system calibration parameters for photogrammetric measurements in the conditions of field experiments // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2127. P. 012029.
11. **Poroykov A.Yu.** A system for determining the error in measuring the shape of a flexible deformable surface by means of the image pattern correlation technique // Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Ser. Priborostr. 2017. No. 6. P. 28–39.

А.А. Иванов¹, А.К. Рыжков¹, Б.А. Сафронов², А.А. Волошин³, А.Н. Васильев³

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта, 3 – консультант

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО СКАНЕРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СТАНДАРТА МЭК61850 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлен процесс разработки сканера – анализатора локальной вычислительной сети цифровой подстанции (далее – сканер сети) для анализа ошибок в цифровых потоках, анализа загруженности локальной вычислительной сети цифровой подстанции и отслеживания SV-потоков (Sampled Values) и GOOSE-сообщений (Generic Object-Oriented Substation Event). В статье описываются особенности разработки программной части сканера сети и процесс оптимизации загрузки процессора для повышения производительности с использованием библиотеки Data Plane Development Kit (далее – DPDK), а также представлен пользовательский интерфейс разработанного прототипа устройства.

Ключевые слова – SV-потоки, GOOSE-сообщения, локальная вычислительная сеть, цифровая подстанция, повышение надежности

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время процесс цифровизации вошел в стадию глобального внедрений. Сфера электроэнергетики также подверглась модернизации: строительство цифровых подстанций, использование новых стандартов обмена данными (МЭК 61850) и использование оборудования с полностью изменённым подходом обработки данных.

Приведенные выше изменения обязывают персонал цифровой подстанции и наладчиков оборудования знать структуру цифровых пакетов данных и уметь анализировать содержимое цифровых пакетов протоколов обмена. В настоящий момент персонал использует для анализа цифровых пакетов зарубежное программное обеспечение (далее – ПО), которое предназначено для сетевых администраторов, а не сотрудников службы релейной защиты и персонала цифровых подстанции. Полноценное использование зарубежного профессионального ПО требует переподготовки кадров или разработки специализированного, для использования на цифровой подстанции, устройства.

В связи с этим на кафедре Релейной защиты и автоматизации энергосистем НИУ «МЭИ» разработан прототип сетевого сканера информационных потоков стандарта МЭК 61850: SV-потоков и GOOSE-сообщений. Мобильный сетевой сканер представляет собой устройство с программным обеспечением для анализа поведения оборудования цифровых подстанций с поддержкой протоколов МЭК 61850-9.2LE (SV) и МЭК 61850-8.1 (GOOSE). Устройство обладает «облегченным» интерфейсом и не требует дополнительной подготовки персонала, вывод информации осуществляется на любое устройство с поддержкой Wi-Fi [1].

Сканер позволяет проводить анализ ошибок в цифровых потоках, анализ загруженности локальных вычислительных сетей цифровой подстанции, а также мониторинг SV-потоков и GOOSE-сообщений. Таким образом, устройство упростит процесс наладки сетевого оборудования, поспособствует улучшению качества технического контроля работоспособности локально-вычислительных сетей, а также снизит аварийность за счет

упрощения анализа сети цифровой подстанции.

2. ВЫБОР ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ СКАНЕРА СЕТИ

Для реализации вышеописанных функций необходимо устройство, обладающее требованиями, приведенными в таблице 1.

Таблица 3 – Требования к мобильному сканеру сети

RAM	Не менее 1 Гб
Wi-Fi	Да
Ethernet	1000 Мбит/с
Разъемы	Power over Ethernet
Операционная система	Linux
Тактовая частота	Не менее 1,2 ГГц
Количество ядер	Не менее четырех

В сравнительном анализе были рассмотрены такие модели как: Raspberry Pi Model B, Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Model 3, Orange Pi Prime, Banana Pi M3, Arduino Mega 2560, Asus Tinker board S.

В качестве платформы для реализации прототипа было выбрано устройство Raspberry Pi 4 (см. рисунок 1). Данное устройство обладает оптимальными характеристиками, конкурентной стоимостью, мультиплатформенной операционной системой Linux, а также у команды разработчиков сканера сети имеется опыт разработки под Raspberry.



Рис. 4. Raspberry Pi 4B

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ DPDK ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ НАГРУЗКИ НА ПРОЦЕССОР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

В ходе планирования программной части сканера сети, была разработана обобщенная структура программного взаимодействия (рисунок 2).

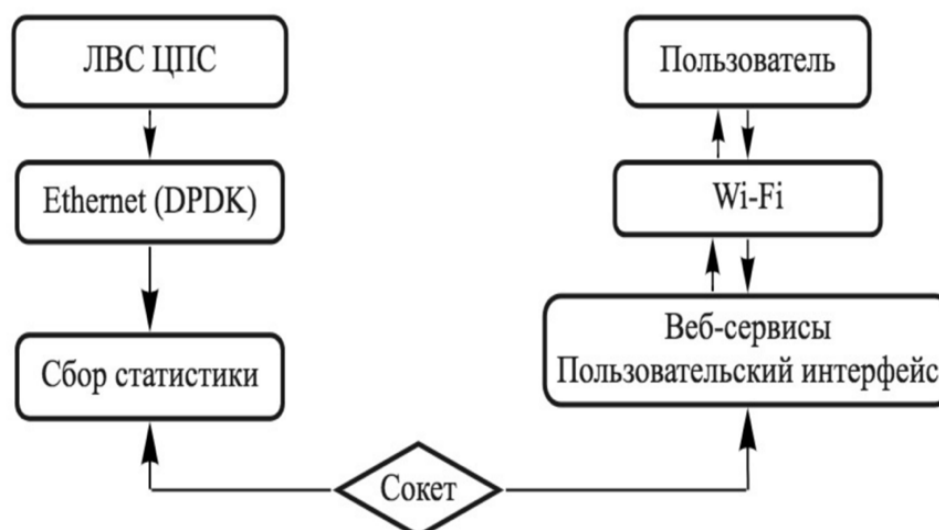


Рисунок 5 – Обобщенная структура мобильного сканера информационных потоков

В обобщенной структуре сканера сети стрелками представлены потоки передачи данных. Для решения вопросов кибербезопасности сканер сети не имеет возможности отправки данных в сеть.

Сложность реализации сканера сети на устройстве с низкой мощностью процессора вызвана спецификой SV-потоков: в среднем 1 поток имеет вес 2.5 Мбит, количество потоков в среднем около 15 и частота отправки в сеть от 800 пакетов в секунду до 12800 пакетов в секунду [2]. При первичном тестировании мобильного сканера были получены следующие результаты: при сканировании более 4 SV-потоков с частотой 4кГц появляется потеря пакетов и искажение качества сканирования, вызванное перегрузкой процессора. В связи с этим при разработке настоящего сканера сети использовалась библиотека DPDK. Библиотека ускоряет обработку пакетов и позволяет изменить процессор общего назначения в собственный сервер пересылки пакетов. При традиционной обработке пакетов пакеты с сетевой карты копируются в основную память. Далее с ним начинает работать ядро системы. Если при обработке пакета ядром и передачей пользователю приложению на сетевую карту поступает новый пакет, то происходит переключение контекста (прерывание процесса обработки старого пакета с сохранением всех результатов и переключение процесса на копирование в определенный буфер нового пакета). При большом количестве принимаемых пакетов на переключение контекста тратится излишне много ресурсов. Библиотека DPDK позволяет исключить ядро системы из данной цепочки и предоставляет доступ приложению работать напрямую с сетевой картой [3]. При этом само приложение получает доступ к системным файлам, что несет некоторую опасность при некорректной работе приложения. Но даже при этом происходит многократное ускорение работы процесса для приема/передачи пакетов.

В результате доработки программного кода и использования библиотеки DPDK удалось добиться повышения конкурентоспособности мобильного сканера сети, благодаря значительному повышению производительности в части обработки пакетов:

- предельное количество SV-потоков с частотой дискретизации 4 кГц [4] (для нужд релейной защиты и автоматики) – 25. На рисунке 3 приведены результаты тестирования: при 27 потоков замечены кратковременные отклонения, которые увеличиваются по мере увеличения потоков в сети.

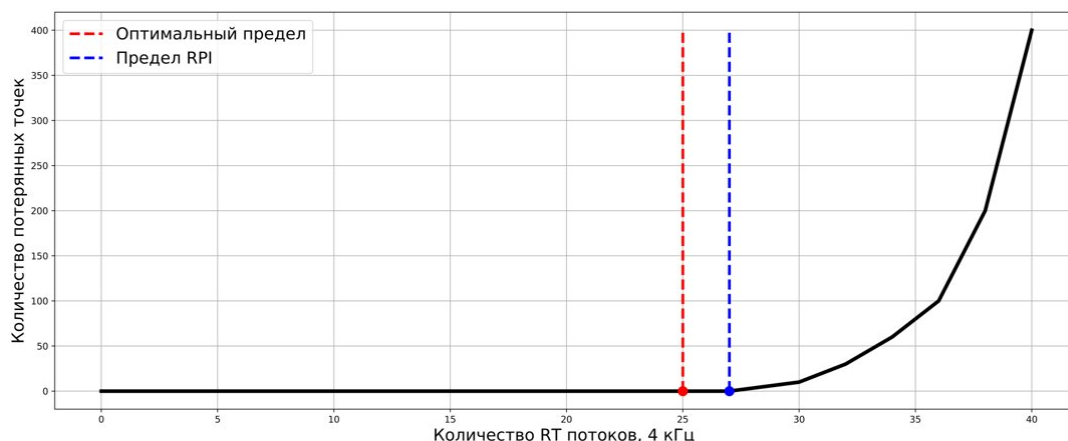


Рисунок 6 – Предельное количество SV-потоков (с частотой дискретизации 4 кГц)

- предельное количества SV-потоков с частотой дискретизации 12,8 кГц [5] (для нужд автоматизированной системы коммерческого учёта электроэнергии) в режиме Real-Time – 6. Учитывая, что режиме реального времени ресурсов сканера достаточно только для обработки 6 потоков, было принято решения производить анализ потоков на данной частоте в режиме Non Real-Time [6]. Результаты сканирования SV-потоков с частотой дискретизации 12,8 кГц в режиме Non-Real-Time представлены на рисунке 5.

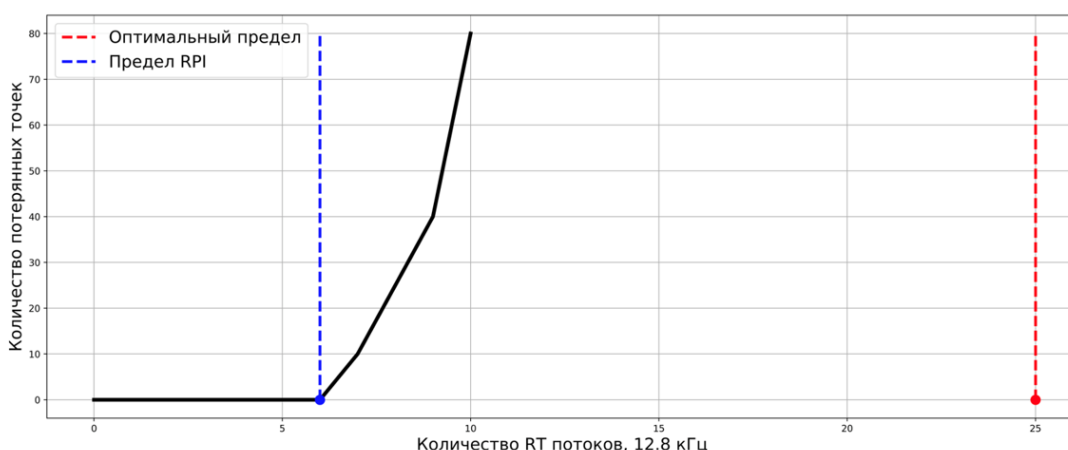


Рисунок 7 – Предельное количество SV-потоков в режиме Real-Time (частотой дискретизации 12,8 кГц)

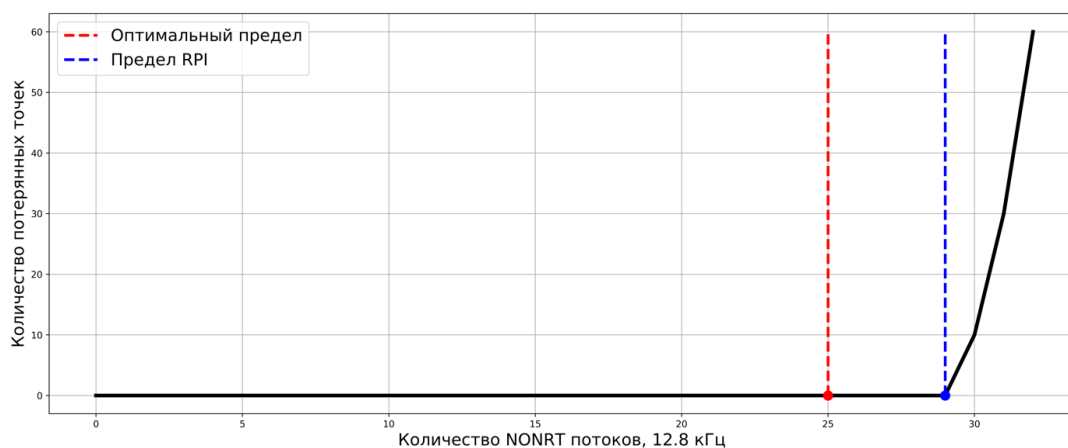


Рисунок 8 – Предельное количество SV-потоков в режиме Non-Real-Time (частотой дискретизации 12,8 кГц)

Тестирование устройства производилось на кафедре РЗиАЭ Национального Исследовательского Университета «МЭИ» с помощью программного аппаратного комплекса RTDS, который позволяет моделировать эталонные SV-потоки и GOOSE-сообщения, а также с использованием зарубежного аналога сканера сети – сетевого анализатора Povoно (Китай).

4. РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА МОБИЛЬНОГО СКАНЕРА СЕТИ

Одной из ключевых задач разработки мобильного сканера сети является разработка интуитивно-понятного интерфейса для использования устройства без прохождения дополнительного обучения [7]. Результаты разработки интерфейса представлены на рисунке 6.

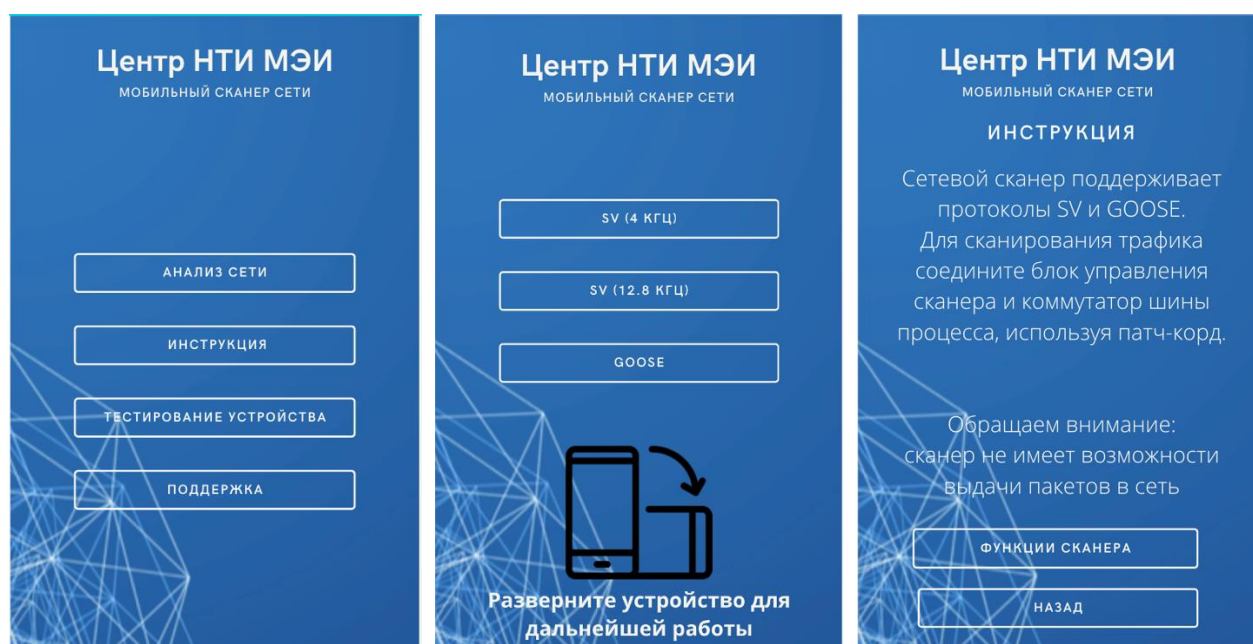


Рисунок 9 – Интерфейс мобильного сканера сети

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКАНЕРА СЕТИ В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ

Разработанный сканер сети планируется интегрировать в лабораторные работы по курсу «Наладка релейной защиты» на кафедре Релейной защиты и автоматизации НИУ «МЭИ». Разработаны следующие лабораторные работы с использованием сканера сети:

- «Анализ и оценка загруженности локальной вычислительной сети цифровой подстанции»;
- «Расчет уставок и наладка учебного стенда релейной защиты ЧЭАЗ» (Чебоксарский электроаппаратный завод).

6. ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе апробации устройства были выявлены потенциальные зоны роста для повышения конкурентоспособности сканера сети:

- реализация функции анализа протокола MMS (Manufacturing Message Specification) (протокол цифровой подстанции для передачи отчетов). Для реализации функции анализа протокола MMS планируется проведение НИОКР. Сложность анализа протокола MMS заключается в необходимости отправки в сеть запросов. Но данное решение не является оптимальным в связи со сложностью сертификации в области кибербезопасности. На ка-

федре РЗиАЭ НИУ «МЭИ» уже имеется научный задел для решения поставленной задачи.

- интеграция элементов питания для возможности автономной работы. Данное решение необходимо для возможности работы при отсутствии порта Power Over Ethernet.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в настоящей работе прототип мобильного сканера информационных потоков с поддержкой протокола МЭК 61850 разработан в рамках внутреннего гранта НИУ «МЭИ» для реализации проектов в рамках ПНИ 2020/22 «Информационные технологии» ПНИ «Электроника, радиотехника и IT». «ПНИ 2020/22» направлены на формирование научно-технического задела по прорывным направлениям исследований и разработок с целью достижения лидирующих позиций МЭИ в научной и образовательной сферах и развития кадрового резерва МЭИ.

Разработанный прототип сканера сети, не имеющий аналогов в России, должен внести вклад в реализацию программы «Цифровая экономика Российской Федерации», включающей в себя программу цифровизации энергетики. Данный прототип был представлен на зарубежных и российских конференциях и получил высокую степень оценки и заинтересованности со стороны крупнейших сетевых компаний. Полноценный мобильный сканер сети упростит процесс наладки сетевого оборудования, поспособствует улучшению качества технического контроля работоспособности локально-вычислительных сетей, а также снизит аварийность за счет упрощения анализа сети цифровой подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **A. A. Ivanov, A.K. Ryzhkov, B. A. Safronov, A. A. Voloshin, S.S. Usachev.** "Development Of A Mobile Network Scanner Of Information Flows With Support For Protocols Of The IEC 61850 Standard," 2021 4th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), vol. 8, 2021.
2. **IEC 61850-9-2.** Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Edition 2.1 2020, P.131-210.
3. **Intel, DPDK.** DPDK documentation. <<https://www.dpdk.org/>>.
4. **IEC 61850-9-2 LE (Lite Edition).** Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers using IEC 61850-9-2. P.131-210.
5. **СТО 56947007-25.040.30.309-2020.** Корпоративный профиль МЭК 61850 ПАО «ФСК ЕЭС». Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Дата введения: 05.10.2020./ 153 с.
6. **IEC 61869-9** Instrument Transformers – Part 9: Digital Interface for Instrumental Transformers, 2016. P.131-210.
7. **Алан Купер,** Интерфейс. Основы проектирования взаимодействия / 4-е изд. – Санкт-Петербург – Москва; 2022. – 129 с.

Д.С.Дикарев¹, Я.В.Стожжк¹, Т.Б.Дуйшеналиев²

1- студент, 2 – руководитель проекта

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ЛИНИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ КРУГОВ НАПРЯЖЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ КОНСТАНТ

АННОТАЦИЯ

Предложены различные представления выведенного уравнения огибающей линии предельных кругов напряжений Мора. В системе MatLab построены огибающие линии предельных кругов напряжений для хрупких и полухрупких материалов. Даны формулы для определения констант по трем представлениям уравнения огибающей линии. Показано, что огибающая линия для любого материала не зависит от того, по какому из этих уравнений она построена.

Ключевые слова: математическая модель, система MatLab, нормальные напряжения, касательные напряжения, предельные круги напряжений, огибающая линия, уравнение огибающей линии, теория прочности Мора

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка месторождений полезных ископаемых (драгоценные и цветные металлы, газ, нефть и др.) часто ведется на больших глубинах земной коры, где горные породы находятся в условиях трехосного сжатия. Требуется тщательное изучение и прогнозирование поведения горных пород при различных уровнях напряженного состояния. Эта проблема тесно связана с теорией прочности Мора, основной задачей которой является количественное описание разрушающих усилий в условиях трехосных напряженных состояний. Она, пожалуй, является самой распространенной и широко применяемой теорией в механике горных пород, конструкционных и строительных материалов.

2. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ МОРА

Основной задачей теории прочности Мора является количественное описание разрушающих напряженных состояний в условиях трехосных напряженных состояний. Однако, теория прочности Мора до сих пор не имеет единого количественного выражения. В качестве такого выражения предлагались много соотношений, которые были выдвинуты на основе различных соображений.

Ни одно из известных нам большего числа уравнений, предложенных в качестве количественного описания гипотезы Мора, не имеет строгого математического обоснования.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ УРАВНЕНИЯ ОГИБАЮЩЕЙ ЛИНИИ

В работе [1,2] выведено уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений в параметрической форме:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}; \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'} \quad (1)$$

где:

$$\sigma_3 = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^2}; \sigma_3' = \frac{2\sigma_1}{\sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + \sigma_1^2}} . \quad (2)$$

В уравнение огибающей линии (1) механическое свойство материала входит в виде констант a, b . Если величины этих констант установлены, то уравнение (1) определяет все те напряженные состояния, которые приводят к разрушению данного материала.

3.1. Первое представление. Определение констант по величинам главных напряжений любых двух напряженных состояний трехосного сжатия

Допустим, что предел прочности материала не установлен, т.е. материал не испытан на осевое сжатие, все испытания проведены с приложением к боковой поверхности образца гидростатического давления. Величины констант уравнения (2) можно определить, используя и такие опытные данные.

Подставим в первое уравнение (2) величины главных напряжений какого-либо одного разрушающего напряженного состояния:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{1r}, \quad \sigma_3 = \sigma_{3r} \\ \sigma_{3r} &= \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + (\sigma_{1r})^2} , \end{aligned} \quad (3)$$

где σ_{1r}, σ_{3r} - измеренные в опытах величины главных напряжений.

Подставим в то же уравнение еще опытные величины главных напряжений какого-либо другого разрушающего напряженного состояния:

$$\sigma_1 = \sigma_{1s}, \quad \sigma_3 = \sigma_{3s} ,$$

где σ_{1s}, σ_{3s} - измеренные в опытах величины главных напряжений σ_1, σ_3 .

$$\sigma_{3s} = \frac{a+b}{2} + \sqrt{\frac{(a-b)^2}{8} + (\sigma_{1s})^2} . \quad (4)$$

Решим равенства (3) и (4) относительно констант a, b :

$$\begin{aligned} a &= \frac{(\sigma_{3r})^2 - (\sigma_{3s})^2 - (\sigma_{1r})^2 + (\sigma_{1s})^2}{2(\sigma_{3r} - \sigma_{3s})} + \\ &+ \sqrt{\frac{((\sigma_{3r})^2 - (\sigma_{3s})^2)^2 - ((\sigma_{1r})^2 - (\sigma_{1s})^2)^2}{2(\sigma_{3r} - \sigma_{3s})^2} - (\sigma_{1r})^2 - (\sigma_{1s})^2 + (\sigma_{3r})^2 + (\sigma_{3s})^2} \\ b &= \frac{(\sigma_{3r})^2 - (\sigma_{3s})^2 - (\sigma_{1r})^2 + (\sigma_{1s})^2}{2(\sigma_{3r} - \sigma_{3s})} - \\ &- \sqrt{\frac{((\sigma_{3r})^2 - (\sigma_{3s})^2)^2 - ((\sigma_{1r})^2 - (\sigma_{1s})^2)^2}{2(\sigma_{3r} - \sigma_{3s})^2} - (\sigma_{1r})^2 - (\sigma_{1s})^2 + (\sigma_{3r})^2 + (\sigma_{3s})^2} \end{aligned} \quad (5)$$

и их введем в уравнения (2):

$$\sigma_3 = \frac{(\sigma_{3_r})^2 - (\sigma_{3_s})^2 - (\sigma_{1_r})^2 + (\sigma_{1_s})^2}{2(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})} + \sqrt{\frac{(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2}{4} + \frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{1_s})^2)^2}{4(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2} - \frac{(\sigma_{1_r})^2 + (\sigma_{1_s})^2}{2} + \sigma_1^2} \quad (6)$$

$$\sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2}{4} + \frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{1_s})^2)^2}{4(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2} - \frac{(\sigma_{1_r})^2 + (\sigma_{1_s})^2}{2} + \sigma_1^2}}$$

Теперь уравнения огибающей линии (1), (2) примут вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}; \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'} \quad (7)$$

где:

$$\sigma_3 = \frac{(\sigma_{3_r})^2 - (\sigma_{3_s})^2 - (\sigma_{1_r})^2 + (\sigma_{1_s})^2}{2(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})} + \sqrt{\frac{(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2}{4} + \frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{1_s})^2)^2}{4(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2} - \frac{(\sigma_{1_r})^2 + (\sigma_{1_s})^2}{2} + \sigma_1^2} \quad (8)$$

$$\sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2}{4} + \frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{1_s})^2)^2}{4(\sigma_{3_r} - \sigma_{3_s})^2} - \frac{(\sigma_{1_r})^2 + (\sigma_{1_s})^2}{2} + \sigma_1^2}}$$

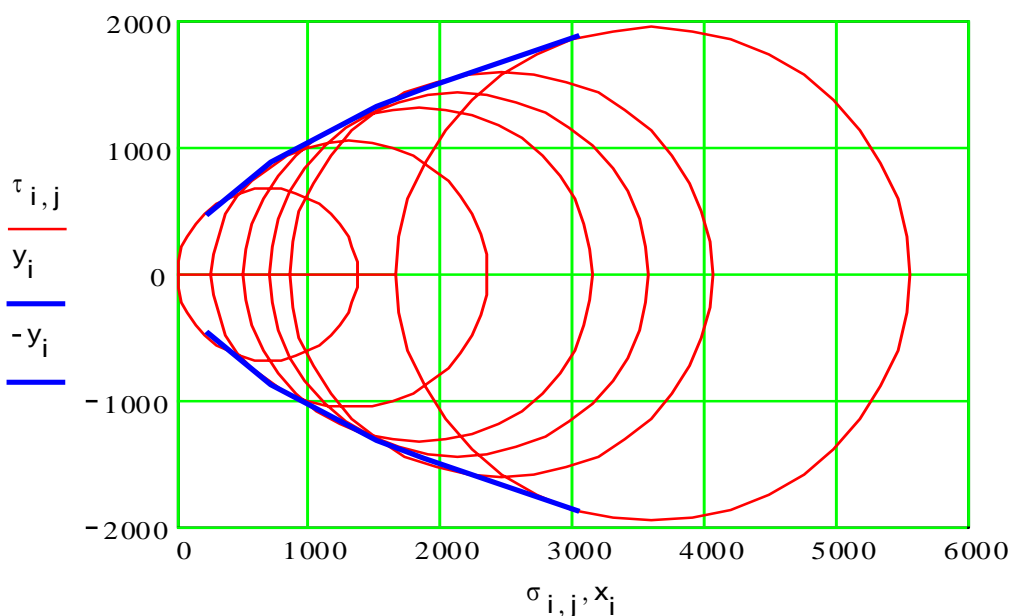


Рис. 1. Опытные предельные круги и огибающая линия (формулы (7), (8)), построенная по двум опытными кругам (выбраны второй и шестой круги, каррарский мрамор [3])

3.2. Второе представление. Выражение констант уравнения огибающей линии через предел прочности материала на осевое сжатие и величины главных напряжений какого-либо одного разрушающего напряженного состояния

В камерах трехосного сжатия образцы горных пород и строительных материалов можно довести до разрушения при осевом сжатии без бокового давления (осевое сжатие)

и при осевом сжатии с приложением к боковой поверхности образца различных величин гидростатического давления. В таких испытаниях определяются предел прочности на осевое сжатие σ_c , а также ряд величин главных напряжений, при которых образец разрушается.

Таким образом, в таких испытаниях материал не испытывается на осевое растяжение, т.е. предел прочности на осевое растяжение σ_p не определяется. Для таких испытаний величины констант a , b необходимо выразить через величины предела прочности на осевое сжатие и через величины какой-либо пары главных напряжений.

Пусть, в уравнении (5) в качестве главных напряжений σ_{1_s} , σ_{3_s} , взяты главные напряжения осевого сжатия:

$$\sigma_{1_s} = \sigma_c, \sigma_{3_s} = 0,$$

где σ_c - предел прочности материала при осевом сжатии. Введем это в уравнения (5):

$$\begin{aligned} a &= \frac{(\sigma_{3_r})^2 - (\sigma_{1_r})^2 + \sigma_c^2}{2\sigma_{3_r}} + \sqrt{\frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{3_r})^2)^2 + \sigma_c^2(\sigma_c^2 - 2(\sigma_{1_r})^2 - 2(\sigma_{3_r})^2)}{2\sigma_{3_r}^2}} \\ b &= \frac{(\sigma_{3_r})^2 - (\sigma_{1_r})^2 + \sigma_c^2}{2\sigma_{3_r}} - \sqrt{\frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{3_r})^2)^2 + \sigma_c^2(\sigma_c^2 - 2(\sigma_{1_r})^2 - 2(\sigma_{3_r})^2)}{2\sigma_{3_r}^2}} \end{aligned} \quad (9)$$

и (6):

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \frac{(\sigma_{3_r})^2 - (\sigma_{1_r})^2 + \sigma_c^2}{2\sigma_{3_r}} + \\ &+ \sqrt{\frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{3_r})^2)^2 + \sigma_c^2(\sigma_c^2 - 2(\sigma_{1_r})^2 - 2(\sigma_{3_r})^2)}{4\sigma_{3_r}^2}} + (\sigma_1)^2 \\ \sigma_3' &= \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{3_r})^2)^2 + \sigma_c^2(\sigma_c^2 - 2(\sigma_{1_r})^2 - 2(\sigma_{3_r})^2)}{4\sigma_{3_r}^2}} + (\sigma_1)^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

Теперь уравнения огибающей линии (1), (2) примут вид:

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}; \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'} \quad (11)$$

где:

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= \frac{(\sigma_{3_r})^2 - (\sigma_{1_r})^2 + \sigma_c^2}{2\sigma_{3_r}} + \\ &+ \sqrt{\frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{3_r})^2)^2 + \sigma_c^2(\sigma_c^2 - 2(\sigma_{1_r})^2 - 2(\sigma_{3_r})^2)}{4\sigma_{3_r}^2}} + (\sigma_1)^2 \\ \sigma_3' &= \frac{\sigma_1}{\sqrt{\frac{((\sigma_{1_r})^2 - (\sigma_{3_r})^2)^2 + \sigma_c^2(\sigma_c^2 - 2(\sigma_{1_r})^2 - 2(\sigma_{3_r})^2)}{4\sigma_{3_r}^2}} + (\sigma_1)^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

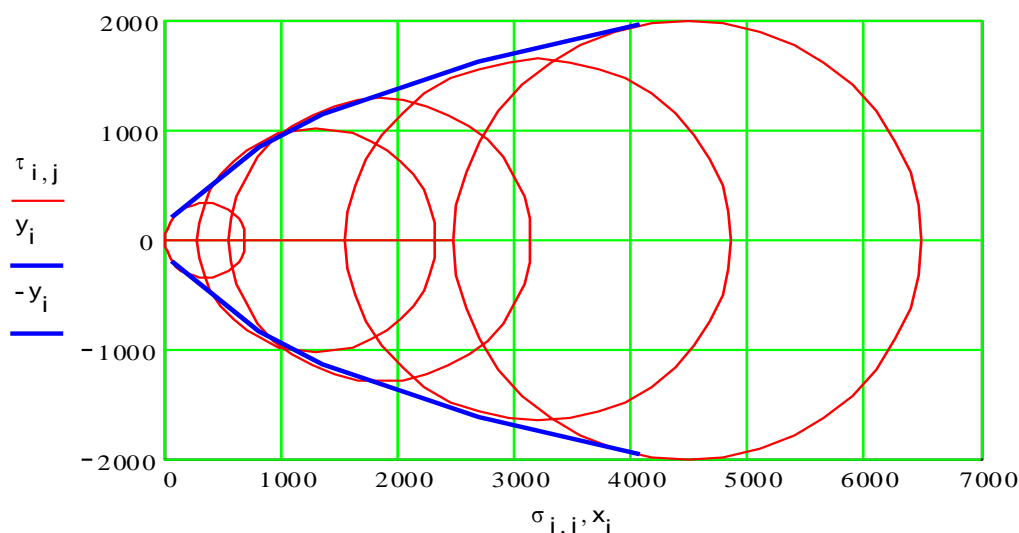


Рис. 2. Опытные предельные круги и огибающая линия (формулы (11), (12)), построенная по пределу прочности и одному опытному кругу (выбран пятый круг, песчаник [1])

3.3. Третье представление. Выражение констант уравнения огибающей линии через пределы прочности материала на осевое растяжение и на осевое сжатие

Самыми распространенными механическими характеристиками строительных материалов и горных пород являются пределы их прочности на осевое сжатие и на осевое растяжение, которые обозначим соответственно σ_c и σ_p .

Подставим в уравнения (9) главные напряжения при осевом растяжении

$$\sigma_1 = 0, \sigma_3 = \sigma_c \tag{13}$$

и выразим константы через пределы σ_c и σ_p [1,2]:

$$a = \frac{\sigma_c^2 + \sigma_p^2}{2 \cdot \sigma_p} + \frac{\sigma_c^2 - \sigma_p^2}{\sqrt{2 \cdot \sigma_p^2}}$$

$$b = \frac{\sigma_c^2 + \sigma_p^2}{2 \cdot \sigma_p} - \frac{\sigma_c^2 - \sigma_p^2}{\sqrt{2 \cdot \sigma_p^2}} \tag{14}$$

Введем равенства (13) в уравнения (10):

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_c^2 + \sigma_p^2}{2 \cdot \sigma_p} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_c^2 - \sigma_p^2}{2 \cdot \sigma_p}\right)^2 + \sigma_1^2} \tag{15}$$

$$\sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_c^2 - \sigma_p^2}{2 \cdot \sigma_p}\right)^2 + \sigma_1^2}} \tag{16}$$

Теперь в окончательном виде напишем уравнение огибающей линии предельных кругов напряжений, выраженное через пределы прочности материала на осевое сжатие и на осевое растяжение

$$\sigma = \frac{\sigma_3 + \sigma_1 \sigma_3'}{1 + \sigma_3'}; \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{1 + \sigma_3'} \sqrt{\sigma_3'} \tag{17}$$

где:

$$\sigma_3 = \frac{\sigma^2 + \sigma p^2}{2 \cdot \sigma p} + \sqrt{\left(\frac{\sigma^2 - \sigma p^2}{2 \cdot \sigma p}\right)^2 + \sigma_1^2}; \sigma_3' = \frac{\sigma_1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma^2 - \sigma p^2}{2 \cdot \sigma p}\right)^2 + \sigma_1^2}} \quad (18)$$

В уравнение огибающей линии (17) механическое свойство материала входит в виде пределов прочности материала на осевое сжатие и на осевое растяжение. Если величины этих пределов установлены, то уравнение (18) определяет все те напряженные состояния, которые приводят к разрушению данного материала.

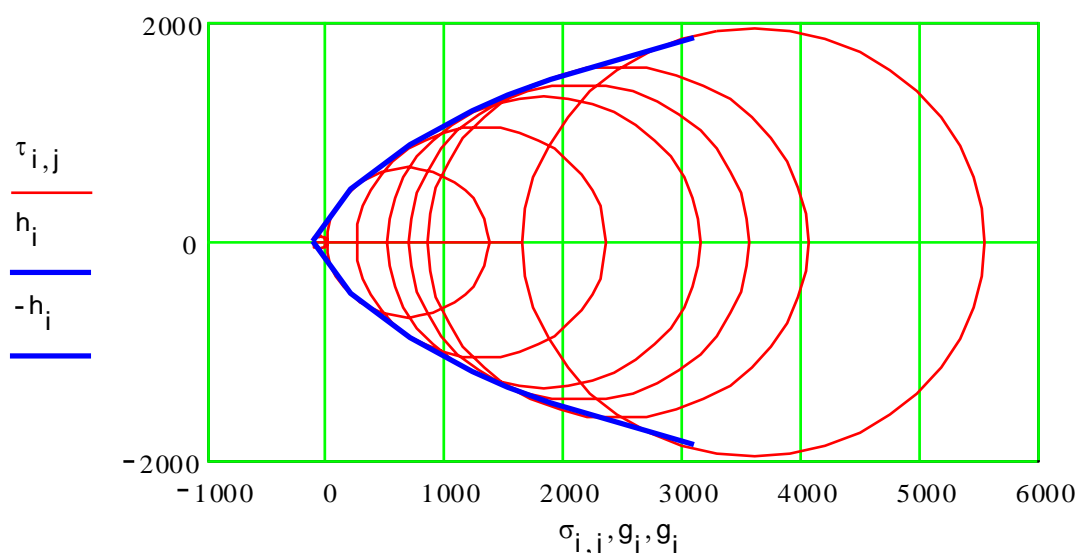


Рис. 3. Опытные круги напряжений и огибающая линия (формулы (17), (18)), построенная по величинам пределов прочности на осевое сжатие и осевое растяжение (каррарский мрамор [3])

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выведенное в [1,2] уравнение, выражающее количественное соотношение между предельными величинами наименьшего и наибольшего главных напряжений, определяет все те напряженные состояния, которые приводят к разрушению материала. По этому уравнению можно определить ориентировку тех площадок, по которым происходит разрушение, вычислить нормальное и касательное напряжения на этих площадках. Используя данное уравнение, можно построить огибающую линию предельных кругов напряжений. Выведенное уравнение содержит две константы. Предложены формулы для расчета величин этих констант. Различные представлений уравнения огибающей линии одинаковым образом определяют все разрушающие данный материал напряженные состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дуйшеналиев Т.Б.** Количественное описание теории прочности Мора // Известия Национальной академии наук КР. - №4.- 2012.- С. 47-50.
2. **Duishenaliyev, T., Duishembiev, A., Merkuryev, I., Ushanov, S.** Mathematical Description of the Bending Line of the Mohr's Limiting Stress Circles. DAAAM International Scientific Book 2021, Chapter 08, pp. 095-106.
3. **Карман Т.** Опыты на всестороннее сжатие // Новые идеи в технике. Сб. статей, 1915. №1. С.51-102.

Н.О. Игнатъев¹, К.Е. Литвиц¹, А.С. Швецов²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

БЕСПРОВОДНЫЕ ПАССИВНЫЕ ДАТЧИКИ БЫСТРОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

АННОТАЦИЯ

Датчики на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) являются перспективным типом датчиков для применения в области авиации и энергетики в связи с возможностью беспроводного контроля вибрации в нагретых объектах. В статье описывается разработанная программная модель датчика быстропеременной деформации на основе резонатора на ПАВ, генерация опрашивающего сигнала и прием отклика датчика с помощью программируемого приемно-передающего устройства, а также измерение характеристик датчика при повышенных температурах.

Ключевые слова – датчик, беспроводной датчик, датчик деформации, резонатор на ПАВ, датчик на ПАВ, программируемое приемно-передающее устройство

1. ВВЕДЕНИЕ

Система измерения быстропеременных деформаций посредством датчиков на основе резонаторов на ПАВ предназначена для беспроводного измерения быстропеременных деформаций, параметров вибрации подвижных объектов, в том числе имеющих повышенную температуру [1]. Датчик на ПАВ является полностью пассивным радиотехническим устройством, состоящим из антенны и резонатора или линии задержки на ПАВ. Он опрашивается по радиоканалу, отклик датчика формируется только за счет энергии опрашивающего сигнала и выделяется на фоне помех, благодаря свойству устройства на ПАВ сравнительно долго переизлучать сигнал.

В отличие от резистивных тензодатчиков, опрашиваемых посредством проводного соединения, система с датчиком на ПАВ позволяет измерять деформации движущихся объектов. В отличие от активного датчика, содержащего активные электронные компоненты и элементы питания, она дает возможность проводить измерения деформации при температурах более 200°C. В отличие от оптических методов измерения вибраций, такая система может работать в отсутствии прямой видимости между датчиком и опрашивающим устройством.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА ДАТЧИКА

2.1. Программная модель для расчета отклика датчика

Модель позволяет рассчитывать отклик датчика быстропеременной деформации на основе резонатора на ПАВ. Программная модель для расчета отклика датчика разработана в среде Matlab на основе метода, предполагающего представление изменяющейся во времени под действием деформации частотной характеристики датчика ступенчато изменяющейся во времени характеристикой неизменной в период времени от начала одного опрашивающего импульса до начала следующего [1], [2].

Исходными данными модели являются электрические параметры резонатора на ПАВ вблизи резонанса (задаются через параметры эквивалентной схемы); входной импеданс антенны датчика; амплитуда и частота изменения резонансной частоты резонатора на ПАВ под действием вибрации; несущая частота, период повторения и длительность опрашивающих импульсов. Результатом расчета являются зависимости от времени и спектры принятого приемником опрашивающего устройства отклика датчика до и после стробирования, а также после амплитудной и частотной демодуляции. Разработаны модификации программы, позволяющие учитывать наличие побочных резонансов и адаптивное изменение параметров опрашивающего сигнала. Модель позволяет оценить полученный отклик и подобрать оптимальные параметры опрашивающего сигнала и резонатора на ПАВ [1], [2].

2.2. Испытательный стенд

В состав испытательного стенда датчиков на ПАВ входят следующие блоки. Генератор радиочастотных сигналов, позволяющий получать гармонический сигнал в диапазоне 100...1000 МГц. Радиочастотные управляемые переключатели для формирования из гармонического сигнала радиоимпульсов и выделения из принятого сигнала отклика датчика. Генераторы импульсов для управления переключателями. Усилитель, усиливающий сигнал на 25 Дб. Антенны и планка для их закрепления на определенном расстоянии (расстояние между антенной датчика и приемной и передающей антеннами варьируется от 3 до 70 см). Камертон с резонатором на ПАВ, наклеенным близи точки с максимальной деформацией, позволяет измерять отклик датчика, находящегося под воздействием вибродеформации с известной частотой. Принятый сигнал наблюдается на осциллографе и анализаторе спектра (которые также могут быть переключены на другие точки схемы) и может приниматься приемником с амплитудной или частотной демодуляцией. Последнее имеет смысл в режиме измерения характеристик датчика под воздействием вибродеформации камертона. Демодулированный сигнал, связанный с величиной деформации посредством звуковой карты ПК, оцифровывается и может быть визуализирован и записан посредством ПК.

2.3. Экспериментальное исследование отклика датчика

Экспериментальное исследование влияния параметров опрашивающего сигнала на отклик датчика позволило верифицировать программную модель для расчета отклика датчика и показало ее применимость для решения задачи оптимизации параметров опрашивающего сигнала. Измерена постоянная времени отклика датчика и определена зависимость его амплитуды от несущей частоты опрашивающего сигнала, периода повторения, длительности и скважности опрашивающих импульсов. При испытаниях датчика обнаружено и исследовано влияние на отклик побочных резонансных пиков; в последующие версии программной модели для расчета отклика датчика внесена возможность их учета. На основе результатов экспериментов и поверенных ими расчетов предложено использование опрашивающих сигналов с несущей частотой близкой к резонансной частоте, периодом повторения импульсов, близким к удвоенной постоянной времени отклика, и скважностью 2 [2].

3. ПРОТОТИП ОПРАШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

3.1. Выбор компонентов опрашивающего устройства

В результате анализа возможностей построения опрашивающего устройства (ОУ) на базе отдельных радиоэлектронных компонент и на базе программируемого приемно-передающего устройства (ПППУ) в качестве предпочтительного был выбран вариант с использованием ПППУ [3]. Использование ПППУ в качестве основы блока опроса датчиков привлекательно возможностью легкого изменения параметров сигнала опроса, выбора методов обработки принимаемого сигнала и реализации сложных алгоритмов опроса. Более того, при розничной покупке ПППУ для построения одного экспериментального ОУ оно может даже быть дешевле, чем набор необходимых компонентов. Вариант с использованием компонент рассматривался как альтернативный на случай выявления невозможности использования доступного ПППУ для целей данной работы.

Было проведено сравнение параметров наиболее распространенных моделей ПППУ, таких как RTL-SDR, BladeRF x40, Ettus B210 и HackRF One. В итоге было выбрано HackRF One, так как все его характеристики подходили для нашей задачи, и он был как минимум в 2 раза дешевле других систем. Начальные эксперименты проводились с парой ПППУ HackRF One, одно из которых использовалось для генерации опрашивающего сигнала, другое для приема отклика датчика; также рассматривалась (но пока не была реализована) возможность использования одного HackRF One.

3.2. Тестирование опрашивающего устройства на основе ПППУ

Управление ПППУ осуществлялось посредством свободно распространяемой программной среды GNU Radio, в которой строились необходимые программы. На предварительных этапах испытаний сначала с помощью осциллографа и анализатора спектра была проверена генерация опрашивающего сигнала [2], [4], потом проверен прием тестовых сигналов: АМ-сигналов, ЧМ-сигналов, радиоимпульсов, импульсного ЧМ-сигнала и сигнала, имитирующего отклик датчика. На следующих этапах была протестирована совместная работа передающего и приемного ПППУ: проведен прием отклика датчика в отсутствие деформации (рис. 1, *а*, *б*) и тестовый опрос датчика под воздействием вибрдеформации (рис. 1, *в*).

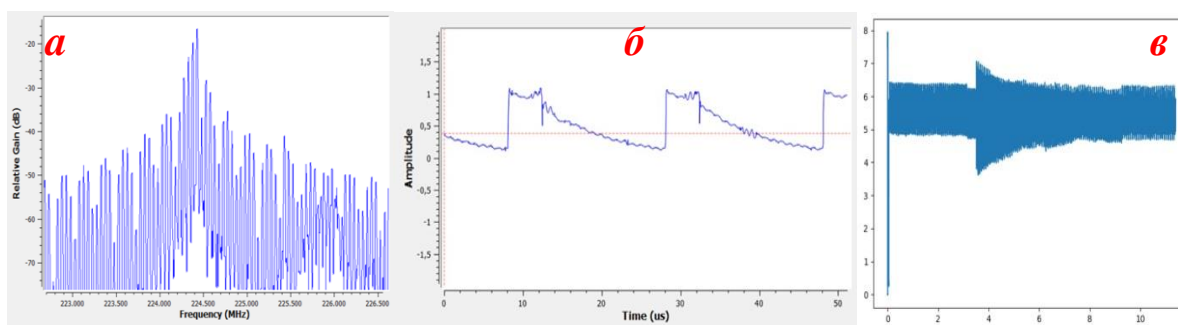


Рис. 1. Спектр (*а*) и огибающая (*б*) принятой ПППУ суммы опрашивающего сигнала и отклика датчика; демодулированный сигнал, пропорциональный деформации датчика (*в*).

На рис. 1 приведен пример характеристик принятого сигнала, отображаемых на виртуальном анализаторе спектра и осциллографах, для случая опрашивающих импульсов со

скважностью 4. Полученный спектр соответствует спектру прямоугольных радиоимпульсов со скважностью 4, несколько искаженному из-за влияния датчика, которое проявляется в асимметрии спектра вблизи его максимума.

Следующий этап испытаний ОУ заключался в приеме отклика датчика, находящегося под действием вибродеформаций при помощи опрашивающего устройства. Меняющееся с звуковой частотой от долей до единиц кГц среднее значение огибающей принятого сигнала (у которого частота следования импульсов составляет десятки кГц), выделенное посредством фильтра нижних частот связано с измеряемой датчиком деформацией. На рис. 1, в воспроизведена осциллограмма записи демодулированного данным способом сигнала длительностью около 12 с. В момент времени, соответствующий примерно 4 с., по камертону был нанесен удар, после которого наблюдались экспоненциально затухающие колебания деформации с частотой, близкой к резонансной частоте камертона. После 2 с. колебания становятся незаметны на фоне шума.

3.3. Прототип опрашивающего устройства

Для улучшения отношения сигнал/шум был произведен подбор параметров управляющей программы: амплитуды, несущей частоты, периода и скважности опрашивающих импульсов; центральной частоты, коэффициента усиления частоты дискретизации приемного ПППУ; типов и параметров элементов обработки принятого сигнала. Для прототипа опрашивающего устройства были подобраны параметры, позволившие повысить отношения сигнал/шум, а также устранить в выходном сигнале неинформативную постоянную составляющую. Пример зарегистрированной прототипом ОУ быстропеременной деформации от датчика, закрепленного на камертоне с частотой колебаний 512 Гц, приведен на рис. 2, а.

Поскольку используемый метод опроса подразумевает прием отклика датчика в промежутках между опрашивающими импульсами, потенциально ОУ может быть построено на базе единственного HackRF One, которое является полудуплексным ПППУ. В этом случае оно должно на несколько или несколько десятков микросекунд переключаться на передачу для излучения опрашивающего импульса и на время такого же порядка переключаться на прием для приема отклика датчика. На данный момент при использовании GNU Radio возможности реализовать это не нашлось.

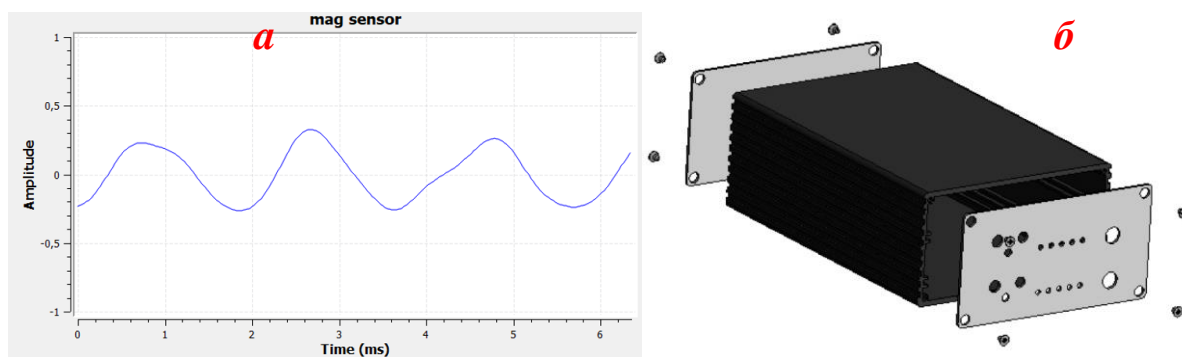


Рис. 2. Зарегистрированная посредством прототипа ОУ вибродеформация с частотой 512 Гц (а) и 3D модель корпуса прототипа ОУ (б).

Для разработанного варианта прототипа ОУ для создания физически единого устройства предлагается извлечь платы ПППУ (каждое из них выполнено на одной печатной плате) из штатных корпусов и разместить их в едином корпусе. Было произведено извлечение платы из корпуса, проведение необходимых замеров и на их основе был разработан чертеж и 3D модель (рис 2, б) корпуса прототипа ОУ, вмещающего 2 платы HackRF One. Внутренние крепления не предусмотрены, так как крепление происходит за счет внутренних направляющих и SMA разъемов для антенн и выводов синхронизации, которые привинчиваются к боковым крышкам. Сами боковые крышки крепятся к основному корпусу на винты.

4. ИСПЫТАНИЯ ДАТЧИКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

4.1. Проверка сохранения работоспособности датчика

Проверка сохранения работоспособности датчика при совместном воздействии повышенной температуры и деформации проводилась поэтапно: сначала подвергающиеся воздействию элементы конструкции (резонаторы на ПАВ, материалы для его крепления резонатора к объекту, соединительные проводники и материалы для их крепления и обеспечения электрического контакта) проверялись при воздействии отдельных факторов [5]. В результате проверки имеющихся в наличии бескорпусных резонаторов из лангасита с электродами из иридия установлено сохранение работоспособности после нагрева до 500°C и при непосредственном воздействии температуры до 350°C. Подтверждена работоспособность при воздействии деформации и вибрации при температуре до 270°C.

4.2. Выбор метода крепления и определение чувствительности к деформации при различной температуре

Для целей демонстрации предлагаемой технологии измерений в диапазоне температур до 200...250°C предлагается крепление датчика клеем «Рохіро!». Для резонаторов на подложках из лангасита теоретически [6] и экспериментально определена чувствительность к деформации при нормальных условиях и экспериментально при температуре около 50, 100, 150, 200 и 250°C. Результаты экспериментов показывают потребность в учете при измерении деформации изменяющейся с температурой чувствительности и показывают возможность производить его с помощью измерения резонансной частоты недеформированного резонатора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы предложена методика расчета отклика датчика быстропеременной деформации на основе резонатора на ПАВ, на ее основе разработана программная модель для расчета отклика датчика, с помощью которой проведена оптимизация параметров опрашивающего сигнала и определены ожидаемые характеристики ОУ. Верификация программной модели проведена посредством сравнения результатов расчета и экспериментального исследования отклика датчика. В качестве предпочтительного варианта построения ОУ была выбрана его реализация на базе пары ПППУ HackRF One. Создание заключается в первую очередь в разработке программы для управления ПППУ в выбранной для этой цели среде GNU Radio. Испытания экспериментального образца ОУ на основе разработанной начальной версии управляющей программы проде-

монстрировали работоспособность выбранных ПППУ. Для прототипа ОУ был проведен подбор параметров управляющей программы для улучшения отношения сигнал/шум и разработан чертеж единого корпуса для пары плат HackRF One. Проверена работоспособность имеющихся в наличии резонаторов на ПАВ из лангасита при температурах до 350°C (и после воздействия до 500 °C) и при температурах до 270°C с одновременным воздействием статической деформации и вибрации. Выбран способ крепления резонаторов, позволяющий измерять деформацию в диапазоне температур от 20 до 250°C и определена температурная зависимость чувствительности резонансной частоты резонаторов из лангасита к деформации в данном диапазоне температур.

При выполнении работы выявлены основные направления ее возможного дальнейшего развития: разработка ОУ с заданной дальностью/точностью измерения; разработка ОУ для одновременного опроса множества датчиков; разработка ОУ на базе одного ПППУ; отработка системы с датчиками, работающими в диапазонах частот, разрешенных для данных применений; использование отклика датчика для измерения температуры и коррекции результатов измерения деформации, учитывающей температурную зависимость чувствительности датчика; испытания датчиков при более высоких температурах, определение подходящих методов крепления; совершенствование методов измерения характеристик датчиков, определение погрешностей их измерения и поиск путей их минимизации; разработка миниатюрных антенн для датчиков

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **A.A. Merkulov, S.A. Zhgoon, A.S. Shvetsov, and N.A. Belyankin.** Properties of SAW vibration sensors applicable in the field of power engineering // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2021, pp. 1-5.

2. **A.A. Merkulov, N.O. Ignatev, A.S. Shvetsov, S.A. Zhgoon, and K.E. Lipshits.** Optimization of Interrogation Signal for SAW-resonator-based Vibration Sensor // 2022 4rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), 2022, pp. 1-6.

3. **Меркулов А.А., Белянкин Н.А., Швецов А.С.** Беспроводные пассивные датчики быстропеременной деформации // Технологии будущего: Сб. тез. докл. IV нац. научно-техн. конф. М.: Изд. ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», 2021.

4. **Игнатъев Н.О., Липшиц К.Е., Юсупов А.Р., Меркулов А.А.** Опрос беспроводного пассивного датчика на ПАВ с помощью программируемого приёмного-передающего устройства // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. тез. докл. Двадцать восьмой межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва, 2022. С. 18.

5. **Липшиц К.Е., Меркулов А.А.** Определение чувствительности к деформации резонансной частоты ПАВ-резонаторов для беспроводных пассивных датчиков // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. тез. докл. Двадцать восьмой межд. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва, 2022. С. 17.

6. **A. Shvetsov, S. Zhgoon, A. Merkulov, N. Belyankin, P.W. Mengue and O. Elmazria.** Sensitive Elements for Wirelessly Interrogated High Temperature SAW Deformation Sensors // 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2021, pp. 1-4.

А.П. Мальшев¹, А.А. Чугунов², Т.А. Бровка², И.В. Корогодин³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ НА БАЗЕ СМАРТФОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена синтезу и исследованию алгоритма комплексирования сверхширокополосной системы локальной радионавигации и датчика угловой скорости в составе смартфона. Представлены результаты моделирования и натурального эксперимента, а также аналитическая оценка точности синтезированного алгоритма фильтрации. По результатам имитационного фильтра ошибка фильтрации по планарным координатам составила 0,22 и 0,16 см соответственно, по результатам эксперимента – 0,35 и 0,36 см соответственно, аналитически – 0,28 см по обеим координатам.

Ключевые слова – Фильтр Калмана, позиционирование внутри помещений, сверхширокополосные радиосистемы

1. ВВЕДЕНИЕ

Для позиционирования внутри помещений применяют следующие технологии, различающиеся по физическому принципу и достигаемой точности измерений: системы на базе узкополосных связных сигналов стандартов Bluetooth, Wi-Fi, NFC; сигналов оптического и ультразвукового диапазона; инерциальные навигационные системы; одометрические системы; магнитометрические системы и т.д.

Разнообразие технологий, с помощью которых обеспечивается решение навигационной задачи внутри помещений, а также широкий спектр существующих и потенциальных областей применения таких навигационных систем, обуславливают предъявляемые к ним требования, однако существующие технологии в большинстве случаев не обеспечивают достаточной точности, ненадежны и подвержены помехам.

Однако из всего разнообразия систем позиционирования внутри помещений можно выделить системы на базе смартфонов. Такие системы позволяют потребителю в качестве навигационной аппаратуры использовать свой смартфон. Это сильно упрощает как разработку самой системы, так и ее промышленное внедрение за счет того, что смартфоны массово распространены. На сегодняшний день любой смартфон поддерживает основные стандарты радиопередачи: сотовая связь, Bluetooth, Wi-Fi, NFC, а с 2019 г внедрены сверхширокополосные (СШП) сигналы (стандарт IEEE 802.15.4z (2020) [1]). Этот стандарт, по сравнению с привычными узкополосными стандартами связи, был разработан с качественно новой характеристикой – он является навигационно-связным. То есть, его использование в системах позиционирования не ставится под сомнение с точки зрения физических принципов, заложенных в сигнал разработчиками. Очевидно, что внедрение такого стандарта открывает возможность построения систем позиционирования внутри помещений на базе смартфонов.

Наряду с этим, каждый современный смартфон оснащен набором нерадиотехнических датчиков, таких как акселерометры, гироскопы и магнитометры, построенные на

базе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Наличие разных по физической природе измерителей открывает возможность построения комплексных систем навигации: для коррекции измерений инерциальных датчиков можно использовать информацию о положении потребителя из радиотехнических измерителей; с другой стороны, информация от инерциальных датчиков, например, о статическом положении потребителя, может быть использована для устранения неизбежных шумовых и аномальных помеховых составляющих радиоизмерений, полученных в условиях нелинейности визирования радиосистем.

Все вышеперечисленные предпосылки позволяют поставить задачу синтеза и исследования алгоритма комплексирования сверхширокополосной системы локальной навигации (СШП ЛНС) и инерциальных датчиков, применимого для систем внутреннего позиционирования.

2. СИНТЕЗ КОМПЛЕКСНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

2.1. Постановка задачи

Имеется потребитель, позиционирующийся внутри помещения с помощью локальной навигационной системы, включающий в себя сверхширокополосный радиомодуль, координаты которого требуется определять, датчик угловых скоростей (оба измерителя встроены в смартфон потребителя) и система опорных приемо-передающих СШП маяков, размещенных по периметру помещения.

Необходимо синтезировать алгоритм комплексной обработки радио- и инерциальных измерений – комплексный фильтр Калмана. Далее необходимо оценить работоспособность синтезированного фильтра путем сравнения предельных ошибок фильтрации, полученных из оценок матрицы дисперсий ошибок, определенных в имитационном моделировании и экспериментально и рассчитанных аналитически путем решения уравнения Рикатти.

2.2. Синтез комплексного фильтра

Структурная схема синтезируемого фильтра представлена на рисунке 1.

Такой вариант комплексирования можно отнести к так называемым слабосвязанным схемам, так как приемопередатчик СШП ЛНС и датчик угловых скоростей вырабатывают независимые оценки вектора состояния, при этом между ними есть связующий блок – расширенный фильтр Калмана, который формируем комплексную оценку вектора состояния [2].

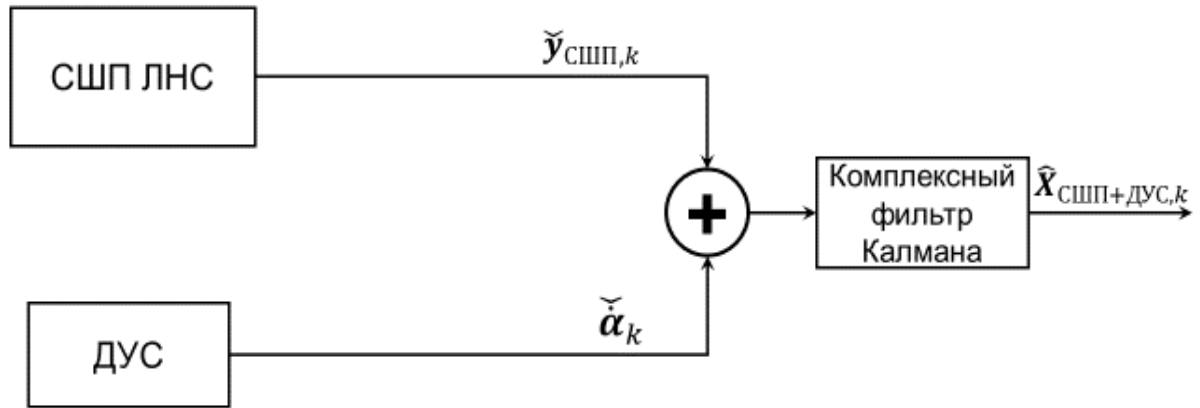


Рис. 1. Структурная схема синтезируемого комплексного фильтра: $\check{\alpha}_k$ - измерения скорости угла курса, поступающий с ДУС; $\check{y}_{\text{СШП},k}$ - измерения координат, поступающие из СШП ЛНС; $\hat{X}_{\text{СШП+ДУС},k}$ - оценка вектора состояния на выходе фильтра Калмана.

При синтезе комплексного алгоритма на основе фильтра Калмана наблюдениями являются радиоизмерения сверхширокополосной локальной навигационной системы и измерения датчика угловых скоростей в моменты времени t_k :

$$y_k = \begin{bmatrix} x_k & y_k & \dot{\alpha}_k \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

В вектор состояния включим координаты потребителя, модуль вектора скорости потребителя, угол курса и скорость его изменения:

$$x_k = \begin{bmatrix} x_k & y_k & V_k & \alpha_k & \dot{\alpha}_k \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

где x_k, y_k - координаты потребителя; V_k - модуль вектора скорости потребителя; $\alpha_k, \dot{\alpha}_k$ - угол курса и его производная.

Опишем модель динамики потребителя:

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + V_{k-1} \cdot \cos \alpha_{k-1} T \\ y_k &= y_{k-1} + V_{k-1} \cdot \sin \alpha_{k-1} T \\ V_k &= V_{k-1} + \xi_{k-1} T \\ \alpha_k &= \alpha_{k-1} + \dot{\alpha}_{k-1} T \\ \dot{\alpha}_k &= \dot{\alpha}_{k-1} + \zeta_{k-1} T \end{aligned} \quad (3)$$

где ξ_{k-1} - дискретный белый гауссовский шум с дисперсией σ_ξ^2 ; ζ_{k-1} - дискретный белый гауссовский шум с дисперсией σ_ζ^2 .

В дискретном времени динамическая модель расширенного фильтра Калмана для вектора состояния (1) является известной для моделей динамики объекта [2].

Данный алгоритм реализует комплексную обработку измерений СШП радиомодуля смартфона и измерений датчика угловых скоростей смартфона в составе навигационной системы для позиционирования потребителя внутри помещений.

3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОШИБОК ФИЛЬТРАЦИИ

3.1. Постановка задачи

Постановка задачи оценки точности фильтрации сводится к нахождению матрицы дисперсий ошибок оценок фильтрации \mathbf{D} [3, 4].

Изменение матрицы $\mathbf{D}(t)$ во времени описывается матричным нелинейным дифференциальным уравнением Рикатти:

$$\frac{d\mathbf{D}}{dt} = \mathbf{F}(t)\mathbf{D}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{F}^T(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{D}_\xi(t)\mathbf{G}^T(t) - \mathbf{D}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{D}_n(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{D}(t), \quad (4)$$

где $\mathbf{D}(t)$ – матрица дисперсий ошибок фильтрации, $\mathbf{F}(t)$ – функция, описывающая изменение вектора состояния во времени, $\mathbf{H}(t)$ – матрица наблюдений, $\mathbf{G}(t)$ – матрица формирующих шумов, $\mathbf{D}_\xi(t)$ – матрица дисперсий формирующих шумов, $\mathbf{D}_n(t)$ – матрица дисперсий шумов наблюдений.

3.2. Решение уравнения Рикатти

Для решения уравнения Рикатти необходимо:

1. Описать модель динамики потребителя в непрерывном времени и определить необходимые матрицы также в непрерывном времени;
2. Учесть нелинейность фильтра в $\mathbf{F}(t)$;
3. В связи с тем, что фильтруемые процессы и формирующие шумы являются стационарными случайными процессами, то дисперсии ошибок фильтрации достаточно

определить в установившемся режиме, то есть при $\frac{d\mathbf{D}}{dt} = 0$.

В результате матричное нелинейное дифференциальное уравнение Рикатти преобразовано в матричное алгебраическое уравнение вида:

$$\frac{\partial f(\mathbf{x}(t))}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{D}(t) + \mathbf{D}(t) \frac{\partial f(\mathbf{x}(t))}{\partial \mathbf{x}}^T + \mathbf{G}(t)\mathbf{D}_\xi(t)\mathbf{G}^T(t) - \mathbf{D}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{D}_n(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{D}(t) = 0 \quad (5)$$

Решением уравнения (5) являются параметрические выражения, соответствующие оцениваемым фильтром элементам вектора состояния. Параметром является угол курса $\alpha_{уст}$ в установившемся режиме. Эти выражения были найдены, но ввиду громоздкости, опущены в данном разделе. Однако, численные результаты, полученные на основе этих выражений приведены в п. 4.2.

4. СРАВНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОШИБОК ФИЛЬТРАЦИИ

4.1. Имитационное моделирование

Для проверки работоспособности и эффективности синтезированного фильтра была смоделирована траектория движения потребителя, представленная на рисунке 2. Синим обозначена истинная (референсная) траектория, а черным – смоделированные измерения координат, полученные от СШП ЛНС.

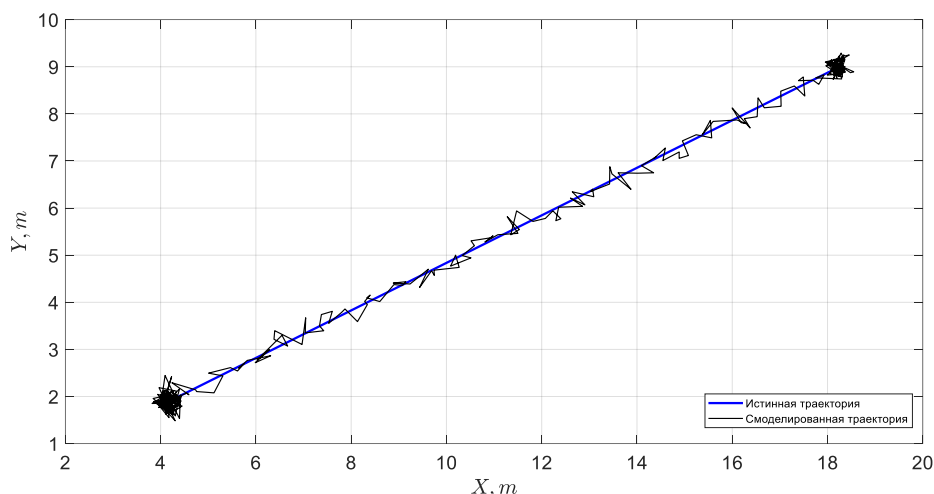


Рис. 2. Модель траектории движения потребителя: траектория длиной 15,7 м состоит из трех участков: первый участок длительностью 11,9 с, является режимом статики; второй участок длительностью 11,9 с представляет собой прямолинейное равномерное движение со средней скоростью 1,3 м/с; третий участок длительностью 6,1 с, также, как и первый, отражает режим статики.

Так как навигационная задача поставлена для случая перемещения потребителя в определенном помещении, все расчеты координат будут производиться в локальной системе координат, связанной с СШП ЛНС.

При моделировании будем считать, что потребитель изначально смотрел в направлении своего движения и угол курса не изменялся по ходу его движения и пребывания в режимах статики. Это необходимо для сравнения предельных ошибок фильтрации, полученных в результате моделирования и с помощью аналитических параметрических выражений для дисперсий. Также известными являются углы крена и тангажа (телефон сориентирован параллельно плоскости земли).

Для объективного сравнения результатов имитационного моделирования и экспериментального исследования алгоритма потребитель двигался по аналогичной смоделированной траектории.

В соответствии с постановкой задачи и с условиями имитационного моделирования все оценки элементов вектора состояния будут производиться в локальной системе координат, связанной с СШП ЛНС.

При проведении эксперимента изначально ориентируем смартфон потребителя параллельно плоскости пола и по углу курса, который не меняется по ходу его движения и пребывания в режимах статики. Это необходимо для сравнения экспериментальных предельных ошибок фильтрации с ошибками, полученными в результате имитационного моделирования и с помощью аналитических параметрических выражений для дисперсий.

При обработке экспериментальных измерений используются те же значения СКО шумов наблюдения и формирующих шумов, что использовались при моделировании синтезированного фильтра.

4.2. Результаты

Результатом данного исследования стали значения предельных ошибок фильтрации элементов вектора состояния по уровню 3σ , полученные путем имитационного модели-

рования, из экспериментальных данных и вычисленных с помощью аналитических выражений. Численные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценки предельных ошибок фильтрации

Оценка предельной ошибки фильтрации	X, м	Y, м	V, м/с	α
Полученная аналитически	0,28	0,28	0,5	16,6
Полученная из матрицы дисперсий фильтра при имитационном моделировании	0,22	0,16	0,3	2,0
Полученная экспериментально	0,35	0,36	0,6	9,2

По данным из таблицы 1 можно сделать вывод, что в пределах погрешностей, соизмеримых с заданными значениями СКО формирующих шумов и СКО шумов наблюдения, все рассмотренные предельные ошибки фильтрации одинаковы на всех этапах проверки синтезированного фильтра. Таким образом, синтезированный комплексный фильтр Калмана применим и эффективен в планарной задаче позиционирования потребителя с помощью ЛНС на базе смартфонов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования было выявлено полное соответствие в пределах погрешности между теоретически рассчитанными оценками предельных ошибок фильтрации и оценками предельных ошибок фильтрации, полученными из матриц дисперсий ошибок в имитационной модели и по экспериментальным измерениям.

Научно-практическая ценность данного исследования заключается в подтверждении эффективности синтезированного комплексного алгоритма и его применимости для реальных задач навигации внутри помещений.

Новизна результатов заключается: а) в новом синтезированном алгоритме обработки измерений; б) в применении данного алгоритма в перспективных комплексных системах навигации на базе смартфонов, в составе которых есть сверхширокополосный приемопередатчик, поскольку такие датчики сейчас внедряются во все флагманские устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **IEEE Std. 802.15.4-2020**, IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
2. **ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/** под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. 800 с., ил.
3. **Перов А.И.** Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. - 398 с.
4. **Первачев С.В.** Радиоавтоматика: учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982, 296 с.

Е.Е. Козлова¹, К.Ю. Ванин¹, Л.А. Цырульникова², А.Р. Сафин³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ «АНТИФЕРРОМАГНЕТИК – ТЯЖЕЛЫЙ МЕТАЛЛ»

АННОТАЦИЯ

Исследовано две модели детекторов терагерцевых электромагнитных волн, построенных на основе гетероструктуры «антиферромагнетик – тяжелый металл», работающих в пассивном и активном (автоколебательном) режимах. Показано, что зависимость выпрямленного напряжения от частоты внешней электромагнитной волны носит резонансный характер с пиком, соответствующим частоте антиферромагнитного резонанса. Показано, что с ростом величины напряженности постоянного магнитного поля уровень выпрямленного напряжения растет.

Ключевые слова – спиновый эффект Холла, антиферромагнетик, резонансное выпрямление, перестройка частоты, спинтроника

1. ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевое (ТГц) излучение представляет собой электромагнитную волну с частотами от 300 ГГц до 3 ТГц. За последние годы потребность в освоении этого частотного диапазона возросла [1-3]. ТГц излучение не является ионизирующим, поэтому оно может широко применяться в медицине и устройствах безопасности, спектроскопии веществ и в астрономии [4,5]. В настоящее время существуют заметные трудности с разработкой компактных и перестраиваемых по частоте генераторов и детекторов ТГц излучения, работающих при комнатных температурах [5,6]. Перспективными материалами для использования в ТГц технологиях являются антиферромагнетики (АФМ), резонансные частоты которых лежат в широких пределах от единиц гигагерц (ГГц) до десятков ТГц [4,6].

В настоящей работе исследованы две модели детекторов ТГц электромагнитных волн, построенных на основе АФМ и тяжелого металла (ТМ), работающих в пассивном и активном (автоколебательном) режимах.

2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАССИВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Физическая структура перестраиваемого по частоте детектора ТГц колебаний на основе массива гетеропереходов АФМ-ТМ представлена на рис. 1. Гетероструктура ориентирована параллельно как постоянному магнитному полю $\mathbf{H}_0 = H_0 \mathbf{z}$, так и направлению распространения регистрируемой ТГц волны. Магнитная компонента переменного электромагнитного поля имеет линейную поляризацию $\mathbf{h}_{AC} = h_{AC} (\cos \alpha_p \mathbf{x} + \sin \alpha_p \mathbf{y}) \cdot e^{i\omega t}$ и ориентирована в плоскости образца, перпендикулярно легкой оси \mathbf{z} , где α_p - угол поляризации в плоскости, h_{AC} и ω - амплитуда и частота переменного магнитного поля, соответственно. Переменное ТГц излучение, падающее на гетероструктуру со стороны прозрачной для ТГц подложки, индуцирует крутящий момент, который действует на магнитные

подрешетки $M_{1,2}$ массива АФМ и вызывает прецессию вектора Нееля $\mathbf{l} = (\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2) / 2M_s$ вблизи легкой оси анизотропии. Благодаря механизму спиновой накачки в массиве АФМ возникает спиновый ток, который конвертируется в электрический ток в слое ТМ. За счет обратного спинового эффекта Холла возникновение спинового тока в ТМ приводит к ненулевой разности потенциалов V_{out} на выходных электродах (рис. 1). Использование массива АФМ в гетероструктуре позволяет суммировать в общей шине платины вклады постоянных токов от каждого элемента, повышая уровень выпрямленного напряжения. Перестройка частоты АФМ резонанса осуществляется постоянным магнитным полем. Математическая модель, описывающая динамику намагниченности вектора Нееля $\mathbf{l}(t)$ в АФМ, имеет вид [7-9]:

$$\mathbf{l} \times \left(\frac{d^2 \mathbf{l}}{dt^2} + \gamma_{eff} \frac{d\mathbf{l}}{dt} + \hat{\Omega} \cdot \mathbf{l} \right) = \left[\mathbf{l} \times \gamma \frac{d\mathbf{h}_{AC}}{dt} \right] \times \mathbf{l} - (\mathbf{l} \cdot \gamma \mathbf{H}_0) [\mathbf{l} \times \gamma \mathbf{H}_0] - 2(\mathbf{l} \cdot \gamma \mathbf{H}_0) \frac{d\mathbf{l}}{dt}, \quad (1)$$

где $\gamma_{eff} = \alpha_{eff} \omega_{ex}$ - ширина спектральной линии АФМ резонанса при нулевом магнитном поле H_0 [9], α_{eff} - эффективное затухание, включающее вклады от затухания Гильберта и спиновой накачки, $\hat{\Omega} = -\omega_{ex} \omega_A \mathbf{z} \otimes \mathbf{z}$ - матрица анизотропии.

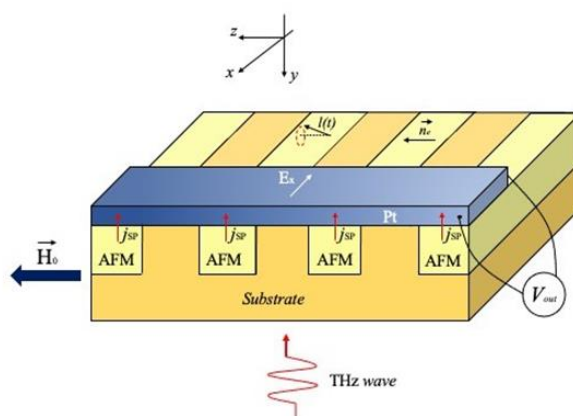


Рис. 1. Структурная схема детектора ТГц колебаний, выполненного на основе гребенчатой структуры, содержащей массив антиферромагнетиков (АФМ), выращенных на подложке (Substrate), прозрачной для ТГц излучения, и имеющих общую шину тяжёлого металла.

Получено выражение для расчета выходного выпрямленного напряжения на контактах ТМ:

$$V_{out}(\omega) = N \cdot \kappa \left\langle s_x \frac{ds_y}{dt} - s_y \frac{ds_x}{dt} \right\rangle = \frac{4N\kappa\omega^4 (\omega_0^2 - \omega^2) \omega_{DC}}{|D(\omega)|^2} \omega_{AC}^2, \quad (2)$$

где $\kappa = \frac{L\theta_{SH} e \lambda_{Pt} \rho}{d_{Pt} \hbar} \tanh\left(\frac{d_{Pt}}{2\lambda_{Pt}}\right) \cdot \frac{\hbar g_r}{2\pi}$.

На рис. 2 показана зависимость выходного напряжения детектора при резонансе для АФМ от частоты ω для различных значений внешнего магнитного поля H_0 для верхней ветви резонансной кривой. В численных расчетах предполагается, что слой АФМ представляет собой MnF_2 , а ТМ Pt и из [9] $\alpha_{eff} = 0.5 \cdot 10^{-3}$, $\theta_{SH} = 0.08$, $\lambda_{Pt} = 1.4$ нм, $d_{Pt} = 5$ нм,

$\rho = 2.5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, $g_r = 2.86 \cdot 10^{18}$ м⁻². Как видно из рис. 2, резонансное напряжение увеличивается с увеличением магнитного поля, также с увеличением магнитного поля происходит перестройка рабочей частоты детектора в сторону больших частот.

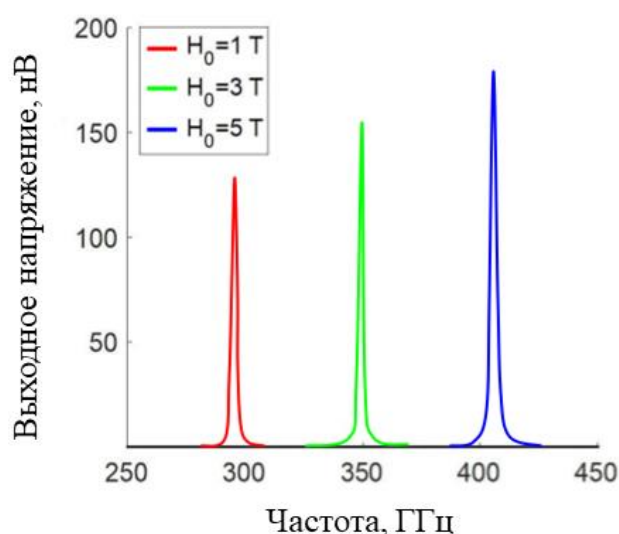


Рис. 2. Зависимость выпрямленного напряжения верхней моды от частоты внешней электромагнитной волны для трех значений внешнего постоянного магнитного поля.

3. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ КОЛЕБАНИЙ В АКТИВНОМ РЕЖИМЕ

Под действием постоянного электрического тока, протекающего через слой тяжелого металла, возникают спиновый эффект Холла в АФМ и неоднородная прецессия намагниченности подрешёток в базовой плоскости анизотропии на резонансной частоте. В свою очередь изменение намагниченностей подрешеток АФМ ведет к спиновой накачке из АФМ в слой тяжелого металла, в котором происходит обратный процесс преобразования переменного спинового тока в электрический, благодаря обратному спиновому эффекту Холла. В результате этого возникает переменный электрический ток, частота колебаний которого зависит от амплитуды управляющего постоянного тока. Если управляющий ток задать медленно меняющимся относительно возникающих колебаний пилообразным импульсом, то по мере увеличения уровня управляющего тока будет увеличиваться частота возникающих автоколебаний. В момент времени, когда частота анализируемого сигнала попадает в полосу синхронизма АФМ осциллятора, происходит захват этой частоты.

Осциллятор на основе гетероструктуры «АФМ – тяжелый металл» описывается следующим уравнением нелинейного маятника, следующим из уравнения (1) для полярного угла вектора Нееля в легкой плоскости:

$$\ddot{\varphi} + \alpha \omega_{ex} \dot{\varphi} + 0.5 \omega_e \omega_{ex} \sin 2\varphi = \sigma \omega_{ex} \left(J_{dr}(t) + \sum_{i=1} J_{ac_i} \sin(\omega_i t) \right). \quad (3)$$

Здесь $\omega_{ex} = 2\pi \cdot 27.5$ ТГц – обменная частота; $\omega_e = \gamma H_e = 2\pi \cdot 1.75$ ТГц – частота легкой плоскости; $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-3}$ – параметр затухания Гильберта; $\sigma = 2\pi \cdot 4.32 \cdot 10^{-4}$ (Гц·м²)/А – коэффициент спинового переноса. Анализируемый сигнал представлен суммой гармоник,

где j_{ac_i} – амплитуда i -ой гармоники, а ω_i – частота i -ой гармоники. $J_{dr}(t)$ – плотность управляющего тока, которая задается следующим выражением:

$$J_{dr}(t) = J_0 + \varepsilon \cdot (t - T_1) \cdot (1(t - T_1) - 1(t - T_2)), \quad (4)$$

где T_1, T_2 – время начала и окончания действия пилообразного тока; $1(t)$ – функция Хэвисайда; $\varepsilon = \Delta J / \Delta T$ – крутизна пилообразного сигнала, $A / (m^2 \cdot c)$; $\Delta J = J_{max} - J_0$ – интервал изменения плотности тока, A/m^2 ; $\Delta T = T_2 - T_1$ – длительность пилообразного импульса.

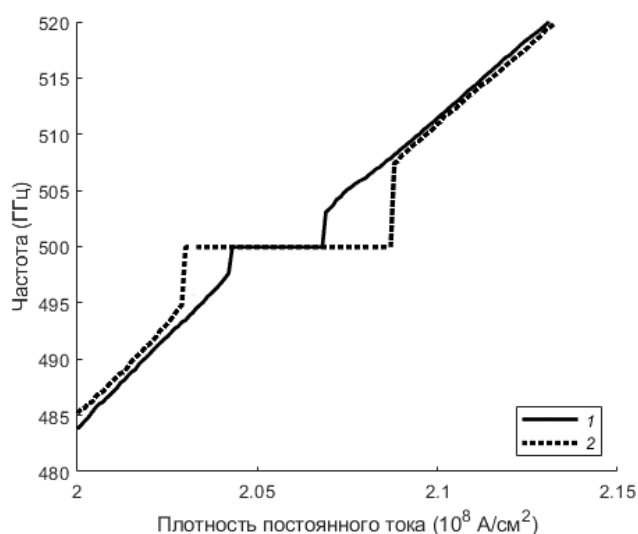


Рис. 3. Зависимость частоты возбуждаемых автоколебаний АФМ осциллятора в составе спектроанализатора от плотности постоянного тока для двух значений амплитуды анализируемого сигнала. 1 – анализируемый сигнал представлен гармоническим колебанием с частотой 500 ГГц и амплитудой $0.1 \cdot 10^8 A/cm^2$. 2 – анализируемый сигнал представлен гармоническим колебанием с частотой 500 ГГц и амплитудой $0.2 \cdot 10^8 A/cm^2$.

На рис. 3 приведена зависимость частоты возбуждаемых автоколебаний от амплитуды управляющего тока, полученная в результате численного моделирования. Анализируемый сигнал представлен гармоническим сигналом с частотой 500 ГГц, при этом кривая 1 демонстрирует полученную зависимость при амплитуде анализируемого сигнала равной $0.1 \cdot 10^8 A/cm^2$, а кривая 2 зависимость при амплитуде анализируемого сигнала равной $0.2 \cdot 10^8 A/cm^2$. Таким образом, ширина зоны синхронизации увеличивается с увеличением амплитуды входного сигнала.

При проведении численного моделирования гармоники анализируемого сигнала были разнесены на относительно большое расстояние в 100 ГГц, поэтому их взаимное влияние не проявлялось. На практике же важно определить разрешающую способность спинтронного осциллятора в активном режиме, работающего как спектроанализатор. Разрешающая способность АФМ осциллятора может быть описана следующим выражением:

$$\Delta\omega = \frac{4\gamma k_B T}{\alpha M_s V_{AFM}}. \quad (5)$$

Здесь V_{AFM} – объем АФМ, k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура АФМ осциллятора, γ – гиромагнитное отношение, M_s – намагниченность насыщения. Для АФМ осциллятора при комнатной температуре и линейных размерах в 10 мкм рассчитанная полоса $\Delta\omega / (2\pi)$ равна 0.36 МГц, а добротность приблизительно равна $3 \cdot 10^6$.

Для исследования работы детектора было проведено численное моделирование. Длительность пилообразного управляющего импульса составляла 20 мкс, плотность тока нарастала от $1.9 \cdot 10^8$ А/см² до $2.7 \cdot 10^8$ А/см². Анализируемый сигнал задан суммой двух гармонических составляющих с частотами 500 и 600 ГГц, при этом амплитуда первой гармоники равна $0.1 \cdot 10^8$ А/см², а амплитуда второй $0.2 \cdot 10^8$ А/см². На рис. 4 представлена полученная зависимость частоты возникающих автоколебаний от времени, а также приведен спектр анализируемого сигнала. В некоторой полосе наблюдался захват внешней частоты АФМ осциллятором – на рис. 3 это интервал времени, на котором частота автоколебаний постоянна.

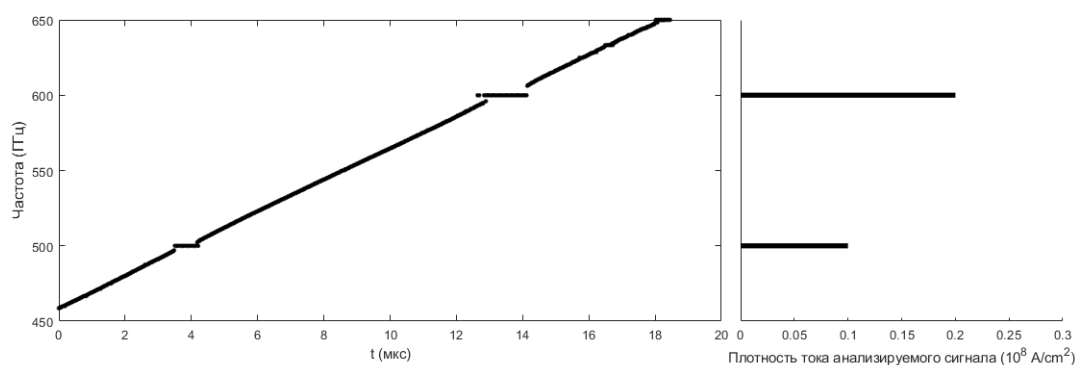


Рис.4. Зависимость частоты возбуждаемых автоколебаний АФМ осциллятора в составе спектроанализатора от времени, полученная в результате численного моделирования. Анализируемый сигнал представлен суммой гармонических колебаний с частотами 500 и 600 ГГц, спектр которого приведен справа. Амплитуда первой гармоники равна $0.1 \cdot 10^8$ А/см², амплитуда второй $0.2 \cdot 10^8$ А/см². Собственная частота автоколебаний АФМ осциллятора перестраивается во времени пилообразным импульсом тока длительностью 20 мкс с крутизной равной $4 \cdot 10^{12}$ А/(см²·с).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследована теория резонансного детектирования ТГц сигналов с помощью гетероструктуры «антиферромагнетик – тяжелый металл» в пассивном и активном режимах. Показано, что зависимость постоянного напряжения детектора от частоты носит резонансный характер с пиком, соответствующим частоте антиферромагнитного резонанса. Чувствительность к переменному ТГц сигналу предложенной структуры детектора сравнима с чувствительностью современных детекторов. Перестройку рабочей частоты детектора можно осуществлять с помощью постоянного магнитного поля. Зависимость выпрямленного напряжения от частоты внешней электромагнитной волны для различных значений постоянного магнитного поля носит резонансный характер с пиком, соответствующим частоте антиферромагнитного резонанса, причем увеличение постоянного магнитного поля ведет к росту величины резонансного пика. Для активного

автоколебательного режима рассчитана полоса синхронизации от величины амплитуды внешнего воздействия.

Работа выполнена в рамках проекта ”Разработка устройств формирования, приема и обработки сигналов, выполненных на основе магнитных наноструктур“ при поддержке гранта НИУ ”МЭИ“ на реализацию программ научных исследований ”Энергетика“, ”Электроника, радиотехника и ИТ“ и ”Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника“ в 2020–2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sirtori C.** Bridge for the terahertz gap // *Nature*. 2002. No. 417. P. 132–133.
2. **Kleiner R.** Filling the terahertz gap // *Science*. 2007. No. 318. P. 1254–1255.
3. **Generation** of terahertz waves by a current in magnetic junctions / Gulyaev Y. V., Zilberman P. E., Mikhailov G. M., and Chigarev S. G. // *JETP Lett.* 2014. No. 98. P. 742–752.
4. **THz** detectors / Sizov F., Rogalski A. // *Progress in quantum electronics*. 2010. No. 34. P. 278–347.
5. **Antiferromagnetic** spintronics / Baltz V., Manchon A., Tsoi M., et al // *Rev. of Mod. Phys.* 2018. No. 90. P. 015005.
6. **Materials** for terahertz science and technology / Ferguson B., Zhang X.-C. // *Nature materials*. 2002. No.1. P. 26–33.
7. **Zvezdin A. K.** Dynamics of domain walls in weak ferromagnets // *ZhETF Pisma v Redaktsiiu*. 1979. No. 29. P. 605.
8. **Electrically** tunable detector of THz-frequency signals based on an antiferromagnet / Safin A., Puliafito V., Carpentieri M., et al // *Appl. Phys. Lett.* 2020. No. 117. P. 222411.
9. **Subterahertz** spin pumping from an insulating antiferromagnet / Vaidya P., Morley S., van Tol J., et al // *Science*. 2020. No. 368. P. 160–165.

Секция 7

Технологии создания конструкций нового поколения

Руководитель –
к.т.н. **П.Ю. Петров**

*Е.К. Титарев*¹, *А.В. Нехорошев*², *А.Л. Гончаров*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты, полученные при разработке мощной электронно-лучевой пушки с ускоряющим напряжением 120 кВ и классом мощности до 120 кВт. Разработаны математические модели для исследования основных режимов работы, разработана методика верификации математических моделей. На основе математической модели проведена оптимизация геометрических параметров ускоряющего промежутка. Проведён расчёт изолятора на электрическую прочность. Проработана конструкция электронной пушки и составлена её твердотельная модель. По результатам исследования математических моделей разработана имитационная модель работы электронной пушки.

Ключевые слова – электронно-лучевая пушка, оптимизация конструкции, имитационная модель, верификация модели

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в промышленности возрастает потребность сварки современных сплавов на основе никеля и титана толщиной более 250 мм. Подавляющее большинство отечественных энергетических комплексов большой мощности для ЭЭС разрабатывались на класс напряжения 60 кВ. Высоковольтные технологические электронные пушки с напряжением 150 кВ предназначены для реализации технологий прецизионной сварки изделий малой толщины, поэтому имеют невысокие показатели мощности [1-3]. Вместе с тем технологические задачи по сварке изделий большой толщины могут с успехом решаться с применением высоковольтных электронных пушек большой мощности, поэтому целью данной работы является разработка мощной электронно-лучевой сварочной пушки мощностью 120 кВт с ускоряющим напряжением 120 кВ (далее 120/120). Дальнейшее внедрение такого оборудования в промышленное производство должно качественно улучшить технологические возможности существующих и создаваемых в РФ наукоёмких производственных мощностей, а также технические, экономические и эксплуатационные характеристики выпускаемых на данных мощностях изделий в сравнении с выпускаемыми в настоящее время с применением традиционных электронных пушек класса 60 кВ отечественного и зарубежного производства.

2. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ 120кВ/120кВт

2.1. Математические модели

На протяжении всей работы были разработаны следующие модели. Для проведения электростатических расчётов и траекторного анализа в области ускоряющего промежутка были созданы модели трёхэлектродной области для электронной пушки ЭЛА-15 и пушки 120/120. Для проверки электрической прочности изолятора был смоделирован катодный узел пушки 120/120, в результате чего для снижения напряжённости электростатического

поля был добавлен электрод тарельчатого вида. Для оценки работы фокусирующей и магнитной систем была разработана модель, включающая в себя непосредственно фокусирующую и отклоняющую линзы и ускоряющий промежуток. Для оценки работы динамической фокусировки была разработана модель, включающая в себя динамическую линзу и источник электронов, имитирующий работу ускоряющего промежутка.

Для оценки теплового состояния элементов конструкции пушки была разработана тепловая модель, учитывающая нагрев катода электронной бомбардировкой от подогревателя, а также перераспределение тепловых потоков за счёт излучения в высокотемпературной области катода. На основании этой модели были рассчитаны расстояния в катодном узле между электродами с учётом теплового расширения деталей. Рассчитанные поправки на “горячие” были учтены в электростатической модели, что позволило более точно построить вольт-амперную характеристику разрабатываемой пушки.

2.2. Верификация математических моделей

Для подтверждения корректности моделирования было необходимо разработать модель электронной пушки, которая бы давала результаты, идентичные результатам реально существующей пушки. Корректность оценивалась по двум параметрам: для оценки энергетической составляющей работы электростатической линзы - вольт-амперная характеристика (ВАХ), а для оценки фокусирующей способности - радиус кроссовера.

Натурные эксперименты проводились на пушке ЭЛА-15. Для регистрации вольт-амперной характеристики с участком насыщения эксперимент проводили на недогретом катоде. При этом ток пучка был ограничен максимальным значением 35 мА. При таких параметрах подогрева источник накала работает с минимальными колебаниями.

На вольт-амперной характеристике выявляется два участка (рисунок 1). На начальном участке при возрастании напряжения смещения не наблюдается изменения тока пучка, его значение ограничено плотностью тока термоэлектронной эмиссии при данной температуре, а токоотбор производится со всей поверхности катода. При увеличении напряжения смещения более 1800 В наблюдается переход к режиму ограничения тока потенциалом управляющего электрода, при этом чем выше напряжение смещения, тем с меньшей площади производится токоотбор, тем меньше значение тока. При напряжениях около 3200 В наблюдается полное запирающее действие пушки как в эксперименте, так и при математическом моделировании.

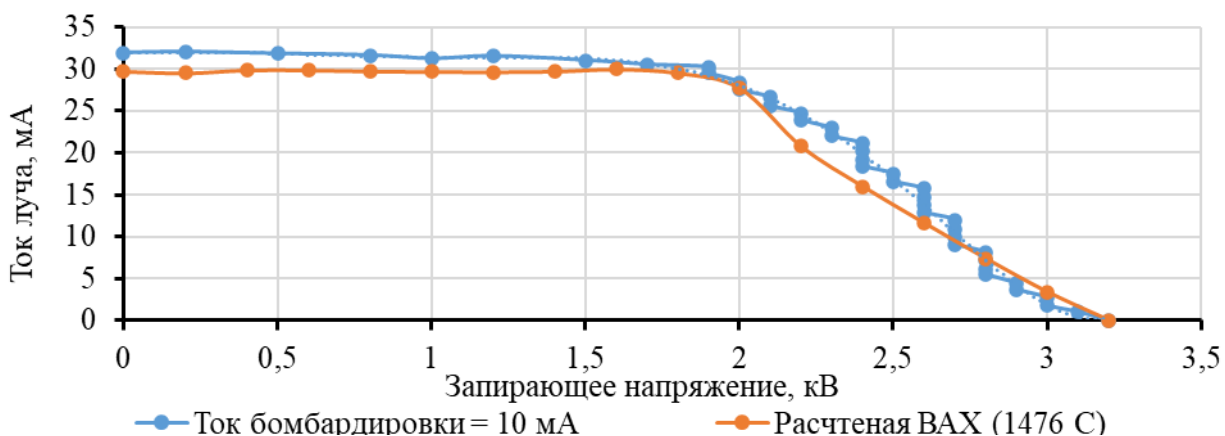


Рис. 1. Расчетная и экспериментальная вольт-амперная характеристика для тока бомбардировки 10 мА

Оценку фокусирующей способности электростатической линзы и параметров получаемого пучка в ее области производили по параметрам пучка в области дрейфа. Для оценки параметров технологического электронного пучка в области дрейфа предлагается использовать косвенный контактный метод диагностики, основанный на регистрации светового излучения из области транспортировки с помощью фотокамеры и последующей обработки изображения [4]. После измерения радиуса сфокусированного электронного пучка r_b радиус кроссовера r_c может быть оценён через масштаб магнитной линзы M по соотношению:

$$r_c = \frac{r_b}{M}. \quad (1)$$

Учитывая линейность оптической системы, масштаб линзы равняется отношению расстояния от плоскости кроссовера до плоскости линзы к расстоянию от плоскости линзы до плоскости фокусировки электронного пучка [5].

На основании экспериментальных данных радиус кроссовера равняется 0.243 мм. После проведения траекторного анализа математической модели радиус кроссовера в ЭЛА-15 был равен 0.235 мм.

2.3. Оптимизация геометрических параметров электростатической линзы

Далее проводилась оптимизация геометрических параметров разрабатываемой пушки для получения требуемых энергетических параметров электронного пучка и работы ускоряющего промежутка без пробоев. Оптимизация проводилась на основе расчётов электростатического поля. Если при анализе полученных результатов обнаруживались места со значениями напряженности электростатического поля, выходящими за допустимые пределы, то именно в их области изменялась геометрия. Главной целью данной оптимизации являлось сокращение расстояния катод-анод, которое неизбежно увеличивается и при увеличении ускоряющего напряжения. Таким образом была получена твердотельная модель ускоряющего промежутка по схеме “сфера в сфере” (рис. 2). Для оптимизированной геометрии рассчитывались ВАХ и прочие характеристики пучка.

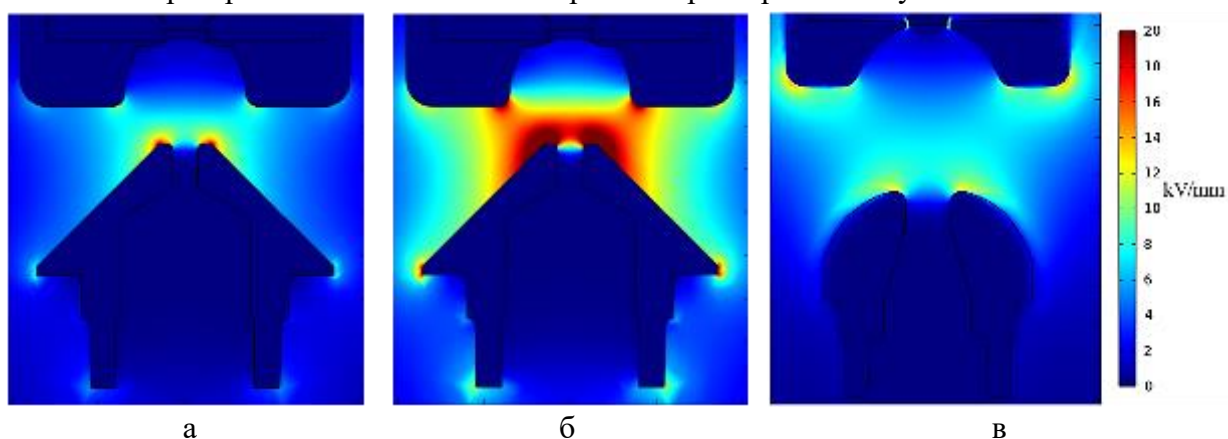
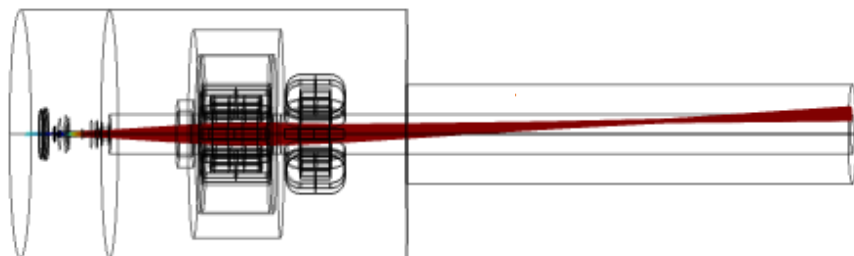


Рис. 2. Распределение напряженности электростатического поля для оригинальной конструкции пушки ЭЛА-15 с ускоряющим напряжением 60 кВ (а) и с 120 кВ (б) и оптимизированной конструкции (в)

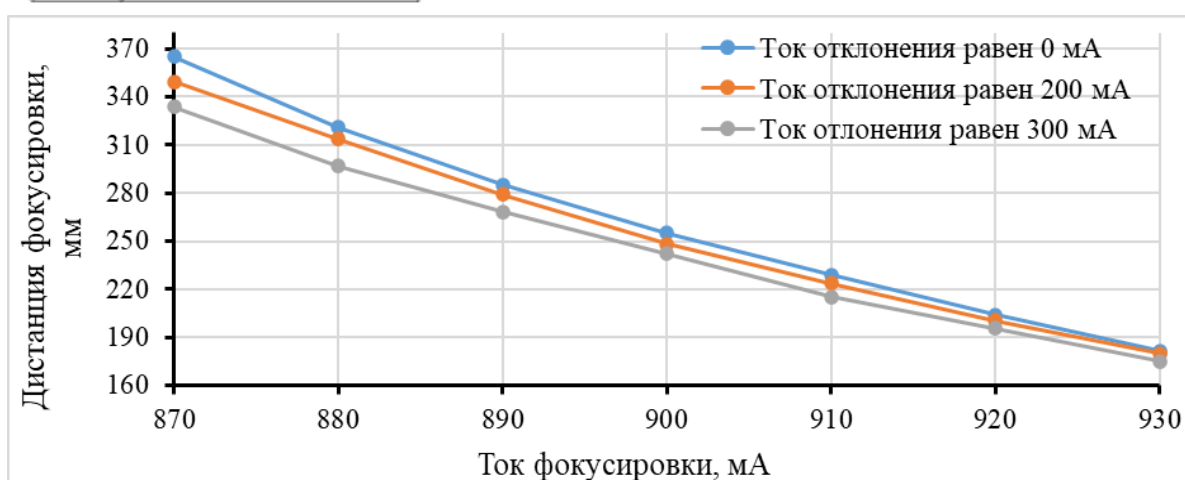
2.4. Анализ режимов работы фокусирующей и отклоняющей систем

На основании конструкторских расчётов были разработаны и смоделированы фокусирующая и отклоняющая системы в одной модели (рис. 3а). В ней проводился траектор-

ный анализ дистанции фокусировки при различных токах фокусировки, смещения дистанции фокусировки при различных токах отклонения и другие (рис. 3б). По рисунку 3б можно заметить, что при различных токах фокусировки зависимости смещения фокусировки от токов отклонения имеют разный характер. При этом, чем выше ток фокусировки, меньше дистанция фокусировки, тем меньше величина смещения фокуса при ненулевом токе отклонения.



а)



б)

Рис. 3. Твёрдотельная модель для анализа режимов работы магнитных систем при токе фокусировки 900 мА и токе отклонения 100 мА (а), зависимость дистанции фокусировки (от среза пушки) от тока фокусировки при различных токах отклонения

При анализе режимов работы отклоняющей системы было установлено, что при токе 332 мА достигается угол отклонения луча в 5 градусов, предъявляемый техническим заданием. При различных временных составляющих тока в катушках отклонения фокус двигается по окружности, что подтверждает корректность моделирования отклоняющей системы.

Оценка работы катушки динамической фокусировки была произведена в другой модели. По результатам оценки для достижения параллельности пучка при выходе из катушки ток в ней должен составлять 330 мА.

3. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИИ ПУШКИ 120/120

Первоначальным этапам в разработке твёрдотельной модели электронно-лучевой пушки нового поколения было моделирование нижней части пушки, а именно фокусирующей и отклоняющей систем.

В рассматриваемой пушке 120/120 кВ/кВт было принято решение об использовании комбинированной системы фокусировки и отклонения. Были предусмотрены и проработаны технологические отверстия для подвода и отвода проточной воды для охлаждения анода.

Далее проектировались корпус катодного узла и корпус высоковольтного ввода. В рамках данного проекта была предложена отличная от стандартных решений конструкция высоковольтного ввода, расположенного сверху крышки электронно-лучевой пушки. В качестве высоковольтного соединения розетка – штекер в данной конструкции используется готовое решение от компании Varex Imaging.

Так как конструкция любой пушки имеет необходимость в охлаждении катодного узла специальной диэлектрической жидкостью, в конструкция пушки был спроектирован медный змеевик охлаждения проточной водой. Так же был произведен тепловой расчет линейного расширения охлаждающей жидкости, который показал незначительную возможность расширения охлаждающей жидкости, для чего так же была спроектирована специальная полость в крышке электронно-лучевой пушки.

Конструкция всей пушки была спроектирована, основываясь на первоначальном техническом задании данного проекта. Были выдержаны все габаритные и расчетные размеры. Были проработаны все технологические и присоединительные отверстия. Общий вид всей конструкции в сборе представлен на рисунке 3.

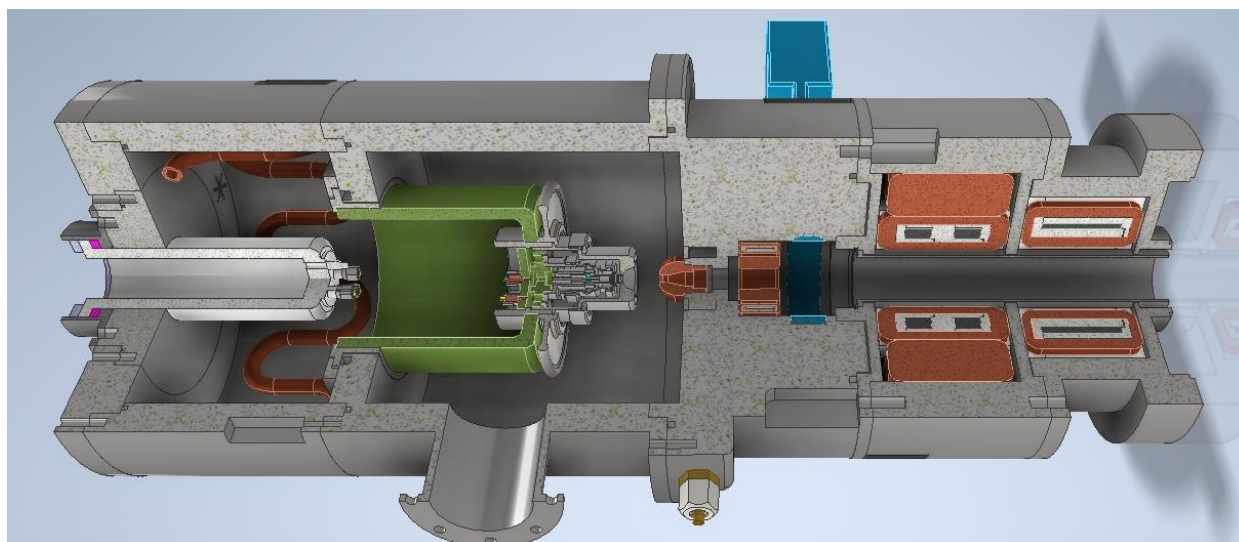


Рис. 3. Твёрдотельная модель электронно-лучевой пушки 120/120 кВ/кВт

4. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПУШКИ 120/120

При разработке имитационная модель была условно разделена на два блока: первый блок, состоящий из конечно-элементных моделей и содержащий результаты исследований; второй блок, являющийся визуальным представлением полученных в первом блоке результатов.

“Интерфейс пользователя” представляет собой приложение с простым интерфейсом (рис. 4), на котором изображены все параметры электронной пушки. Внутри приложения заданы связующие зависимости для полученных ранее параметров. Таким образом, пользователю не нужно самостоятельно заниматься расчётами или изучать зависимости, от него требуется лишь нажать кнопку, переместить ползунок или ввести значение желаемого параметра и посмотреть, как изменились остальные значения.

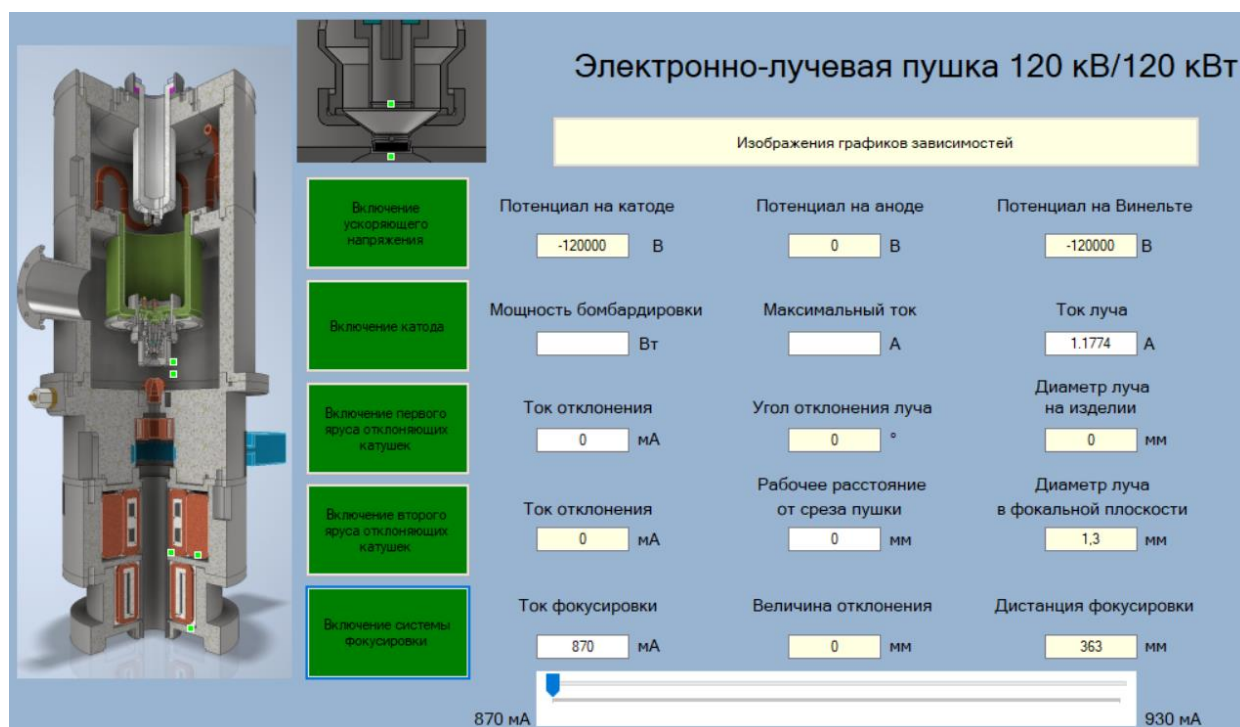


Рис. 4. Пользовательский интерфейс на стадии разработки

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работ по проекту на основании математического моделирования были разработаны конструкции отдельных узлов мощной электронной пушки с классом напряжения 120 кВ, проведено исследование режимов их работы и подтверждены технические характеристики, определённые техническим заданием. Была разработана конструкция электронной пушки в целом, создана её твердотельная 3D модель. Для определения параметров режима работы электронной пушки была разработана имитационная модель и реализована в виде компьютерной программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Производитель** электронно-лучевого сварочного оборудования ООО «ТЭТа»: [Электронный ресурс]: URL: <http://tetacom.ru/>
2. **Рау А.Г.** Электронно-лучевая пушка с термокатодом для сварочной установки / Осипов И.В., Тюнков А.В. и др. // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20, №2. – С. 129-131.
3. **Осипов И.В.** Установки электронно-лучевой сварки производства ТЭТа. / Рау А.Г., Семенов Г.В. // Электронно-лучевая сварки и смежные технологии «НИУ «МЭИ». – 2015. - С. 84-92.
4. **Методика** определения технологических параметров электронных пучков в сварочных электронных пушках / А. Л. Гончаров, В. К. Драгунов, А. В. Щербаков [и др.] // Электротехника. – 2015. – № 10. – С. 40-45.
5. **Study** of the operating modes of the electrostatic lens of the welding electron gun / E. K. Titarev, A. L. Goncharov, I. A. Kharitonov, A. I. Davletshin // Journal of Physics: Conference Series: 10, St. Petersburg, 20–22 сентября 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 012022. – DOI 10.1088/1742-6596/2077/1/012022.

Е.М. Воронкова¹, Д.В. Голубев¹, Д.И. Ковалев²

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта

НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ТОКОПРОВОДОВ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен вопрос опасных событий, приводящих к отказу токопроводов с твердой изоляцией, где наиболее опасными являются электрический пробой и механическое воздействие. Произведен расчет и анализ показателей надежности токопроводов с твердой изоляцией в составе с цифровой системой мониторинга на двух уровнях надежности: надежности элемента и системной надежности.

Ключевые слова – токопровод, твердая изоляция, отказ, надежность, электрическая прочность, механическое воздействие

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие токопроводящей продукции находит широкое распространение во всех отраслях деятельности в качестве оборудования, предназначенного для передачи электрической энергии конечным потребителям. Замена токопроводов с воздушным типом изоляции на более современные, компактные, быстровозводимые токопроводы с твердой изоляцией является хорошей альтернативой. Однако замена элементов энергосистемы на новые или модернизированные объекты должна основываться на анализе возможных видов отказов, а также показателях надежности заменяемых элементов и этих элементов в составе электроэнергетической системы. Подробный анализ причин отказов, приводящих к технологическим нарушениям, позволяет определить наиболее опасные ситуации, тем самым своевременно определить организационные и технические мероприятия по обеспечению безопасности, а анализ показателей надежности оценивает рациональность замены оборудования.

Большое количество опасных причин возникновения отказов технологического характера (не организационного) для токопроводов приводит к снижению его надежности и удорожанию мер безопасности, а значит и стоимости самого токопровода. Первоначальная оценка надежности конструкций токопроводов с твердой изоляцией должна выявить его недостатки на этапе разработки с целью усовершенствования конструкции при дальнейшем проектировании и производстве.

2. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТКАЗОВ В ТОКОПРОВОДАХ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

2.1. Общая классификация причин отказов

Изучение надежности основывается на событиях элементов системы – отказах. Существует огромное количество классификаций отказов [1-3], при этом по причинам возникновения различают отказ:

- конструкционный;
- производственный (технологический);
- эксплуатационный;

- деградационный.

На этапе разработки и проектирования особое внимание нужно уделять конструкции элементов и их технологическим параметрам. Именно они определяют возможные конструкционные и технологические отказы.

Согласно приказу Министерства энергетики РФ № 90 [4] классификационные признаки причин аварии подразделяются на организационные и технические причины повреждения оборудования. При рассмотрении технических признаков повреждения для токопроводов с твердой изоляцией отказы по причинам их возникновения можно классифицировать так, как представлено в табл. 1.

Таблица 1. Отказы токопроводов с твердой изоляцией по причинам их возникновения

Причины повреждения оборудования			
Конструкционные	Технологические	Эксплуатационный	Деградационный
– нарушение нормального вибросостояния; – нарушение электрической изоляции и электрического контакта цепей; - дефект программного обеспечения	– нарушение и дефекты механического соединения, герметичности; – загрязнение, попадание инородных предметов; – сбой/дефект программного обеспечения; – термическое повреждение, перегрев; – электродуговое / электрическое повреждение	– термическое повреждение, перегрев; – электродуговое / электрическое повреждение; – нарушение структуры материала; – внешнее механическое воздействие; – механическое разрушение (повреждение), деформация	– нарушение структуры материала; – механический износ; – коррозионный, эрозионный износ

Согласно табл. 1, конструкционные причины повреждения токопроводов с твердой изоляцией связаны с нарушением его конструирования. Технологические (производственные) причины связаны с нарушением технологии производства оборудования, а также с нарушением протекающих технологических процессов в нормальном режиме работы. Грамотное проектирование и качественный контроль производства снижают количество отключений данных типов и позволяют не учитывать их в статистике.

Деградационные причины связаны с износом оборудования. Эксплуатационные причины отказов являются следствием нарушения использования оборудования при эксплуатации в нормальном режиме, а также вследствие нарушения нормального режима работы. Отказы данного типа являются наиболее опасными, поэтому их стоит учитывать в первую очередь при анализе надежности. Так, например, в случае аварийных ситуаций, вызванных короткими замыканиями, могут возникнуть электрические повреждения – пробой изоляции. В случае сильного механического воздействия может наблюдаться деформация оборудования с последующим его разрушением. Таким образом, наиболее опасными причинами отказов являются эксплуатационные отказы, вызванные электрическим, термическим или механическим воздействиями.

2.2. Отказы токопроводов с твердой изоляцией, вызванные электрическим и термическим воздействиями

Отказы данной группы объединяются в один тип, так как в большинстве случаев

электрические повреждения сопровождаются перегревами оборудования.

При проектировании токопроводов с твердой изоляцией обязательно нужно проводить расчеты, подтверждающие работоспособность конструкций по электрическим и тепловым характеристикам.

Расчетные максимальные характеристики напряженности электрического поля не должны превышать максимально допустимых пороговых значений напряженностей электрического поля для конкретного типа изоляции, а расчетные температуры внутри токопроводов должны соответствовать температурному нагреву в продолжительном режиме по наибольшим допустимым величинам.

При несоблюдении данных условий необходимо пересматривать конструкцию токопровода.

2.3. Отказы токопроводов с твердой изоляцией, вызванные механическим воздействием

Механическое воздействие может быть вызвано рядом причин. Для предотвращения разрушения конструкций данным фактором необходимо проводить расчеты статического и динамического анализа.

Под статическим анализом предполагают оценку воздействия на элемент постоянной или медленно приложенной нагрузки. Под динамическим анализом подразумевают оценку воздействия на элемент быстроизменяющейся или изменяющейся во времени нагрузки. Целью данных видов анализов является преждевременное выявление возможных разрушающих нагрузок и резонансных частот, которые при совпадении с собственной частотой колебания оборудования могут привести к большим перемещениям и напряжениям.

Для удовлетворения высокой надежности токопроводы с твердой изоляцией должны выдерживать большие механические нагрузки.

3. РАСЧЕТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ НАДЕЖНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ТОКОПРОВОДОВ

3.1. Показатели надежности токопровода с твердой изоляцией, как элемента системы

Согласно ГОСТ 27.003 [5] средняя наработка до отказа токопроводов должна составлять не менее 10 лет. Токопроводы с литой изоляцией относятся к невозстанавливаемым объектам, поэтому их надежность характеризуется единичными показателями надежности безотказности в отношении одного свойства элемента.

К показателям безотказности относятся [6]:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность отказа $Q(t)$ – противоположная $P(t)$ величина;
- средняя наработка на отказ T_O ;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$.

Основной причиной отказа конструкции токопровода с твердой изоляцией является пробой любой секции (прямая, угловая (Z-образная), терминальная, секция компенсации теплового расширения). Секция, в которой происходит пробой, восстановлению не подлежит, при этом наиболее опасными местами являются секции компенсации теплового расширения. В случае отказа только элементов системы мониторинга работоспособное состояние конструкции токопровода сохраняется и замене подлежит только тот элемент

системы мониторинга, который вышел из строя.

Сечения структурной надежности конструкции токопроводов, по которым анализируются возможные пути отказов, представлены на рис. 1

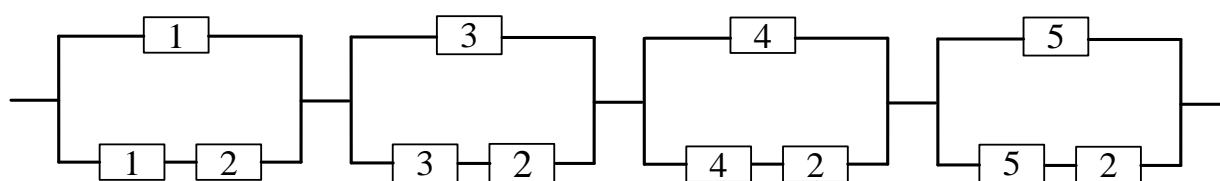


Рис. 1. Сечения структурной надежности конструкции: 1 – терминальная секция токопровода; 2 – элементы системы мониторинга; 3 – прямая секция токопровода; 4 – угловая (Z-образная) секция токопровода; 5 – секция компенсации теплового расширения.

Согласно рис. 1, отказ конструкции токопровода может произойти при отказе секции либо одновременном отказе элементов системы мониторинга и секции. Таким образом, отказ элементов системы мониторинга не приводит к отказу всей системы.

Совокупность рассматриваемых событий (переходы из работоспособного состояния в неработоспособное) представляют собой надежность всего рассматриваемого элемента – токопровода. По ГОСТ 27.003 средняя наработка на отказ токопроводов должна составлять не менее 10 лет, поэтому к разрабатываем токопроводам должны предъявляться требования по величине $T_0 \geq 10$ лет. Таким образом, интенсивность отказов должна составлять не менее 0,1 1/год [6].

Вероятности безотказной работы и отказа являются экспоненциальными характеристиками, зависящими от времени эксплуатации. При заданных минимальных параметрах надежности вероятность безотказной работы токопроводов с литой изоляцией через 10 лет составляет 99%, а вероятность отказа токопроводов после 69 лет эксплуатации принимает значение 0,5, что свидетельствует о высокой надежности конструкции

3.2. Показатели надежности токопровода с твердой изоляцией в составе электрической системы

Надежность токопроводов в составе системы должна рассматриваться для двух случаев, когда токопроводы используются:

1. Для соединения генераторного оборудования с другими элементами.
2. Для соединения негенераторного оборудования.

Соединения генераторного оборудования с другими элементами с помощью токопроводов характерно при представлении энергоблоков. Случаи присоединения токопроводов с твердой изоляцией в энергоблоках представлены на рис. 2.

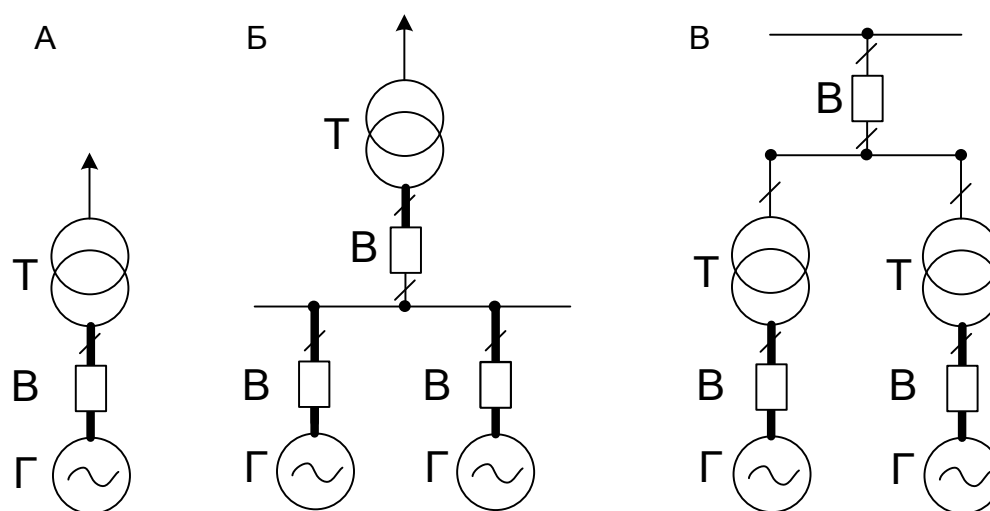


Рис. 2. Схема присоединения токопроводов в энергоблоках, где токопроводы представлены жирной линией: А – моноблок, Б – укрупненный блок, В – объединенный блок, Г – генератор, В – выключатель, ТР – трансформатор.

Турбоагрегат представляет собой совокупность турбины и присоединенного к ней генератора. На схеме турбоагрегат представляется только генератором. Однако в анализе надежности данных элементов, относящихся к тепловым установкам, под турбоагрегатом необходимо понимать энергоблок. В энергоблок помимо турбины и генератора также входит котлоагрегат. Справочные показатели надежности для энергоблоков можно найти в [7]. В рассматриваемых случаях (рис. 2) токопровод также может соединять генератор с трансформатором без выключателя.

Моноблоки и укрупненные блоки являются наиболее распространенными типовыми схемами коммутации ТЭС [8].

Все элементы рассматриваемых схем (рис. 2), кроме токопроводов, являются восстанавливаемыми, поэтому необходимо учитывать время восстановления и ремонта элементов. Для моноблока преднамеренные отключения не учитываются, так как отключение системы приведет к отсутствию электроснабжения. В случаях укрупненного и объединенного блоков преднамеренные отключения учитываются, так как ремонт только одного энергоблока не приведет к отсутствию электроснабжения всего узла нагрузки.

Для группы последовательно соединенных элементов без учета и с учетом преднамеренных отключений показатели надежности находятся по формулам из [9]. Для расчета надежности блоков были заданы единичные показатели надежности для генераторов (энергоблоков) мощностью 250 МВА, воздушных выключателей 15,75 кВ, токопроводов и трансформаторов 110/15,75 кВ [7]. Вероятность отказов токопроводов принималась равной 0,01, а при отказе выключателей также учитывалась вероятность односторонних отказов при КЗ.

Расчет показателей надежности для структурных схем на рис. 2 показывает, что для всех видов блоков вероятность отказа достаточно мала, поэтому можно судить о надежной работе токопроводов в составе энергоблоков. Так, вероятность отказа моноблока составила 0,188, укрупненного блока – 0,014, объединенного блока – 0,014.

Аналогично предыдущим случаям можно рассчитать показатели надежности токопроводов в составе электрической системы в схемах объекта генерации с распределитель-

ствами. Согласно [7-9] схемы подстанции (схемы РУ) является заведомо надежными (вероятность отказа распределительного устройства в основном составляет $\sim 2-3 \cdot 10^{-8}$). Таким образом, показатели надежности и выдача мощности подстанции определяется не надежностью РУ, а надежностью блоков, состоящих из генератора (энергоблока), выключателя и трансформатора.

К схемам, в которых токопроводы связывают негенераторное оборудование, чаще всего относятся схемы с трансформаторами собственных нужд подстанций, надежность которых согласно предыдущим расчетам в-первую очередь зависит от вероятности отказа генераторов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Токопроводы с твердой изоляцией являются достаточно надежным видом оборудования как сами по себе, так и в составе энергоблоков и электрической системы, что подтверждается полученными результатами: вероятность отказа достаточно мала в случае рассмотрения надежности токопроводов, а также их учета в составе энергоблоков. На уровне энергосистемы надежность схем в-первую очередь определяется вероятностью отказов генераторов.

Наиболее опасными причинами отказов токопроводов с твердой изоляцией являются отказы, вызванные электрическим, термическим и механическим воздействиями. С целью своевременного предотвращения их влияния необходимо проводить мероприятия, повышающие их надежность при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Надежность** систем энергетики и их оборудования Т. 1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Г.Н. Антонов, В.И. Зоркальцев, Л.Д. Криворучий, Ю.Е. Малашенко и др. Под ред. Ю. Н. Руденко. - М.: Энергоатомиздат, 1994. 480 с.
2. **Матвеевский В.Р.** Надежность технических систем. М.: Московский государственный институт электроники и математики. 2002. 113 с.
3. **Правиков, Ю. М.** Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 122 с.
4. **Приказ** Министерства энергетики РФ от 2 марта 2010 г. N 90 «Об утверждении формы акта о расследовании причин аварий в электроэнергетике и порядка ее заполнения».
5. **ГОСТ 27.003-2016.** Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.
6. **Волков Н. Г.** Надежность электроснабжения. Томск: ТПУ, 2003. 140 с.
7. **Китушин В.Г.** Надежность энергетических систем. Часть 1/ Теоретические основы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 256 с.
8. **Балаков Ю.Н., Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В.** Проектирование схем электроустановок. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 288 с.
9. **Фокин Ю. А.** Вероятностные методы в расчетах надежности электрических систем. М.: МЭИ, 1983. 216 с.

*Т.Д. Баландин*¹, *Д.А. Жгут*², *М.В. Карпова*², *В.А. Барат*³, *А.Ю. Марченков*⁴

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта, 4 – консультант

ДИАГНОСТИКА РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПЕРЛИТНЫХ И АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

АННОТАЦИЯ

Данная статья посвящена вопросам диагностики разнородных сварных соединений перлитной и аустенитной сталей. Разнородное сварное соединение является сложным объектом, так как высокий градиент химического состава и структурная неоднородность при использовании известных физических способов контроля создает структурные шумы, что приводит к снижению чувствительности традиционных сканирующих методов неразрушающего контроля. В то же время, применение метода акустической эмиссии для контроля разнородных сварных соединений является перспективным из-за его высокой чувствительности и возможности диагностирования неоднородных объектов, имеющих сложную структуру. Объектом исследования в данной работе являются дефекты сплошности и дефекты структуры, которые выявляются при циклическом нагружении образцов разнородных сварных соединений при значении нагрузки близкой к эксплуатационной.

Ключевые слова – разнородные сварные соединения, акустическая эмиссия, диффузионные прослойки, непровары.

1. ВВЕДЕНИЕ

Разнородные сварные соединения применяют в самых разных отраслях промышленности. В настоящее время используют соединения типа «сталь – алюминиевый сплав», «сталь – титановый сплав», «сталь – медь», а также соединения сталей разных структурных классов. Применение таких сварных соединений позволяет добиться экономии дорогостоящих материалов, снизить массогабаритные характеристики конструкций и обеспечить необходимые сочетания механических и эксплуатационных свойств сварных конструкций. В частности, комбинированные сварные соединения сталей перлитного и аустенитного классов достаточно широко применяются в энергетике при изготовлении трубопроводов и элементов энергетического оборудования.

Как и для однородных соединений, при изготовлении комбинированных сварных конструкций, вследствие несовершенства технологии сварки, ошибок оператора или нарушения технологического процесса, возможно формирование в сварном соединении дефектов сплошности – пор, газовых полостей, несплавлений, непроваров, трещин. Обычно критические дефекты сплошности достаточно уверенно выявляются с помощью существующих технологий неразрушающего контроля – например, ультразвуковой дефектоскопии, радиационных методов контроля, течеискания и др. Однако, сложная структура комбинированных сварных соединений, характеризующихся наличием зон с высокими градиентами химического состава и структуры [1-4], маскирует наличие дефектов сплошности при попытке их выявления физическими способами контроля. Так, в сварных соединениях сталей перлитного и аустенитного классов в качестве такой помехи выступают кристаллизационные и диффузионные прослойки (обезуглероженные, кар-

бидные, мартенситные), формирующиеся в процессе сварки и последующей длительной эксплуатации соединения.

В данной статье рассматривается возможность применения метода акустической эмиссии (АЭ) для диагностики разнородных сварных соединений сталей перлитного и аустенитного класса. В отличие от традиционных методов неразрушающего контроля, метод АЭ не предполагает активного воздействия физическим полем на контролируемый объект. Он основан на регистрации упругих акустических колебаний среды, генерируемых дефектами сплошности при механическом нагружении объекта. Дефекты сплошности и структуры будут выявляться при АЭ-диагностике как источники акустического сигнала, независимо от наличия в сварном соединении сложных неоднородных структур. В этой связи метод АЭ является весьма перспективным для диагностики комбинированных сварных соединений.

Настоящая работа посвящена диагностике разнородных сварных соединений стали перлитного класса 09Г2С и стали аустенитного класса 12Х18Н10Т. В работе исследуется возможность выявления дефектов сплошности (непроваров) и дефектов структуры (диффузионных прослоек) за счет выявления специфических признаков АЭ-сигналов, указывающих на наличие дефектов в исследуемых сварных соединениях.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе исследованы комбинированные сварные соединения сталей 09Г2С (перлитный класс) и 12Х18Н10Т (аустенитный класс). Для получения соединений сваривали между собой пары пластин из сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т с размерами 250 x 300 x 3 мм каждый. Аргонодуговую сварку проводили с использованием присадочной проволоки Sabaros SW146 диаметром 1,2 мм.

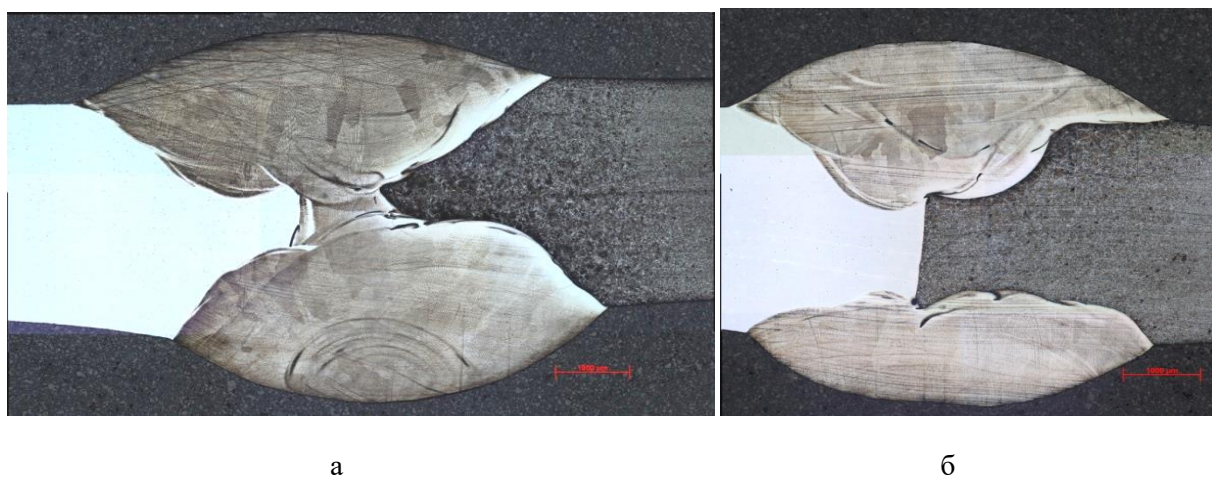


Рис. 1. Комбинированные сварные соединения сталей 09Г2С и 12Х18Н10Т: а – соединение с полным проплавлением, без дефектов; б – сварное соединение с непроваром

Для получения бездефектных сварных соединений сварку пластин проводили с соблюдением правильной технологии дуговой сварки на рекомендованных параметрах режима сварки, в результате получили сварное соединение с полным проплавлением и аустенитной структурой металла шва (рис. 1а). Для формирования в сварных соединениях непроваров сварку проводили на режимах с малыми токами сварки, что обеспечивало неполное проплавление стыка (рис. 1б). Для формирования в сварных соединениях диф-

фузионных прослоек, присущих разнородным сварным соединениям, длительно работающим в условиях высоких температур, сваренные пластины подвергали последующей термической обработке, имитирующей длительную эксплуатацию указанных сварных соединений при высоких температурах.

Из полученных сварных соединений изготавливали плоские образцы для проведения механических испытаний с шириной рабочей части 20 мм. Статические испытания проводились на испытательной машине Instron 5982 со скоростью деформирования $V_{\text{деф}} = 2$ мм/мин. Испытания на циклическое растяжение проводились на испытательной машине Instron 8801 циклическим растяжением циклами синусоидальной формы с частотой 1 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R = 0.05$. Значение максимального напряжения цикла составляло $\sigma_{\text{max}} = 200$ МПа. Всего было испытано 15 образцов – 5 образцов с полным проплавлением (без дефектов), 5 образцов – с дефектом типа непровар, 5 образцов с диффузионными прослойками.

Для регистрации данных акустической эмиссии использовалась система A-Line 32D. Измерительный тракт состоял из резонансных датчиков GT200 с резонансной частотой 180 кГц и предварительных усилителей электрического сигнала ПАЭФ-014.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис.2а показаны АЭ данные, полученные при статическом растяжении бездефектного образца разнородного сварного соединения. Зависимость АЭ активности от деформации имеет два характерных экстремума: первый, в области 250-300 МПа, приблизительно соответствует пределу текучести стали 12Х18Н10Т, второй, в области 400 МПа, пределу текучести стали 09Г2С.

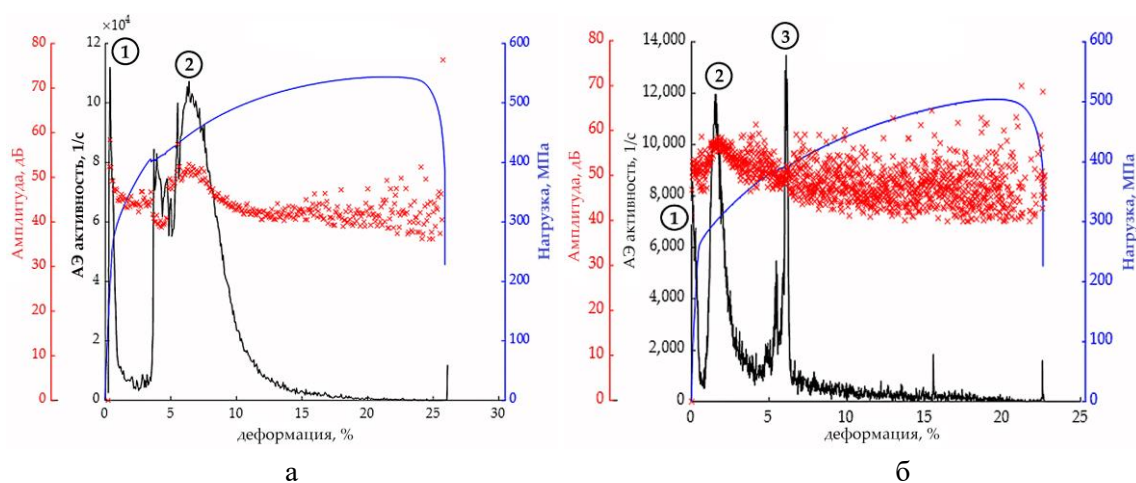


Рис. 2. АЭ данные, полученные при растяжении разнородного сварного соединения:
а – без дефектов, б – с диффузионными прослойками

На рис.2б показаны АЭ параметры, полученные при растяжении образца с диффузионными прослойками. Отличие от бездефектного случая состоит в том, что на графике АЭ активности при напряжении 250-300 МПа возникает дополнительный максимум, приблизительно соответствующий пределу прочности ферритной фазы. Динамика изменения АЭ данных до момента разрушения образца с непроваром была в целом такой же, как и в случае бездефектного образца, однако, в период акустического затишья между всплеска-

ми активности возникали сигналы специфичной формы, являющиеся признаками наличия дефекта [5].

Исходя из закономерностей, полученных при статическом нагружении, можно составить представление о характере деформации разнородного сварного соединения, и определить особенности АЭ при наличии дефектов. Однако, с точки зрения практического применения целесообразно рассмотреть АЭ при циклическом нагружении разнородных сварных соединений.

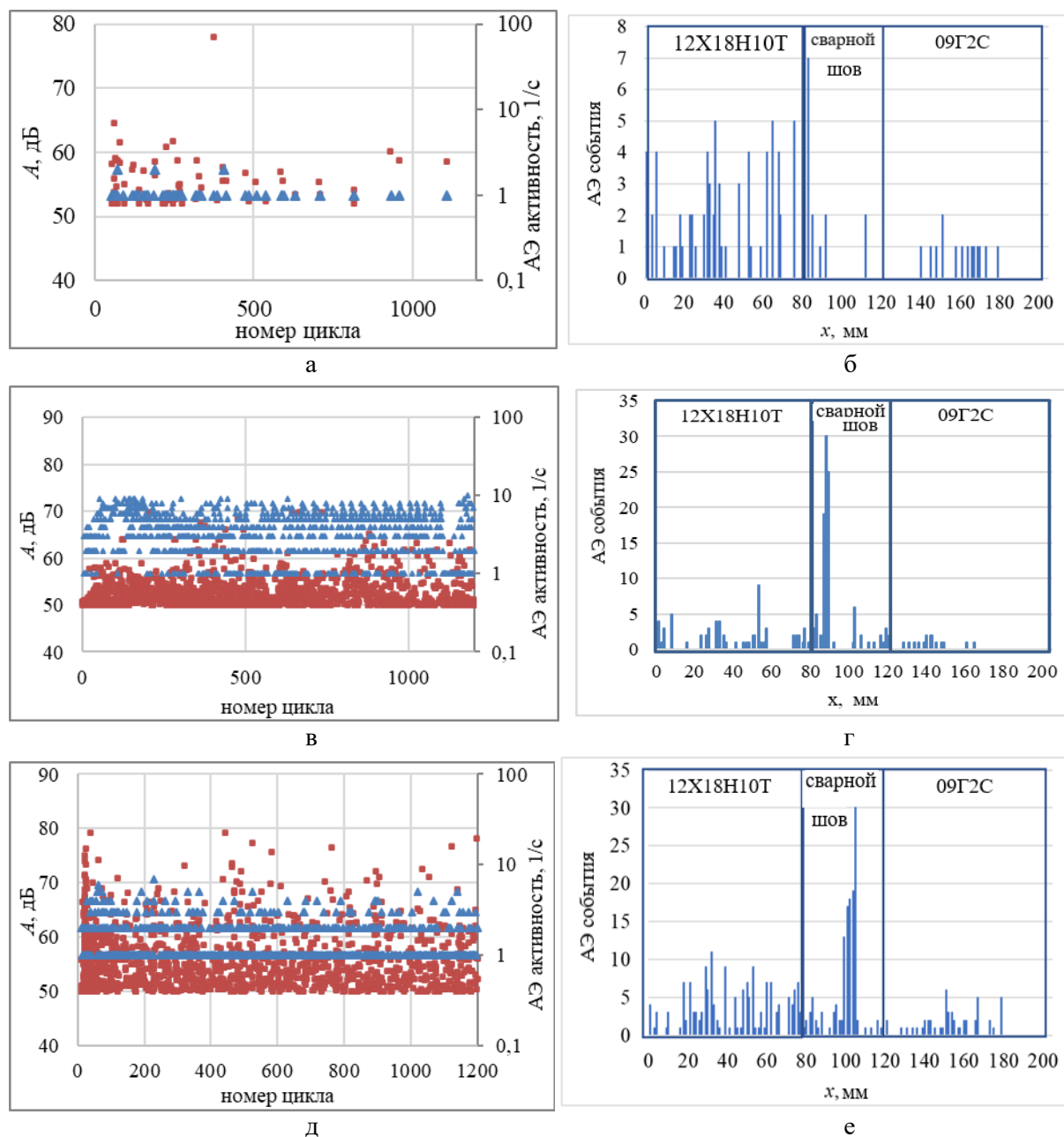


Рис. 3 АЭ данные, полученные при циклическом нагружении а, б – бездефектного разнородного сварного соединения; в, г – непроваром; д, е – с диффузионными прослойками.

На рис.3 показаны АЭ данные, полученные при циклическом нагружении образцов разнородного сварного соединения при $\sigma_{\max}=200$ МПа. Это значение напряжения близко к эксплуатационному, так как при нагружении само сварное соединение и основной металл

(стали 09Г2С и 12Х18Н10Т) деформируются преимущественно упруго. В качестве информативных параметров рассматриваются амплитуды импульсов, активность АЭ и результат локации АЭ событий по длине образца.

На рис.3 а,б показаны результаты испытаний бездефектного образца, на рис.3 в, г – для образца с непроваром, на рис 3 д,е – для образца с диффузионными прослойками. Для дефектных образцов АЭ активность оказалась значительно выше, чем для бездефектного образца. Для образца с непроваром среднее значение активности составляет 1,9 имп/с, для образца с диффузионными прослойками 0,95 имп/с. В обоих случаях на локации наблюдается выраженный максимум в средней части, указывающий на источник АЭ, расположенный в области сварного соединения. Таким образом, характер АЭ данных для бездефектного и дефектных образцов оказывается существенно различным. Кроме того, каждый вид дефекта формирует свой специфичный АЭ образ, для образцов с диффузионными прослойками характерна меньшая АЭ активность при больших, до 70-80 дБ, значениях амплитуд, а для образцов с непроварами, наоборот, наблюдается большая активность, в то время как амплитуды импульсов АЭ, как правило, не превышают 60-65 дБ.

Для более детального исследования данных был проведен кластерный анализ, в рамках которого сигналы АЭ объединялись в кластеры на основании схожести формы. В качестве меры близости был использован коэффициент кросс корреляции. При объединении сигналов в кластеры был использован метод полной связи, пороговое значение коэффициента кросс корреляции было выбрано равным 0,6. В результате кластерного анализа было установлено, что импульсы АЭ, зарегистрированные для бездефектного образцов, не обладают повторяемостью формы и не коррелируют друг с другом.

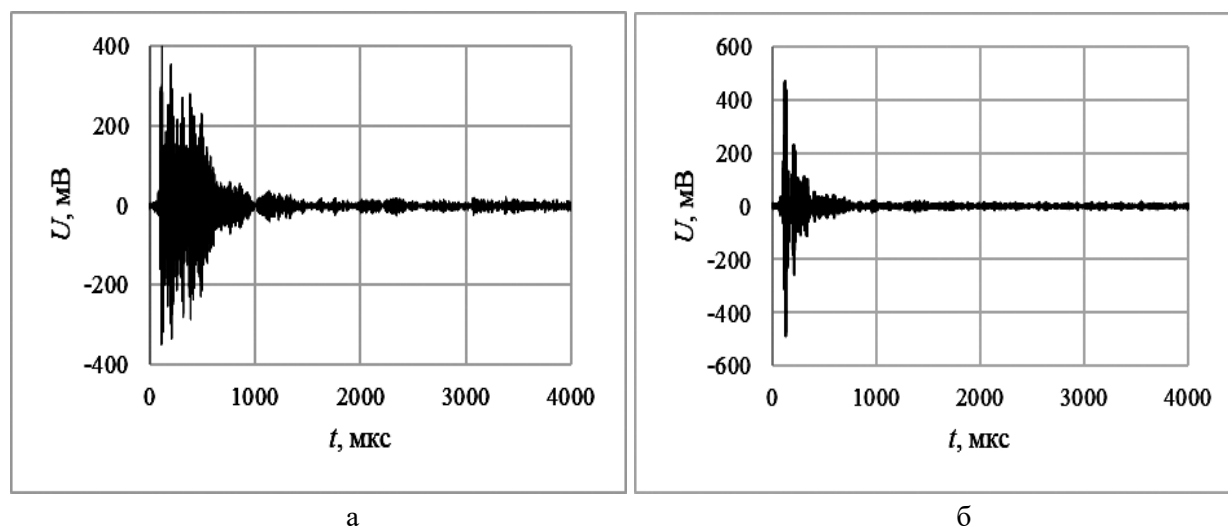


Рис. 4 Типичные формы АЭ сигналов, а – для сварного соединения с непроваром, б – для сварного соединения с диффузионными прослойками

Для образцов с непроваром доля схожих по форме сигналов составляет более 25 %, а для образцов с диффузионными прослойками схожими и коррелированными являются более половины сигналов АЭ. Типичный сигнал, соответствующий наличию непровара, представлен на рис. 4а, в случае, типичный вид сигнала для образца с диффузионными прослойками показан на рис. 4б.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показана возможность применения метода акустической эмиссии для обнаружения и идентификации различных типов дефектов разнородных сварных соединений перлитных и аустенитных сталей. Полученные результаты могут быть использованы для разработки диагностических критериев выявления дефектов при разработке промышленной методики неразрушающего контроля разнородных сварных соединений.

Работа выполнена в рамках проекта 20/22-0000028/4 «Диагностика разнородных сварных соединений перлитной и аустенитной сталей методом акустической эмиссии» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и ИТ» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Goncharov A.** Study of structural non-homogeneity impact on mechanical properties of dissimilar weld joints of carbon steel 20 and corrosion-resistant austenitic 12Kh18N10T steel. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng, 2019, 681:012016.
2. **Khodakov V.D., Khodakov D.V.** Structure and mechanism of formation of dissimilar welded joints in nuclear power plant made of austenitic and pearlitic steels. Weld Int, 30, 2016, pp. 935-940.
3. **Sharma P, Dheerendra K.D.** A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties. J Manuf Proc, 44, 2019, pp.166-178.
4. **Saini M.** Mechanical properties of bimetallic weld joint between SA 516 grade 65 carbon steel and SS 304 L for steam generator application. Int J Res Eng Techn, 03, 2014, pp. 39-42.
5. **Barat, V.; Marchenkov, A.; Bardakov, V.; Karpova, M.; Zhgut, D.; Elizarov, S.** Features of Acoustic Emission in Tensile Testing of Dissimilar Welded Joints of Pearlitic and Austenitic Steels. Appl. Sci. 2021, 11, 11892

В.А. Мурашов¹, А.А. Борисов¹, А.С. Попов¹, К.В. Строгонов²

1 – студент, 2 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ПЕЧИ БАРБОТАЖНОГО ТИПА

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается возможность интенсификации процессов и уменьшения тепловых потерь при производстве базальтовых композитных материалов. Интенсификации процесса и снижения тепловых потерь можно достичь использованием низкопотенциальной теплоты уходящих газов, применения барботажа в зоне плавления, сокращением длительности осветления расплава, для достижения которого применяется разряжение над поверхностью неосветленного расплава, приводящее к более интенсивному осветлению. В рамках исследовательской работы проводится разработка зоны плавления и осветления, которые должны стать частью перспективного реактора по плавлению базальта. Представлены результаты по оптимизации технических параметров установки для достижения наибольшей эффективности процесса и уменьшения тепловых потерь. Выбраны габариты установок и разряжение в камере осветления для заданного объема производства.

Ключевые слова – барботаж, базальт, осветление, дегазация, базальтовое волокно, расплав

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день производство композитных волокон на основе базальта активно развивается, существуют различные технологии, некоторые из которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Затраты энергоресурсов для получения 1 тонны расплава

Наименование агрегата	Энергоресурс	Удельное потребление энергоресурса	
Электродуговая печь	электроэнергия	1,5 кВт·ч/кг	5 400 кДж/кг
Ванная печь	природный газ	500 м ³ /т	17 850 кДж/кг
Индукционная печь	электроэнергия	2,2 кВт·ч/кг	7 920 кДж/кг
Печь вагранка ОАО "Тизол"	кокс	180 кг/т	5 279 кДж/кг
Агрегат ООО "НПК "УралТермоКомплекс"	природный газ	130 м ³ /т	4 641 кДж/кг

Особенностью производства непрерывного базальтового волокна (далее НБВ) является дешёвое сырьё и высокая энергоёмкость. Одним из важнейших и актуальных вопросов современности является рациональное расходование ресурсов, в том числе эффективное расходование энергетических ресурсов. Устойчивым трендом развития промышленности является снижение удельных затрат топлива для производства [1]. Это даёт значительный экономический эффект и способствует бурному росту предприятий композитной отрасли и чёрной металлургии – предприятий энергоёмких отраслей. Внедрение новых технологий, способствующих повышению экономичности [2] оборудования в этих производствах, автоматизации – это основное направление развития отрасли, которое способствует росту как российского рынка композитов и чёрной металлургии, так и общемирового.

Плавление сырья является одной из энергоёмких стадий производства данных отраслей. За счёт интенсификации процессов получения расплава мы можем снизить потребление энергии на нагрев и плавление породы. Сокращение времени технологических операций позволит уменьшить тепловые потери в окружающую среду и снизить требования по перегреву расплава [3]. Осветление расплава – процесс, во время которого удаляются пузырьки газа для получения однородного высококачественного продукта, является одним из таких технологических процессов [4]. Ведь при производстве непрерывного базальтового волокна осветление расплава происходит в ваннах печах и занимает до двух часов [5]. Следовательно, интенсификация и ускорение данного процесса, также как и интенсификация процесса плавления позволят уменьшить тепловые потери и увеличить энергетическую эффективность производства НБВ.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ В MATHCAD

Плавление базальта в барботажном режиме предлагается выполнять в плавильном агрегате, техническая суть которого описана в патенте [6], а иллюстрация представлена на рис. 1.

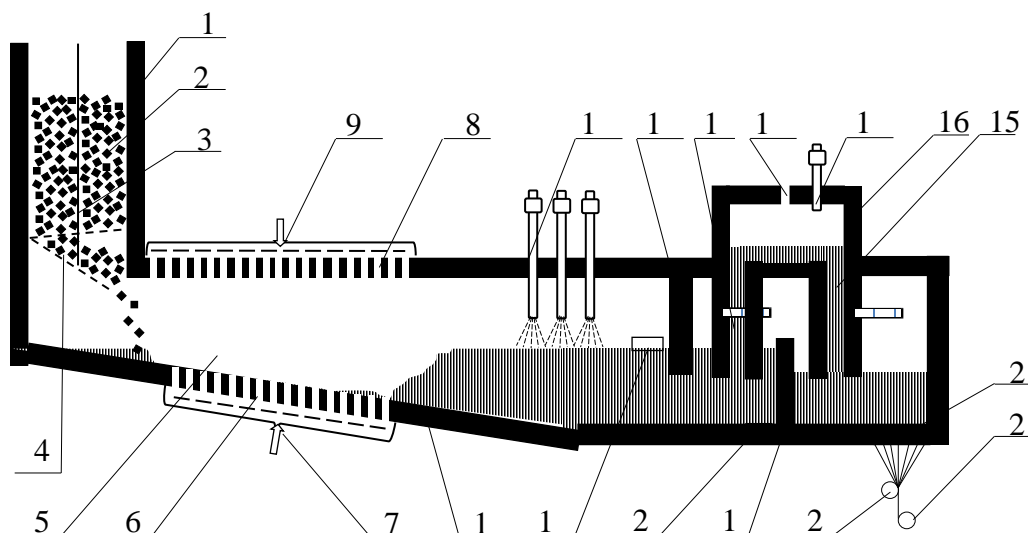


Рис. 1. Схема плавильной печи барботажного типа: 1 – регенеративный подогреватель исходного материала (РПИМ); 2 – нагреваемый базальт; 3 – вал, обеспечивающий вращение пода РПИМ; 4 – перфорированный под подогревателя, выполненный в виде шнека; 5 – барботажный слой расплава; 6 – перфорированный под для организации рассредоточенной продувки; 7 – устройство раздельного подвода газа и окислителя; 8 – перфорированный свод для организации рассредоточенной подачи окислителя для дожигания; 9 – подвод окислителя; 10 – наклонный под; 11 – устройство для подогрева расплава; 12 – технологическое окно для скачивания лёгких не базальтовых фракций; 13 – перегородка отделяющая плавильную часть реактора; 14 – подъёмный патрубок камеры осветления расплава; 15 – опускной патрубок камеры осветления расплава; 16 – камера осветления расплава; 17 – технологическое отверстие для создания разряжения в камере осветления; 18 – устройство для разогрева камеры осветления; 19 – перегородка отделяющая осветлённый расплав от неосветлённого; 20 – пробка донная для выпуска расплава базальта при остановке агрегата; 21 – фильтрный питатель; 22 – механизм нанесения замасливателя; 23 – устройство намотки непрерывных нитей в бобины.

2.1. Расчёт геометрии плавильного реактора

В работе рассчитывается печь производительностью 3 тонны базальтомассы в час. Также в основе конструкции лежит применение барботажа расплава горючей газовой-воздушной смесью, за счёт использования барботажных сопел, смонтированных в донной части печи. Применение барботажа позволяет значительно увеличить производительность печи [7]. Примером может служить сравнение мартеновской и конвертерной плавки, где производительность последней выше в 5-8 раз. Это обеспечивается высоким коэффициентом теплоотдачи от расплава к твёрдым частицам при организации барботажа расплава [8]. Стоит отметить, что при использовании барботажа следует увеличить глубину расплава, так как при большом расходе газовой-воздушной смеси следует чрезмерное бурление и попадание расплава на поверхность свода, что может привести к его разрушению.

В среде Mathcad исходя, из плотности базальта, равной 3000 кг/м^3 , и производительности получим, что объёмная производительность по расплаву 1 кг/м^3 . Глубина расплава равна 0,3 метра, откуда следует, что при использовании барботажа глубина бурлящего расплава составит 0,5 метра, а высота газового пространства над бурлящим расплавом – 0,3 метра. С учётом глубины бурлящего расплава и ширины в 1,5 метра получим длину плавильной зоны 2,22 метра, следовательно, съём базальтомассы с одного м² составляет 900 кг в час.

2.2. Тепловой баланс

Для подбора горелок и расчёта геометрических характеристик пода, а также учета тепловых потерь был составлен тепловой баланс (табл. 2), где приходная часть включала в себя теплоту материала, подогретого в ПИМ, химическую теплоту топлива, физическую теплоту топлива и окислителя. В расходную часть вошли теплота технологического продукта, теплота уходящих газов, потери тепла через обмуровку.

Таблица 2. Таблица тепловых балансов

Приход			Расход		
%	Q	кВт	кВт	Q	%
0,74	Теплота, вносимая исходным материалом	15,4	1945,658	Теплота технологического продукта	93,70
98,98	Химическая теплота топлива	2055,229	108,859	Теплота уходящих газов	5,25
0,08	Физическая теплота топлива	1,725	21,883	Потери теплоты в окружающую среду через ограждения	1,05
0,20	Физическая теплота окислителя	4,046			
100	Σ	2076,4	2076,4	Σ	100

После решения данного уравнения получены следующие основные значения: химическая теплота топлива - 2055 кВт, теплота технологического продукта - 1946 кВт, потери с уходящими газами - 108,9 кВт, удельный расход энергоресурсов - 2465 кДж/кг.

2.3. Расчёт габаритов перфорированного пода

Расчеты показали, что необходимое количество теплоты топлива равно 2055 кВт, мощность одной горелки (со скоростью подачи газа 1 м/с и подаче окислителя 22,4 м/с) составляет 4,5 кВт, следовательно, необходимо 458 горелок. Внешний диаметр каждой

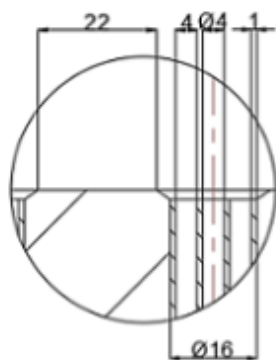


Рис. 2. Схема расположения горелки

горелки 16 мм (рис. 2), с учётом их конструктивного расположения получаем, что площадь горелки около 0,0001 м², а блока из 458 горелок - 0,486 м². С учётом расстояния от крайних горелок до стены, необходимого для сохранения бокового ограждения от интенсивного теплового потока, получим длину перфорированного пода - 0,426 м.

2.4. Расчёт габаритов осветлительной камеры

Для ускорения процесса дегазации расплава в осветлительной камере применяется разряжение над расплавом. Определение оптимальных габаритов и разряжения является одной из ключевых задач данной работы.

Первоначально определим необходимый уровень подъёма расплава для создания необходимого разряжения. Из основ гидродинамики получаем формулу зависимости высоты подъёма расплава и график (рис. 3) зависимости длины осветлительной камеры от разряжения. Исходя из них, принимаем значение разряжения в камере освещения 20 кПа.

Определим геометрические размеры дегазационной камеры. Исходя из времени всплытия пузырька, а также времени движения расплава в осветлительной камере при разряжении в 20 кПа и учёте расширения пузырька газа, получим длину камеры в 2,234 метра.

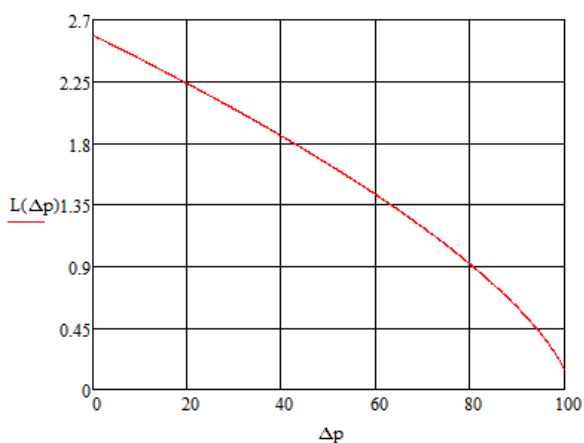


Рис. 3. График зависимости длины осветлительной камеры от разряжения

2.5. Использование теплоты продуктов горения

Для уменьшения тепловых потерь с уходящими газами в конструкции печи предусмотрено их использовать для предварительного подогрева базальтовой руды. Был рассчитан объем уходящих газов равный 1,243 м³/сек, скорость уходящих газов – 1,145 м/с. Исходя из этих данных, определены внутренний диаметр патрубка подачи базальта – 0,724 м, высота – 0,705 м, а также скорость подачи базальтовой руды – 5,4 м/с

и температура газов, покидающих подогреватель руды – 610,7 °С.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Для подтверждения теоретических расчётов и гипотез были спроектированы и сделаны три имитационные модели: модель печи [9], перфорированного пода [10] и зоны освещения [11], также проведён ряд физических экспериментов.

Для создания модели печи первоначально были теоретически получены характерные размеры печи, затем по ним был получен эскизный чертёж печи. Дополнительно была создана 3D модель печи в программном продукте Inventor (рис. 4) для дальнейшего исследования тепловых и температурных полей в среде Ansys.

В среде Ansys было получено поле температур внутри перфорированного пода (рис. 5),

которое позволило определить характер нагрева перфорированного слоя для расчёта необходимой толщины огнеупора в реальной установке.

Также на физической модели был исследован процесс дегазации расплава базальта. Дополнительно данные исследования были проведены на основе математической модели в среде Ansys (рис. 6).

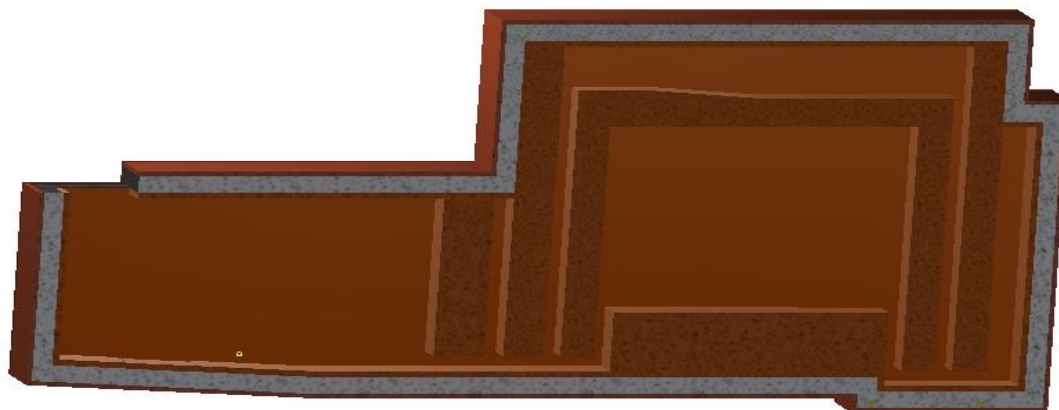


Рис. 4. 3D модель печи

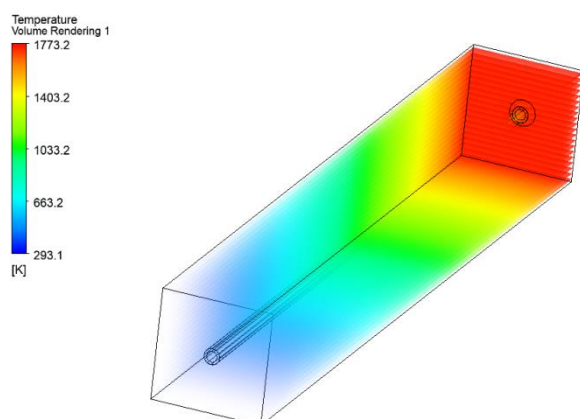


Рис.5. Распределение температур внутри перфорированного пода

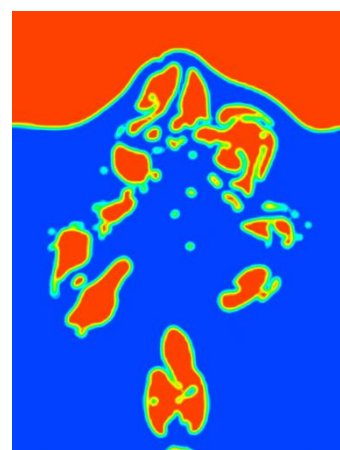


Рис.6. Барботаж расплава базальта

Полученные результаты физического и математического моделирования не противостоят известным данным по аналогичным техническим решениям других отраслей.

4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для функционирования завода по производству НБВ необходимо обеспечить постоянные поставки базальтовой руды, также следует предусмотреть её хранение. После переработки руды в связи с циклом производства требуются складские помещения для временной выдержки промежуточных продуктов и подготовки к отгрузке конечных, поэтому на основе средних данных по отрасли мы получили необходимую площадь складских помещений, равную 465 м². А для доставки руды было принято решение использовать самосвалы (5 шт в сутки).

В соответствии с производительностью предприятия и непрерывностью производства был составлен список необходимого персонала - 45 человек, определены ставки заработных плат и ежегодные расходы на их выплату, которые составили 25 976 016 рублей в

год. Также в рамках ТЭО был произведён подбор необходимого оборудования и на основе этого рассчитаны капитальные затраты, которые составили 228 443 060 рублей. Ежегодные затраты на работу предприятия оцениваются в 6 159 859 346 рублей. Расчётный срок реализации проекта строительства завода составил 18 месяцев.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были рассчитаны габаритные размеры печи барботажного типа для производства НБВ, они составили 6,81x2,69x1,87 м. Был применён комплекс технических решений по снижению тепловых потерь, таких как повышение интенсификации процесса нагрева и плавления, использование температуры продуктов сгорания для подогрева исходного сырья, уменьшение зоны плавления за счёт применение барботажа, а также зоны осветления за счёт создания разряжения при дегазации. Длина последней за счет разряжения сократилась примерно на 15%. Применение барботажа также положительно повлияло на удельный расход топлива, в сравнении с другими печами (таблица 1) он уменьшился. Срок реализации проекта составил 18 месяцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ushakov V. Y.** The main problems of energy and possible ways to solve them //Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2011. – Т. 4. – С. 513.
2. **Strogonov K. V.** Energy-efficient furnace for basalt fiber production //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1990. – №. 1. – С. 012030.
3. **Evtekhova O. A., Pribytkov I. A., Shatokhin K. S.** Energy Efficiency Assessment of Coal Preparation Plants Waste Processing //Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – Т. 61. – №. 3. – С. 245-248.
4. **Semenov B. A., Ozerov N. A.** Thermal resistance of the wall layer of molten glass in the high-temperature corrosion zone of the refractory walls of the melting tank of glassmaking furnaces //Glass and Ceramics. – 2016. – Т. 73. – №. 5. – С. 159-164.
5. **Koroteeva L.** Technology and Equipment for the Production of Glass Threads and Fibers //INFRA-M. Moscow, 2015 P. 288.
6. **Патент № 2695188** РФ Устройство изготовления непрерывных базальтовых волокон, МПК51 С03В 37/02/ Строгонов К.В., Назаров М.Н. (РФ). Заявл. 07.06.2018; опубл. 22.07.2019 Бюл. № 21
7. **Ключников А. Д., Кузьмин В. Н., Попов С. К.** Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах //М.: Энергоатомиздат. – 1990. – Т. 9.
8. **Михеев М. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. -3-е изд., репринтное //М.: ООО «ИД «БАСТЕТ». – 2010.
9. **Strogonov K. V., Borisov A. A.** Cold experiment as a model of basalt melting //2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2022. – С. 1-6.
10. **Strogonov K.** et al. For Calculation of Perforated Hearth Burner Equipment to the Bubble-Type Furnaces //International Symposium on Sustainable Energy and Power Engineering. – Springer, Singapore, 2022. – С. 143-151.
11. **Strogonov K.** et al. Development of a Degassing Plant for a Promising Melting Reactor for Basalt //International Conference on Efficient Production and Processing. – Springer, Cham, 2021. – С. 142-150.

А.В. Молостова¹, А.Н. Журкин², М.Я. Погребисский³, С.М. Нехамин³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОЩНОСТИ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА СТОРОНЕ ВТОРИЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В настоящей работе описано устройство компенсации неактивных составляющих мощности дуговой сталеплавильной печи с полупроводниковым преобразователем переменного тока. Особенность компенсации неактивных составляющих мощности в данном случае заключается в использовании преобразователя на вторичном напряжении печного трансформатора. Это позволяет предотвратить загрузку печного трансформатора неактивной мощностью и увеличить коэффициент мощности и КПД печи. Актуальность данного решения состоит в том, что компенсация производится непосредственно у электроприёмника, т.к. обычно фильтро-компенсирующие устройства устанавливаются в узле нагрузки, т.е. подключаются к секции с печным трансформатором. Для анализа работы полупроводникового преобразователя была разработана обобщённая стохастическая модель электродуговой нагрузки и проведено имитационное моделирование.

Ключевые слова – дуговая сталеплавильная печь, неактивная мощность, качество электрической энергии, преобразователь переменного тока, фильтро-компенсирующее устройство

1. ВВЕДЕНИЕ

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) представляет собой неблагоприятный электроприёмник в плане электромагнитной совместимости с питающей сетью. Это вызывается, главным образом, резкопеременным режимом работы печи, нелинейным характером вольт-амперной характеристики (ВАХ) дуги, а также несимметричной нагрузкой фаз печи и явлением переноса мощности. Кроме того, такие установки обычно работают с низким коэффициентом мощности $\cos \varphi$, который у мощных печей (120 т и выше) достигает значений 0,7–0,8. Этим обусловлена необходимость в одновременной компенсации неактивной мощности и повышении коэффициента мощности и КПД.

Выражение для полной мощности электроприёмника с нелинейной ВАХ $S, B \cdot A$:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (1)$$

где P – составляющая активной мощности, Вт; Q – составляющая реактивной мощности, вар; D – составляющая мощности искажения.

Наиболее распространённым средством компенсации неактивных составляющих мощности является фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ), подключённое к узлу нагрузки. Такое решение оправдано в плане электромагнитной совместимости с питающей сетью, но не позволяет управлять коэффициентом мощности печи и повышать её КПД. Как видно из выражения (1), в случае компенсации составляющих Q и D непосредственно у потребителя появляется возможность увеличить активную мощность и энерге-

тическую эффективность установки, однако, в случае ДСП такой вариант более затратен по капитальным вложениям, поскольку элементы ФКУ выбираются на значительно большие номинальные значения тока. В настоящее время для полупроводниковых устройств такой выбор возможен благодаря появлению мощных силовых IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) транзисторов и ИГТ (Integrated Gate-Commutated Thyristor) тиристоров. Преимуществом данных полупроводниковых ключей является возможность коммутации с высокой частотой, что позволяет поддерживать устойчивое горение дуги при времени коммутации меньшем постоянной времени дуги, т.е. $t_{\text{коммутации}} < \tau_{\text{дуги}}$, где $\tau_{\text{дуги}}$ составляет от 0,5 до 5,0 мс в зависимости от стадии плавки [1].

2. УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, РАБОТАЮЩЕЕ НА ОБОБЩЁННУЮ ЭЛЕКТРОДУГОВУЮ НАГРУЗКУ

2.1. Схема устройства компенсации неактивной мощности

Рассматриваемое устройство компенсации представляет собой статический полупроводниковый преобразователь, подключаемый на вторичное напряжение параллельно нагрузке, как показано на рис. 1. Обозначения на рис. 1: U_{S2} – напряжение вторичной обмотки печного трансформатора, В; U_1 – напряжение первичной обмотки вспомогательного трансформатора, В; $U_{2.k}$ – напряжение k-ой вторичной обмотки вспомогательного трансформатора, В. В таком случае устройство аналогично управляемому источнику тока и позволяет, подобно активному фильтру, улучшать форму тока на стороне короткой сети.

Полупроводниковый преобразователь состоит из звена управляемого трёхфазного

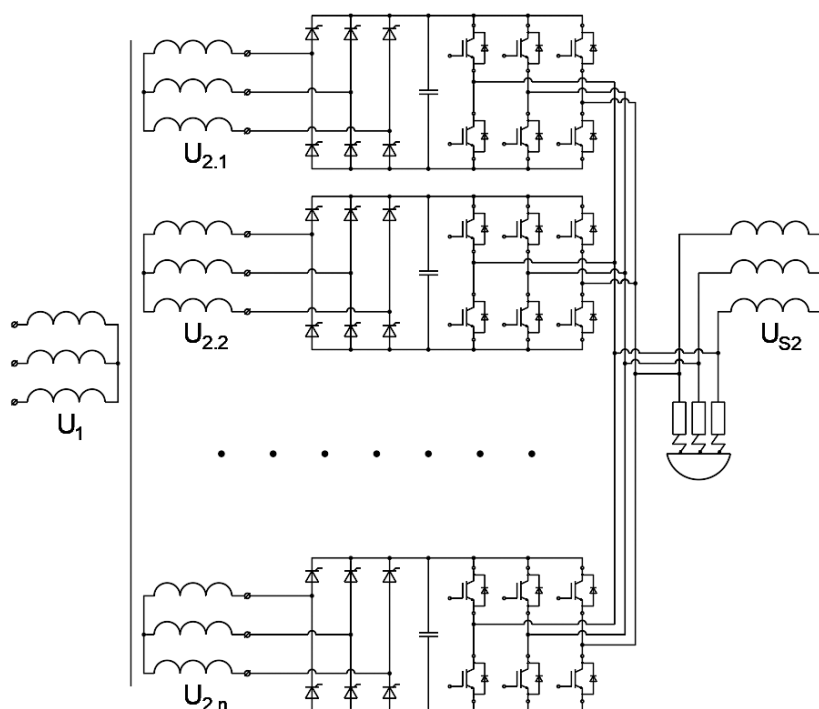


Рис. 1. Схема подключения устройства компенсации параллельно нагрузке

выпрямителя, звена постоянного тока, звена управляемого трёхфазного инвертора на IGBT-транзисторах или звена импульсного тока. На выходе преобразователя посредством

широтно-импульсной модуляции и обратной связи по току формируется ток компенсации. Устройство получает питание от отдельного трансформатора, что позволяет ему поддерживать напряжение на нагрузке при провалах напряжения основного источника.

2.2. Обобщённая стохастическая модель дуги переменного тока

Для анализа работоспособности нового ФКУ и определения его основных рабочих параметров была разработана обобщённая стохастическая модель дуги переменного тока.

Уравнения электрической цепи с дугой:

$$u_{arc} = u_{2ph} - i_{arc} \cdot R_{ph} - L_{ph} \cdot \frac{di_{arc}}{dt}; \quad (2)$$

$$i_{arc} = \frac{u_{arc}}{r_{arc}},$$

где u_{arc} – напряжение дуги, В; u_{2ph} – напряжение источника, В; i_{arc} – ток дуги, А; R_{ph} – активное сопротивление контура, Ом; L_{ph} – индуктивность контура, Гн; r_{arc} – активное сопротивление дуги, Ом.

Выражение обобщённой модели дуги переменного тока:

$$\frac{dr_{arc}}{dt} = \frac{r_{arc}}{\tau} \left(1 - \frac{u_{arc} i_{arc}}{p_{01} r_{arc}^{-\alpha_1}} - \frac{u_{arc} i_{arc}}{p_{02} r_{arc}^{-\alpha_2}} \right), \quad (3)$$

где p_{01} и p_{02} – составляющие постоянной отводимой мощности дуги, Вт; α_1 и α_2 – дополнительные коэффициенты, $\alpha_1 = 2$ и $\alpha_2 = 0$ [2–3].

Отводимая мощность дуги определяется как [4]:

$$p_0 = 2\pi^{1/2} \cdot \sigma^{-1/2} \cdot l^{3/2} \cdot \sigma_{sv} \cdot T^4, \quad (4)$$

где σ – удельная проводимость ионизированного разрядного промежутка, См/м; l – длина столба дуги, мм; σ_{sv} – постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma_{sv} = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴; T – абсолютная температура столба дуги, К.

Величина удельной проводимости ионизированного разрядного промежутка σ принята равной $2 \cdot 10^3$ См/м; среднее значение абсолютной температуры столба дуги T принято равным 4500 К. Такая модель позволяет учитывать геометрические и термодинамические характеристики дуги при ряде допущений (например, форма дуги принята неизменно цилиндрической). Величины τ и T задаются как случайные с нормальным законом распределения. На рис. 2 приведена схема для расчёта (2-4).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения расчётных значений использовались данные ДСП-180 [5]. На рис. 3 показаны кривые напряжение и тока дуги, а также сумма высших гармоник тока дуги. Полученные результаты позволяют настроить систему управления преобразователем и определить технические характеристики вентилях. Номинальный ток компенсации для ДСП-180 (полная компенсация) составляет порядка 20-30 кА. Частота коммутации вентилях составляет более 2 кГц. Этим обусловлены значительные динамические потери в силовых транзисторах.

Для обобщённой оценки степени нелинейных искажений были построены зави-

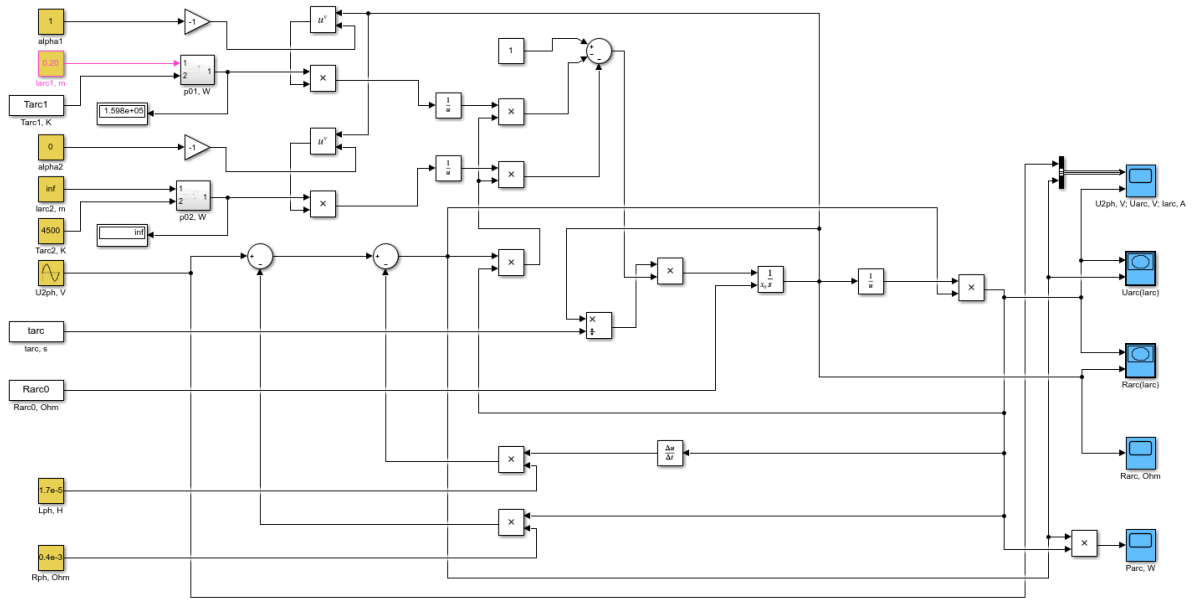


Рис. 2. Схема Simulink для решения уравнений обобщённой стохастической модели дуги переменного тока

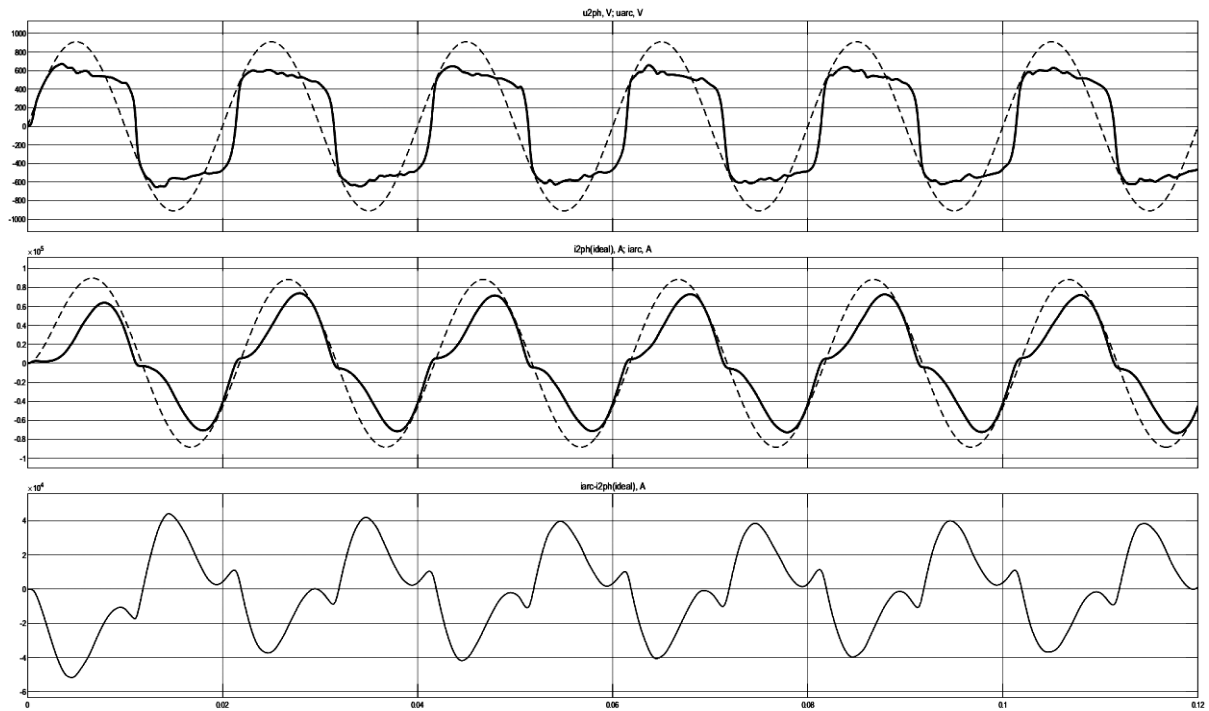


Рис. 3. Кривые напряжения дуги (верх), тока дуги (посередине), сумма высших симости суммарных коэффициентов гармонических искажений напряжения дуги $THD_U, \%$ тока дуги $THD_I, \%$ (см. рис. 4). При увеличении длины дуги и межэлектродного расстояния гармонические искажения напряжения уменьшаются, а тока – увеличиваются. Из сравнения THD_U и THD_I на рис. 4 видно, что гармонические искажения тока меньше, чем напряжения.

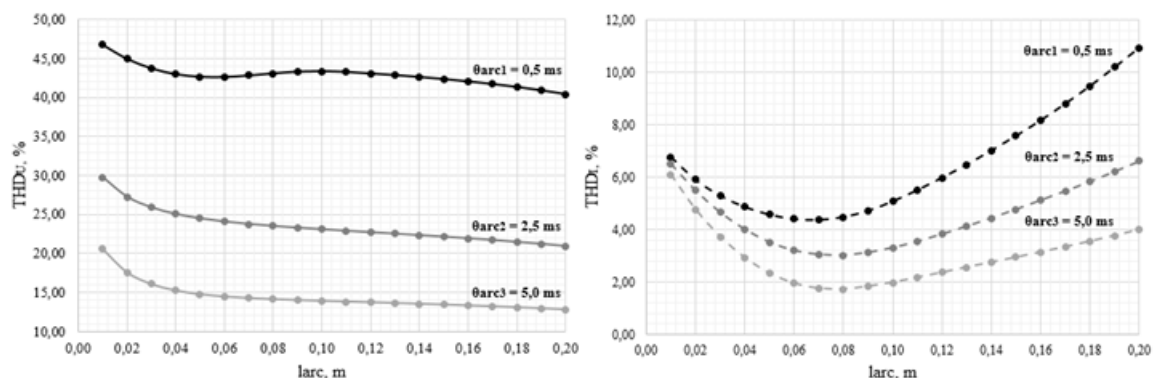


Рис. 4. Зависимости коэффициентов THD_U (справа) и THD_I (слева) от длины дуги

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная схема компенсации неактивных составляющих мощности позволяет снизить негативное влияние дуговой сталеплавильной печи на питающую сеть и повысить коэффициент мощности и КПД самой печи. Компенсирующее устройство работает по принципу параллельной фильтрации, т.е. фильтрации тока нагрузки.

Разработанная модель обобщённой стохастической электродуговой нагрузки переменного тока позволяет учитывать случайный характер горения дуги за счёт введения случайных искажений входных параметров дуги. Данная модель основана на комбинированном уравнении Касси-Майра. Кроме этого, построенная модель учитывает некоторые геометрические (например, длину дуги или её радиус) и термодинамические (например, температуру) параметры горячей дуги переменного тока. Из-за сильных различий температуры внутри и на поверхности дуги для расчёта было принято среднее значение абсолютной температуры. С помощью построенной модели были получены зависимости суммарных коэффициентов гармонических искажений напряжения и тока дуги от её длины, которые могут быть полезны при настройке системы управления ДСП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Корнилов Г.П.** Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Энергетика и теплоэнергетика металлургической отрасли. – 2013. – № 1. – С. 76–82.
2. **Golestani S., Samet H.** Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace models / S. Golestani, H. Samet // IET Generation, Transmission & Distribution, 2016. – pp. 1–10.
3. **Golestani S., Samet H.** Polynomial-dynamic electric arc furnace model combined with ANN / S. Golestani, H. Samet // International Transactions on Electrical Energy Systems, 2018. – pp. 1–15.
4. **Logar V., Dovzan D., and Skrjanc I.**, “Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace,” ISIJ International, vol. 51, no. 3, 2011, pp. 382–391.
5. **Николаев А.А.** Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. канд. техн. наук: 05.09.03. / Николаев Александр Аркадьевич – Магнитогорск, 2009. – 204 с.

Секция 8

Робототехника

Руководитель –
д.т.н. **И.В. Меркурьев**

*А.М. Соколов*¹, *А.П. Жарков*², *В.В. Борисов*³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

КАСКАДНО-КОМПОЗИЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКОВ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается построение каскадно-композиционной модели для оценки эффективности и рисков управления многозвенным роботом-манипулятором с учетом воздействия внутренних факторов системы и факторов окружающей среды, оказывающих негативное влияние на процесс его функционирования. Приведена общая структура построения указанной модели, а также описание входящих в нее компонент. Представлены результаты апробация каскадно-композиционной модели для оценки эффективности и рисков управления на примере трехзвенного последовательного робота-манипулятора с угловой системой координат.

Ключевые слова – последовательный робот-манипулятор, каскадно-композиционная модель, эффективность управления

1. ВВЕДЕНИЕ

При реализации управления последовательным многозвенным роботом-манипулятором (МРМ) существуют риски возникновения ситуаций, при которых не удастся обеспечить его эффективное функционирование ввиду наличия внутрисистемных факторов, а также внешних факторов окружающей среды.

Анализ литературных источников показал, что на практике при эксплуатации электромеханических и робототехнических систем, к которым относится МРМ, наиболее часто возникают риски следующих трех основных групп [1-5]:

- эксплуатационные (превышение заданного уровня энергопотребления, преждевременный износ оборудования),
- технические (недостижение заданной точности позиционирования захвата, недостижение заданного уровня скорости функционирования)
- связанные с охраной труда (безопасность нахождения оператора и обслуживающего персонала в рабочей зоне при эксплуатации МРМ).

Показатели эффективности определяются с учетом рисков в зависимости от стратегии и цели управления. На практике в качестве основных показателей эффективности функционирования МРМ выделяют их быстродействие, точность позиционирования захвата и удельное энергопотребление.

Зависимости между управляющими параметрами, которые представляют собой целевые значения углов поворота звеньев, и затратами электрической энергии на осуществление перемещения, а также их воздействия на риски нарушения этих процессов носят существенно нелинейный характер. Это обусловлено спецификой математического описания механической структуры МРМ, нелинейностью зависимостей, определяющих решение обратной задачи кинематики, а также влиянием факторов неопределенности параметров внешней среды при функционировании МРМ.

В этой связи для обеспечения эффективного управления на каждой стадии функционирования МРМ с учетом возможных рисков и динамически изменяющихся факторов внешней среды целесообразно использовать нечеткий подход [6], а также методы гибридизации и комплексирования нечетких моделей [7].

2. КАСКАДНО-КОМПОЗИЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РИСКОВ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Структурная схема каскадно-композиционной модели

Постановка задачи комплексного управления рисками при функционировании МРМ может быть сформулирована следующим образом:

$$S \rightarrow \min, \text{ при } R \leq R_{per},$$

$$S = s_k k + s_E E,$$

$$E = FE (E_0, \dots, E_N),$$

$$k = FA (k_0, \dots, k_N),$$

$$R = FR (R_0, \dots, R_N),$$

где S – показатель, характеризующий затраты на электрическую энергию приводов звеньев МРМ для осуществления операций и дистанцию между требуемым и полученным значениями координат позиционирования захвата МРМ; R – обобщенный риск управления (нарушения процессов) МРМ в целом; R_{per} – допустимый уровень обобщенного риска управления МРМ; E – общие затраты на энергию; R_i – риск управления i -го процесса; s_k, s_E – весовые коэффициенты, определяющие степень важности учета при управлении МРМ соответствующих показателей эффективности.

Предложена каскадно-композиционная модель для оценки эффективности и осуществления комплексного управления рисками при функционировании МРМ, структурная схема которой приведена на рис. 1.

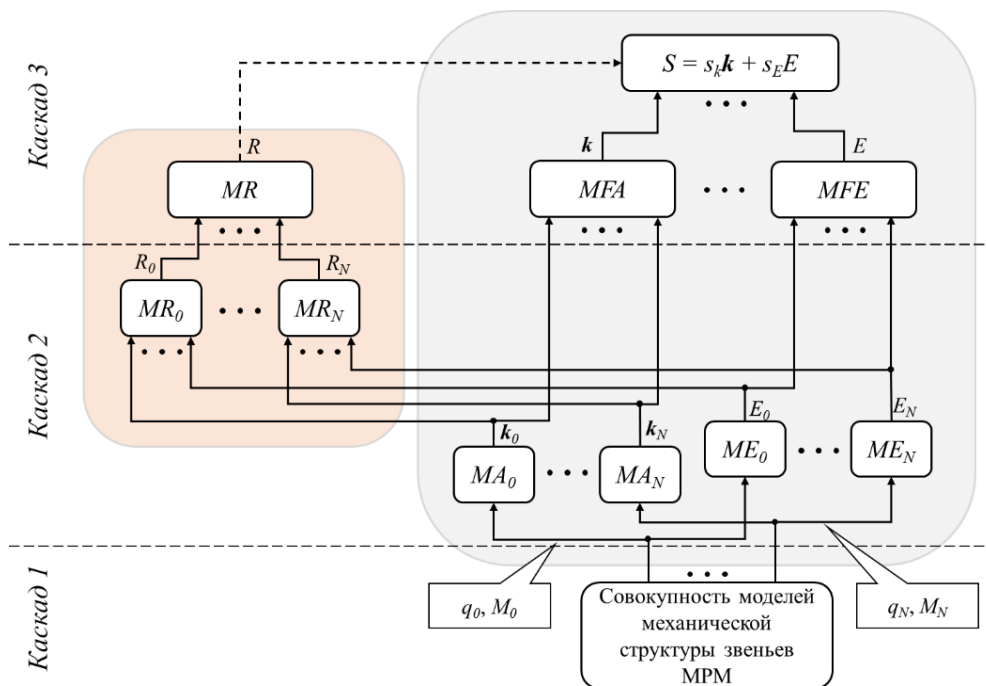


Рис. 1. Структурная схема каскадно-композиционной модели оценки эффективности и рисков управления МРМ

Каскады приведенной каскадно-композиционной модели включают модели для оценки эффективности и рисков управления на каждой стадии функционирования МРМ, а также модели для обобщенной оценки эффективности и рисков управления МРМ в целом. Подробное описание моделей, входящих в каскады, будет представлено в следующем разделе.

2.2. Структура каскадов каскадно-композиционной модели

Каскад 1 включает в себя совокупность нечетких компонентных моделей для анализа каждой стадии функционирования МРМ. Под стадией функционирования в данном случае понимаются перемещения отдельно взятого звена МРМ на заданный угол q_j ($j = 0 \dots N$). Данная модель предназначена для решения обратной задачи кинематики (ОЗК) для каждого из звеньев МРМ с учетом неопределенности факторов внешней среды.

В *каскад 2* входят совокупности моделей $\{ME_j \mid j = 0 \dots N\}$ и $\{MA_j \mid j = 0 \dots N\}$, которые реализуют зависимости FE_j и FA_j предназначенные для оценки затрат энергии E_j ($j = 0 \dots N$) для поворота j -ого звена на заданный угол с целью достижения требуемого положения и оценки конечного положения звена. В качестве основы для создаваемых моделей второго каскада выбран нечетко-логический подход, а сами модели представляют собой согласованные базы нечетких продукционных правил [3].

Во 2-й каскад также входят модели $\{MR_j \mid j = 0 \dots N\}$, реализующие зависимости FR_j и предназначенные для оценки рисков нарушения при перемещении j -ого звена (превышение уровня энергопотребления при осуществлении перемещения, недостижение заданной точности позиционирования звена и т.д.). Данные модели строятся на основе нечетко-логического подхода и представляют собой согласованные базы нечетких продукционных правил. Входными нечеткими переменными для модели MR_j служат переменные E_j , A_j , а выходной — R_j .

Каскад 3 включает нечеткие продукционные модели MFE и MFA , используемые для оценки затрат E на электрическую энергию и точности позиционирования A , соответственно.

Помимо моделей MFE и MFA в состав третьего каскада входит модель MFR оценки рисков нарушения процессов функционирования МРМ, которая реализует зависимость вида:

$$R = FR(R_0, \dots, R_N).$$

С учетом выбранной стратегии оценивания и управления рисками могут быть использованы различные модели оценки рисков R , например, на основе максимизирующего критерия.

2.3. Результаты моделирования

Для апробации описанной каскадно-композиционной модели оценки для обобщенной оценки эффективности и рисков управления МРМ было проведено компьютерное моделирование для трехзвенного робота-манипулятора с угловой системой координат.

Пример восстановленной зависимости $R_j = FR_j(E_j, A_j)$, реализуемой 2 каскадом рассматриваемой модели, приведен на рис. 2.

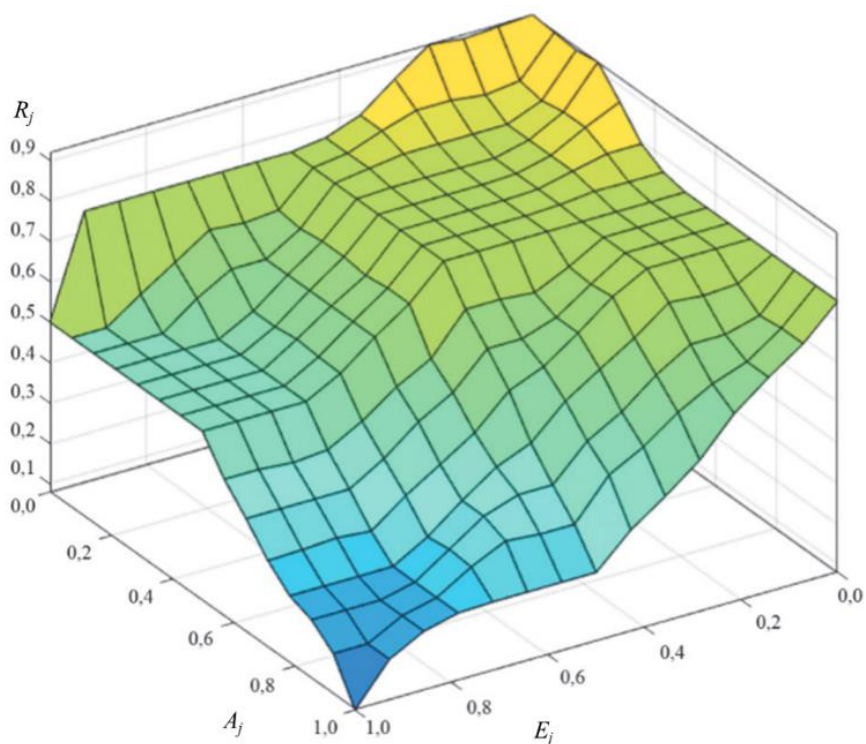


Рис. 2. Пример построения зависимости $R_j = FR_j(E_j, A_j)$

Итоги комплексного управления рисками на каждой стадии функционирования на примере трехзвенного МРМ (в виде результирующих нечетких множеств) при непревышении уровня риска технологического процесса, равного 0,6 ($R \leq 0,6$), представлены на рис. 3.

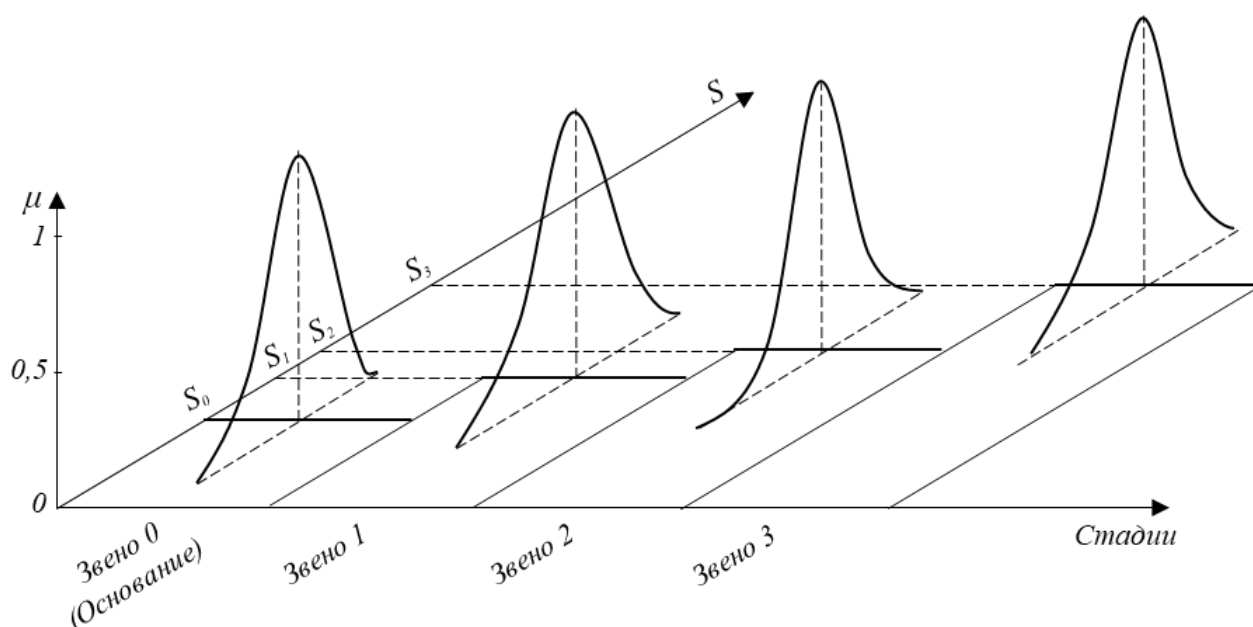


Рис. 3. Результат комплексного управления рисками на каждой стадии функционирования на примере трехзвенного МРМ.

Итоги выполненной оценка эффективности и рисков управления МРМ позволяют сделать выводы о достоверности полученных результатов.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы были выделены три основных группы риска, возникающих при функционировании МРМ: эксплуатационные, технические, связанные с охраной труда. Для организации управления на каждой стадии с учетом возможных рисков выделенных групп, а также динамически изменяющихся факторов внешней среды, предложено использование каскадно-композиционной модели учета рисков и эффективности управления.

Выполнено компьютерное моделирование для апробации на примере трехзвенного последовательного МРМ. Итоги проведенного компьютерного моделирования позволяют сделать выводы о достоверности полученных результатов и перспективности предлагаемых научно-технических решений.

Работа выполнена в рамках проекта «Методы и технологии интеллектуального управления многозвенными роботами-манипуляторами на основе нейро-нечетких моделей» (ПНИ 20/22-0000028/47) при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и ИТ» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Voznenko T. I., Kudryavtsev K. Y.** Algorithm for Multi-Channel Robotic Device Control Based on Minimizing Bayesian Risk // *Procedia Computer Science*. 2021. Т. 190, С. 803-807. DOI: 10.1016/j.procs.2021.06.093.
2. **Borisov V.V., Kurilin S.P., Prokimnov N.N., Chernovalova M.V.** Fuzzy cognitive modeling of heterogeneous electromechanical systems // *Journal of Applied Informatics*. 2021. Т. 16. № 1 (91). С. 32-39. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-1-32-39
3. **Gualtieri L., Rauch E., Vidoni R.** Development and validation of guidelines for safety in human-robot collaborative assembly systems // *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Т. 163, С. 107801. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107801.
4. **Курилин С.П., Соколов А.М., Прокимнов Н.Н.** Компьютерная программа для моделирования показателей технического состояния электромеханических систем // *Прикладная информатика*. 2022. Т. 17. № 2 (98). С. 105-119. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-105-119
5. **Blinov A.O., Borisov A.V., Konchina L.V., Novikova M.A.** Applying the models of magneto-rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // *Journal of Applied Informatics*. 2022. Т. 17. № 2 (98). С. 133-142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
6. **Guzman A., Aoyama A.** Measuring the Benefit of Invest in Pipeline Safety using Fuzzy Risk Assessment // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. Т. 45, С. 116-132. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.018
7. **Borisov V. V.** Hybridization of Intellectual Technologies for Analytical Tasks of Decision-Making Support// *Journal of Computer Engineering and Informatics*. 2014, Т. 2, № 1. С. 148–156.

И.В. Апанасевич¹, Д.Р. Андреев¹, Г.Р. Сайпулаев², И.В. Меркурьев³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА МАКЕТА НОВОГО АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРОСОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается построение нового типа автоматического робототехнического комплекса для периодического мониторинга несущей способности стальных тросов шахтного подъемного оборудования. Создание робототехнического комплекса обусловлено требованиями по обеспечению безопасности функционирования грузоподъемного оборудования и автоматизации технологических процедур мониторинга технического состояния стальных тросов. Разработано новое техническое решение робототехнического комплекса в виде многозвенного механизма с электрогидравлической исполнительной системой, обеспечивающей монтаж дефектоскопа на стальном тросе. Разработана новая математическая модель функционирования комплекса, алгоритмы управления и прикладное программное обеспечение для выполнения периодического мониторинга в автоматическом режиме. Представлены результаты математического моделирования функционирования комплекса, дана оценка эффективности предлагаемых технических решений.

Ключевые слова – робототехнический комплекс, неразрушающий контроль, математическая модель, управление движением

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка методов оценки технического состояния строительных, промышленных и грузоподъемных систем является актуальной задачей машиностроения, решение которой позволяет обеспечить безопасность функционирования производства. Необходимость контроля технического состояния стальных тросов обусловлена повышенными требованиями к безопасности эксплуатации грузоподъемного оборудования на протяжении всего периода эксплуатации. Оценка несущей способности стальных тросов проводится при входном контроле на предприятии-изготовителе, а также в процессе эксплуатации по заданному техническому регламенту. Причиной снижения несущей способности стальных тросов являются коррозионная потеря поперечного сечения, обрыв витых проволок и прядей стального троса. Методы контроля несущей способности стальных тросов основаны на математических моделях, описывающих напряженно-деформированное состояние нагруженного стального троса с различными сплетениями прядей и свойствами материала. Методы неразрушающего контроля могут быть построены с использованием различных физических принципов. В настоящее время успешно применяются акустический, вихретоковый, виброакустический, магнитный, радиоволновой, радиационный, тепловой, электрический и др. методы неразрушающего контроля, детально описанные в [1].

Достаточно подробное решение задач диагностики с использованием оборудования магнитной и вихретоковой дефектоскопии представлено в работах [2-4]. С использованием методов неразрушающего контроля оценивают наличие коррозии, дефектов и износа

несущих элементов конструкций, проводят сравнение измеренных параметров с расчетными значениями.

Автоматизированная система периодического мониторинга технического состояния стальных тросов дает возможность сократить расходы на техническое обслуживание и поверочные испытания, обеспечивая при этом повышенную безопасность функционирования. Проведенный анализ современного состояния развития робототехнических комплексов показывает на неуклонное увеличение областей применения роботов во всех сферах деятельности человека при усложнении выполняемых технологических задач. Таким образом, создание перспективных видов робототехнических диагностических комплексов является актуальным.

2. РАЗРАБОТКА НОВОГО СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

2.1. Разработка эскизного проекта робототехнического комплекса

Применяемый в робототехническом комплексе магнитный дефектоскоп Интрос-Авто компании ООО «Интрон Плюс» состоит следующих основных частей: магнитных головок, аналогового модуля и блока управления и индикации. Магнитные головки состоят из двух полуцилиндров с роллерной системой, предназначенной для центрирования стального троса (рис.1). Магнитные головки дефектоскопа позволяют контролировать техническое состояние стальных канатов с диаметрами от 30 мм до 70 мм. Продольная скорость движения каната в процессе диагностирования устанавливается постоянной в диапазоне от 1,0 м/с до 5 м/с.



Рис. 1. Магнитный дефектоскоп с роллерной системой

В целях автоматизации технологических процессов диагностики поставлена и решена задача конструирования робототехнического комплекса в виде многозвенного устройства для автоматического подведения и монтажа магнитных головок дефектоскопа на стальном тросе (рис.2). Периодический мониторинг технического состояния стальных тросов осуществляется в заданных условиях эксплуатации без непосредственного участия специалистов по неразрушающему контролю.

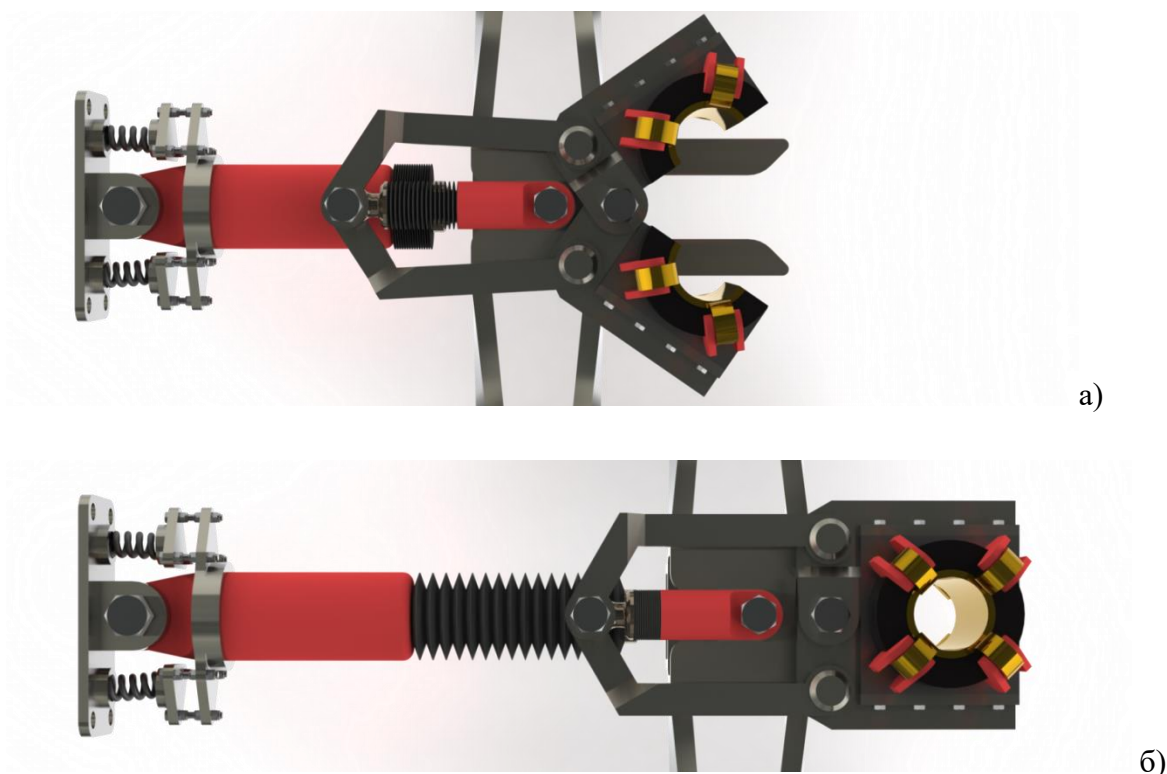


Рис.2. Эскизный проект робототехнического комплекса

Для перемещения двух блоков дефектоскопа из технологической ниши в активную зону разработана система автоматического управления движением, включающая в себя исполнительную систему на базе гидропривода, измерительную систему датчиков положения звеньев механизма и положения движущегося троса. Отличительной особенностью разработанного эскизного проекта и системы автоматического управления движением является динамическая разгрузка робототехнического комплекса от случайных ударных воздействий на дефектоскоп со стороны движущегося стального троса с возможными обрывами витых проволок троса. Ударное воздействие передается на подрессоренные ролики, перемещающиеся по горизонтальным неподвижным направляющим. Принцип функционирования робототехнического комплекса основан на свойстве системы управления передней стойки самолетного шасси парировать интенсивные колебания при интенсивном внешнем взаимодействии. В системе предусматриваются два гидроцилиндра, обеспечивающих выдвигание магнитных головок дефектоскопа и смыкании их вокруг стального троса. Кожух позволяет защитить гидроцилиндры от угольной пыли и грязи.

2.2. Разработка силовой гидравлической системы робототехнического комплекса

Учитывая, что робототехнический комплекс функционирует в запыленной угольной пылью шахте при значительных внешних силовых воздействиях, в качестве привода выбрана гидравлическая приводная система цикловой автоматики.

Разработанный конкурсный вариант схмотехнического решения гидравлической схемы силовой части предлагаемого робототехнического комплекса представлен на рис.3.

Дроссель ДР1 применён для регулирования скорости перемещения выходного звена цилиндра (Ц) для прямого и обратного хода захватов. Двухсторонний гидрозамок (ЗМ) обеспечивает фиксацию положения штока Ц. Пневмогидравлический аккумулятор (АК) обеспечивает обратное перемещение штока Ц. Обратный клапан КО2 является зарядным, а дроссель ДР2 обеспечивает опорожнение АК с расходом, дающим нужную скорость перемещения штока Ц. Из соображений компактности, надёжности и сравнительно кратковременного периода работы системы при диагностике состояния троса использован насос (Н) постоянной подачи с переливным клапаном, перепускающий жидкость через гидроочиститель (Ф) в открытый гидробак (Б). Обратный клапан КО3 служит для защиты фильтроэлемента Ф от прорыва при загрязнении. Обратный клапан КО4 исключает подсос воздуха из атмосферы за счёт обеспечения подпорного сливного давления. Направляющий распределитель (Р) осуществляет прямой и обратный ход выходного звена Ц. Вентили ВН1, ВН2 в штатном режиме функционирования заблокированы и открываются для «ручного» перемещения штока Ц при отключённом насосе в целях обслуживания системы и регламентных работ.

Наличие АК позволяет оптимизировать энергопотребление, улучшить тепловой режим и повысить надёжность и живучесть системы, обеспечив, в частности, отвод блоков прибора от троса даже при аварийном отключении энергопитания. С этой целью рабочий объём АК рассчитывается из условия обеспечения прямого и обратного перемещения захватов. Установленное в напорную линию реле давления (РД) автоматически включает приводящий электродвигатель (ЭД) насоса при падении давления в напорной линии ниже заданного значения и отключает ЭД при достижении требуемого давления. В штатной или аварийной ситуации (например, в случае обрыва энергопитания ЭД), запасённая в АК энергия используется для обратного хода штока Ц для отвода захватов с магнитными головками дефектоскопа от стального троса.

Предложенная циклограмма работы робототехнического комплекса изображена на рис. 4.

Для составления уравнений динамики робототехнического комплекса использован формализм Лагранжа и математическая модель исполнительной гидросистемы [5,6]. Полученная система нелинейных дифференциальных уравнений описывает управляемое движение элементов конструкции робототехнического комплекса при выполнении заданной циклограммы работы с учетом динамики исполнительной системы и внешних дестабилизирующих воздействий.

Проведенный расчет параметров математической модели на тестовых движениях робототехнического комплекса и при заданном уровне внешних возмущений позволил оценить требуемые характеристики силовой и измерительной части комплекса. Сформированный облик технической системы был реализован в виде малого макетного образца на базе электропривода малой мощности и микроконтроллера Ардуино. Найдено программное управление движением звеньев комплекса. Разработано программное обеспечение макетного образца робототехнического комплекса, обеспечивающее выполнение поставленных задач.

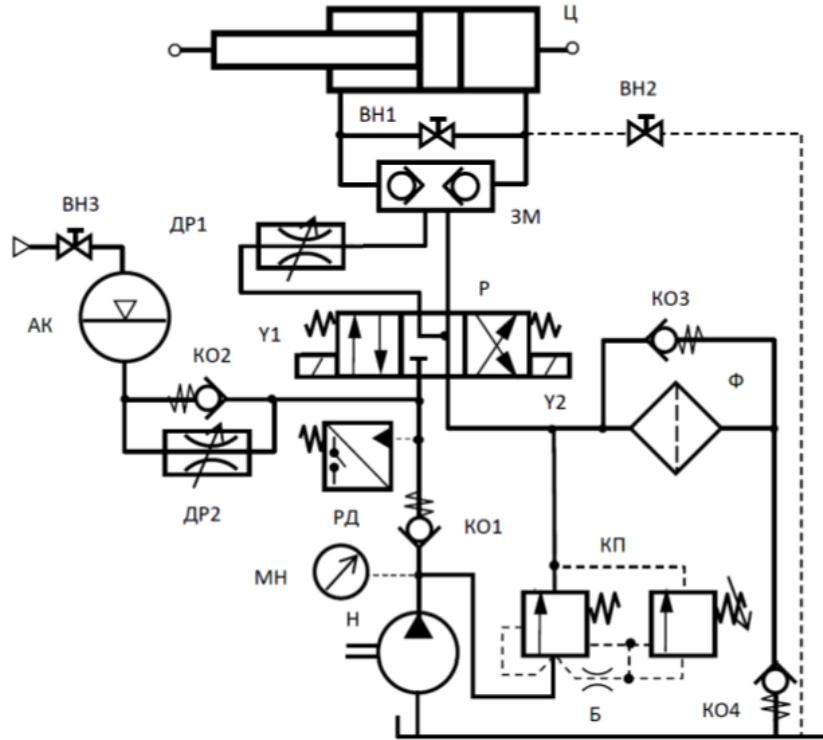


Рис.3. Принципиальная гидравлическая схема робототехнического комплекса

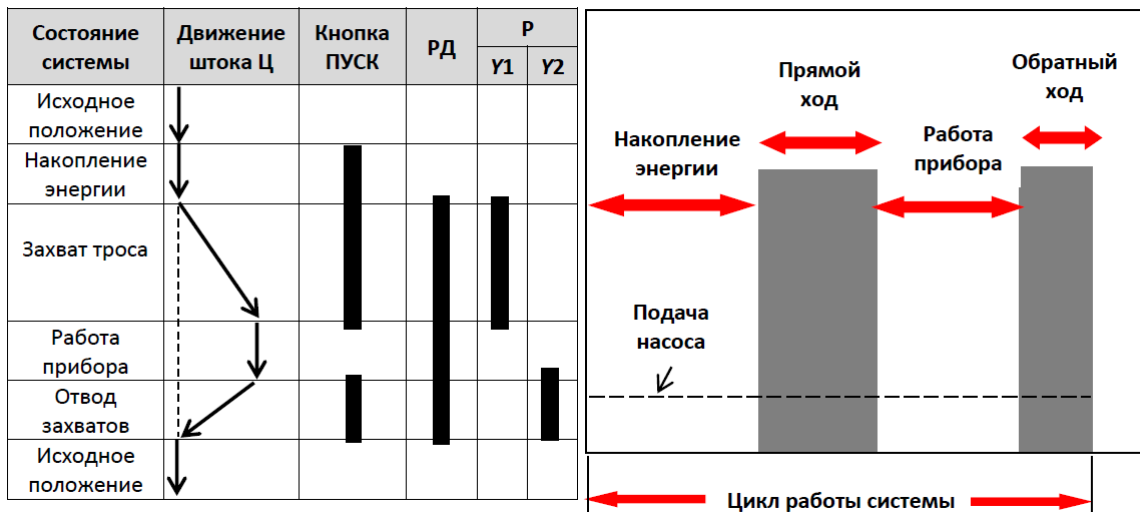


Рис.4. Циклограмма работы комплекса

Проведенное численное и натурное моделирование движения робота показывает достижимость выполнения целей автоматического закрепления и демонтажа магнитного дефектоскопа на стальном канате. Результаты математического моделирования функционирования робототехнического комплекса позволяют перейти к процессу внедрения робототехнического комплекса в промышленности.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены технические требования к робототехническому комплексу для решения задач мониторинга технического состояния тросового оборудования. Разработана 3D модель автономного робототехнического комплекса, представляющего собой управляемое

многозвенное устройство с целевым оборудованием магнитной дефектоскопии стальных тросов для выполнения заранее определенного набора технологических задач в суровых условиях эксплуатации шахтного подъемного оборудования без непосредственного участия специалистов по неразрушающему контролю.

Разработана новая математическая модель робототехнического комплекса, описывающая движение многозвенного механизма при выполнении технологических процедур дефектоскопии.

Найдено программное движение и управление движением звеньев комплекса, предложены конкурсные схемотехнические решения для гидроприводной части системы.

Проведено численное и полунатурное моделирование движения робототехнического комплекса.

Проведена сборка экспериментального прототипа робототехнического комплекса и исследована математическая модель функционирования робота с учетом динамики исполнительных и измерительных систем робота. Проведена оценка точности выполнения поставленных задач управления движением.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка прототипа нового автономного мобильного робота для решения задач мониторинга технического состояния тросового оборудования» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А.** Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин. Изд-во "Инновационное машиностроение", Москва, 2019, 247с.

2. **Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Сухоруков Д.В., Рудяк А.Р.** Магнитная дефектоскопия - эффективный инструмент мониторинга технического состояния проводов и грозотросов воздушных линий электропередачи // Электрические станции. 2019. № 12 (1061). С. 28-37.

3. **Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Шпаков И.И., Гончаров В.В.** Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 5. С. 7-16.

4. **Слесарев Д.А., Потехин О.П., Шпаков И.И., Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н.** Мониторинг технического состояния талевых канатов буровых установок эксплуатационного и разведочного бурения нефтяных и газовых скважин: технология, эффективность, перспективы // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 6. С. 13-22.

5. **Зуев Ю.Ю., Зуева Е.Ю., Меркурьев И.В., Скулова П.А., Дони В.** Постановка прямой и обратной задачи следящего гидравлического привода с дроссельным управлением с позиции системно-креативного подхода//XVI Международная конференция по электромеханике и робототехнике. Санкт-Петербург, 2021. С. 106-110.

6. **Меркурьев И.В., Сайпулаев Г.Р., Орлов И.В., Чан Т.Ч.** Роботизированное устройство для автоматизации контроля состояния тросов в горнодобывающей промышленности// В сборнике: Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Санкт-Петербург, 2021. С. 66-68.

В. Дони¹, П.А. Скулова¹, М. Р. Сайпулаев², Б.И. Адамов³

1 – студент, 2 – аспирант, 3 – руководитель проекта

РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРО-ГИДРОПНЕВМОПРИВОДА, УВЕЛИЧИВАЮЩЕГО ФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБНОСТИ ЧЕЛОВЕКА И КАЧЕСТВО ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

АННОТАЦИЯ

Предложены новые конструктивные, схемотехнические решения и математические модели активного экзоскелета, применяемого для реабилитации нарушений опорно-двигательного и вестибулярного аппарата человека. Разработана трехмерная модель активного экзоскелета с суставными исполнительными механизмами на базе следящих электромеханических и электрогидравлических приводов с дроссельным управлением потоками гидроэнергии.

Предложен новый электрогидравлический исполнительный механизм с симметричными поворотными гидродвигателями, встроенным крановым золотниковым гидросилителем, шаговым электродвигателем и кинематической обратной связью по положению выходного звена экзоскелета. Проведена оценка динамических свойств привода активного экзоскелета и разработаны алгоритмы и прикладные программы для решения задач управления движением по оценке вектора состояния системы. Предложены алгоритмы управления приводами экзоскелета, обеспечивающие требуемое быстродействие и точность перемещений корпуса.

Ключевые слова – экзоскелет, математическая модель, датчики, управление, оценивание состояния

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание шагающих аппаратов и активных экзоскелетов человека является сложной задачей механики и теории автоматического управления. Актуальность поиска новых технических решений шагающих аппаратов и активных экзоскелетов человека связана с увеличивающимся числом приложений экзоскелетов в промышленности, в здравоохранении и в военном деле [1, 2]. Экзоскелеты человека принято разделять на активные и пассивные по наличию двигателей, усиливающих силовые возможности человека. Все типы экзоскелетов предназначены для снижения нагрузки на опорно-двигательный аппарат человека. Существенными проблемами активных экзоскелетов является высокая стоимость и сложность аппаратов, а также конечное время работы активного экзоскелета из-за ограниченных источников внешней энергии и существенных массово-габаритных характеристик.

При разработке экзоскелетов возникает необходимость решения комплексных научно-технических задач, направленных на формирование математической модели системы, разработку методов управления движением и оптимизации ее свойств.

Анализ современного состояния разработок показывает на достаточно полную проработку кинематических схем и математических моделей движения экзоскелета [3–5], алгоритмов оптимизации движения [6]. В развитие существующих схем были

предложены новые рациональные схемы построения двигательной системы [8, 9], проведена разработка алгоритмов управления [9–11] и оценивания состояния системы [12–14].

Для получения измерительной информации о пространственном положении звеньев экзоскелетов применяют различные типы датчиков [9–14]: энкодеры, гироскопы, акселерометры, датчики момента, датчики силы, магнитометры, потенциометры, датчики биосигналов и др.

К числу весьма сложных проблем в создании активных экзоскелетов человека и шагающих аппаратов следует отнести методические междисциплинарные проблемы конструирования управляемого силового каркаса активного экзоскелета, предназначенного для управления движением человеком с нарушением опорно-двигательного и вестибулярного аппарата. Особый интерес представляет разработка механизмов с гибкими (нежесткими) приводами для экзоскелетов и систем разгрузки. Конструктивные особенности этих приводов позволяют существенно упростить многие сложные аспекты проектирования таких устройств, в том числе вопросы размещения приводов относительно суставов человека, без существенного увеличения габаритов носимого устройства.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается активный экзоскелет нижних конечностей человека для медицинского, реабилитационного назначения, обеспечивающий заданное перемещение человека с нарушением в опорно-двигательном или вестибулярном аппарате. Поставлена задача разработки контура энергетики активного экзоскелета в виде совокупности устройств, в состав которых входит блок усиления, двигатели, внешняя корпусная часть, электрическая проводка и силовая трансмиссия. Необходимо разработать контур управления активного экзоскелета в виде совокупности устройств и датчиков, обеспечивающих сбор и обработку первичной измерительной информации датчиков внешней и инерциальной информации, формирование управляющего сигнала в виде обратной связи по оценке вектора состояния. Управляющие сигналы должны обеспечить минимизацию энергозатрат активного экзоскелета при безопасном, комфортабельном перемещении человека по горизонтальной опорной шероховатой поверхности. Учитывая, что шагающий механизм является системой, взаимодействующей с человеком, важно обеспечить безопасность и удобство использования экзоскелета. Необходимо провести расчет оптимальных по энергозатратам законов управления и разработать соответствующее математическое и программное обеспечение для макета шагающего аппарата.

3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОГО ЧЕЛОВЕКА

Рассматриваемая комплексная робототехническая система, взаимодействующая с человеком, обладает достаточно большим числом степеней свободы, которые описываются исключительно громоздкими математическими моделями, описывающими управляемое пространственное движение системы.

В докладе обсуждается методика формирования вариантов схмотехнических и конструктивных решений корпусной части экзоскелета нижних конечностей (рис.1).



Рис. 1. Трехмерная математическая модель экзоскелета нижних конечностей

Выбор кинематической схемы корпусных частей экзоскелета произведен на основе бионического принципа. Количество степеней свободы экзоскелета должно быть таким, чтобы его конструктивные элементы не сковывали движения человека. В разработанной математической модели экзоскелета на бедро, голень и голеностоп каждой ноги приходится по одному шарниру, обеспечивающему поворот этих звеньев в сагиттальной плоскости (позиции 1, 2 и 3 на рис. 1). Для обеспечения подвижности туловища относительно тазового пояса предусмотрены два дополнительных шарнира (позиции 4а и 4б на рис. 1).

Во всех звеньях активного экзоскелета человека расположены датчики инерциальной информации – микромеханические гироскопы и акселерометры, обеспечивающие измерения углового положения и угловых скоростей всех звеньев конструкции. В дополнение к измерениям инерциальных датчиков использованы встроенные датчики двигателей, установленных в шарнирных соединениях экзоскелета. Комплексная обработка измерительной информации об угловом положении и угловой скорости звеньев позволяет получить управление в виде обратной связи по оценке вектора состояния системы.

4. РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА ЧЕЛОВЕКА

Создание динамической модели системы необходимо для формирования управляющих воздействий по принципу обратной связи для стабилизации заданного программного движения системы. При этом для формирования управления важную роль играют алгоритмы оценивания состояния динамической системы и набор доступных для применения датчиков, измерения которых используются в алгоритмах управления.

Рассмотрим экзоскелет с жесткой конструкцией силового каркаса при симметричном движении ног в сагитальной плоскости. Кинематическая схема экзоскелета представлена на рис. 2.

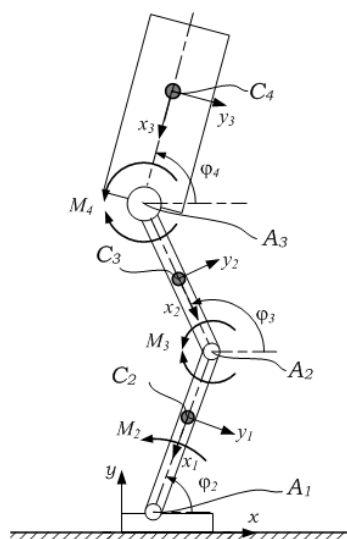


Рис. 2. Кинематическая схема экзоскелета нижних конечностей в сагитальной плоскости

На кинематической схеме введены следующие обозначения: C_2, C_3, C_4 – центры масс голени, бедра и корпуса соответственно; A_1, A_2, A_3 – шарниры, соединяющие звенья экзоскелета; $\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – углы поворота звеньев экзоскелета; M_2, M_3, M_4 – управляющие моменты, создаваемые приводами, расположенными в шарнирах A_1, A_2, A_3 соответственно.

Ранее в статье [6] авторами была разработана математическая модель динамики для экзоскелета. В качестве основы для построения системы управления движением экзоскелетом будем использовать динамическую модель из указанной статьи:

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{F}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^2 + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{P}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}, \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения: $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ – матрица инерционных сил; $\mathbf{F}(\mathbf{q})$ – матрица скоростных сил; $\mathbf{D} = \text{diag}(\mu_2, \mu_3, \mu_4)$ – диагональная матрица диссипативных сил, характеризующих трение в шарнирах; $\mathbf{P}(\mathbf{q}) = (M_{G2} \cos \varphi_2 \quad M_{G3} \cos \varphi_3 \quad M_{G4} \cos \varphi_4)^T$ – вектор-столбец моментов, возникающих от действия сил тяжести; $\mathbf{M} = (M_2 - M_3 \quad M_3 - M_4 \quad M_4)^T$ – вектор-столбец управляющих моментов, создаваемых приводами, которые расположены в шарнирах звеньев экзоскелета; $\mathbf{q} = (\varphi_2 \quad \varphi_3 \quad \varphi_4)^T$ – вектор-столбец обобщенных координат, состоящий из углов поворота звеньев экзоскелета; $\mu_k (k = 2, 3, 4)$ – коэффициенты линейного трения в шарнирах звеньев экзоскелета; $M_{Gk} (k = 2, 3, 4)$ – максимальные величины моментов гравитационных сил, воспринимаемые выходными звеньями приводами.

В докладе обсуждаются задачи построения законов управления движением экзоскелета и выбора схемотехнических решений для исполнительной системы, реализующих требуемое быстродействие системы. Проведен анализ точности и энергозатрат при заданных типах движения. В качестве программного движения рассмотрен подъем человека из сидячего положения в вертикальное стояние; а также стабилизация вертикального положения экзоскелета при начальных отклонениях его звеньев от вертикали. По результатам

моделирования показана работоспособность предлагаемого управления звеньями экзоскелета нижних конечностей с использованием показаний энкодеров и блоков инерциальных датчиков (микромеханических гироскопов и акселерометров).

По совокупности массовых, габаритных, энергетических и динамических, показателей предложено применение электрогидравлических исполнительных механизмов с симметричными поворотными гидродвигателями, встроенным крановым золотниковым гидроусилителем, шаговым электродвигателем и кинематической обратной связью по положению выходного звена.

По требованиям, предъявляемым к исполнительным механизмам активного экзоскелета медицинского назначения, наиболее предпочтительными являются следящие электрогидравлические приводы с дроссельным управлением, которые способны обеспечить трудно реализуемые в электромеханических системах функции стопорения и свободного перемещения выходных звеньев в штатных и аварийных режимах. Развиваемые моменты в двигателях голеностопных, коленных и тазобедренных суставов не превышают 300 Нм для поддержания движения человека массой 100 кг. Для обеспечения расчётных режимов работы электрогидравлических исполнительных механизмов активного экзоскелета человека достаточно укомплектовать блок питания объёмно-роторным насосом мощностью 350 Вт для пациента массой 100 кг и 140 Вт при массе 60 кг.

Предложена схема гидравлического блока питания, включающая в себя компактный гидробак открытого типа объёмом 0,05–0,1 л, моментный энергоёмкий электродвигатель с расчётной частотой вращения 3000–4000 об/мин, миниатюрный объёмно-роторный насос постоянной подачи 1,3–3,3 л/мин для давления 6,3 МПа, а также необходимый комплект защитной гидроаппаратуры.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое новое техническое решение активного экзоскелета человека может быть использовано в медицинских приложениях, в том числе в задаче вертикализации пациентов с нарушениями функций опорно-двигательного аппарата. Разработанная новая математическая модель активного экзоскелета человека описывает комплексную систему, состоящую из механической части в виде шарнирно соединённых звеньев экзоскелета, поддерживающих заданное положение и движение человека. Исполнительная часть системы представляет собой новое техническое решение поворотных суставных следящих электромеханических и электрогидравлических приводов с дроссельным управлением потоками гидроэнергии. Сенсорная часть системы образована распределённой сетью датчиков силовой, инерциальной и угломерной информации. Разработанная новая система автоматического управления обеспечивает требуемые законы движения звеньев экзоскелета в виде обратной связи по оценке вектора состояния системы. Предложены алгоритмы оптимизации энергозатрат при движении активного экзоскелета. Адекватность разработанной математической модели проверена на разработанном в ходе выполнения проекта макетном образце шагающего аппарата.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка макетного образца активного экзоскелета на базе электро-гидропневмопривода, увеличивающего физические способности человека и качество процессов управления движением» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехника» в 2020-2022 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **De Looze M.P. et al.** Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load // *Ergonomics*. 2015. No 5. P. 671–681.
2. **Роботизированная** механотерапия: возможность применения экзоскелета для нижних конечностей у пациентов с нарушением функции ходьбы при рассеянном склерозе / А. А. Геворкян, С. В. Котов, В. Ю. Лиждвой // *Альманах клинической медицины*. 2020. № 1. С. 7–12.
3. **Трехзвенная** математическая модель для задачи стабилизации вертикальной позы человека / И.В. Новожилов [и др.] // *Математическое моделирование движений человека в норме и при некоторых видах патологии*. М.: Изд-во механико-математ. факультета МГУ. 2005. С. 7–20.
4. **Моделирование** процессов вставания экзоскелета из положения сидя / Г.Я. Пановко [и др.] // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016. № 3. С. 19–24.
5. **Saypulaev M.R., Zuev Y.Y. and Saypulaev G.R.** Development of the Lower Extremity Exoskeleton Dynamics Model Using in the Task of the Patient Verticalization // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. No 2096. P. 1–8.
6. **Оптимизация** времени вертикализации экзоскелета по критерию энергоэффективности / С.Ф. Яцун [и др.] // *Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. чт.: в 2 ч. Ч. 2*. Курск: Изд-во Юго-Зап. гос. ун-та. 2016. С. 151–160.
7. **Zuev Y.Y., Saypulaev M.R. and Doni V.** Laws of Motion of the Lower Extremities and Structural-parametric Synthesis of Electro-hydraulic Executive Modules of the Active Exoskeleton According to the Criterion of Energy Sufficiency // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. No 2096. P. 1–10.
8. **Яцун С.Ф., Рукавицин А.Н.** Определение параметров приводов биоинженерных мехатронных модулей для экзоскелета нижних конечностей человека // *Известия Юго-Зап. Гос. Ун-та*. 2012. № 1. С. 196–200.
9. **Savin S.I., Yatsun A.S. and Yatsun S.F.** Energy-efficient control algorithm for verticalization of the exoskeleton // *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*. 2017. No 5. P. 108–113.
10. **Aliman N. et al.** A robust adaptive-fuzzy-proportional-derivative controller for a rehabilitation lower limb exoskeleton // *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2022. Vol. 5. P. 1–14.
11. **Amiri M.S. et al.** Adaptive Particle Swarm Optimization of PID Gain Tuning for Lower-Limb Human Exoskeleton in Virtual Environment // *Mathematics*. 2020. Vol. 8. P. 1–16.
12. **Lee D. et al.** Development and Control of an Electro-Hydraulic Actuator System for an Exoskeleton Robot // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. P. 1–17.
13. **Lora-Millan J.S., Hidalgo A.F. and Rocon E.** An IMUs-Based Extended Kalman Filter to Estimate Gait Lower Limb Sagittal Kinematics for the Control of Wearable Robotic Devices // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 144540–144554.
14. **Ка D.M. et al.** Minimizing Human-exoskeleton Interaction Force by Using Global Fast Sliding Mode Control // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2016. Vol. 14. P. 1–10.
15. **Балакришнан А.В.** Теория фильтрации Калмана. М.: Книга по Требованию, 2021. 164 с.

О.В. Воробьев¹, М.Н. Кирсанов²

1 – аспирант, 2 – руководитель проекта

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКИХ ФЕРМ С ПОДЪЕМОМ. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Приводятся схемы статически определимых плоских ферм и формулы для расчета их прогибов в зависимости от числа панелей. Используется формула Максвелла – Мора для вычисления прогиба. Решения находятся в виде формул методом индукции. Графики строятся для различных соотношений высот и пролетов ферм. Выявляются наиболее и наименее жесткие конструкции.

Ключевые слова – ферма, прогиб, формула Максвелла – Мора, индукция

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Регулярные фермы

Стержневые конструкции широко используются в машиностроении, строительстве, авиации, транспорте, робототехнике. Отличительное свойство ферм – легкость, прочность, удобство транспортировки и монтажа. Расчет ферм на деформации обычно производится в хорошо зарекомендовавших себя программных комплексах, основанных на методе конечных элементов. Для регулярных ферм, имеющих в своей структуре повторяющиеся элементы или группы элементов, существуют также аналитические алгоритмы расчета деформаций ферм, сводящиеся к формулам, пригодным с одинаковой степенью погрешности для расчетов конструкций произвольных порядков. Такие конструкции могут быть элементами космических аппаратов, антенн, робототехнических манипуляторов или применяться в строительстве. Регулярные фермы и проблемы существования статически определимых стержневых структур впервые рассмотрены в [1]. Аналитические решения для прогибов регулярных арочных ферм получены в [2-4]. В справочниках [5, 6] собраны различные схемы плоских статически определимых регулярных ферм и приведены формулы для расчета их прогибов под действием различных нагрузок. Примененный в этих работах метод индукции позволяет также получать аналитические нижние оценки первой собственной частоты свободных колебаний ферм, масса которых сконцентрирована в узлах [7, 8].

1.1. Алгоритм вывода формул

Особую ценность для практики имеют расчетные формулы, содержащие наибольшее число параметров, характеризующих объект исследования. В регулярных фермах основные параметры — это размеры конструкции, нагрузка, свойство материала, порядок регулярности (число панелей). Наибольшую сложность при выводе формул вызывает учет произвольного числа панелей. Рассматриваемый в настоящей работе метод индукции состоит в обобщении по числу панелей ряда отдельных аналитических решений, полученных в системе компьютерной математики. Прогиб рассчитывается по формуле Максвелла – Мора, усилия в стержнях, входящие в эту формулу, находятся методом вырезания узлов. Часто конструкция бывает внешне статически неопределимой (число опор больше трех для плоской не составной системы). Внешняя статическая неопределенность рас-

крывается в этом случае учетом реакций опор в общей системе уравнений равновесия узлов. Процедура обобщения решений может быть выполнена средствами системы компьютерной математики. В системе Maple для этого сначала составляется линейное однородное рекуррентное уравнение, которому удовлетворяет общий член последовательности коэффициентов, входящих в отдельные решения, затем из решения рекуррентного уравнения (также с помощью операторов Maple) находятся общие члены, дающие решение поставленной задачи.

2. СХЕМЫ ФЕРМ

Ниже приведены семь схем статически определимых ферм, не вошедшие в справочники [5, 6], каждая из которых имеет $2n$ панелей. Решетки ферм крестообразные или раскосные. Подъем h средней части фермы у всех схем одинаковый.

2.1. Ферма 1

Ферма на четырех опорах, три из которых являются подвижными шарнирами, а одна неподвижным, с пролетом $L = 2a(2n - 1)$ высотой $2h$ состоит из $m = 8n + 2$ стержней (рис.1).

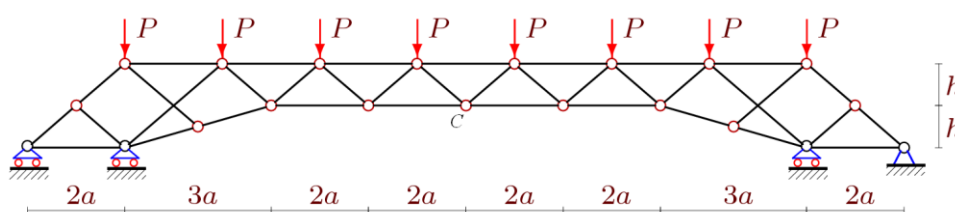


Рис. 1. Ферма 1, $n=5$

За прогиб фермы примем вертикальное смещение среднего узла C нижнего пояса. Для вычисления прогиба используется формула Максвелла – Мора в виде:

$$\Delta = \sum_{j=1}^m N_j \tilde{N}_j l_j / (EF), \quad (1)$$

где EF — жесткость стержней, N_j — усилия в стержне j фермы от внешней нагрузки, \tilde{N}_j — усилие от единичной вертикальной силы, приложенной к узлу C , смещение которого разыскивается, l_j — длина стержня. Пять стержней опор приняты недеформируемыми, и их усилия в сумму не входят. Расчет ряда ферм различного порядка n показывает, что результат вычислений по формуле Максвелла – Мора (1) имеет общий вид:

$$\Delta = P(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 d^3) / (h^2 EF), \quad (2)$$

где $c = \sqrt{a^2 + h^2}$, $d = \sqrt{9a^2 + h^2}$.

В случае действия сосредоточенной силы в узле C методом индукции получены следующие коэффициенты:

$$C_1 = (16n^3 - 72n^2 + 110n - 87) / 6, C_2 = (8n + 3) / 8, C_3 = 1 / 8.$$

Аналогично, при действии нагрузки на нижний пояс коэффициенты имеют вид:

$$C_1 = (20n^4 - 120n^3 + 322n^2 - 486n + 261) / 6,$$

$$C_2 = (4n^2 + 3n - 18) / 4, C_3 = (4n - 5) / 16.$$

Нагрузка на верхний пояс:

$$C_1 = 2(n-1)(5n^3 - 25n^2 + 54n - 63)/3, C_2 = (4n^2 + 3n - 15)/4, C_3 = (n-1)/4.$$

Суммарная нагрузка на верхний пояс составляет $P_0 = 2(n-1)P$.

2.2. Ферма 2

Внешне статически неопределимая ферма высотой $3h$ с длиной пролета $L = 4a(n-1)$ имеет в своем составе $m = 8n - 2$ стержней (рис. 2). Суммарная нагрузка на верхний пояс $P_0 = (2n+1)P$. Зависимость прогиба от числа панелей при загрузении верхнего пояса имеет вид:

$$\Delta = P(C_1 a^2 + C_2 c^2) / (h^2 EF). \quad (3)$$

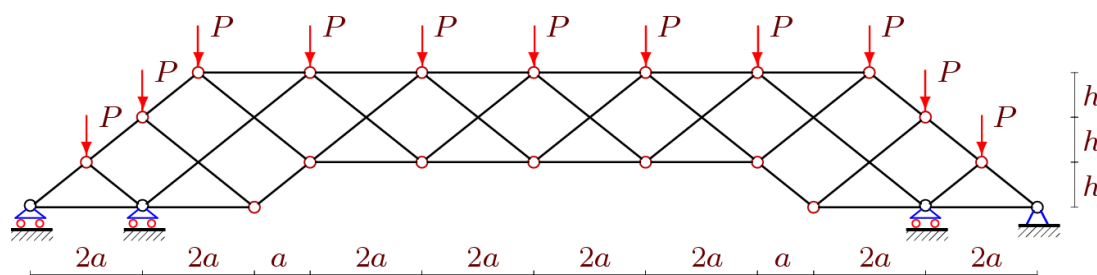


Рис. 2. Ферма 2, $n=5$

Коэффициенты в (3):

$$C_1 = (5n^4 - 4((-1)^n + 10)n^3 + (24(-1)^n + 139)n^2 - 2(31(-1)^n + 115)n + 51(-1)^n + 135) / 6,$$

$$C_2 = (n^2 - ((-1)^n + 2)n - 3(-1)^n + 5) / 2.$$

2.3. Ферма 3

Внешне статически неопределимая ферма высотой $3h$ с длиной пролета $L = 4a(n-1)$ имеет в своем составе $m = 8n$ стержней (рис. 3). Суммарная нагрузка на верхний пояс $P_0 = (2n-1)P$. Зависимость прогиба от числа панелей при загрузении верхнего пояса имеет вид:

$$\Delta = P(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 d^3 + C_4 h^3) / (h^2 EF). \quad (4)$$

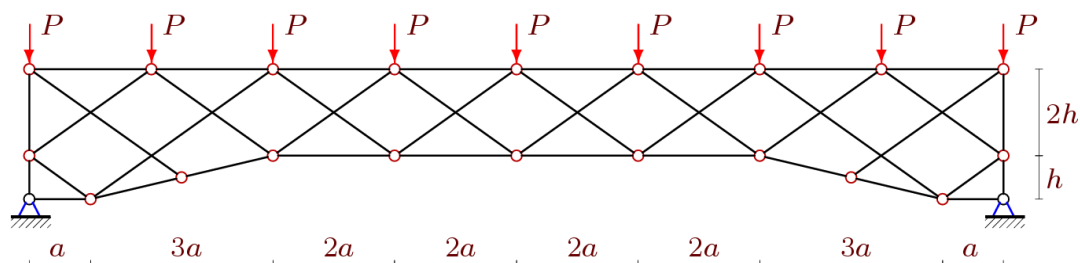


Рис. 3. Ферма 3, $n=5$

Коэффициенты в (4):

$$C_1 = (10n^4 + 16((-1)^n - 5)n^3 + 4(59 - 27(-1)^n)n^2 + 4(47(-1)^n - 70)n - 39(-1)^n + 111) / 12,$$

$$C_2 = (4n^2 + 2(3(-1)^n - 4)n - 14(-1)^n - 1) / 8, C_3 = -(-1)^n / 8, C_4 = (2n - 1) / 2.$$

2.4. Ферма 4

Внешне статически неопределимая ферма с крестообразной решеткой высотой $3h$ с длиной пролета $L = 2a(2n - 1)$ имеет в своем составе $m = 8n$ стержней (рис. 4). Суммарная нагрузка на верхний пояс $P_0 = (2n - 1)P$.

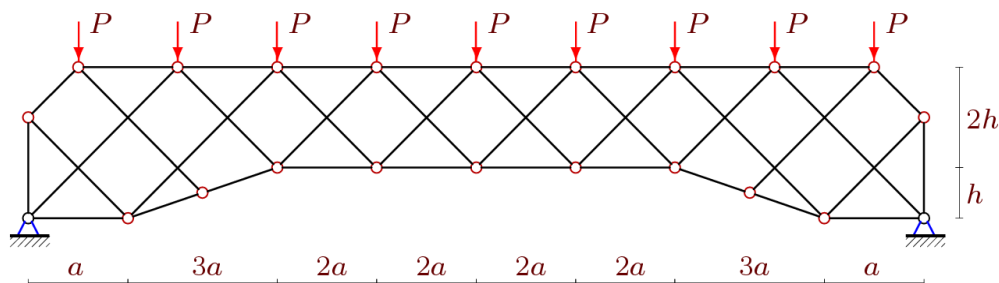


Рис. 4. Ферма 4, $n=5$

Формула (2) для прогиба в этом случае имеет коэффициенты:

$$C_1 = (5n^4 + 2(4(-1)^n - 5)n^3 - (12(-1)^n + 35)n^2 - 2(79(-1)^n + 10)n + 339(-1)^n + 237) / 6,$$

$$C_2 = (2n^2 + (3(-1)^n + 11)n - 7(-1)^n - 47) / 4, C_3 = (n - 4)((-1)^n + 1) / 4.$$

2.5. Ферма 5

Ферма высотой $2h$ с длиной пролета $L = 2a(2n - 1)$ состоит из $m = 8n - 1$ стержней и трех опор. Суммарная нагрузка на верхний пояс $P_0 = 2nP$.

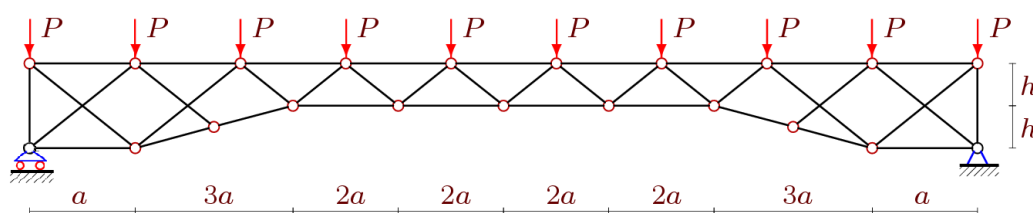


Рис. 5. Ферма 5, $n=5$

Формула для прогиба (4) в этом случае имеет коэффициенты:

$$C_1 = (10n^4 - 20n^3 + 14n^2 - 172n + 228) / 3,$$

$$C_2 = n^2 + 8n - 18, C_3 = (2n - 3) / 2, C_4 = 2n - 2.$$

2.6. Ферма 6

Ферма высотой $2h$ с длиной пролета $L = 2a(2n - 1)$ состоит из $m = 8n - 1$ стержней и двух опор (рис. 6). Суммарная нагрузка на верхний пояс $P_0 = 2nP$.

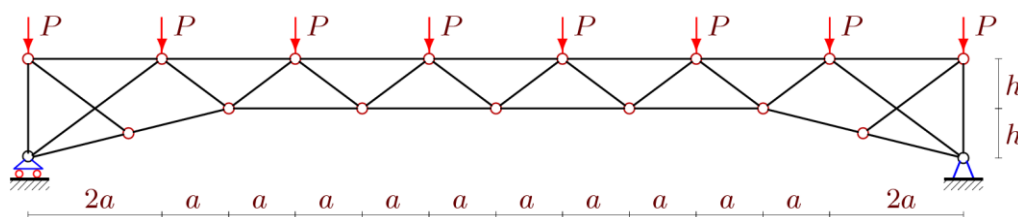


Рис. 6. Ферма 6, $n=4$

Формула для прогиба (2) в этом случае имеет коэффициенты:

$$C_1 = 2(n-1)(5n^3 - 5n^2 + 2n - 15) / 3, C_2 = (4n^2 + 11n - 17) / 4, C_3 = (n-1) / 4.$$

2.7. Ферма 7

Внешне статически неопределимая ферма высотой $3h$ с длиной пролета $L = 2a(2n-1)$ имеет в своем составе $m = 8n$ стержней. Суммарная нагрузка на верхний пояс $P_0 = (2n-1)P$. Формула для прогиба (2) в этом случае имеет коэффициенты:

$$C_1 = (5n^4 - 2(4(-1)^n + 25)n^3 + (72(-1)^n + 181)n^2 - 2(62(-1)^n + 107)n + 15(-1)^n + 33) / 6,$$

$$C_2 = (2n^2 - (3(-1)^n + 5)n + 4(-1)^n + 4) / 4, C_3 = (((-1)^n + 1)n) / 4.$$

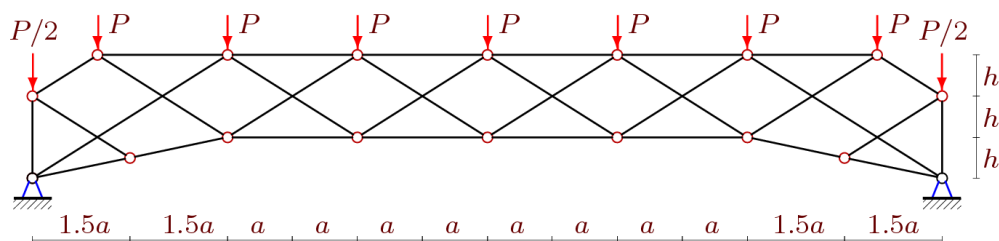


Рис. 7. Ферма, $n=4$

2.8. Графики зависимости прогиба от числа панелей

Приведем графики прогибов ферм как функций числа панелей для всех семи схем. Введем обозначение для относительного безразмерного прогиба: $\Delta' = \Delta EF / (P_0 L)$, где P_0 — суммарная нагрузка на верхний пояс фермы, L — длина пролета. На рисунке 8 приведены кривые зависимости прогибов ферм от числа панелей при $L=100$ м.

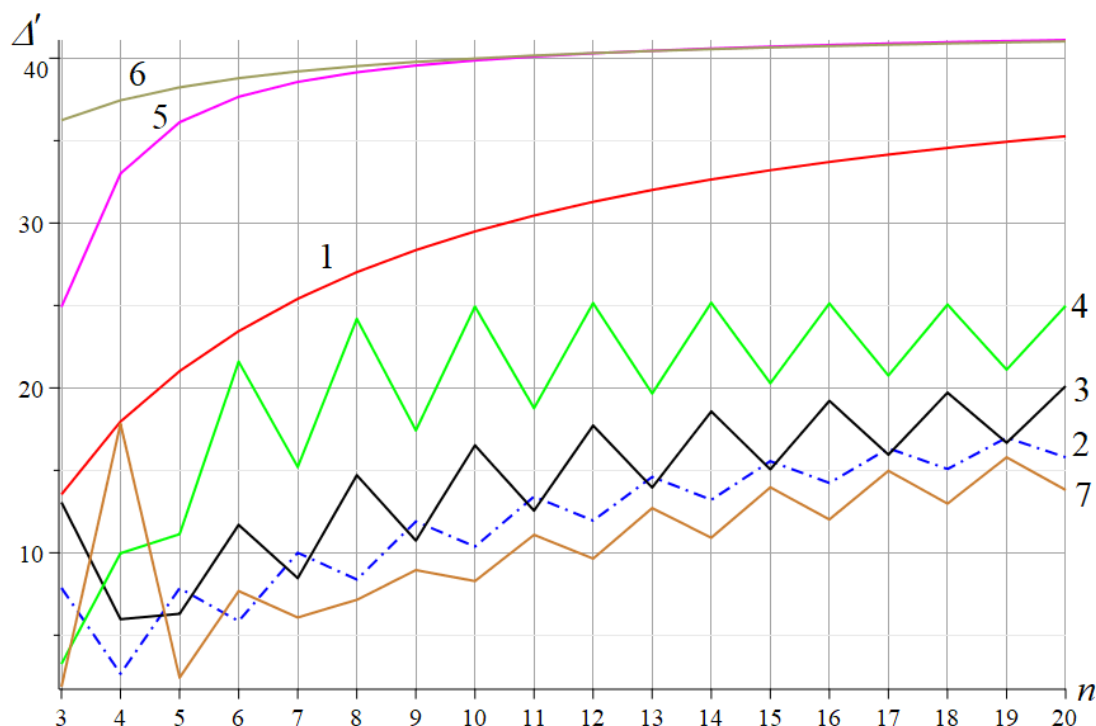


Рис. 8. Кривые зависимостей относительных прогибов ферм 1-7

Высота у всех ферм одинаковая - 5 м, размер панели a зависит от отношения L/n , высота h — от числа панелей по высоте. Для трех ферм (1, 5 и 6) наблюдается монотонное увеличение прогиба при увеличении числа панелей. Это объясняется отсутствием в решениях слагаемых переменных знаков с коэффициентом $(-1)^n$. Три фермы №3, №4 и №7 распорные. В этих фермах от вертикальных сил возникают горизонтальные реакции в неподвижных шарнирах. Однако существенным образом это на повышение жесткости сказалось только в ферме №7. Среди всех рассмотренных схем это самая жесткая при большом числе панелей. В начале же графика кривая №7 имеет большой скачок. При $n=4$ жесткость фермы многократно меньше, чем при $n=3$ и $n=5$. Таким образом, изменив число панелей всего на одну, можно существенно повысить или понизить жесткость конструкции. Фермы №1, №2 имеют сдвоенные боковые опоры. Эти конструкции должны были бы иметь заметно большую жесткость, однако это проявилось только для схемы №2. Графики полученных решений показывают, что в принятой постановке задачи (постоянный, не зависящий от числа панелей, пролет и одинаковая для всех n суммарная нагрузка) относительный прогиб во всех схемах монотонно или скачкообразно увеличивается с увеличением числа панелей.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для нескольких схем статически определимых симметричных ферм с различным числом опор выведены аналитические зависимости прогиба от числа панелей. Построенные кривые выявили особенности схем ферм одного типа. Отмечены наименее и наиболее жесткие схемы ферм. Предлагаемые схемы могут быть использованы в строительстве и машиностроении как несущие элементы, а выведенные формулы как тестовые для оценки численных решений и оптимизации конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hutchinson R.G., Fleck N.A.** Microarchitected cellular solids – The hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2005. № 9(85). С. 607–617. DOI:10.1002/zamm.200410208.
2. **Rakhmatulina, A.R., Smirnova A.A.** The dependence of the deflection of the arched truss loaded on the upper belt, on the number of panels // *Science Almanac*. 2017. № 2–3(28). С. 268–271. DOI:10.17117/na.2017.02.03.268.
3. **Voropay, R., Domanov E.** Analytical solution of the problem of shifting a movable support of a truss of arch type in the Maple system // *Postulat*. 2019. (1).
4. **Kazmiruk I.Y.** On the arch truss deformation under the action of lateral load // *Science Almanac*. 2016. № 3–3(17). С. 75–78. DOI:10.17117/na.2016.03.03.075.
5. **Kirsanov M.** *Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas*. Newcastle upon Tyne, GB: Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2020. 178 с.
6. **Kirsanov M.** *Planar Trusses: Schemes and Formulas*. Newcastle upon Tyne, GB: Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, 2019. 198 с.
7. **Petrenko V.F.** The natural frequency of a two-span truss // *AlfaBuild*. 2021. № 20. С. 2001. DOI:10.34910/ALF.20.1.
8. **Vorobev O.V.** Bilateral Analytical Estimation of the First Frequency of a Plane Truss // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. № 7(92). С. 9204–9204. DOI:10.18720/CUBS.92.4.

**Тезисы
докладов
заочных участников конференции**

А.А. Гаврилов, А.А. Курушкина, С.Д. Блаженова, А.Н. Зейн (НИУ «МЭИ»)

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ХРАНЕНИЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ**

На многих предприятиях по разработке нового энергетического оборудования отсутствует единое информационное пространство для хранения результатов экспериментальных исследований, а также результатов моделирования энергетических процессов, что усложняет исследовательскую работу инженеров и увеличивает ее объемы.

Поэтому было решено разработать программный комплекс, состоящий из базы данных [1-2] и приложения, для хранения, анализа и обработки результатов численных и экспериментальных исследований энергетических процессов. Наличие такого программного комплекса на предприятии позволит не только систематизировать данные, получаемые в ходе различных экспериментов, но также избежать потери опыта исследований при уходе сотрудника с предприятия.

Для того, чтобы облегчить работу инженерам, необходимо также хранить настройки программных комплексов (ПК) для моделирования энергетических процессов, поскольку некорректная настройка таких ПК может привести к существенному отклонению результата расчета от эксперимента.

Помимо вышеперечисленного, в данный программный комплекс было решено включить интеллектуальную систему [3-4], которая бы анализировала и обрабатывала существующие экспериментальные данные, а также данные моделирования и настроек, и рекомендовала бы настройки программных комплексов для моделирования новых задач. Это не только ускорит работу инженеров, но и уменьшит количество ошибок при подборе настроек. Также комплекс позволит компенсировать недостаточность опыта у небольших предприятий, так как с помощью описываемого комплекса они смогут использовать данные о настройках и результатах экспериментов крупных предприятий.

Сложности подобной разработки заключаются в том, что исследование энергетических систем не может быть ограничено фиксированным набором атрибутов, поэтому классический подход к проектированию баз данных (БД) теряет свою актуальность. Следовательно, необходимо разработать такую структуру БД, которая позволила бы хранить любое количество параметров у любых задач. Для этого используются такие приемы, как переход от горизонтальной структуры таблиц к вертикальной, а также применение таблицы со структурой «дерево». Со стороны разработки приложения такие сложности приводят к необходимости реализовывать динамический интерфейс.

Литература

1. **Туманов, В.Е.** Основы проектирования реляционных баз данных / В.Е. Туманов. – Москва: Интернет-Университет Информационных Технологий, 2007. – 421 с.
2. **Разработка** приложений на С# с использованием СУБД PostgreSQL: учебное пособие / И. А. Васюткина, Г. В. Трошина, М. И. Бычков, С. А. Менжулин. - Новосибирск: НГТУ, 2015.— 143 с.
3. **Бурков, А.** Машинное обучение без лишних слов. — СПб.: Питер, 2020. — 192 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»).
4. **Рашка, С.** Python и машинное обучение. / Рашка С., Мирджалили В. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020 – 848 с.

И.П. Шорсткин, А.В. Соломатин, К.В. Крюков (НИУ «МЭИ»)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ»

Курс “Электрические машины” является одной из основных дисциплин при подготовке инженеров в области электроэнергетики. С развитием интернет-технологий появилась возможность перенести учебную деятельность в дистанционный формат [1,2]. Такой формат обучения имеет массу преимуществ, основным из которых является доступ к учебному процессу из любой точки мира. Однако, в отличие от теоретических занятий, для которых весь учебный материал может быть представлен в формате видео роликов или учебных пособий, для практических занятий требуется взаимодействие с физическими стендами. В условиях дистанционного обучения такой опыт получить невозможно, поэтому разрабатываются различные виртуальные лаборатории и лаборатории с дистанционным управлением.

В данной работе описывается лабораторная работа «Исследование характеристик синхронного генератора, работающего параллельно с сетью», созданная с использованием интернет-технологий.

Целью лабораторной работы является изучение конструкции и характеристик синхронных машин, ознакомление со способами включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

Разработанная лабораторная работа проводится через web-сайт и разбита на несколько этапов. Сначала студенту предлагается ознакомиться с теоретическим материалом лабораторной работы и выполнить тестирование по пройденному материалу. После прохождения теоретической части студент выполняет практическую часть, которая состоит из исследования характеристик машины на компьютерной модели и эксперимента на реальном лабораторном стенде. Интерфейсная часть компьютерной модели представляет собой панель управления стендом (рис. 1).

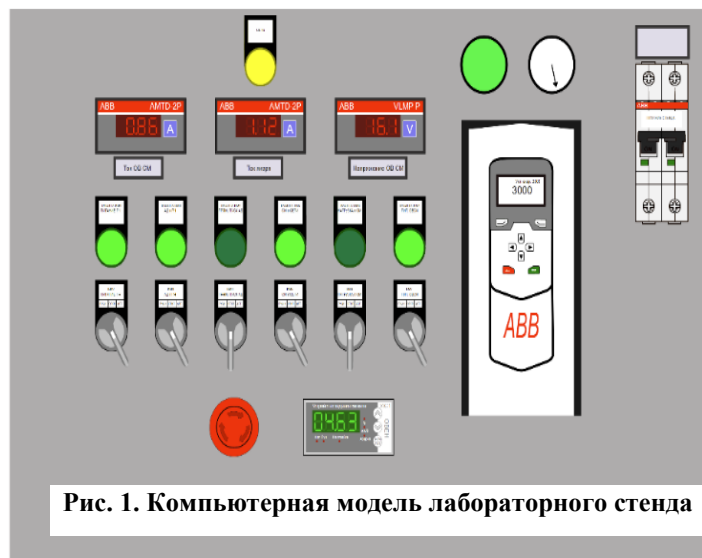


Рис. 1. Компьютерная модель лабораторного стенда

На этой модели студент может отработать методику синхронизации синхронной машины с сетью и снять U-образные характеристики машины. В заключительной части лабораторной работы студент выполняет эксперимент по снятию U-образной характеристики реальной синхронной машины.

Литература

1. **M. Tawfik**, E. Sancristobal, S. Martin, G. Diaz, J. Peire and M. Castro. Expanding the Boundaries of the Classroom: Implementation of Remote Laboratories for Industrial Electronics Disciplines // IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 41-49, March 2013
2. **E. Sancristobal Ruiz**. Virtual and Remote Industrial Laboratory: Integration in Learning Management Systems // IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, no. 4, pp. 45-58, Dec. 2014

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТДЕЛЬНОЙ КВАРТИРЫ МНОГOKВАРТИРНОГО ДОМА В ЧАСЫ УТРЕННЕГО МАКСИМУМА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕГАПОЛИСОВ

В наши дни вопросы исследования электрических нагрузок жилых зданий приобретают особую актуальность в связи с тем, что наблюдается интенсивная электрификация домашних хозяйств и цифровизация всех сфер жизни человека. Эти процессы в наибольшей степени коснулись основы любого жилого многоквартирного здания – отдельной квартиры. При этом в справочной литературе не рассматривается характер электропотребления квартиры, а, как правило, приводится значение её удельной электрической нагрузки.

В данной работе исследовался характер потребления активной мощности на вводе в квартиру в часы утреннего максимума в зимний сезон. По фактическим измерениям с периодичностью раз в минуту были рассчитаны значения средней мощности за 10-минутные интервалы, на основе которых был построен суточный график нагрузки будних дней. Для данного графика анализировалось распределение максимумов активной мощности в течение суток.

Так, для рассматриваемого сезона можно выделить утренний максимум в период с 7:20 до 8:40. Для данного максимума была получена гистограмма распределения случайной величины максимумов активной мощности, представленная на рисунке 1. По виду данной гистограммы можно сделать предположение, что исследуемая случайная величина распределена по нормальному закону. Для данной гистограммы был рассчитан критерий согласия Пирсона χ^2 , равный 6.27. По справочным данным для числа степеней свободы, равного 3, и степени значимости, равной 0.05, χ^2 равен 7.81. Тогда по критерию согласия Пирсона можно утверждать, что гипотеза о нормальном законе распределения случайной величины не противоречит измеренным данным.

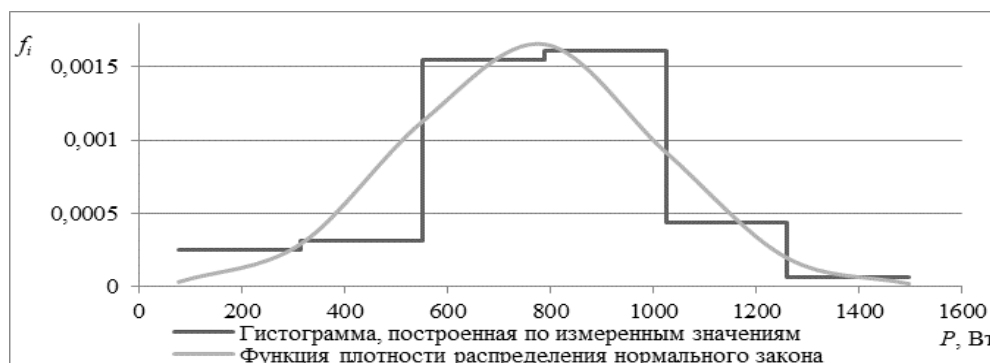


Рисунок 1. Гистограмма распределения активной мощности в часы утреннего максимума

Таким образом, распределение значений активной мощности будних дней в часы утреннего максимума на вводе в квартиру многоквартирного дома соответствует нормальному закону распределения случайной величины с математическим ожиданием, равным 762.64 Вт, и среднеквадратическим отклонением, равным 239.59 Вт.

Литература

1. **Вентцель Е.С.**, Теория вероятностей и ее инженерные приложения/ Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
2. **Шведов Г.В.**, Системы электроснабжения: учебник / Г.В. Шведов, Т.А. Шестопалова. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 312 с

С.В. Курочкин, А.А. Гаврилюк, В.Н. Кулешов (НИУ «МЭИ»)

СОВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЕВОЙ ПЕНЫ

Для создания современных щелочных электролизных батарей с низким удельным энергопотреблением на выработку водорода требуется разработать новый тип электродов [1]. Основой для них может выступать никелевая пена, на поверхность которой можно нанести различные типы катализаторов. Данный материал обладает хорошей адгезией к катализаторам никелевой группы. А высокая пористость никелевой пены значительно облегчает отвод газов с тыльной стороны электрода, тем самым значительно уменьшая градиент давления выделяющихся электролизных газов на газоразделительную диафрагму. Для нанесения катализаторов был использован метод электроосаждения. Данный метод позволяет проецировать синтез данного катализатора на промышленные образцы, что в перспективе позволит перейти к массовому производству без многократного роста стоимости по сравнению с лабораторными образцами. На первом этапе исследований на никелевую пену наносился никелевый порошок марки ПНК-ОТ2. Данное покрытие выступало будущей основой для нанесения катализатора Ni-Fe. Для испытаний полученных образцов использовалась трёхэлектродная ячейка. Электродом сравнения выступал окисно-ртутный электрод, а рабочим – платиновый. В качестве электролита использовался раствор 6М КОН, который нагревался до температуры 90 °С. Плотность тока варьировалась в диапазоне от 1 до 1000 мА/см². С помощью данного метода были получены Тафелевские кривые перенапряжения выделения водорода и кислорода.

Полученные результаты испытаний электродов в трёхэлектродной ячейке подтвердили их высокую каталитическую активность. В катодной области снижение перенапряжения выделения водорода у никелевой пены, в состав покрытия которой входил никелевый порошок, с нанесёнными частичками Ni-Fe, относительно немодифицированной никелевой пены, составило от 50 до 100 мВ. При этом электрод, основа которого – никелевая пена, покрытая только никелевым порошком, показал снижение перенапряжения от 25 до 30 мВ.

В анодной области электрод из никелевой пены без каталитического покрытия показал наихудшие результаты. Модифицирование данного электрода никелевым порошком позволило снизить перенапряжение выделения кислорода до 48 мВ. Дальнейшее развитие активной электрохимической поверхности было достигнуто за счёт нанесения на никелевый порошок частиц Ni-Fe, что продемонстрировало снижение перенапряжения на величину от 50 до 122 мВ.

Исследования проведены в рамках Программы научных исследований ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» ПНИ 20/22-0000028/32 «Энергетика, II очередь», секция 5 «Водородная энергетика». Проект «Высокоэффективный электролизер с системой хранения генерируемых газов для энергоустановок на базе возобновляемых источников с водородным циклом накопления энергии».

Литература

1. Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Kurochkin S.V., Fedotov A.A., Sleptsova E.E., Blinov D.V., Gavriluk A.A., Zhmurko I.E. Water electrolyzer for renewable energy systems // E3S Web of Conferences, 2021, V. 289 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128905004>

О.И. Дьячкова, А.Г. Звончевский, А.В. Федюхин (НИУ «МЭИ»)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

В работе анализируется энерготехнологическая схема нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) на предмет выявления наиболее энергоемких этапов переработки нефти. По результатам анализа установлено, что на этапе первичной переработки сырой нефти наибольшую энергетическую нагрузку несет электрообессоливающая установка с атмосферной трубчаткой (ЭЛОУ-АТ), которая объединяет множество энергоемких процессов [1]. В технологической схеме атмосферного модуля электрообессоливающей установки выявлены потенциальные источники низкопотенциальной теплоты, энергия которых может быть полезно использована. В качестве побочной продукции в схеме ЭЛОУ-АТ выступает углеводородная парогазовая смесь (ПГС), которая поэтапно охлаждается сначала в аппаратах воздушного охлаждения (АВО), а затем в системе водяного охлаждения. Таким образом, тепловая энергия ПГС после ректификационных колонн в схеме ЭЛОУ-АТ попросту рассеивается в окружающей среде.

На основе стратегических направлений [2] и актуальных задач развития нефтехимической промышленности [3] предложены перспективные направления энерго- и ресурсосбережения на основе использования низкопотенциальной тепловой энергии ПГС в технологической схеме ЭЛОУ-АТ. В работе отмечается теоретическая и практическая значимость рассматриваемых направлений при реализации в действующих НПЗ, а также на основе расчетов делается акцент на экономической и экологической эффективности.

Потенциал углеводородной ПГС предлагается использовать в системе рекуперации, состоящей из блока теплообменных аппаратов (ТА), который включается в технологическую сеть параллельно исходным системам охлаждения отбензинивающей и атмосферной колонн. Система блока ТА предназначена для нагрева промежуточного теплоносителя, в качестве которого в первом модуле блока выступает теплосетевая вода, поступающая в индивидуальный тепловой пункт (ИТП). Во втором модуле блока ТА в качестве нагреваемого теплоносителя выступает наружный воздух, который далее направляется в печь для образования оптимального состава газовойоздушной смеси.

Разработанные решения по использованию теплоты ПГС в технологии производства позволяют уменьшить тепловые потери на 14,5 МВт и сократить выбросы CO₂ на 16%. При этом годовой эффект только от экономии топлива составит около 15 тыс. т.у.т/год.

Литература

1. **Сетин С.П.** Системный анализ и управление процессами первичной переработки нефти: дис. канд. тех. наук: 05.13.01/ Сергей Петрович. Самара, 2016. 203
2. **Энергетическая стратегия** Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение от 9 июня 2020 г №1523-р, Москва «Утвердить прилагаемую Энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года.» - М.: Правительство РФ, 2020. – 78 с.
3. **Жданев О. В., Корнев В. В., Рубцов А. С.** О приоритетных направлениях и развитии технологий переработки нефти в России (обзор) // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 9. С. 1263–1274.

О.И. Дьячкова, А.Г. Звончевский, А.В. Федюхин, (НИУ «МЭИ»)

ОЦЕНКА ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА НА ОСНОВЕ ПИНЧ-АНАЛИЗА

В работе рассматривается технология первичной переработки нефти с использованием комбинированной электрообессоливающей установки атмосферно-вакуумной перегонки (ЭЛОУ-АВТ). В данной технологии исследуются всевозможные энергетические потоки, определяется их потребность в подводе и отводе тепла, а также анализируются возможности дальнейшего совершенствования технологической схемы. На основе высокоэффективного энергетического метода производится анализ энергоиспользования и предлагаются решения, которые улучшают показатели энергетической и экономической эффективности.

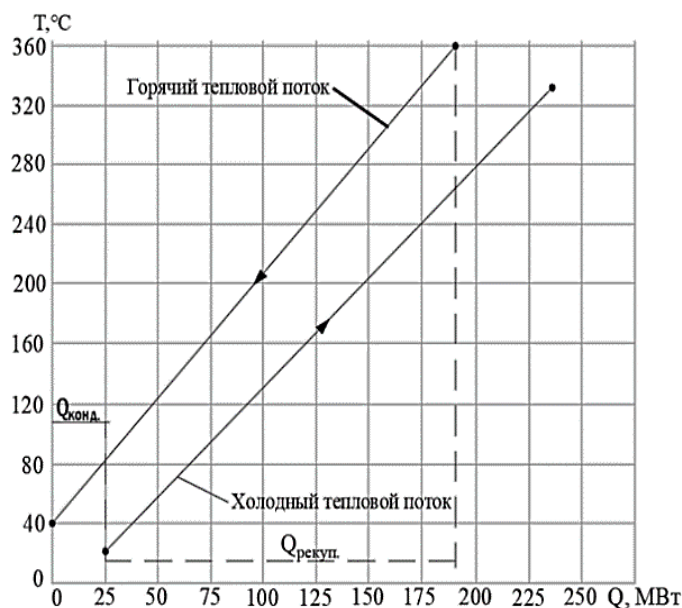


Рис.1. Композитная диаграмма тепловых потоков

что основным лимитирующим звеном для повышения показателей энергетической эффективности является трубчатая печь атмосферной колонны. Для снижения тепловой нагрузки на печь предложен вариант по установке дополнительного рекуперативного теплообменного аппарата кожухотрубного типа, использующего тепло высокопотенциального потока гудрона. Это позволило повысить температуру потока нефти, который направляется для дальнейшей переработки в атмосферную колонну после отбензинивающей колонны, до 340°C .

Таким образом, реализация предложенного технического решения по частичной реконструкции исходной технологической схемы ЭЛОУ-АВТ-7 за счет оптимального распределения горячих тепловых потоков в системе рекуперации перед трубчатой печью позволит сократить расход природного газа и снизить тепловую нагрузку печи на 20%.

Литература

1. Федюхин А.В. Применение прикладных программных средств для решения задач промышленной теплоэнергетики / А.В. Федюхин, И.А. Султангузин, С.Ю. Курзанов, Р.В. Белов, А.В.Бакулин, Т.П. Шомова. – М.: Издательство МЭИ, 2016 – 88 с.

РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХПУТЕВОГО МЕТОДА СУБНАНОСЕКУНДНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ В СИНХРОННЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В современных условиях технического развития крайне актуальной является задача сверхточной синхронизации времени, которая возникает при разработке разнесенных позиций радиолокационных систем, локальных и глобальных навигационных систем, систем с временным уплотнением сигналов типа *SDH/SONET*.

Главным отличием синхронной сети передачи данных (ССПД) [1] относительно несинхронной является наличие только одного задающего генератора тактового сигнала, который генерирует опорную частоту для функционирования всей сети и осуществляет её передачу по линиям связи в виде сериализованных данных до ведомых и промежуточных устройств.

Использование двухпутевого метода синхронизации [2] через дуплексную оптоволоконную линию связи позволяет значительно сократить количество линий, используемых для синхронизации приёмопередающих модулей разнесенной синхронной сети и обеспечения штатного информационно-логического обмена данными. При этом ССПД позволяет избавиться от проблемы нестабильности опорных генераторов (ОГ) на каждом из синхронизируемых устройств.

В ССПД точность синхронизации может быть повышена благодаря измерению разности фаз между тактовым сигналом, тактирующим счётчик времени и сигналами, по которым осуществляется приём и отправка сообщений в канальный уровень. Таким образом каждая временная метка (t_1, t_2, t_3, t_4), используемая в двухпутевом методе, может быть дополнена информацией о фазе ($\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \Delta\phi_3, \Delta\phi_4$ соответственно) – рисунок 1.

После вычисления оценки смещении времени на ведомом устройстве фазовый остаток – та часть, что не уложилось в целую часть периодов, должна быть скомпенсирована на системе ФАПЧ, а счётчик соответственно скорректирован целым числом тактов работы. В таком случае точность синхронизации будет ограничена только 2 величинами:

- точность измерения фазы между тактовыми сигналами;
- точность установки фазового сдвига в системе ФАПЧ.

Использование системы синхронизации позволяет организовать сеть распределенных когерентных синфазных тактовых частот, что позволяет значительно упростить архитектуру распределенной сети приёмопередающих устройств. Важно отметить, что параллельно с синхронизацией устройств в той же ССПД могут передаваться сигнальные данные, данные управления и прочие служебные данные, что было успешно реализовано и протестировано на скоростях 1, 10, 40 Гбит/с соответствующих стандартов *Ethernet*.

Литература

1. **J. Aweya** "Emerging Applications of Synchronous Ethernet in Telecommunication Networks," in *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 56-72, Secondquarter 2012
2. **Нагибин Е.В., Щенин Н.Н.** «Методы сравнения шкал времени» - Радионавигация и время, №6(14), 2020

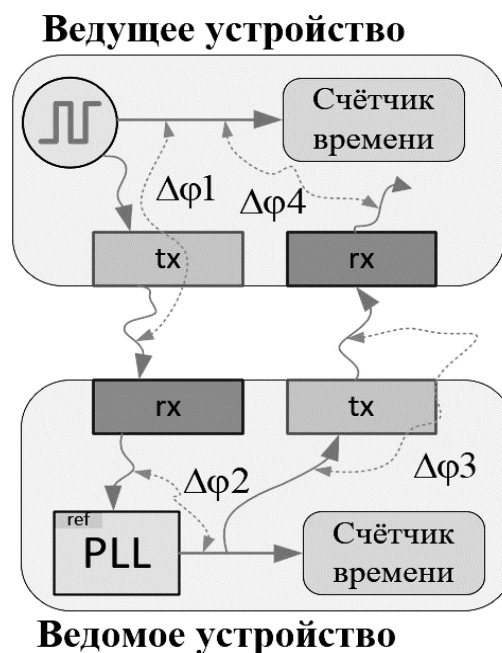


Рис. 10. Тактирование в ССПД

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО СКАНЕРА ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ СТАНДАРТА МЭК61850 ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ

В настоящее время процесс цифровизации вошел в стадию глобальных внедрений. Сфера электроэнергетики также подверглась модернизации: строительство цифровых подстанций, использование новых стандартов обмена данными (МЭК 61850) и использование оборудования с полностью изменённым подходом обработки данных.

Приведенные выше изменения обязывают персонал цифровой подстанции и наладчиков оборудования знать структуру цифровых пакетов данных и уметь анализировать содержимое цифровых пакетов протоколов обмена. В настоящий момент персонал вынужден использовать для анализа цифровых пакетов зарубежное программное обеспечение (ПО), которое предназначено для сетевых администраторов, а не сотрудников службы релейной защиты и персонала цифровых подстанции. Полноценное использование зарубежного профессионального ПО требует переподготовки кадров или разработки специализированного, для использования на цифровой подстанции, устройства.



Рис. 1. Платформа для реализации мобильного сканера сети

загруженности локальных вычислительных сетей цифровой подстанции, а также мониторинг SV-потоков и GOOSE-сообщений. Таким образом, устройство упростит процесс наладки сетевого оборудования, поспособствует улучшению качества технического контроля работоспособности локально-вычислительных сетей, а также снизит аварийность за счет упрощения анализа сети цифровой подстанции. Основные потребители сканера - не только компании электроэнергетического сектора, но и ВУЗы, обучающие по направлению подготовки 13.03.02 и 13.04.02. Сканер рекомендуется использовать при проведении лабораторных работ по предмету «Наладка релейной защиты».

Представленный в настоящем докладе сканер сети, не имеющий аналогов в России, должен внести вклад в реализацию программы «Цифровая экономика Российской Федерации», включающей в себя программу цифровизации энергетики.

Литература

1. Алан Купер. Интерфейс. Основы проектирования взаимодействия. М.: Санкт-Петербург – Москва; 2022.
2. Воробьев Е. С. Аппроксимация потерянных отсчетов в SV-потоках. М: Ползуновский альманах, 2020.

М.В. Кахальников, О. Очирбат, Е.В. Сухарева (НИУ «МЭИ»)

СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Актуальность работы обусловлена возрастающим вниманием всего Мира к проблеме загрязнения окружающей среды вредными парниковыми выбросами. Ориентация стратегии страны на концепцию низкоуглеродной экономики сопряжена с повсеместными и необратимыми последствиями для антропогенных и естественных систем, а также рисками угрозы безопасности и устойчивого развития отдельных стран и всего Мира.

Целью работы является разработка стратегии снижения углеродного следа в условиях цифровизации энергетической отрасли.

Для реализации международных климатических соглашений на национальном и мировом уровнях используются различные меры политики, стимулирующие в числе прочего технологический переход мировой энергетики от генерации на основе углеводородного сырья и других видов топлива к энергоресурсам с низким уровнем выбросов парниковых газов. Глобальный энергопереход формирует новые тренды для устойчивого развития мировой энергетики и экономики и определяет новые вызовы для стран - экспортеров углеводородного сырья, связанные со снижением спроса на это сырье. В то же время активизация климатической повестки создает предпосылки для появления в мировой экономике новых рынков.

Одним из вариантов выравнивания углеродного баланса являются разработка и освоение технологий улавливания, переработки, использования и захоронения парниковых газов. С появлением сквозных цифровых технологий появилась возможность оценивать секвестрационный потенциал лесных участков, а прорывные исследования и разработки в области генетики позволили выращивать более углеродоемкие породы деревьев [1]. Все это дало возможность реализовать в настоящий момент проекты создания карбоновых полигонов и ферм. Однако для эффективного их функционирования требуется поддержка со стороны государств.

Ориентация энергетических стратегий России и Монголии в рамках создания совместных проектов по созданию карбоновых экосистем, базирующихся на основе Киотских механизмов, гибкости, позволит обеим странам снизить углеродный след и обеспечит устойчивое развитие их экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халин В.Г. Цифровизация и ее влияние на российскую экономику и общество: преимущество, вызовы, угрозы и риски / В.Г. Халин, Г.В. Чернова // Управленческое консультирование. 2018. №10 (118). С. 46-63.

Научное издание

ТЕХНОЛОГИИ БУДУЩЕГО

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

23 – 27 мая 2022 г.

СБОРНИК ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИИ

Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Подписано в печать	13.06.22.	Печать цифровая	Формат 60x84 1/16
Печ. л. 20,75	Тираж 80 экз.	Изд. № 22н-054	Заказ

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.
ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК