

РОСЖЕЛДОР  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

ГРЕБЕННИКОВ НИКОЛАЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ С  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 2.9.3 – «Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация»

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
профессор А.А. Зарифьян

Ростов-на-Дону  
2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 Современное состояние проблемы эффективности эксплуатации и показатели оценки энергоэффективности автономных локомотивов .....	18
1.1 Обзор энергоэффективности эксплуатации локомотивов .....	18
1.2 Процесс передачи и преобразования мощности в автономном локомотиве.....	27
1.3 Удельный расход дизельного топлива на тягу поездов.....	30
1.4 Коэффициент полезного действия локомотива.....	32
1.5 Коэффициент полезного использования мощности локомотива .....	34
1.6 Показатель энергоэффективности локомотива .....	35
1.7 Индикатор энергетической эффективности локомотива.....	37
1.8 Постановка задач исследования .....	43
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	44
2 Методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности.....	46
2.1 Метод оценки эффективности процесса преобразования энергии в первичном двигателе в условиях эксплуатации .....	49
2.2 Показатели оценки эффективности процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании электрической передачи мощности .....	54
2.3 Метод оценки эффективности процессов преобразования энергии в тяговых преобразователях .....	60
2.4 Метод оценки эффективности процессов преобразования энергии в тяговых электрических машинах локомотивов.....	65
2.5 Метод оценки энергетической эффективности процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотивов в условиях эксплуатации .....	74
2.6 Анализ энергетической эффективности эксплуатации грузового тепловоза 2ТЭ25К <sup>М</sup> .....	78

2.6.1 Четное направление «раз. 9км – Железный Рог».....	85
2.6.2 Нечетное направление «Железный Рог – раз. 9км».....	89
2.6.3 Обобщенный анализ эксплуатации грузового тепловоза.....	93
2.7 Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС .....	102
2.8 Анализ энергетической эффективности эксплуатации маневрового тепловоза ЧМЭЗ .....	116
2.9 Анализ энергетической эффективности эксплуатации грузового тепловоза 2ТЭ25А .....	129
2.10 Сводные результаты и выбор направлений по повышению энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов .	140
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	142
3 Методы и концепция повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности .....	144
3.1 Энергетический баланс при движении поезда по заданному участку.....	150
3.2 Классическая постановка задачи минимизации энергопотребления.....	153
3.3 Концепция повышения энергетической эффективности автономных локомотивов .....	156
3.3.1 Исследование возможности применения модульных энергетических установок на различных сериях автономных локомотивов .....	157
3.3.2 Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях за счет применения дискретно-адаптивного управления.....	166
3.3.3 Применение бесколлекторных тяговых электрических машин.....	172
3.4 Формулирование основных положений концепции повышения энергетической эффективности автономных локомотивов.....	175
3.5 Разработка научных основ проведения тяговых расчетов методом конечных элементов через изменение энергетического состояния поезда .....	178

3.5.1 Основные положения метода конечных элементов .....	179
3.5.2 Метод расчет энергетического состояния поезда.....	181
3.5.3 Формирование карты энергетического состояния поезда.....	185
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	194
4 Комплексная компьютерная модель автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования .....	197
4.1 Компьютерная модель дизеля .....	198
4.2 Математическая и компьютерная модель электромеханического преобразования энергии в тяговых электрических машинах автономных локомотивов .....	203
4.3 Компьютерная модель статического преобразователя .....	226
4.4 Математическая и компьютерная модель автономного локомотива .....	234
4.5 Компьютерная модель тягового модуля передачи мощности.....	244
4.6 Теоретические исследования режимов работы макетов тяговых электрических машин .....	245
4.6.1 Определение условий эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в генераторе .....	246
4.6.2 Определение условий эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в двигателе.....	250
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	253
5 Экспериментальные исследования макета тягового модуля электрической передачи мощности .....	255
5.1 Макет тягового модуля электрической передачи мощности .....	255
5.2 Стенд для испытания макета тягового модуля электрической передачи мощности .....	259
5.3 Программа и методика испытаний тягового модуля электрической передачи мощности.....	270
5.3.1 Определение электромеханических и энергетических характеристик генератора.....	273



5.3.2	Определение электромеханических и энергетических характеристик двигателя.....	275
5.3.3	Обработка результатов измерений.....	276
5.4	Проведение испытаний макета системы электрической передачи мощности на стенде .....	279
5.5	Анализ и сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований.....	289
5.5.1	Результаты испытаний макета генератора.....	289
5.5.2	Результаты испытаний макета двигателя.....	291
5.6	Сопоставление полученных результатов с мировыми тенденциями.....	293
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....		295
6	Экспериментальные исследования энергоэффективной электрической передачи мощности тепловоза с бесколлекторными электрическими машинами.....	297
6.1	Разработка и исследование энергоэффективной электрической передачи мощности тепловоза для модернизации маневровых тепловозов с электрической передачей мощности .....	299
6.1.1	Структурная схема энергоэффективной электрической передачи .....	299
6.1.2	Бесколлекторный тяговый генератор .....	303
6.1.3	Преобразователь генератора БПС-680 .....	305
6.1.4	Бесколлекторный тяговый двигатель ТРИД-125 .....	307
6.1.5	Статический преобразователь БПС-400.....	309
6.2	Разработка и исследование энергоэффективного бесколлекторного тягового привода для модернизации тепловоза ТГМ6А.....	312
6.2.1	Изготовление и испытания бесколлекторных тяговых двигателей....	317
6.2.2	Комплексные испытания комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности тепловоза .....	318
6.2.3	Испытания комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности на тепловозе .....	321
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6 .....		323

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	325
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	329
Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационного исследования.....	358

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Рост и развитие экономики Российской Федерации является возможным при наличии эффективной и надежной транспортной системы. По данным Федеральной службы государственной статистики на железнодорожный транспорт приходится 47,2 % грузооборота страны, с учетом грузооборота по трубопроводу (2020 г.) [1]. Среди транспортных средств, грузооборот железнодорожного транспорта составляет 86,8 %, что определяет необходимость обеспечения перевозочного процесса железнодорожным транспортом с минимальными расходами энергетических ресурсов страны. О необходимости повышения энергетической эффективности перевозок указано в Федеральном законе от 23.11.2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [2], в том числе контроль энергоэффективности оборудования, производимого на территории РФ, с присвоением ему класса энергетической эффективности в зависимости от значений показателей энергоэффективности, определяемых в ходе энергетических обследований энергопотребляющего оборудования.

Для ОАО «РЖД» вопросы энергосбережения и энергоэффективности особенно актуальны, что подтверждается утвержденными энергетическими стратегиями развития холдинга [3, 4]:

- «Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года», утверждена 15.12.2011 г. распоряжением №2718р [3];

- «Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)», утверждена 17.04.2018 распоряжением N 769/р [4].

В соответствии с п. 4.7.2 Стратегии [4], на втором этапе обновления локомотивного парка (2021–2025 годы и на перспективу до 2030 года) предусматривается создание новых локомотивов, в которых будут использоваться перспектив-

ные «интеллектуальные технологии» со следующими основными характеристиками:

- повышение тяговых свойств на 10 – 15 %;
- повышение коэффициента технической готовности до 0,96 – 0,97;
- существенное снижение затрат на техническое обслуживание и ремонт;
- снижение затрат на электроэнергию и дизельное топливо в среднем на 10 %;
- повышение эксплуатационного коэффициента полезного действия локомотива;
- реализация возможности управления локомотивом в полностью автоматическом режиме с повышением уровня безопасности движения поездов;
- снижение воздействия на окружающую среду за счет уменьшения образования отходов и выброса вредных веществ.

В п.4.7.2 стратегии [4] указываются перспективные инновационные технологии, которые позволят повысить эффективность автономных локомотивов:

- использование газомоторных, гибридных локомотивов, многодизельных силовых установок [5];
- применение гибридного привода и накопителей электрической энергии торможения [6];
- автоматическая адаптация к условиям работы локомотива;
- возможность работы дизелей тепловоза по системе «старт/стоп» с обеспечением собственных нужд от работающего дизеля;
- возможность использования функций автоведения, удаленного управления, беспилотного вождения («автомашинист»).

Целевыми задачами при разработке новых локомотивов [4] являются:

- повышение эффективности перевозочного процесса за счет увеличения маршрутных скоростей;
- снижения энергозатрат в эксплуатации;
- уменьшение стоимости жизненного цикла;
- повышение показателей функциональной безопасности и надежности.

Учитывая то, что основным потребителем энергии являются тяговые системы (тяговая передача или электропривод) локомотивов, то вопросы повышения энергетической эффективности работы тягового оборудования, в условиях реальной эксплуатации, выходят на первый план.

**Основной проблемой**, решаемой в диссертационном исследовании, является разработка научных основ повышения энергоэффективности тягового привода новых и перспективных автономных локомотивов.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов уделяется особое внимание, начиная с самого начала существования железных дорог. Основные положения определения параметров, влияющих на энергоэффективность перевозочного процесса (время хода, техническая скорость, расход энергоресурсов), изложены в правилах тяговых расчетов. Большой вклад в развитие методов тяговых расчетов и теории тяги поездов внесли многие ученые и инженеры:

А.М. Бабичков, А.П. Бородин, А.В. Вульф, П.Т. Гребенюк, А.Н. Долганов, В.Ф. Егорченко, И.П. Исаев, Г.В. Лебедев, А.И. Липец, Ю.В. Ломоносов, А.С. Нестрахов, С.И. Осипов, Н.П. Петров, Ф.А. Пироцкий, В.Е. Розенфельд, С.Я. Френкель, Б.С. Якоби и др.

С развитием вычислительной техники методы расчета энергоэффективных траекторий движения поезда стали совершенствоваться, при этом основное внимание уделяется выбору управляющих воздействий с целью минимизации расхода энергии на тягу, для этого применяется численная реализация итерационных методов с проведением тяговых расчетов на рассматриваемом участке. Актуальным направлением является разработка методов тяговых расчетов для их применения в бортовых системах локомотивах, что позволит обеспечить непрерывную корректировку параметров управления тяговым приводом с использованием алгоритмов машинного обучения. Большой вклад для решения данного класса задач внесли многие ученые и инженеры:

Л.А. Баранов, В.И. Головин, Я.М. Головичер, Г.В. Евдомаха, Е.В. Ерофеев, В.А. Лазарян, В.М. Лисенков, А.Л. Лисицын, Л.А. Мугинштейн, Б.Д. Никифоров,

А.В. Плакс, О.Е. Пудовиков, М.С. Пясик, А.Н. Савоськин, К.И. Юренко, И.А. Ябко и др.

Повышение эффективности использования тягового и вспомогательного оборудования локомотива с целью улучшения энергетических показателей тягового подвижного состава является комплексной задачей:

- разработка новых автономных локомотивов с газодизельными силовыми установками, с гибридными силовыми установками, с водородными топливными элементами, газотурбовозов, многодизельных локомотивов;

- применение энергоэффективных бесколлекторных электрических машин (асинхронные, синхронные с постоянными магнитами, реактивные индукторные) в качестве вспомогательного и тягового привода с микропроцессорными системами управления, позволяющими реализовать различные режимы работы;

- разработка оптимальных режимов работы оборудования локомотива, в том числе с возможным отключением неиспользуемого оборудования (применение модульных силовых энергетических установок, системы энергоэффективного управления тягой, снижение частоты вращения мотор-вентиляторов).

Большой вклад для решения данного класса задач внесли многие ученые и инженеры:

В.В. Асабин, А.А. Андрющенко, Ю.В. Бабков, В.Н. Балабин, А.Ю. Балакин, Е.С. Васюков, А.И. Володин, В.А. Гапанович, И.П. Гордеев, В.В. Грачев, А.В. Грищенко, А.М. Евстафьев, А.А. Зарифьян, В.Н. Игин, К.К. Ким, А.В. Киреев, В.Ф. Козаченко, П.Г. Колпахчян, А.С. Космодамианский, Д.И. Курилкин, В.С. Коссов, Е.Е. Коссов, А.Б. Красовский, В.А. Кручек, В.В. Кручек, В.А. Кузьмичев, В.А. Кучумов, И.К. Лакин, Я.А. Новачук, Д.Я. Носырев, С.М. Овчаренко, Ю.А. Орлов, В.Н. Остриров, С.А. Пахомин, В.А. Перминов, К.С. Перфильев, Д.И. Петраков, А.Д. Петрушин, Г.К. Птах, А.А. Пугачев, В.А. Соломин, С.Н. Флоренцев, В.В. Фурман, С.Г. Шантаренко, П.В. Шепелин и др.

**Объектом исследования** являются современные и перспективные автономные локомотивы с электрической передачей мощности, оснащенные регистраторами параметров работы оборудования.

**Предметом исследования** являются методы обработки регистрируемой информации и выбора режимов работы тягового оборудования для повышения энергоэффективности автономных локомотивов.

**Цель работы:** разработка новых научно обоснованных технических решений, концепции структуры и режимов работы тягового оборудования локомотивов с электрической передачей мощности, обеспечивающих повышение энергетической эффективности эксплуатации, на основе методов обработки регистрируемой информации бортовыми системами локомотивов.

**Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:**

1. Провести анализ современного состояния проблемы эффективности эксплуатации и показателей оценки энергоэффективности автономных локомотивов.

2. Разработать методологию оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности.

3. Провести анализ энергетической эффективности автономных локомотивов в условиях эксплуатации, на основе интеллектуальной обработки данных, встроенных средств регистрации параметров бортовых систем локомотивов.

4. Разработать научно обоснованную концепцию повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов.

5. Усовершенствовать проведение тяговых расчетов с использованием метода конечных элементов.

6. Разработать комплексную компьютерную модель автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования.

7. Провести теоретические исследования электромеханических процессов в различных режимах работы электрической передачи мощности локомотива с целью определения условий эффективности преобразования энергии.

8. Провести экспериментальные исследования макета тягового модуля электрической передачи мощности и комплекта тягового электрооборудования элект-

трической передачи мощности автономного локомотива с бесколлекторными электрическими машинами.

**Научная новизна диссертационной работы:**

Теоретически обоснованы и предложены:

- методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности по данным встроенных средств регистрации параметров бортовых систем автономных локомотивов;
- математические модели процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотива, основанные на энергетическом подходе и пересчете паспортных технических характеристик;
- концепция повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов, на основе принципа масштабируемости используемого тягового оборудования, в зависимости от условий эксплуатации;
- впервые предложен метод конечных элементов для проведения тяговых расчетов, что позволяет учитывать изменение энергетического состояния поезда на координатно-скоростной плоскости зависящего от профиля пути, скорости движения, сил сопротивления движению;
- комплексная компьютерная модель автономного локомотива с электрической передачей мощности и с модульной структурой тягового оборудования на базе синтеза программных комплексов, позволяющая проводить теоретические исследования режимов работы тягового оборудования с оценкой энергетической эффективности процессов преобразования энергии.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Предложен новый научно обоснованный метод проведения анализа энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава в условиях эксплуатации по данным средств регистрации параметров, позволяющий проводить оценку и управление энергетической эффективностью автономных локомотивов, в том числе и перспективных, в реальном времени, при ведении поезда.

2. Проведенный анализ энергетической эффективности автономных локомотивов в условиях реальной эксплуатации, на основе интеллектуальной обра-



ботки данных, встроенных средств регистрации параметров бортовых систем локомотивов, показал низкую эффективность работы тягового оборудования в условиях эксплуатации для различного рода службы локомотивов.

3. Разработаны математические модели процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотива, основанные на энергетическом подходе и пересчете паспортных технических характеристик, которые повышают точность и быстроту расчетов, что позволяет их использовать в системах управления реального времени.

4. Предложен коэффициент эффективности использования тягового оборудования, предназначенный для сопоставления энергоэффективности различных режимов эксплуатации тягового оборудования автономных локомотивов.

5. Дополнены научные основы повышения энергоэффективности локомотивов с электрической передачей мощности, в части разработки новых методов и концепции масштабируемости используемого тягового оборудования автономного локомотива в зависимости от условий эксплуатации, за счет снижения потерь при преобразовании энергии в тяговом оборудовании, что позволяет снизить затраты на энергоресурсы в процессе эксплуатации и сократить количество отказов дизель-генераторной установки из-за длительной работы на холостом ходу не только во время стоянок, но и во время движения.

6. Усовершенствован метод проведения тяговых расчетов, что обеспечивает выполнение оптимальных тяговых расчетов с повышенной точностью, при существенном сокращении временных и вычислительных затрат.

7. Применение разработанной комплексной компьютерной модели автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования позволяет проводить исследования режимов работы и энергетической эффективности локомотивов на стадиях проектирования, модернизации и испытаний с целью определения алгоритмов управления для условий эксплуатации.

**Методология и методы исследования.** Поставленные в диссертационной работе задачи решены с использованием методов обработки больших массивов

экспериментальных данных; теории локомотивной тяги; теории электрических цепей, теории электромеханического преобразования энергии, теории электромагнитных полей, теории тепловых полей, энергетического баланса механической системы, методов оптимизации многомерных функций, структурного анализа и имитационного компьютерного моделирования, теории метода конечных элементов.

Для построения компьютерной модели применен синтез программных комплексов MATLAB/Simulink, FEMM и «Универсальный механизм», что позволяет минимизировать время при создании комплексной модели локомотива и поезда и увеличить быстродействие при проведении многовариантных расчетов.

Для различных методов обработки данных, формирование матриц жесткости и состояний поезда, проведения расчетов методом конечных элементов применяется объектно-ориентированный язык программирования высокого уровня MATLAB.

Экспериментальные исследования проведены на лабораторной базе аккредитованного испытательного центра подвижного состава «ПРИВОД-Н», обладающего уникальным научным и испытательным оборудованием, внесенным в государственный реестр средств измерения.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности по данным встроенных средств регистрации параметров бортовых систем автономных локомотивов.

2. Результаты анализа энергетической эффективности автономных локомотивов в условиях эксплуатации на сети железных дорог, на основе интеллектуальной обработки данных, встроенных средств регистрации параметров бортовых систем локомотивов.

3. Математические модели процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотива, основанных на энергетическом подходе и пересчете паспортных технических характеристик.

4. Научно обоснованная концепция повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов, на основе принципа масштабируемости используемого тягового оборудования в зависимости от условий эксплуатации.

5. Усовершенствованный метод проведения тяговых расчетов, учитывающий изменение энергетического состояния поезда на координатно-скоростной плоскости зависящего от профиля пути, скорости движения, сил сопротивления движению;

6. Комплексная компьютерная модель автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования на базе синтеза программных комплексов, позволяющая проводить теоретические исследования режимов работы тягового оборудования с оценкой энергетической эффективности процессов преобразования энергии.

7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований макета тягового модуля электрической передачи мощности и комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности автономного локомотива с бесколлекторными электрическими машинами.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов подтверждена сопоставлением теоретических и экспериментальных данных и обеспечивается корректностью исходных математических положений, а также обоснованностью принятых допущений.

Основные результаты и положения диссертационной работы обсуждались: - на научных конференциях и симпозиумах: на научно-техническом семинаре «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: вопросы динамики, прочности и износа» (г. Брянск, 2009г.), Всероссийских научно-практических конференциях «Транспорт», (г. Ростов н/Д, 2010-2023), на Международной конференции ElectrIMACS 2011 (Франция, 2011), на 3-й Российской конференции «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (г. Москва, апрель 2012), на III Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте» (г.

Санкт-Петербург, 2013), на Международной конференции 19th IMACS World Congress (Испания, 2013), на Международной научно-практической конференции «Достижения и перспективы технических наук» (г. Уфа, 2014), на научно-технической конференции и выставке инновационных проектов, выполняемых вузами и научными организациями Южного федерального округа в рамках участия в реализации федеральных целевых программ и внепрограммных мероприятий (г. Новочеркасск, 2014), на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук» (г. Уфа, 2015), на Международной научно-технической конференции «Локомотивы XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2015), на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (г. Ростов-на-Дону, 2015), на Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России (г. Санкт-Петербург, 2017), на Международной научно-практической конференции «Новые материалы и технологии - основа инновационного развития», (г. Уфа, 2017), на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (г. Ростов-на-Дону, 2018), на X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS) (г. Новочеркасск, 2018), на 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED) (г. Москва, 2019), International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (г. Сочи, 2019), на International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Сочи, 2019, 2020, 2021); на международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (г. Ростов н/Д, 2021,2022); на VIII международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орёл, 2023); на международном симпозиуме «Eltrans 2023»(г. Санкт-Петербург, 2023);

- на заседании объединенного ученого совета ОАО «РЖД», заседании кафедры «Тяговый подвижной состав» РУТ (МИИТ), заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС (2012-2023).

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основные научные результаты диссертации использованы при выполнении исследований в рамках соглашения о предоставлении субсидии ФЦП №14.576.21.0036 «Разработка научно-технических решений для создания энергосберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами» (2014-2016); гранта РФФИ № 16-38-00566-мол «Разработка и исследование энергоэффективного электродвигателя класса «Супер премиум» IE4» (2016-2017); гранта РФФИ №18-79-00130 «Разработка научно-технических основ и исследование реактивных индукторных машин нового класса» (2018-2020); в АО «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н» при разработке комплектов тягового электрического оборудования для модернизации маневровых локомотивов; в АО «ЕВРАЗ НТМК» при разработке электрооборудования для комплекта тягового привода на базе ТРИД-320, предназначенного для варианта модернизации маневрового тепловоза серии ТГМ6А; в ОАО «РЖД» при формировании концепции перспективного тягового подвижного состава в виде технических требований на разработку тепловозов с двухдизельной силовой установкой; в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС при подготовке специалистов для железнодорожного транспорта.

**Личный вклад.** Диссертация является результатом научных исследований, выполненных лично автором.

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в 53 печатных работах, в том числе: 21 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 15 – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, опубликована 1 монография, получено 2 патента РФ на изобретения и 2 патента РФ на полезные модели.

Работа выполнялась в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения».

**Структура работы.** Диссертация из 363 страниц машинописного текста включает в себя введение, шесть глав, общие выводы, список литературы из 212 наименований, 1 приложение, 42 таблицы и 206 рисунков. Основное содержание изложено на 328 страницах текста.

# **1 Современное состояние проблемы эффективности эксплуатации и показатели оценки энергоэффективности автономных локомотивов**

## **1.1 Обзор энергоэффективности эксплуатации локомотивов**

Современное состояние развития техники характеризуется очередным этапом модернизации электрооборудования, который связывается с применением бесколлекторных электрических машин, высокотехнологичных компонентов силовой электроники и микропроцессорных средств управления [7]. Применение современного тягового оборудования позволяет повысить секционную мощность локомотива, что особенно актуально для грузовых и пассажирских перевозок, вместе с тем становится новая проблема полного использования доступной мощности локомотива, поэтому среди основных требований к новому и перспективному подвижному составу устанавливаются следующие [8]:

- поосное регулирование силы тяги;
- адаптивное отключение тяговых электродвигателей в зависимости от нагрузки.

Одним из способов снижения затрат на топливно-энергетические ресурсы является применение современных и перспективных решений, предусмотренных стратегиями развития железнодорожной отрасли [3, 4], таких как повышение массы поезда, как за счет увеличения его длины, так и за счет увеличения нагрузки на ось, вплоть до 28 т на ось, а также применения современного бесколлекторного тягового привода с системами микропроцессорного управления. В условиях эксплуатации на энергоэффективность влияет ряд факторов, в том числе, профиль пути и масса поезда, которые непосредственно влияют на режимы работы тягового оборудования локомотива [9]. Энергоэффективность электрической передачи мощности локомотива выше, если она работает в режимах близких к номинальной мощности, но в эксплуатации такие режимы составляют не более 10 % времени работы локомотива [10]. При разработке и проектировании локомотива инженеры сосредоточены на обеспечении высокого значения коэффициента полез-

ного действия локомотива только для последней позиции контроллера машиниста, так как в других режимах оно не нормируется. Поэтому особо остро проблема обеспечения энергоэффективности становится для мощных многоосных и многосекционных локомотивов, работающих с тяжеловесными составами в одном направлении и с порожними составами в обратном направлении [11].

Поиск возможных путей увеличить тяговые свойства локомотива при снижении эксплуатационного расхода топлива ведется уже много лет [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19]. Так в 1987 году, с целью повышения тяговых свойств, при выполнении маневровой работы на станциях и сортировочных горках, в ПКБ ЦТ МПС разработан тяговый агрегат, представляющий собой маневровый тепловоз и бездизельный бустер, предназначенный для совместной эксплуатации с маневровым тепловозом ЧМЭЗ (рисунок 1). В бустерную секцию переоборудовались тепловозы (ЧМЭЗ, 2ТЭ10Л, ТЭЗ, М62) выработавший ресурс или полное восстановление которых, представлялось нецелесообразным.



Рисунок 1 – Тепловоз ЧМЭЗ с бустером ЧМЭЗБ

В бустерной секции дизель-генераторная установка с вспомогательными системами заменялась балластом, оставались тяговые электрические двигатели (ТЭД), система принудительной воздушной вентиляции, высоковольтная камера и песочная система. Тяговые двигатели бустера подключались к силовой схеме маневрового тепловоза (рисунок 2). Силовая схема тягового агрегата предусматривает два режима работы – без бустера и с бустером, для выбора режима работы использовался тумблер, установленный в кабине машиниста, который управлял контакторами тепловоза КП1...КП3 и бустера КБ1...КБ3.

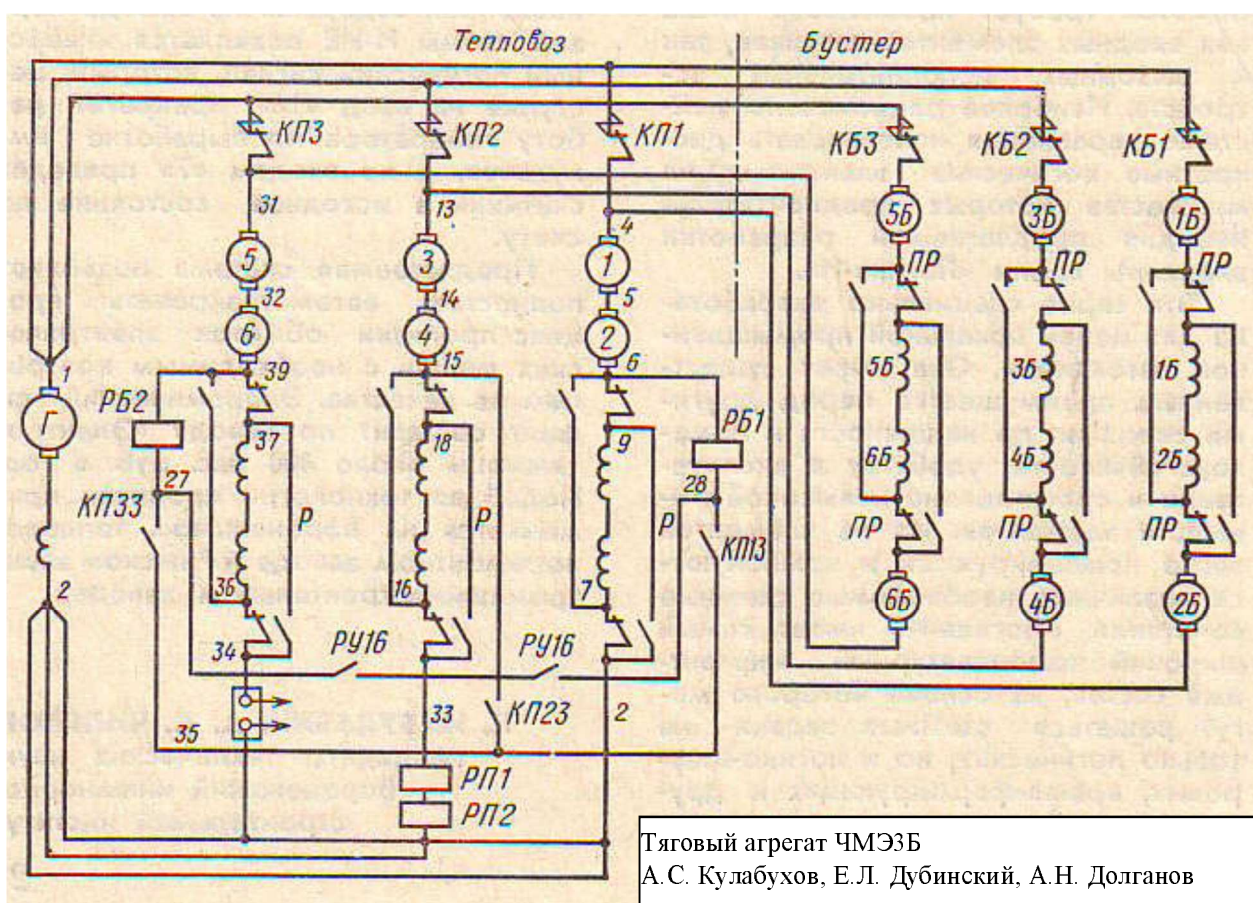


Рисунок 2 – Силовая схема тягового агрегата

Опытная эксплуатация тягового агрегата проводилась на сортировочной горке станции Люблино с составами массой до 6000 т. В процессе эксплуатации тягового агрегата получили существенную экономию дизельного топлива на 19,8 %, в сравнении со сдвоенным ЧМЭЗ.



Экономия дизельного топлива объясняется приведением режимов работы дизеля близким к номинальным, при этом сокращается удельный расход топлива, а, следовательно, повышается топливная экономичность.

В настоящее время ведутся активные работы по поиску оптимальных технических решений для создания энергоэффективных маневровых локомотивов с различными вариантами исполнения и компоновки тягового оборудования. Основные направления в этой области направлены на переход к многодизельным силовым установкам и применению накопителей энергии [20]. Вводится термин гибридный тяговый подвижной состав [21] и предлагается его классификация. При этом тепловозы и гибридный тяговый подвижной состав входят в один большой класс автономных локомотивов.

В области разработки маневровых локомотивов имеются тенденции на отказ от мощных монодизельных энергетических установок [22], на маневровых локомотивах фирмы Rail Power technologies Corp применяется дизель-генераторная установка мощностью 224 кВт совместно с накопителем энергии в виде свинцово-кислотной аккумуляторной батареи [23]. Маневровый тепловоз ТЭМ33 разработки ЗАО «Трансмашхолдинг» с двухдизельной 2x571 кВт энергетической установкой в составе дизеля С18 фирмы Caterpillar и с электрической передачей переменного-переменного тока [24]. Двухдизельный маневровый восьмиосный тепловоз ТЭМ14 [25] производства АО «Людиновский тепловозостроительный завод» с электрической передачей переменного-постоянного тока. Российские гибридные тепловозы ТЭМ35 [26] производства АО «Брянский машиностроительный завод» и ТЭМ9Н Sinara Hybrid [27] разработки АО «Синара-Транспортные машины» с накопителями энергии и асинхронным тяговым приводом. Разработано несколько проектов модернизации тепловозов ЧМЭЗ с применением двух- [28] и даже трехдизельной [29] энергетической установки.

Различные варианты исполнения тягового оборудования маневровых тепловозов свидетельствует об актуальности данного направления исследования и что еще не найден рациональный вариант принципов разработки маневровых автономных локомотивов.

Из закупок ОАО «РЖД» [30] видно, что в 2020 г. приобретено 154 маневровых тепловозов серии ТЭМ18ДМ, на которых установлен один дизель 1-ПД4Д мощностью 882 кВт и применена электрическая передача мощности постоянного тока.

Вопросам изучения энергоэффективности эксплуатации грузовых тепловозов посвящены исследования специалистов ОАО «ВНИКТИ» к.т.н., заведующего отделом В.А. Перминова, к.т.н. первого заместителя генерального директора Ю.В. Бабкова и технического директора ЗАО «УК «БМЗ» Е.С. Васюкова [31]. Для оценки энергоэффективности тепловозов в 2008 – 2009 гг. сотрудниками ОАО «ВНИКТИ» осуществлялся мониторинг работы групп локомотивов в четном и нечетном направлениях участка Северной ж.д. по маршруту «Сосногорск – Воркута». По результатам анализа полученных данных определен удельный расход топлива и построен график в зависимости от нагрузки на ось вагона из которого видно, что у поездов с меньшей нагрузкой на ось удельный расход топлива больше, чем у тяжеловесных (рисунок 3, рисунок 4).

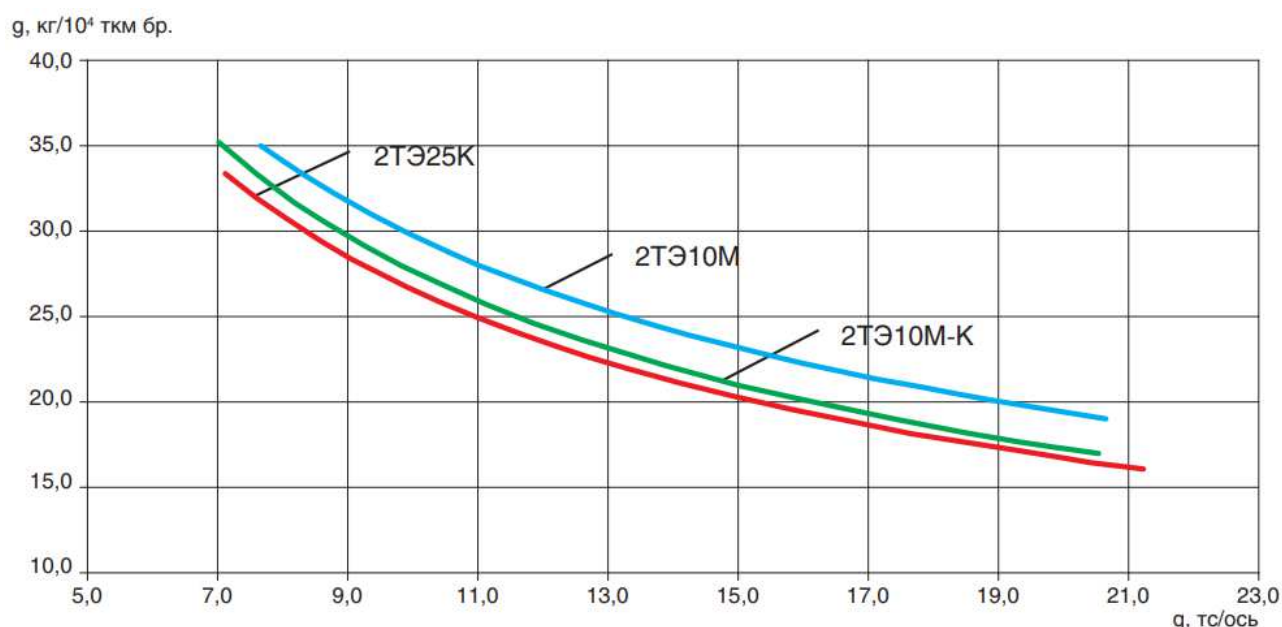


Рисунок 3 – Совмещенные зависимости удельного расхода топлива тепловозов 2ТЭ25К, 2ТЭ10М и 2ТЭ10М-К (четное направление Сосногорск-Печора) [31]

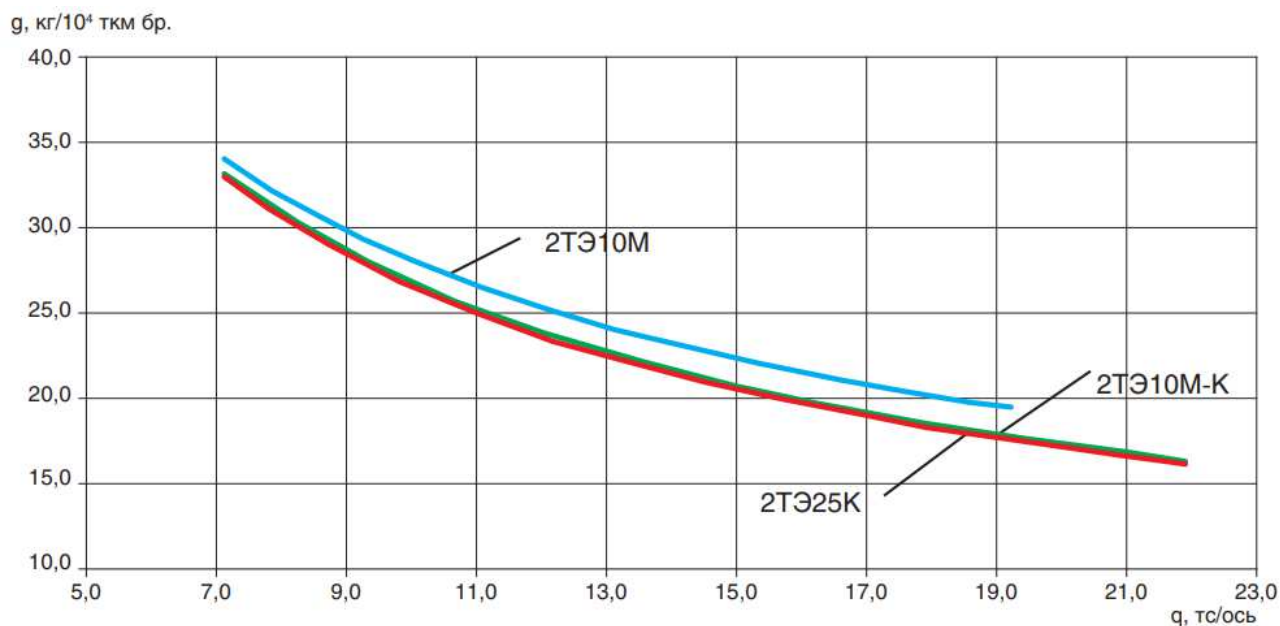
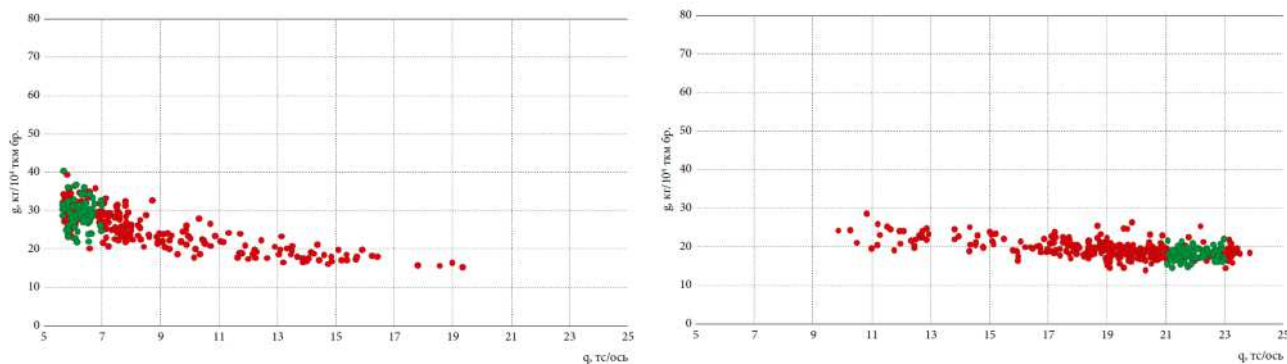


Рисунок 4 – Совмещенные зависимости удельного расхода топлива тепловозов 2ТЭ25К, 2ТЭ10М и 2ТЭ10М-К (нечетное направление Печора-Сосногорск) [31]

В 2012 году, тот же коллектив авторов провел мониторинг работы тепловозов 2ТЭ25А и 3ТЭ2510М-К на четном и нечетном направлениях участка Тынды-Хани Дальневосточной железной дороги [32], где представлены фактические удельные расходы топлива тепловоза 2ТЭ25А с поездами массой 1700-2100 т (нагрузка на ось  $q=5-7$  тс/ось) и с поездами массой 4800-5050 т (нагрузка на ось  $q=21-23$  тс/ось). Из приведенных данных следует, что удельный расход с легковесными поездами массой 1700-2100 составил порядка 30 кг/10000 ткмбр, а при ведении тяжеловесных поездов массой 4800-5050 удельный расход составил порядка 19 кг/10000 ткмбр. Корреляционные поля удельного расхода топлива тепловозов 2ТЭ25А и 3ТЭ2510М-К при эксплуатации на участке Тынды-Юктали приведены на рисунках 5 – 6 [32]. Из представленных данных видно, что удельный расход зависит от нагрузки на ось, т.е. чем легче поезд, тем меньше энергоэффективность перевозочного процесса, кроме этого из рисунков 5 – 6 видно, что имеется существенный разброс  $\pm 15...20\%$  в пределах одной и той же нагрузки на ось, что объясняется различием масс поездов.

Приведенные выше исследования подтверждают актуальность повышения энергоэффективности локомотива при движении с легковесными поездами.

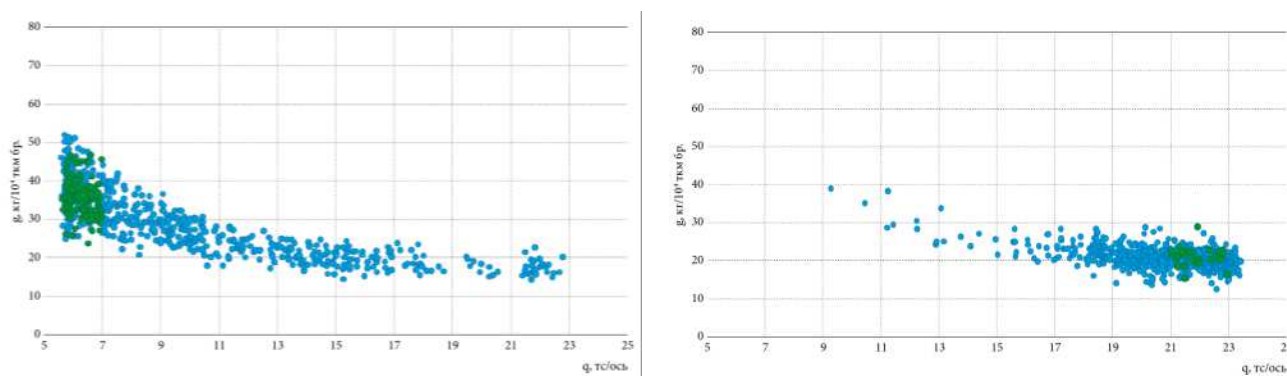


а)

б)

а) – нечетное направление плеча Тынды-Юктали,  $Q=1700-2100$  т; б) – четное направление плеча Тынды-Юктали,  $Q=4800-5050$  т

Рисунок 5 – Корреляционное поле удельного расхода топлива тепловоза 2ТЭ25А (нечетное направление плеча Тынды-Юктали,  $Q=1700-2100$  т) [32]



а)

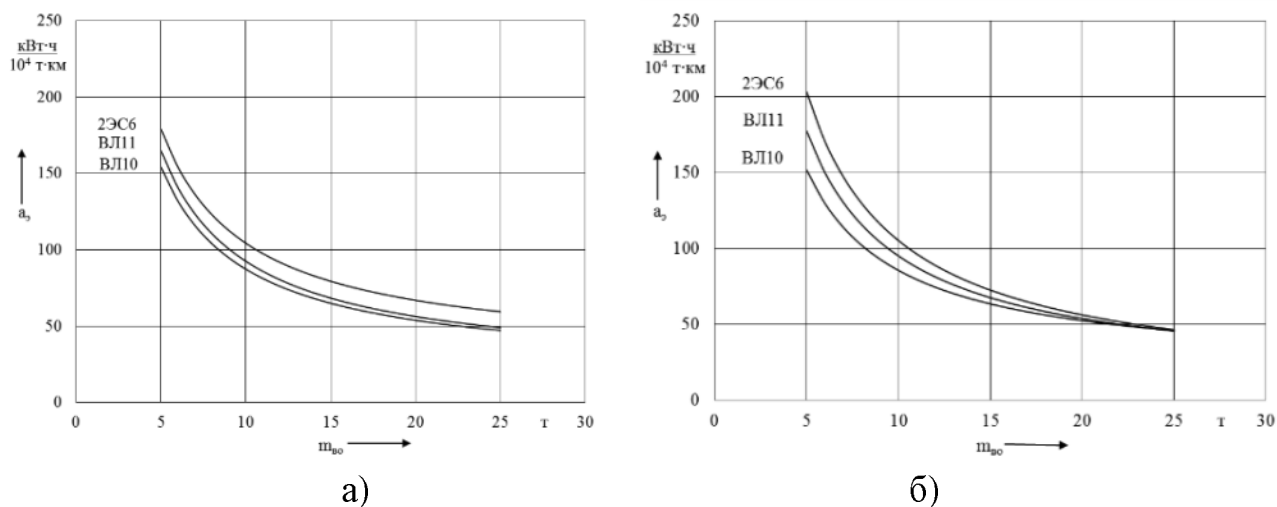
б)

а) – нечетное направление плеча Тынды-Юктали,  $Q=1700-2100$  т; б) – четное направление плеча Тынды-Юктали,  $Q=4800-5050$  т

Рисунок 6 – Корреляционное поле удельного расхода топлива тепловоза 3ТЭ2510М-К [32]

Аналогичная ситуация складывается и с опытом эксплуатации электровозов [33, 34, 35, 36, 37]. На основе анализа маршрутов машинистов локомотивного депо Омск в [38] приведены данные об удельном расходе электроэнергии грузовых поездов с электровозами постоянного тока для участка Входная – Московка – Барабинск, в обоих направлениях (рисунок 7). В результате анализа видна такая же закономерность, что и с тепловозами, чем меньше нагрузка на ось вагонов, тем больше удельный расход. Причем для нового электровоза 2ЭС6 величина удельного расхода электроэнергии больше чем у ВЛ10 и ВЛ11, что объясняется недо-

использованием мощности нового электровоза, а при груженом поезде, удельный расход сопоставим между тремя сериями электровозов [38].



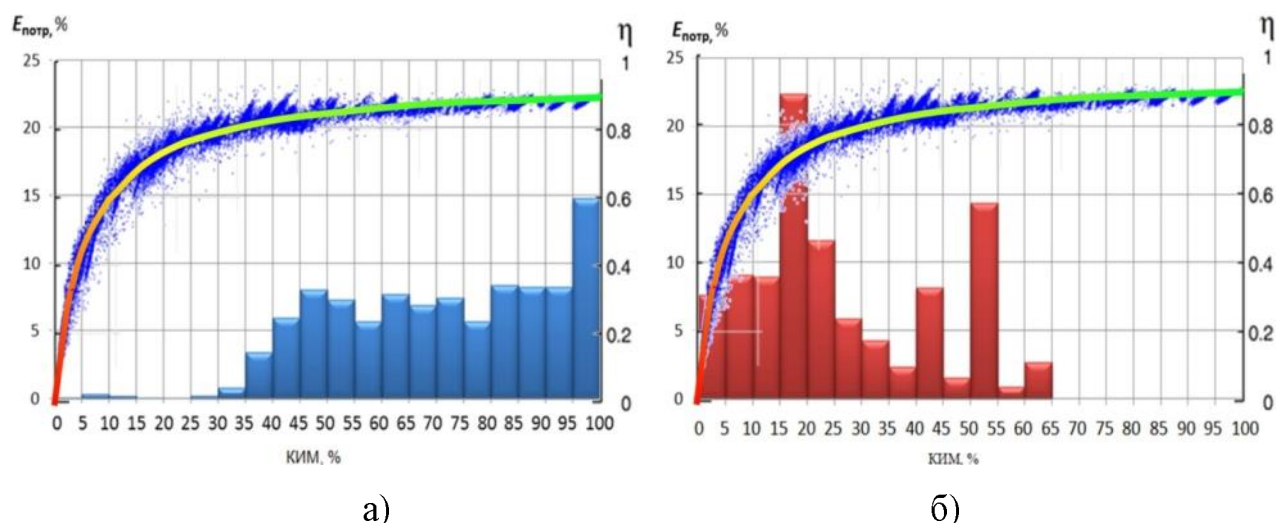
а) – четное направление плеча Входная-Бабринск; б) – нечетное направление плеча Московка-Бабринск

Рисунок 7 – Совмещенные зависимости удельного расхода электроэнергии электровозов ВЛ10, ВЛ11 и 2ЭС6 [38]

По результатам предварительных исследований и проведенных совещаний с представителями ОАО «РЖД» в 2016 г., выпущено указание [39] об определении энергетической эффективности электровозов серии 3ЭС5К с отключением из режима тяги части тяговых электродвигателей. В результате проведения опытных поездок на участке Таксимо-Итыakit получено снижение удельного расхода электроэнергии на 11,8 % при отключении 4-х из 12-ти тяговых двигателей, а на участке Итыakit-Новый Уоян - на 9,5 % при отключении 8-ми из 12-ти тяговых двигателей. Проведенный детальный анализ показал, что при отключении части тяговых двигателей, оставшиеся в работе тяговые двигатели получили более высокую нагрузку и работали в режиме, который обеспечивал более высокий коэффициент полезного действия тягового двигателя, кроме того увеличился коэффициент мощности статических преобразователей. Руководитель проведенных испытаний, региональный инспектор ПКБ ЦТ ОАО «РЖД» Ю.В. Голов, указывает на то, что такие испытания проведены впервые и подтверждают необходимость

научного подхода к выбору конкретного режима регулирования тяги, в том числе и по количеству отключенных ТЭД.

В 2016-2018 гг. проводились испытания электровозов 2ЭС5 на Северо-Кавказкой и Восточно-Сибирской железных дорогах [40] как с груженными поездами, так и с порожними. В результате обработки данных бортовых регистраторов удалось определить [40] распределение потребляемой энергии в зависимости от коэффициента использования мощности (КИМ) электровоза. Совмещение полученных данных с зависимостью коэффициента полезного действия (КПД) электровоза от КИМ (рисунок 8) дает наглядное представление, что недоиспользование мощности тягового оборудования ведет к снижению КПД, а следовательно и к снижению энергоэффективности перевозочного процесса.



а) – поезд массой 9090 т на подъем; б) – поезд массой 2192 т на равнине  
Рисунок 8 – Совмещенные зависимости расхода электроэнергии и коэффициента полезного действия электровоза 2ЭС5 [40]

В диссертационной работе Зарифьян А.А. [41] предложил способ повышения энергетической эффективности электровозов за счет приведения тяговой мощности в соответствие с потребностями (отключение неиспользуемых ТЭД). Способ получил название дискретно-адаптивного управления (ДАУ) [42] тяговым электроприводом, запатентован [43], и позволяет повысить энергоэффективность электровозов в условиях эксплуатации. Регулирование числа работающих тяговых двигателей осуществляется по зависимости эксплуатационного коэффициен-

та полезного действия тяговых двигателей от коэффициента использования мощности (рисунок 9) [44].

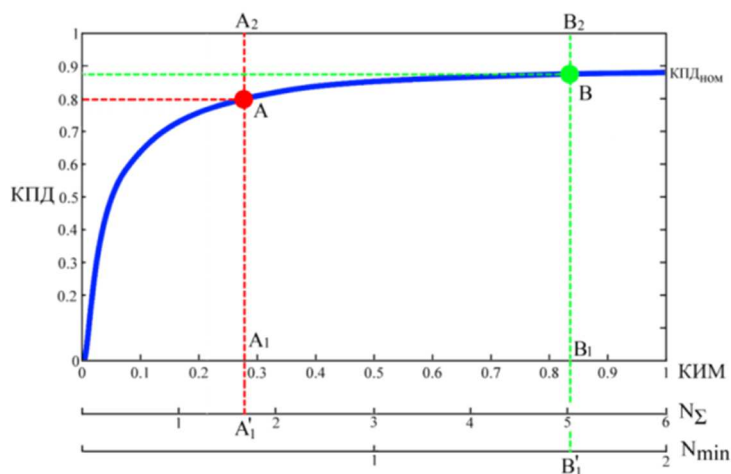


Рисунок 9 – Коэффициент полезного действия электровоза в зависимости от коэффициента использования мощности (режим тяги)

Дискретно-адаптивное управление реализовано, под руководством генерального директора ООО «ТМХ ИНЖИНИРИНГ» Ю.А. Орлова, на электровозе 2(3)ЭС5С и в результате опытной эксплуатации подтверждено снижение удельного расхода электрической энергии на 25 % [45] в режиме «Энергоэффективное ведение», по сравнению с обычным режимом управления электровозом.

Приведенные данные показывают, что повышение энергоэффективности перевозочного процесса не может быть достигнуто только лишь за счет создания новых мощных локомотивов. Особое внимание стоит уделять режимам работы тягового оборудования локомотивов, что позволит привести в соответствие мощностные характеристики условиям эксплуатации, а так же совершенствовать алгоритмы работы вспомогательного оборудования [46].

## 1.2 Процесс передачи и преобразования мощности в автономном локомотиве

Автономный локомотив – тяговой подвижной состав, у которого установлена первичная силовая установка, осуществляющая преобразование энергии топлива в механическую или электрическую энергию. К данному классу подвиж-

ного состава относят: тепловозы, дизель-поезда, автомотрисы, газотурбовозы, гибридный тяговый подвижной состав, водородные локомотивы. Задача транспортировки энергии от первичного двигателя к осям движущих колес возложена на передачу мощности локомотива. К основным видам передач относятся: механическая, гидравлическая и электрическая. В настоящее время широко распространены тепловозы с электрической передачей мощности, поэтому основные исследования и рассмотрение процессов преобразования энергии будут проводиться на примере тепловозов, при этом общие положения, представленные в настоящей работе, могут быть отнесены к любому виду автономных локомотивов с электрической передачей мощности, включая перспективные гибридные локомотивы с водородными топливными элементами.

Рассмотрим процессы передачи и преобразования мощности в автономном локомотиве с дизель-генераторной энергетической установкой (ДГУ) и электрической передачей мощности (ЭПМ) (рисунок 10) [47]. Для этого обратимся к структуре тягового оборудования локомотива, которое представлено различными преобразователями энергии (химической, электрической, механической) с дальнейшим её транспортировкой вплоть до контакта «колесо-рельс».

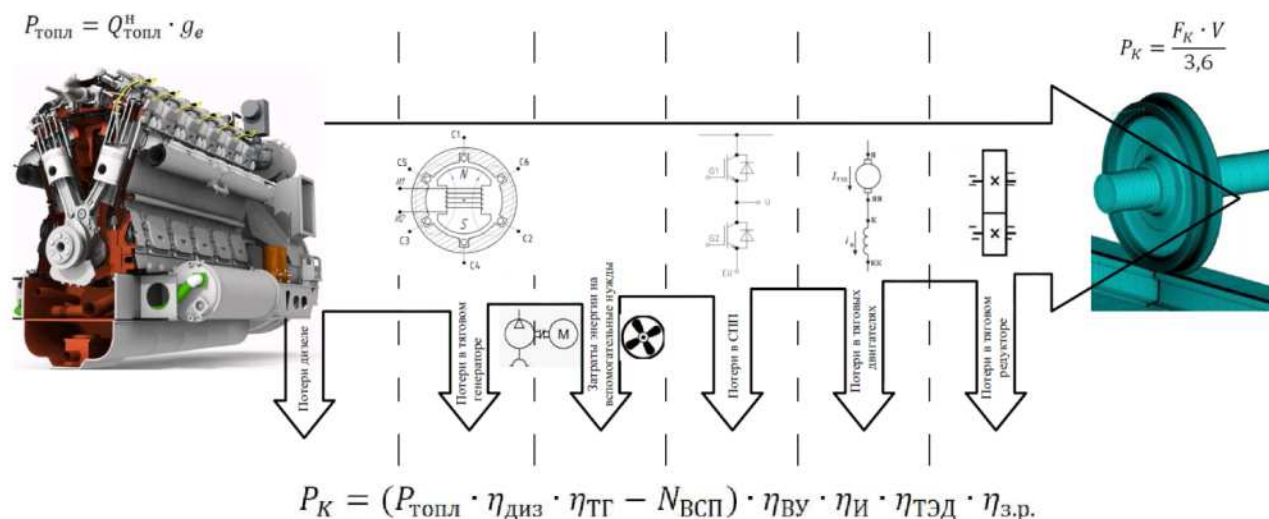


Рисунок 10 – Процесс передачи мощности на автономном локомотиве



Рассмотрим основные преобразователи энергии, применяемые на локомотивах.

Первый элемент – химикомеханический (двигатель внутреннего сгорания, газотурбинный двигатель) преобразователь преобразует химическую энергию топлива (дизельного, газового, газодизельного) в механическую энергию вращения выходного вала (коленчатого вала, вала турбины). Выходными параметрами преобразователя являются вращающий момент и частота вращения вала.

Второй элемент – электромеханический преобразователь (генератор), преобразует механическую энергию первичного элемента в электрическую энергию, с учетом параметров управления и нагрузок: напряжение и ток. Выходными параметрами преобразователя являются ток, напряжение, частота.

В перспективе имеются разработки заменить дизель-генераторную установку на химикоэлектрический (водородные топливные элементы) преобразователь, который непосредственно преобразует химическую энергию топлива в электрическую энергию.

Третий элемент – статический преобразователь генератора (при наличии) – преобразует электрическую энергию, выработанную генератором, для дальнейшей транспортировки к тяговым двигателям. Выходными параметрами преобразователя являются ток, напряжение, частота.

Четвертый элемент – статический преобразователь двигателя (при наличии) – преобразует электрическую энергию, полученную от статического преобразователя генератора, к виду, необходимому для последующего преобразования ее в механическую энергию. Выходными параметрами преобразователя являются ток, напряжение, частота.

Пятый элемент – электромеханический преобразователь (тяговый двигатель), преобразует электрическую энергию, полученную от статического преобразователя двигателя, в механическую энергию. Преобразование происходит в воздушном зазоре электрической машины. Выходными параметрами преобразователя являются электромагнитный момент и частота вращения вала.

Шестой элемент – механический преобразователь (тяговый редуктор), преобразует механическую энергию, полученную от тягового двигателя, к виду, необходимому для ее реализации в точке контакта «колесо-рельс». Выходными параметрами преобразователя являются вращающий момент и частота вращения колесной пары.

Любой процесс передачи и преобразования энергии сопровождается потерями, которые выделяются в виде тепловой энергии в окружающую среду. На утилизацию тепловой энергии потерь приходится затрачивать дополнительную энергию (системы охлаждения дизеля, тягового генератора, статических преобразователей, тяговых двигателей).

Некоторые преобразователи энергии способны накапливать энергию: кинетическую энергию (маховые массы двигателя внутреннего сгорания); магнитного поля (индуктивности); электрического поля (конденсаторы), а одним из самых больших накопителей кинетической энергии является сам поезд.

Характеристики и параметры элементов тяговой передачи мощности непосредственно влияют на технико-экономические показатели локомотивов и их энергоэффективность [48, 49].

Потребность в сравнении эффективности работы процессов электромеханического преобразования энергии возникла тогда, когда появилась возможность решать одну и ту же техническую задачу с помощью различных способов. Необходимость иметь некую общую оценку энергетического совершенства тех или иных устройств определяется не только потребностями общения между специалистами, но и потребитель (заказчик) тоже заинтересован в понятной оценке эффективности преобразующих устройств.

### **1.3 Удельный расход дизельного топлива на тягу поездов**

Наиболее популярным показателем, оценивающим эффективность выполнения перевозочного процесса, является удельный расход дизельного топлива локомотивом на выполнение единицы перевозочной работы [50]. Нормы удельного

расхода топлива устанавливают для локомотивных бригад, депо, отделений железной дороги [51].

Норма удельного расхода топлива устанавливается в зависимости от типа подвижного состава, от вида движения и вида выполняемой работы [51]:

- для локомотивов выполняющих поездную работу, определяется как расход топлива на 10000 ткмбр.

$$e = \frac{E \cdot 10^4}{Q \cdot L}, \quad (1)$$

где  $E$  – расход дизельного топлива;

$Q$  – масса состава;

$L$  – длина участка;

- для одиночно следующих локомотивов, определяется как расход топлива на 100 лок.км. [51]

$$e = \frac{E \cdot 100}{L}; \quad (2)$$

- для маневровой работы, определяется как расход топлива на 1 час маневровой работы [51]

$$e = \frac{E}{t_{\text{ман}}}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{ман}}$  – время маневровой работы.

Данные нормы устанавливаются опытно-расчетным путем с учетом местных особенностей эксплуатации локомотивов. В дальнейшем установленные нормы корректируются с учетом статистического анализа [51].

Показатель удельного расхода топлива характеризует в целом эффективность организации перевозочного процесса и включает в себя целый ряд факторов [52]:

- энергоэффективность автономных локомотивов;
- составность поезда (удельное сопротивление движению поезда, тип подвижного состава, нагрузка на ось, масса состава);
- участок обращения (план и профиль пути);
- эффективность управления поездом машинистом;
- эффективность организации движения поездов (следование по удалению, остановки на промежуточных станциях, длительность простоя на промежуточных станциях, выдерживание заданной технической скорости движения).

Ввиду множества факторов, входящих в данный показатель, объективно оценить энергоэффективность автономных локомотивов используя только удельный расход топлива на единицу перевозочной работы, будет затруднительно [52].

#### 1.4 Коэффициент полезного действия локомотива

Общепризнанным показателем энергетической эффективности является коэффициент полезного действия. Для локомотивной тяги ГОСТ 31187-2011 «Тепловозы магистральные. Общие технические требования» устанавливает следующие показатели энергетической эффективности [53]:

- коэффициент полезного действия (КПД);
- коэффициент полезного использования мощности (КПИМ).

Коэффициент полезного действия локомотива  $\eta_{л}$  определяется через отношение мощностей [54]

$$\eta_{л} = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} = \frac{P_{т}}{P_{т} + P_{п} + P_{сн}}, \quad (4)$$

где  $P_{пол}$  – полезная мощность на тягу;

$P_{\text{затр}}$  – затрачиваемая мощность первичного источника энергии.

$$P_{\text{пол}} = P_{\text{т}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{т}}$  – мощность на ободах колес локомотива (мощность на тягу).

$$P_{\text{затр}} = P_{\text{т}} + P_{\text{п}} + P_{\text{сн}} \quad (6)$$

где  $P_{\text{п}}$  – мощность потерь в элементах тягового оборудования;

$P_{\text{сн}}$  – мощность, расходуемая на собственные нужды локомотива.

Мощность источника энергии  $P_{\text{затр}}$ , т.е. которая затрачена при выполнении определенной работы, определяется через энергию, полученную при химическом преобразовании топлива (дизельного, газового, водородного или др.), отнесенную к временному интервалу.

Номинальный коэффициент полезного действия локомотива, указанный в технической документации приведен для номинальной мощности. В реальных условиях эксплуатации, анализ которых проведен во второй главе диссертации, эксплуатационный КПД зависит от режимов работы элементов силовой схемы локомотива при ведении поезда, а также может учитывать затраты энергии на стоянках.

Следует заметить, что ГОСТ 31187-2011 «Тепловозы магистральные. Общие технические требования» предусматривает определение коэффициента полезного действия для полной мощности двигателя в диапазоне скоростей движения от 0,4 до 0,9 конструкционной скорости и должен быть не менее 0,32 [53]. Таким образом, КПД для грузовых и пассажирских локомотивов нормируется для скоростей от 40...48 до 90...108 км/ч, на которых локомотив с полной мощностью практически не используется. Для маневровых тепловозов ГОСТ 31428-2011 «Тепловозы маневровые с электрической передачей. Общие технические требования» нормирует значение КПД не менее 0,31 [55] для диапазона 0,3...0,7 кон-

струкционной скорости, т.е. для скоростей от 27...33 до 63...77 км/ч, при таких скоростях движения маневровые тепловозы очень редко реализуют полную мощность дизеля.

Касательная мощность локомотива (мощность на ободу колеса  $P_T$ ) определяется по формуле [54]

$$P_T = F_T \cdot V, \quad (7)$$

где  $F_T$  – касательная сила тяги локомотива;

$V$  – скорость движения, м/с.

С учетом единиц измерения, принятых на железнодорожном транспорте, формула для определения касательной мощности будет выглядеть следующим образом [54]

$$P_T = \frac{F_T \cdot V}{3,6}. \quad (8)$$

### 1.5 Коэффициент полезного использования мощности локомотива

Коэффициент полезного использования мощности локомотива, нормируемый показатель для тепловозов, показывающий отношение полезной мощности идущей на совершение полезной работы, т.е. на тягу  $P_T$ , к номинальной мощности  $P_{ном}$  локомотива [53].

$$\gamma = \frac{P_T}{P_{ном}}. \quad (9)$$

Следует заметить, что ГОСТ 31187-2011 «Тепловозы магистральные. Общие технические требования» предусматривает расчет коэффициента полезного

использования мощности как отношение касательной мощности к полной мощности двигателя в диапазоне скоростей движения от 0,4 до 0,9 конструкционной скорости для грузовых и пассажирских локомотивов, от 0,3 до 0,7 для маневровых и должен быть не менее 0,78 [53]. Как и в случае с КПД, КПИМ нормируется для режимов, в которых локомотивы практически не используются, что будет наглядно продемонстрировано во второй главе настоящей работы.

### 1.6 Показатель энергоэффективности локомотива

Проблема выбора объективного показателя для оценки локомотивов актуальна, так в [52] приведены прямой и косвенный способы определения уровня энергетической эффективности тепловозов, в основе которых лежит универсальный показатель энергетической эффективности локомотива, который показывает отношение полезной энергии, выработанной тепловозом, к энергии сгорания дизельного топлива. В результате специалистами ОАО «ВНИКТИ» разработан показатель энергоэффективности локомотива (ПЭЛ) [52], который равен отношению экспериментального коэффициента действия к контрольно-расчетному значению

$$\text{ПЭЛ} = \frac{\eta_{\text{эр}}}{\eta_{\text{кр}}} \quad (10)$$

Экспериментальный КПД определяется по формуле [52]

$$\eta_{\text{эр}} = \frac{E_{\text{кэ}}}{E_{\text{вэ}}}, \quad (11)$$

где  $E_{\text{кэ}}$  – значение выработанной энергии на ободу колеса, полученной входе эксперимента;

$E_{\text{вэ}}$  – энергия дизельного топлива.

Контрольно-расчетное значение КПД определяется по формуле [52]

$$\eta_{кр} = \frac{E_{кр}}{E_{вр}}, \quad (12)$$

где  $E_{кр}$  – расчетное значение потенциально выработанной энергии на ободу колеса, при паспортных данных локомотива;

$E_{вр}$  – расчетное значения энергии дизельного топлива, которое будет израсходовано.

Оценку ПЭЛ предлагается производить в результате часового испытания локомотива [52], дизель-генераторная установка которого нагружена на водяной реостат, а выработанную энергию силовой установки предлагается определять на фланце отбора мощности коленчатого вала.

Косвенный способ определения ПЭЛ [52] заключается в отношении суммы средних индикаторных давлений в цилиндрах дизеля к сумме среднего образцового давления в тех же цилиндрах. За образцовый цилиндр принимается тот, в котором отношение индикаторной работы цикла к полезной работе, будет максимальным

$$\text{ПЭЛ}_{рп} = \frac{\sum P_i^u}{zP^{ou}}, \quad (13)$$

где  $P_i^u$  – индикаторное давление газов в  $i$ -ом цилиндре;

$z$  – число цилиндров;

$P^{ou}$  – среднее индикаторное давление газов образцовом цилиндре.

Из формул и методик для определения ПЭЛ видно, что данный показатель в полной мере оценивает энергетическую эффективность дизель-генераторной силовой установки, оставляя практически без внимания статические преобразователи и тяговые двигатели.



## 1.7 Индикатор энергетической эффективности локомотива

Индикатор энергетической эффективности предложен АО «ВНИКТИ» и внесен в ГОСТ 34514-2019 [56], описывающий метод его определения. Показатель позволяет оценить относительную величину отклонения фактической энергоэффективности тепловоза от её расчетного значения аналогичного тепловоза, который имеет нормативные параметры, в том числе удельный расход и мощность дизеля [56].

$$\text{ИЭЭФ} = \frac{\eta_{\text{эр}}}{\eta_{\text{кэр}}}, \quad (14)$$

где  $\eta_{\text{эр}}$  – экспериментально-расчетный КПД тепловоза, определяется в ходе проведения реостатных испытаний тепловоза по типовой тест-циклограмме и автоматическом нагружении ДГУ на реостат. КПД определяется на основании измерения расхода топлива за время испытаний;

$\eta_{\text{кэр}}$  – контрольный экспериментально-расчетный КПД, определяется расчетным методом на основе нормативных значений удельного расхода топлива и мощности дизеля, указанных в ТУ или ТЗ, что и при проведении реостатных испытаний тепловоза, с учетом затрат энергии на привод вспомогательного оборудования, а также коэффициентов полезного действия тягового оборудования (тягового генератора, выпрямительной установки или инвертора (при наличии) и тяговых двигателей), полученных при испытаниях по оценке величины  $\eta_{\text{эр}}$ .

Значение экспериментально-расчетного КПД тепловоза вычисляют по формуле [56]

$$\eta_{\text{эр}} = \frac{E_{\text{кэ}}}{E_{\text{вэ}}}, \quad (15)$$

где  $E_{кэ}$  – экспериментально-расчетное значение потенциально переданной энергии на обод колес, полученной входе реализации тест-циклограммы нагружения ДГУ на реостат;

$E_{вэ}$  – значение энергии дизельного топлива, потраченного дизелем тепловоза за всю тест-циклограмму испытаний.

Для тепловозов с ЭПМ постоянного тока и тепловозов с передачей переменного-постоянного тока обобщенная формула для определения экспериментально-расчетного значения энергии примет вид [56]:

$$E_{кэ} = \left[ \int_0^T (P_{ТГ(ВУ)ij} - N_{ВСПij}) \cdot \eta_{ТЭДij} \cdot dt \right] \cdot \eta_{ор}, \quad (16)$$

где  $T$  – время реализации тест-циклограммы;

$P_{ТГ(ВУ)ij}$  – текущее значение мощности на клеммах тягового генератора или выпрямительной установки, кВт;

$N_{ВСПij}$  – текущее значение мощности генератора, затраченной на привод вспомогательных агрегатов, кВт (если привод вспомогательных агрегатов питается от силовой обмотки тягового генератора). Для определения величины  $N_{ВСПij}$  в цепи электрической схемы устанавливают дополнительные измерительные датчики;

$\eta_{ТЭДij}$  – текущее значение КПД ТЭД, вычисляемое для позиции контроллера машиниста (ПКМ) с помощью зависимости от тока нагрузки, установленной по экспериментальным данным;

$\eta_{ор}$  – значение КПД осевого редуктора и моторно-осевых подшипников;

$i$  – номер текущего измерения;

$j$  – номер ПКМ.

Для тепловозов с ЭПМ переменного тока формула для определения экспериментально-расчетного значения энергии имеет вид [56]:

$$E_{кэ} = \left[ \int_0^T P_{Иij} \cdot \eta_{Иij} \cdot \eta_{ТЭДij} \cdot dt \right] \cdot \eta_{ор}, \quad (17)$$

где  $P_{Иij}$  – текущее значение мощности на входе в инвертор напряжения, кВт;

$\eta_{Иij}$  – текущее значение КПД инвертора напряжения.

Значение текущей мощности определяется на основании измерений тока и напряжения звена постоянного тока [56]

$$P_{ТГ(ВУ)(И)ij} = I_{ТГ(ВУ)(И)ij} \cdot U_{ТГ(ВУ)(И)ij} \cdot 10^{-3}, \quad (18)$$

где  $I_{ТГ(ВУ)(И)ij}$  – текущее значение силы тока на зажимах тягового генератора, выпрямительной установки или инвертора напряжения, А;

$U_{ТГ(ВУ)(И)ij}$  – текущее значение напряжения на зажимах тягового генератора, выпрямительной установки или инвертора напряжения, В.

$$E_{вэ} = B \cdot Q_{топл}^н, \quad (19)$$

где  $B$  – расход дизельного топлива за время реализации тест-циклограммы, кг;

$Q_{топл}^н$  – низшая теплотворная способность дизельного топлива, МДж/кг.

Контрольный экспериментально-расчетный коэффициент полезного действия тепловоза  $\eta_{кэр}$  определяют по формуле [56]

$$\eta_{эр} = \frac{E_{кэр}^{рн}}{E_{вэ}^{рн}}, \quad (20)$$

где  $E_{кэр}^{рн}$  – контрольное экспериментально-расчетное значение потенциально переданной энергии на колеса тепловоза за время реализации типовой тест-циклограммы при нормативных значениях мощности ДГУ при средних зна-

чениях коэффициентов полезного действия элементов тягового оборудования тепловоза;

$E_{вэ}^{рн}$  – расчетное значение энергии дизельного топлива, потраченного дизелем тепловоза за всю тест-циклограмму испытаний при нормативных значениях параметрах дизель-генераторной установки, без учета переходных режимов работы.

Для тепловозов с ЭПМ постоянного тока, переменного-постоянного тока и переменного тока обобщенная формула для определения контрольного экспериментально-расчетного значения энергии примет вид [56]:

$$E_{кэр}^{рн} = \sum_{j=0}^{NПКМ} \left[ \left( E_{дизj}^{рнс} - E_{вспмехj} \right) \cdot \eta_{тгjср} - E_{вспэлj} \right] \cdot \eta_{вуjср} \cdot \eta_{иjср} \cdot \eta_{тэдjср} \cdot \eta_{ор}, \quad (21)$$

где  $NПКМ$  – максимальное число позиций контроллера машиниста;

$E_{дизj}^{рнс}$  – энергия, выработанная дизелем на  $j$ -ой позиции контроллера машиниста за время расчетной тест-циклограммы при нормативных значениях мощности дизеля;

$E_{вспмехj}$  – энергия на обеспечение работы вспомогательных агрегатов с механическим приводом на  $j$ -ой позиции контроллера машиниста;

$E_{вспэлj}$  – энергия на обеспечение работы вспомогательных агрегатов с электрическим приводом на  $j$ -ой позиции контроллера машиниста;

$\eta_{тгjср}$  – среднее значение КПД тягового генератора на  $j$ -ой позиции контроллера машиниста;

$\eta_{вуjср}$  – среднее значение КПД выпрямительной установки на  $j$ -ой позиции контроллера машиниста;

$\eta_{иjср}$  – среднее значение КПД инвертора напряжения на  $j$ -ой позиции контроллера машиниста;

$\eta_{ТЭДjср}$  – среднее значение КПД тягового электродвигателя на j-ой позиции контроллера машиниста.

Энергия, выработанная дизелем на j-ой ПКМ определяется по формуле [56]

$$E_{дизj}^{рнс} = N_{дизj}^{рнс} \cdot T_j \cdot 10^{-3}, \quad (22)$$

где  $N_{дизj}^{рнс}$  – приведенное к условиям реостатных испытаний нормативное значение мощности дизеля;

$T_j$  – время работы на j-ой позиции контроллера машиниста [56].

$$N_{дизj}^{рнс} = N_{дизj}^{рн} + \Delta N_{дизjср}, \quad (23)$$

где  $N_{дизj}^{рн}$  – нормативное значение мощности дизеля;

$\Delta N_{дизjср}$  – среднее изменение мощности дизеля, вызванное отличием условий проведения реостатных испытаний от нормальных условий.

Типовые тест-циклограммы нагружения дизель-генераторной установки предусматривают следующее распределение времени работы по позициям контроллера машиниста [56]:

- для грузового магистрального тепловоза показано на рисунке 11;
- для пассажирского магистрального тепловоза показано на рисунке 12;
- для маневрового тепловоза показано на рисунке 13.

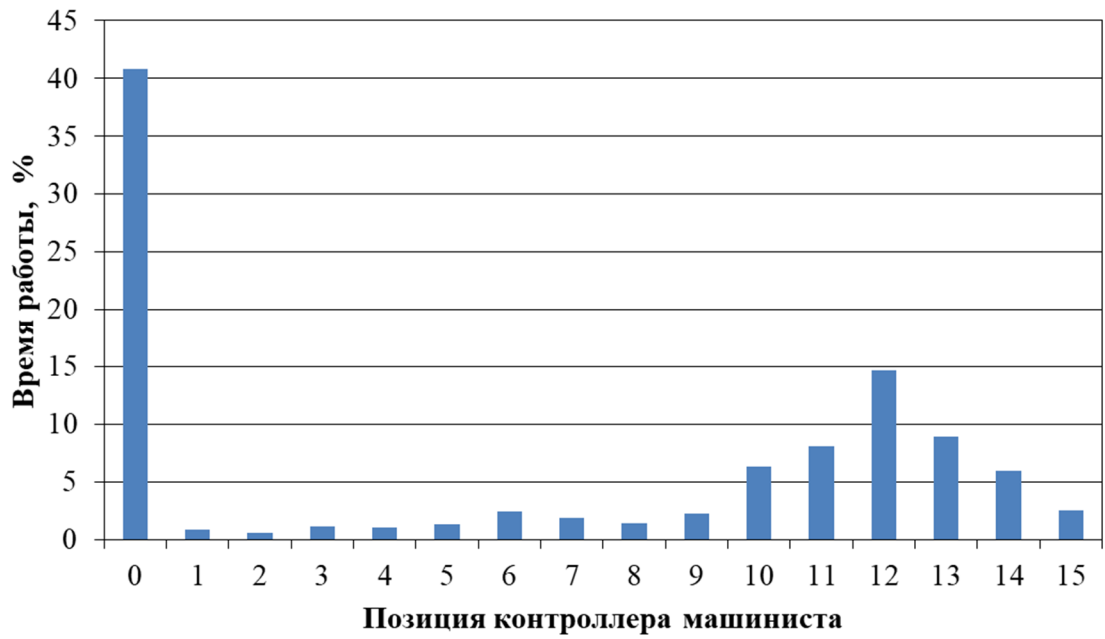


Рисунок 11 – Время работы по позициям для тест-циклограммы грузового магистрального тепловоза

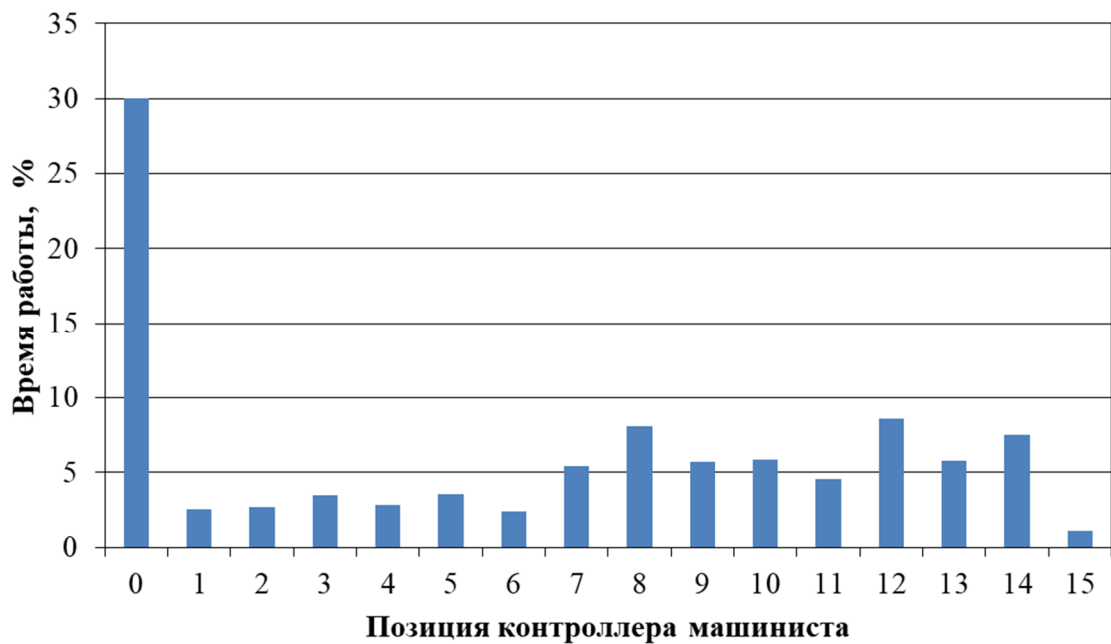


Рисунок 12 – Время работы по позициям для тест-циклограммы пассажирского магистрального тепловоза

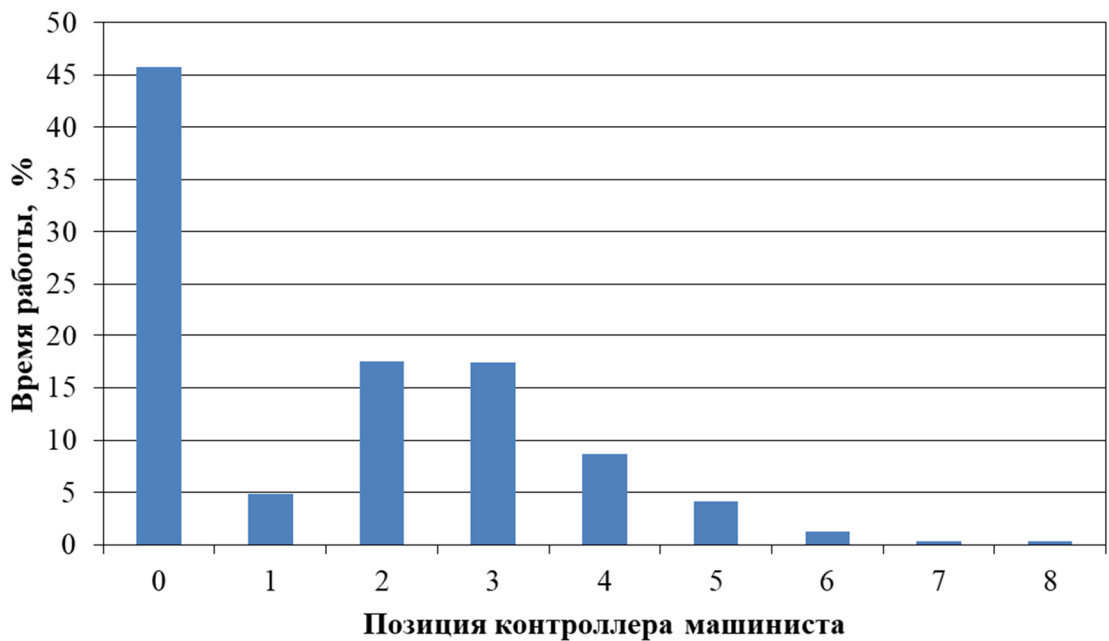


Рисунок 13 – Время работы по позициям для тест-циклограммы маневрового тепловоза

Время работы по позициям для тест-циклограммы должно соответствовать эксплуатационным режимам работы локомотивов, при этом стоит отметить, что коэффициент полезного действия локомотива за период тест-циклограммы зависит не только от коэффициентов полезного действия элементов силовой части оборудования, но и от энергии, выработанной на каждой из позиций контроллера машиниста.

### 1.8 Постановка задач исследования

Тренд, направленный на увеличение секционной мощности локомотивов, позволил увеличить объем перевозок и повысить пропускную способность железных дорог, но при этом практически отсутствует снижение расхода энергоресурсов на тягу поездов, что обусловлено недоиспользованием доступной мощности локомотивов и сопряжено со спецификой работы железнодорожного транспорта, когда в одну сторону направляется основной грузопоток, а в обратную сторону пустая тара, т.е. порожние поезда. Многие исследователи ожидают улучшение

эксплуатационных показателей от внедрения различных накопителей энергии на тяговом подвижном составе и это, безусловно, является перспективным направлением повышения энергоэффективности и соответствует общемировым тенденциям, но в первую очередь необходимо уделить внимание и совершенствовать процессы преобразования энергии на локомотиве в реальных эксплуатационных условиях, иначе применение накопителей энергии не позволит получить существенный экономический эффект.

В данном исследовании хочется обратить внимание на то, что в настоящее время все локомотивы имеют многомоторный тяговый привод, и это позволяет реализовать масштабируемость нагрузки – способность распределенной системы легко расширять и сокращать свои ресурсы для адаптации к более тяжелым или более легким нагрузкам, в результате можно снизить потребление топлива локомотивом.

Рассмотренные показатели являются важными для оценки энергоэффективности эксплуатации автономных локомотивов, однако в процессе эксплуатации оценивается только удельный расход топлива на единицу перевозочной работы, а все остальные показатели (коэффициент полезного действия, коэффициент полезного использования мощности, индикатор энергетической эффективности) определяются/рассчитываются при проведении испытаний (сертификационных, реостатных), т.к. их определение в процессе эксплуатации сопряжено с рядом трудностей и отсутствуют методики их определения.

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1**

1. Анализ проблемы повышения энергетической эффективности использования автономных локомотивов показал, что она является одной из самых актуальных для железнодорожного транспорта, и подтверждается проводимыми поисковыми исследованиями и разработками, ведущими железнодорожными институтами страны и введением новых ГОСТов для определения энергетической эффективности использования локомотивов.



2. Анализ опыта эксплуатации маневровых и магистральных локомотивов показал, что на сегодняшний день имеется констатация низкой энергетической эффективности маневровых и мощных современных магистральных локомотивов, особенно при работе с легковесными поездами, но при этом отсутствуют практические пути выхода из сложившейся ситуации. Несмотря на разработки многодизельных локомотивов с бесколлекторным тяговым приводом, серийно выпускаются однодизельные маневровые тепловозы с передачей мощности постоянного тока и однодизельные (в секции) магистральные тепловозы с передачей мощности переменного-постоянного тока.

3. Существует целый ряд энергетических показателей для тягового подвижного состава, которые нормируются только для полной мощности локомотива при скоростях движения от 40 до 90 % конструкционной скорости, при этом эксплуатационная эффективность оценивается только по показателю удельного расхода топлива на единицу перевозочной работы, из которого трудно оценить непосредственно эффективность самого автономного локомотива, поэтому необходима разработка методологии определения энергетической эффективности локомотивов в реальных условиях эксплуатации.

## **2 Методология оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности**

Современный автономный локомотив – сложное тяговое электромеханическое устройство с химическим источником энергии и с несколькими ступенями преобразования энергии в тяговом оборудовании, поэтому объективно оценить энергоэффективность можно только через коэффициент полезного действия тепловоза за поездку, т.е. отношение количества энергии переданной на колеса к энергии израсходованного топлива. Энергия дизельного топлива определяется через его расход за единицу времени, при этом, чем больше интервал времени, тем меньше влияет погрешность измерения количества топлива, но при этом сложно обеспечить постоянство режима работы дизель-генераторной установки [57]. Расход дизельного топлива можно измерить через изменение массы топлива в топливном баке (необходимо учитывать не только изменение объема топлива, но и изменение плотности дизельного топлива), либо через разность показаний установленных расходомеров на подводящем и обратном трубопроводах топливной системы дизеля (данный способ более точный, но требует специального оборудования и не может быть применен в условиях эксплуатации) [58].

Для объективного измерения энергии переданной на колеса локомотива требуется использовать датчики крутящего момента, которые должны быть установлены между зубчатым колесом тягового редуктора и осью колесной пары. В настоящее время такие устройства еще не разработаны, поэтому прибегают к расчетным и косвенным методам определения энергоэффективности.

Наиболее точно, касательную мощность локомотива можно определить на катковой станции, или через касательную силу тяги при испытаниях с динамометрическим измерительным устройством (тарированное автосцепное устройство с тензодатчиками, установленными на хвостовике автосцепки) [59]

$$N_K = \frac{F_K V}{3,6}, \quad (24)$$

где  $F_K$  – касательная сила тяги локомотива;

$V$  – скорость движения, км/ч.

Касательную мощность определяют с учетом сил основного и дополнительного сопротивлений действующих на локомотив [60]

$$F_K = F_{\text{дин}} + P \left( w'_0(V) \pm i \cdot g + w_r \pm \frac{1}{\xi} \frac{dV}{dt} \right), \quad (25)$$

где  $F_{\text{дин}}$  – сила тяги на автосцепном устройстве локомотива;

$P$  – масса локомотива;

$w'_0(V)$  – основное удельное сопротивление локомотива, в соответствии с правилами тяговых расчетов [61], для нового подвижного состава – по результатам испытаний;

$i$  – крутизна уклона, железнодорожного участка пути;

$g$  – ускорение свободного падения, для европейской части России  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$w_r$  – дополнительное удельное сопротивление от кривой (при наличии);

$\xi$  – коэффициент инерции вращающихся частей локомотива, в соответствии с правилами тяговых расчетов [61], для нового подвижного состава – по результатам испытаний или расчета;

$\frac{dV}{dt}$  – ускорение (замедление) локомотива в процессе проведения измерений.

Из формулы (25) видно, что результат зависит от условий проведения испытаний, поэтому в [60] устанавливаются требования, определяющие условия допустимости их проведения. К таким требованиям относят скорость ветра не более  $6 \text{ м/с}$ , температуру окружающего воздуха выше минус  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , и неравномерность движения не более  $30 \text{ км/ч}^2$  ( $0,0023 \text{ м/с}^2$ ). В обычных условиях эксплуатации выполнить последнее требование практически не возможно, кроме того тарированное автосцепное устройство с тензодатчиками с устройством получения и обработки информации не устанавливается на локомотивы, поэтому данный метод может быть реализован только на испытательном кольце при проведении испытаний (сертификационных, энергетических, определительных и т.д.).

Другим методом является определение касательной силы тяги через токи тяговых двигателей по экспериментальным зависимостям касательной силы тяги локомотива от тока, для двигателей постоянного тока [60]

$$F_K = \sum_{j=1}^n F_{Kj}(I_j, V), \quad (26)$$

где  $F_{Kj}(I_j, V)$  – касательная сила тяги  $j$ -го тягового двигателя в зависимости от тока тягового двигателя и скорости движения.

Для автономного тягового подвижного состава с асинхронными двигателями касательную силу тяги определяют по формуле [60, 59]

$$F_K = \sum_{j=1}^{n_{\text{АТД}}} F_{Kj} = n_{\text{АТД}} \frac{2M_{\text{АТД}} \cdot \mu_p \cdot \eta_p}{D}, \quad (27)$$

где  $n_{\text{АТД}}$  – количество тяговых двигателей;

$M_{\text{АТД}}$  – момент на валу асинхронного двигателя;

$\mu_p$  – передаточное число тягового редуктора;

$\eta_p$  – коэффициент полезного действия тягового редуктора и моторно-осевых подшипников;

$D$  – диаметр колес по кругу катания.

Момент на валу асинхронного двигателя определяется по формуле [60]

$$M_{\text{АТД}} = \frac{U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot \eta_{\text{И}} \cdot \eta_{\text{АТД}}(\omega_p)}{\omega_p}, \quad (28)$$

где  $U_{DC}$  – напряжение в звене постоянного тока;

$I_{DC}$  – ток звена постоянного тока;

$\eta_{\text{И}}$  – коэффициент полезного действия инвертора;

$\eta_{\text{АТД}}(\omega_p)$  – коэффициент полезного действия асинхронного двигателя в зависимости от угловой частоты вращения ротора.

При определении касательной силы тяги локомотива через ток двигателей постоянного тока или через мощность звена постоянного тока для асинхронного привода необходимо знать мгновенные значения токов, напряжений и характеристики для выбранного типа тяговых двигателей, тем самым данный метод определения касательной силы тяги можно использовать для условий эксплуатации, но при этом не учитывается зависимость изменения КПД от реализуемой мощности тяговым приводом, что не позволяет получить объективную оценку энергоэффективности локомотива. Поэтому актуальным является разработка методологии оценки энергетической эффективности основного тягового оборудования электрической передачи мощности локомотива.

## 2.1 Метод оценки эффективности процесса преобразования энергии в первичном двигателе в условиях эксплуатации

Эффективность процесса преобразования энергии в первичном двигателе наиболее полно характеризуется удельным расходом топлива на единицу совершенной работы [кг/(кВт·ч)] [62]. Эффективное значение коэффициента полезного действия первичного двигателя на фланце можно определить по формуле [63]

$$\eta_e = \frac{3600}{b_e \cdot Q_H}, \quad (29)$$

где  $b_e$  – удельный расход топлива первичного двигателя, кг/(кВт·ч);

$Q_H$  – низшая теплотворная способность топлива первичного двигателя, кДж/кг.

В условиях эксплуатации, с достаточной точностью можно, определить расход топлива за поездку и энергию, переданную на вал тягового генератора, тогда

удельный расход топлива (с учетом потерь мощности на привод вспомогательного оборудования от вала дизеля) определяются формулой [50]

$$b_d = \frac{E}{A_{ТГ}}, \quad (30)$$

где  $E$  – расход топлива первичного двигателя, кг;

$A_{ТГ}$  – количество энергии, переданной на вал тягового генератора.

При необходимости определения эффективного удельного расхода топлива, необходимо определить энергию, затраченную на привод вспомогательного оборудования, тогда формула примет вид [50]

$$b_e = \frac{E}{\frac{A_{DC}}{\eta_{ТГ} \cdot \eta_{ВУ}} + A_{ВСП}}, \quad (31)$$

где  $A_{ВСП}$  – количество энергии, затраченной на привод вспомогательного оборудования.

$\eta_{ВУ}$  – коэффициент полезного действия выпрямительной установки;

$\eta_{ТГ}$  – коэффициент полезного действия тягового генератора.

Баланс энергий на фланце коленчатого вала дизеля, за интервал времени работы, определяется формулой [64, 50]

$$A_d = A_{ВСП} + \frac{A_{DC}}{\eta_{ТГ} \cdot \eta_{ВУ}}, \quad (32)$$

Выработанная энергия на фланце коленчатого вала определяется по формуле [64, 50]

$$A_d = E \cdot Q_H \cdot \eta_E, \quad (33)$$

где  $Q_H$  – низшая теплота сгорания дизельного топлива;

$\eta_e$  – эффективное значение коэффициента полезного действия двигателя.

Эффективное значение коэффициента полезного действия двигателя зависит от эффективной мощности дизеля и частоты вращения дизеля, и определяется через универсальные характеристики дизеля (рисунок 14)

$$\eta_e = f(P_e, \omega), \quad (34)$$

где  $P_e$  – эффективная мощность двигателя;

$\omega$  – частота вращения коленчатого вала двигателя.

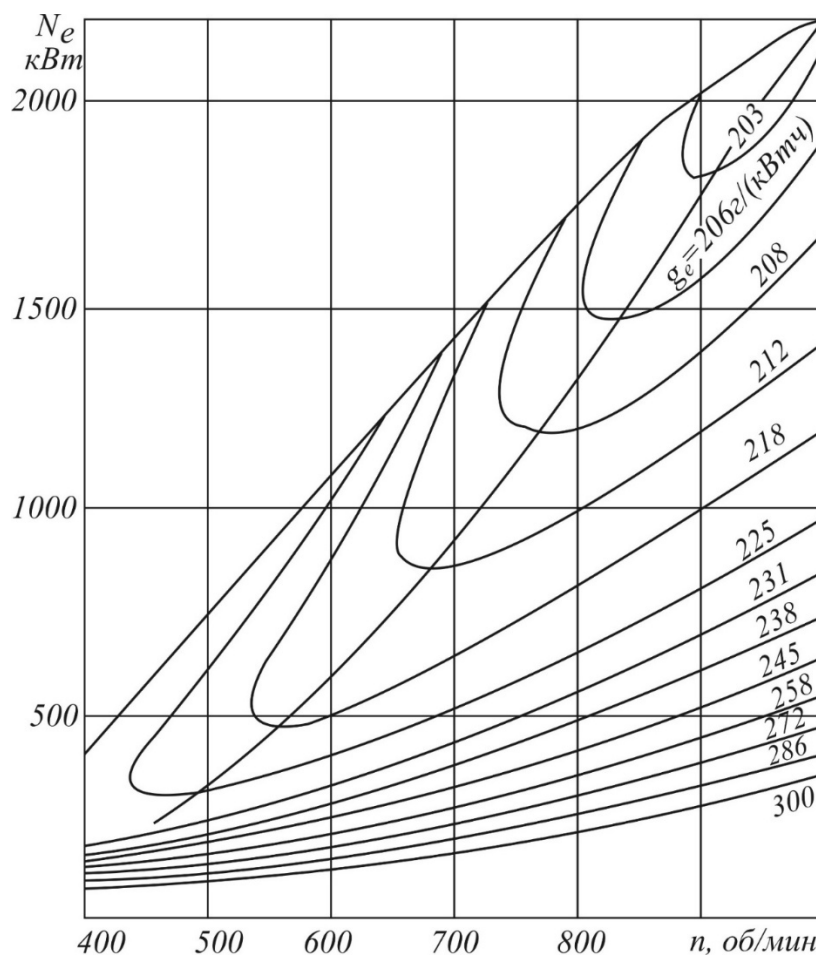


Рисунок 14 – Пример универсальной характеристики дизеля

С учетом того, что первичный двигатель на локомотиве работает по тепло-возной характеристике, обеспечивающей минимальный расход топлива, то эф-

эффективное значение коэффициента полезного действия зависит от эффективной мощности или от коэффициента отношения текущей мощности к номинальной (рисунок 15) [63]

$$\eta_e = f(P_e) = f\left(\frac{P_e}{P_H}\right). \quad (35)$$

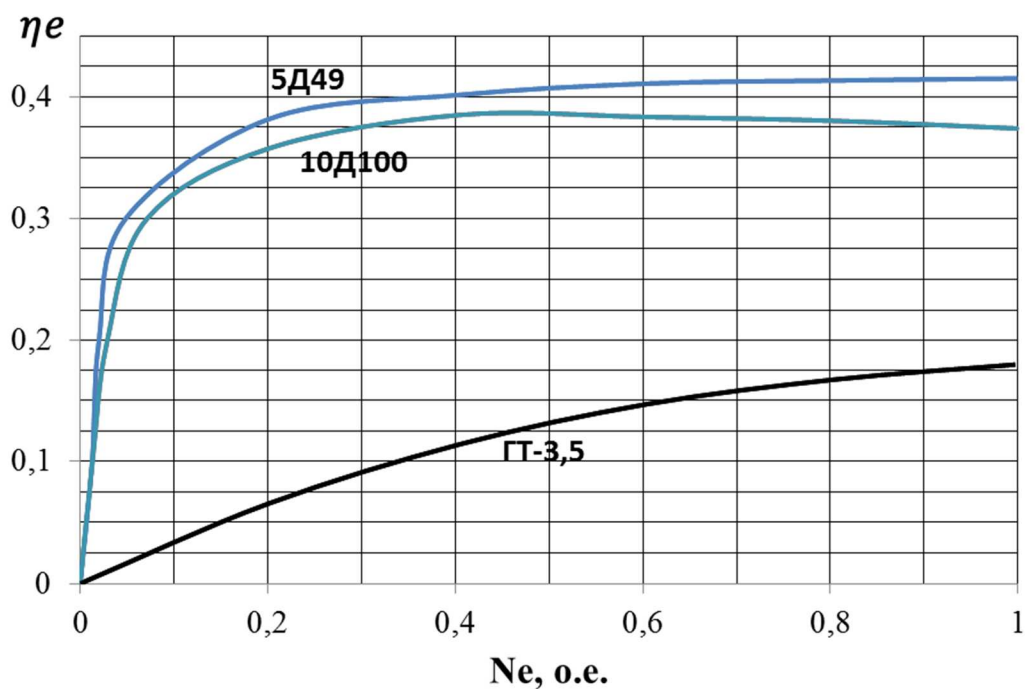


Рисунок 15 – Зависимость эффективного коэффициента полезного действия двигателя от мощности по тепловозной характеристике

Количество энергии, затраченной на привод вспомогательного оборудования, определяется формулой [64, 50]

$$A_{\text{ВСП}} = \int P_{\text{ВСП}} \cdot dt. \quad (36)$$

Количество энергии, переданной на вал тягового генератора определяется по формуле [60, 64, 50]



$$A_{\text{ТГ}} = \int \frac{U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot dt}{\eta_{\text{ТГ}}(I_{DC}, \omega_{\text{ТГ}}) \cdot \eta_{\text{ВУ}}(I_{DC})}, \quad (37)$$

где  $U_{DC}$  – напряжение звена постоянно тока, В;

$I_{DC}$  – ток звена постоянно тока, А;

$\eta_{\text{ТГ}}(I_{DC}, \omega_{\text{ТГ}})$  – коэффициент полезного действия тягового генератора;

$\eta_{\text{ВУ}}(I_{DC})$  – коэффициент полезного действия выпрямительной установки;

$\omega_{\text{ТГ}}$  – угловая частота вращения вала тягового генератора.

В результате получаем формулу для определения среднеэксплуатационного эффективного коэффициента полезного действия первичного двигателя [50]

$$\eta_e = \frac{\int P_{\text{ВСП}} \cdot dt + \int \frac{U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot dt}{\eta_{\text{ТГ}}(I_{DC}, \omega_{\text{ТГ}}) \cdot \eta_{\text{ВУ}}(I_{DC})}}{E \cdot Q_H}, \quad (38)$$

Так как система управления двигателем обеспечивает его работу по тепло-возной (экономической) характеристики [50], то в условиях эксплуатации, важнее определять коэффициент полезного действия передачи энергии поступающей в тяговый генератор

$$\eta_d = \frac{\int \frac{U_{DC} \cdot I_{DC} \cdot dt}{\eta_{\text{ТГ}}(I_{DC}, \omega_{\text{ТГ}}) \cdot \eta_{\text{ВУ}}(I_{DC})}}{E \cdot Q_H}, \quad (39)$$

В этом случае нет необходимости точного определения энергии затраченной на привод вспомогательных машин и агрегатов, но при этом можно оценить эффективность работы дизеля совместно со вспомогательным оборудованием.

Практическая сложность определения коэффициента полезного действия дизеля заключается в обеспечении необходимой точности измерения расхода дизельного топлива [62]. В соответствии с ГОСТ 34514-2019, устанавливается максимальная допустимая погрешность измерения часового расхода топлива

$\pm 0,154$  %. Если это значение привести к измерению топлива в топливном баке, то при работе дизеля в течение одного часа на 15 позиции получим расход топлива 530 кг, при этом необходимо обеспечить точность измерения топлива в топливном баке  $\pm 0,8$  кг. Таким образом, для условий эксплуатации, определение коэффициента полезного действия дизеля возможно только за длительный промежуток времени, а измерение топлива должно происходить во время стоянок. Зависимость эксплуатационного коэффициента полезного действия от времени определяется по формуле [50]

$$\eta_d(t) = \frac{A_d(t)}{A_E(t)} = \frac{A_d(t)}{E(t) \cdot Q_H}, \quad (40)$$

где  $A_d(t)$  – механическая энергия, подводимая к тяговому генератору, в зависимости от времени;

$E(t)$  – расход дизельного топлива в зависимости от времени;

$Q_H$  – низшая теплота сгорания топлива.

Расход дизельного топлива в зависимости от времени, определяется по формуле

$$E_i(t) = (m_{\text{топл}_0} - m_{\text{топл}_i}(t)), \quad (41)$$

где  $m_{\text{топл}_0}$  – начальная масса топлива;

$m_{\text{топл}_i}$  – масса топлива на  $i$ -том шаге расчета.

## **2.2 Показатели оценки эффективности процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании электрической передачи мощности**

Основное назначение электрической передачи мощности заключается в передаче мощности от первичного источника энергии на колесные пары локомоти-

ва. Первые электрические передачи мощности осуществляли всего несколько преобразований энергии (из механической в электрическую и опять в механическую), но, несмотря на простоту конструкции и управления, у данного вида передач оказались существенные недостатки в виде ограничений максимальной мощности и невысокого коэффициента полезного действия. Современная электрическая передача мощности кроме электромеханического преобразования осуществляет и электрическое преобразование энергии с целью приведения ее к виду, который воспринимает следующий элемент тягового оборудования локомотива, при этом происходит контроль и управление процессами преобразования с частотой до нескольких МГц, и возникает необходимость в оценке энергетических показателей и характеристик процессов преобразования энергии на каждом этапе преобразования.

Известно, что любой процесс передачи и преобразования энергии, в том числе и в электрических передачах мощности, сопровождается потерями, т.е. входная мощность всегда больше выходной на величину потерь и для оценки эффективности преобразования необходимо определять данные потери [65].

Как было отмечено в первой главе, универсальным показателем оценки энергетической эффективности выступает коэффициент полезного действия, в том числе, и для элементов электрической передачи мощности [66, 67, 68, 69]

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВЫХ} + \Delta P} = \frac{P_{ВХ} - \Delta P}{P_{ВХ}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{ВХ}}. \quad (42)$$

Коэффициент полезного действия электрической передачи мощности определяется в основном следующими факторами:

- коэффициентом полезного действия тягового генератора;
- коэффициентом полезного действия тяговых двигателей;
- коэффициентом полезного действия статических преобразователей (выпрямитель, инвертор);
- режимами управления тяговым генератором;

- режимами управления тяговыми двигателями;
- режимами электрической передачи мощности в целом.

Для основных силовых элементов электрической передачи мощности (тяговый генератор, тяговые двигатели, статические преобразователи) определяется значение номинального коэффициента полезного действия для номинального (длительного) режима работы тепловоза, что, как правило, соответствует движению с расчетной скоростью на последней позиции контроллера машиниста [70]

$$\eta_H = \frac{P_H}{P_H + \Delta P_H}, \quad (43)$$

где  $P_H$  – номинальная мощность оборудования;

$\Delta P_H$  – потери в оборудовании при номинальном режиме работы.

Оценку эффективности при частичных режимах принято производить по зависимости коэффициента полезного действия от использования мощности оборудования нагрузки  $\eta = f(P/P_H)$ , или от тока  $\eta = f(I)$ , а для асинхронного тягового привода обычно используют зависимость  $\eta = f(\omega)$  [60, 66, 67].

Для оценки эффективности передачи энергии в электрических передачах переменного тока, дополнительно применяется коэффициент мощности, оценивающий искажения, возникающие при передаче активной энергии [66, 67]

$$\chi = \frac{I}{I_{(1)}} \frac{P}{UI} = \nu \cos \varphi, \quad (44)$$

где  $P$  – активная мощность, переданная оборудованию;

$I$  – действующие значения тока;

$I_{(1)}$  – действующие значения тока первой гармоники;

$U$  – действующее значение напряжения;

$\nu$  – коэффициент искажений синусоидального тока;

$\varphi$  – угол сдвига между первыми гармониками тока и напряжения.

Коэффициент мощности приблизительно равен косинусу угла между током и напряжения, если данные искажения не существенны [66, 67]

$$\chi \approx \cos\varphi. \quad (45)$$

Реактивная мощность в электрических передачах переменного тока создает дополнительные омические потери на активных сопротивлениях тягового оборудования. Величина дополнительных потерь имеет квадратичную зависимость от коэффициента мощности [66, 67]

$$\frac{\Delta P_{\sim}}{\Delta P_{=}} = \frac{1}{\cos^2\phi}. \quad (46)$$

Для локомотива характерно частое изменение условий работы тягового оборудования, что определяет необходимость использования интегральных показателей оценки энергетической эффективности [66, 67]

$$A = \int_0^t P(t) dt \quad (47)$$

и

$$\Delta A = \int_0^t \Delta P(t) dt. \quad (48)$$

Тогда значение коэффициента полезного действия за рассматриваемый интервал времени составит

$$\eta_{cp} = \frac{A}{A + \Delta A}, \quad (49)$$

где  $A$  – энергия, переданная выход электрического оборудования;

$\Delta A$  – потери энергии, при преобразовании.

Электрическая передача мощности современного и перспективного автономного локомотива предназначена не только для реализации режима тяги, но и для реализации электродинамического торможения, с дальнейшим гашением энергии на реостатах или накопления энергии, с целью возможного использования. В этом случае к полезной энергии можно отнести энергию, вырабатываемую тяговыми двигателями, тогда процесс передачи энергии считается полезным в обоих направлениях, при этом можно оценить весь процесс движения локомотива с учетом выработанной и возвращенной энергии при торможении, в этом случае формула для определения полезной энергии примет вид [66, 67]:

$$W = \int_0^t |P(t)| dt. \quad (50)$$

Тогда обобщенный коэффициент полезного действия можно определить по формуле [66, 67]

$$H = \frac{A}{A + \sum_{j=k}^l \Delta A}, \quad (51)$$

где  $\sum_{j=k}^l \Delta A$  – сумма потерь энергии в элементах электрической передачи мощности, выбранных для оценки эффективности преобразования энергии.

Обобщенный коэффициент полезного действия позволяет комплексно оценить эффективность совершения механической работы на ободу колеса, с учетом использования энергии электродинамического торможения тяговыми двигателями.

Для сравнения эффективности преобразования энергии в тяговом оборудовании в режимах отличных от номинального предлагается использовать коэффициент эффективности использования (КЭИ) оборудования, который показывает отношения текущего коэффициента полезного действия к его номинальному значению

$$\text{КЭИ}_i = \frac{\eta_i}{\eta_n}, \quad (52)$$

где  $\eta_i$  – значение коэффициента полезного действия для выбранного режима работы оборудования;

$\eta_n$  – номинальное значение коэффициента полезного действия.

Применение КЭИ позволяет сравнивать получаемые результаты при изменении коэффициентов полезного действия оборудования локомотива, например дизеля и тягового электродвигателя, и позволяет оценить как эффективность использования оборудования, так и возникающий перерасход энергоресурсов (ПЭР), связанный с отклонением КПД от номинального значения из-за недоиспользования мощности тягового оборудования локомотива

$$\text{ПЭР} = \frac{1 - \text{КЭИ}}{\text{КЭИ}}. \quad (53)$$

При необходимости оценки эффективности применения нового локомотива, так же возможно использовать коэффициент КЭИ, где в знаменателе подставляется эксплуатационное значение КПД локомотива или отдельного оборудования локомотива, с которым происходит сравнение. В случае если КЭИ будет больше 1, то новый локомотив оказывается эффективнее, при этом коэффициент ПЭР становится отрицательным, что означает экономию топливо-энергетических ресурсов.

Для локомотива, имеющего несколько элементов, последовательно преобразующих энергию, формулы для определения показателей КЭИ и ПЭР примут вид

$$КЭИ_{л} = \prod_{j=1}^n (КЭИ_j) = КЭИ_{д^*} \cdot КЭИ_{тг} \cdot КЭИ_{в\у} \cdot КЭИ_{тэд} \cdot КЭИ_p, \quad (54)$$

$$\begin{aligned} ПЭР_{л} &= \left[ \prod_{j=1}^n (1+ПЭР_j) \right] - 1 = \\ &= (1+ПЭР_{д^*}) \cdot (1+ПЭР_{тг}) \cdot (1+ПЭР_{в\у}) \cdot (1+ПЭР_{тэд}) \cdot (1+ПЭР_p) - 1. \end{aligned} \quad (55)$$

Для тягового редуктора можно принять допущение, что КПД изменяется не значительно в процессе преобразования механической энергии при различной нагрузке, а значит для тягового редуктора  $КЭИ = 1$  и  $ПЭР = 0$ .

### **2.3 Метод оценки эффективности процессов преобразования энергии в тяговых преобразователях**

Тяговые преобразователи применяются на автономных локомотивах с электрическими передачами мощности переменного-постоянного и переменного-переменного тока и служат для преобразования (выпрямления/инвертирования) тока и напряжения. Выпрямительная установка (управляемая/неуправляемая) служит для преобразования переменного трехфазного тока, вырабатываемого трёхфазным синхронным тяговым генератором, в постоянный, для питания звена постоянного тока или тяговых электродвигателей постоянного тока. Инвертор напряжения служит для преобразования постоянного напряжения звена постоянного тока в переменное, для питания тяговых электродвигателей переменного тока.

Коэффициент полезного действия выпрямительной установки в основном зависит от потерь в вентилях от прямого тока нагрузки и от добавочных потерь, включающих потери от обратных токов вентилях, потерь в предохранителях и ошиновки, коммутационных потерь, потерь в сигнальной и защитной аппаратуре.



Основную долю всех потерь в выпрямителе составляют потери в вентильях от прямого тока нагрузки.

На тепловозах применяются выпрямительные установки с высоким коэффициентом полезного действия, который находится в диапазоне от 0,98 до 0,995. При этом следует отметить, что у управляемых выпрямительных установок, коэффициент полезного действия немного ниже, чем у неуправляемых, что обусловлено выбором другой элементной базы. Пример зависимости коэффициента полезного действия выпрямительной установки от тока приведен на рисунке 16.

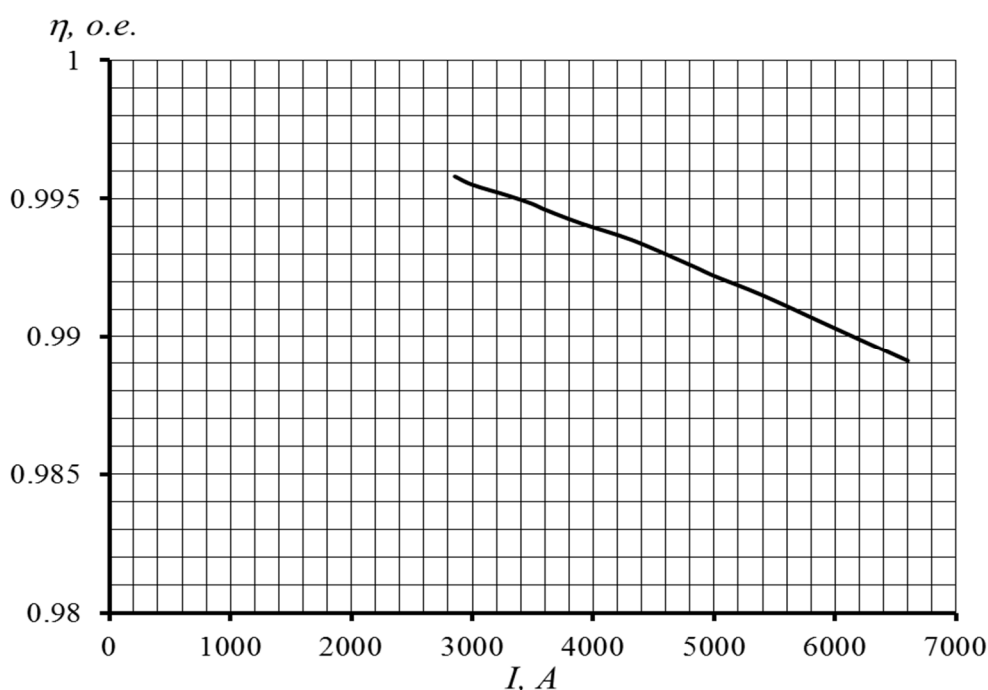


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента полезного действия выпрямительной установки от тока

Для одной и той же выпрямительной установки при одинаковых токах нагрузки коэффициент полезного действия выше, если мощность нагрузки больше (т.е. выше выпрямленное напряжение  $U_d$ ).

Поэтому для анализа энергоэффективности процессов в электрической передаче мощности предлагается применять упрощенную формулу [71] с использованием фиксированного значения коэффициента полезного действия выпрямительной установки равного номинальному значению

$$\eta_{BY} = \frac{P_{BY}}{P_{CTT}} = \frac{P_{BY}}{P_{BY} + \Delta P_{BY}}, \quad (56)$$

где  $P_{BY}$  – выходная мощность выпрямительной установки, определяется произведением действующего значения тока и напряжения;  
 $\Delta P_{BY}$  – потери мощности в выпрямительной установке;

$$\Delta P_{BY}(I) = \left( \frac{1}{\eta_{BY}^n} - 1 \right) \cdot I \cdot U_n = k_{BY} \cdot I, \quad (57)$$

где  $\eta_{BY}^n$  – номинальное значение коэффициента полезного действия;  
 $U_n$  – номинальное значение напряжения;  
 $k_{BY}$  – коэффициент потерь выпрямительной установки от тока

$$k_{BY} = \left( \frac{1}{\eta_{BY}^n} - 1 \right) \cdot U_n. \quad (58)$$

При необходимости более точного определения потерь в выпрямительной установке необходимо учитывать зависимость изменения коэффициента полезного действия от тока, тогда формула [71] для определения потерь мощности примет вид

$$\Delta P_{BY}(I) = \left( \frac{1}{\eta_{BY}^{P_H}(I)} - 1 \right) \cdot P_n, \quad (59)$$

где  $\eta_{BY}^{P_H}(I)$  – зависимость коэффициента полезного действия от тока нагрузки для номинальной мощности тягового генератора при гиперболической внешней характеристике.

В результате, окончательно получаем формулу для определения коэффициента полезного действия выпрямительной установки для любых эксплуатационных режимов [71]:

- упрощенная

$$\eta_{BY}(I, P_{BY}) = \frac{P_{BY}}{P_{BY} + k_{BY} \cdot I}, \quad (60)$$

- уточненная

$$\eta_{BY}(I, P_{BY}) = \frac{P_{BY}}{P_{BY} + \left( \frac{1}{\eta_{BY}^{P_H}(I)} - 1 \right) \cdot P_H}. \quad (61)$$

Пример зависимости коэффициента полезного действия от тока и мощности показан на рисунке 17.

В электрических передачах мощности переменного-переменного тока применяются статические преобразователи частоты, которые служат для двойного преобразования переменного трехфазного тока, вырабатываемого трёхфазным синхронным тяговым генератором, в переменный ток с регулируемой частотой и напряжением для питания бесколлекторных тяговых электродвигателей переменного тока.

Практически на всех локомотивах преобразователи частоты выполнены по мостовой схеме с промежуточным звеном постоянного тока, т.е. преобразователь частоты состоит из выпрямительной установки и трёхфазного автономного инвертора напряжения.

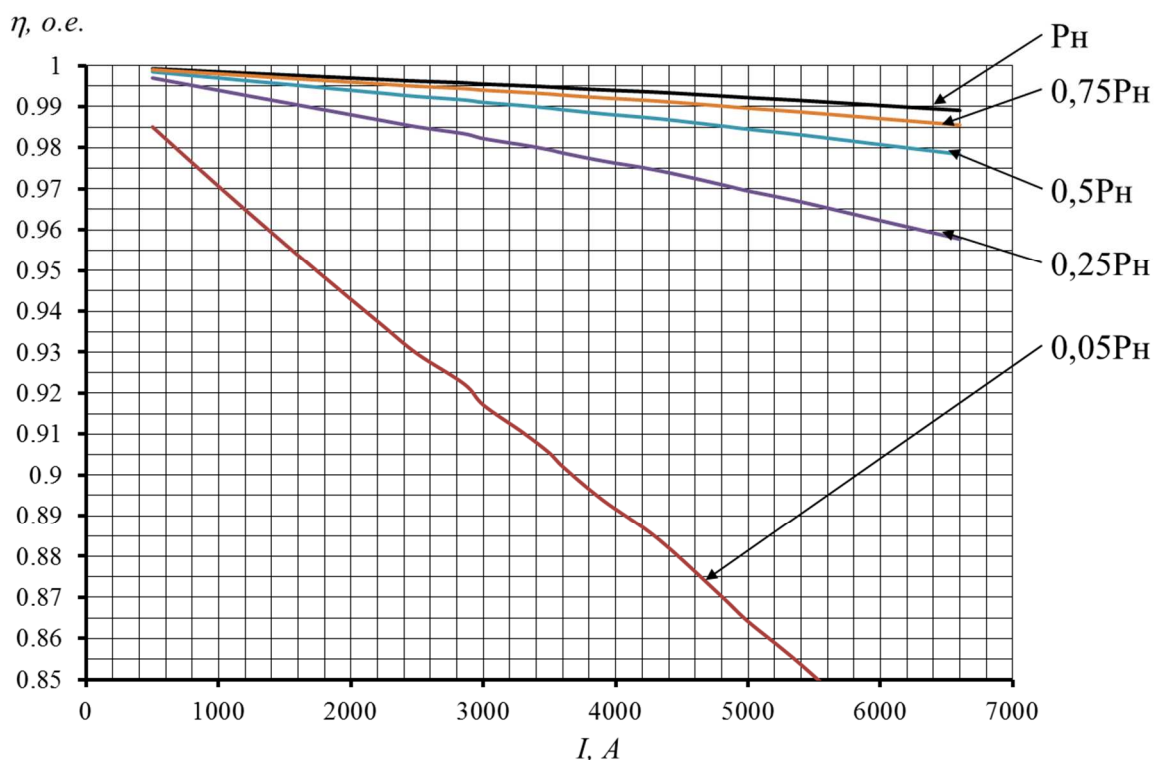


Рисунок 17 – Зависимость коэффициента полезного действия выпрямительной установки от тока и мощности

В результате возникает необходимость определения потерь для выпрямительной установки в составе преобразователя и инвертора напряжения. Сложность определения потерь в инверторе напряжения заключается в том, что они зависят от законов управления бесколлекторным тяговым двигателем. В общем случае потери в инверторе определяются частотой коммутации силовых полупроводниковых приборов и величиной фазного тока. Точное определение потерь в преобразователе является важным этапом проектирования, т.к. это определяет выбор элементной базы и параметров охлаждения силовых приборов (рассмотрено в разделе 4.3 настоящей диссертации).

Для оценки энергоэффективности эксплуатационных режимов достаточно задаться номинальным значением коэффициента полезного действия статического преобразователя частоты, который составляет 0,975...0,985.

## 2.4 Метод оценки эффективности процессов преобразования энергии в тяговых электрических машинах локомотивов

Основными потерями в электрических машинах являются [66, 67]:

- электрические потери в обмотках статора и ротора (якоря) – омические потери;
- потери в магнитопроводе (потери в стали на гистерезис, вихревые токи и т.д.);
- потери вентиляционные (потери на привод системы вентиляции);
- добавочные потери;
- потери в трущихся частях (потери механические).

Коэффициент полезного действия электрических машин зависит от:

- мощности;
- напряжения питания;
- силы тока в обмотке якоря (ротора);
- силы тока в обмотке возбуждения (статора);
- частоты вращения якоря (ротора);
- степени ослабления магнитного потока возбуждения;
- способа (алгоритма) управления.

Суммарные потери мощности в электрической машине складываются из потерь в меди в обмотках возбуждения и якоря  $\Delta P_{эл}$  (электрические или омические потери), потерь в переходном сопротивлении контакта щёток и коллектора  $\Delta P_{щ}$  (для машин постоянного тока), потерь в стали магнитопровода остова и якоря  $\Delta P_{ст}$ , добавочных  $\Delta P_{д}$  и механических потерь  $\Delta P_{мех}$

$$\sum \Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{щ} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{д} + \Delta P_{мех}. \quad (62)$$

Зависимости вращающего момента, частоты вращения якоря, коэффициента полезного действия от тока якоря, полученные при напряжении, формируемом

тяговым генератором в зависимости от тока двигателя и для различных степеней ослабления магнитного потока возбуждения  $\alpha$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , называются электромеханическими характеристиками двигателя и предоставляются заводом изготовителем для каждой серии тягового электродвигателя [72]. Электромеханические характеристики тягового двигателя [73] приведены на рисунке 18.

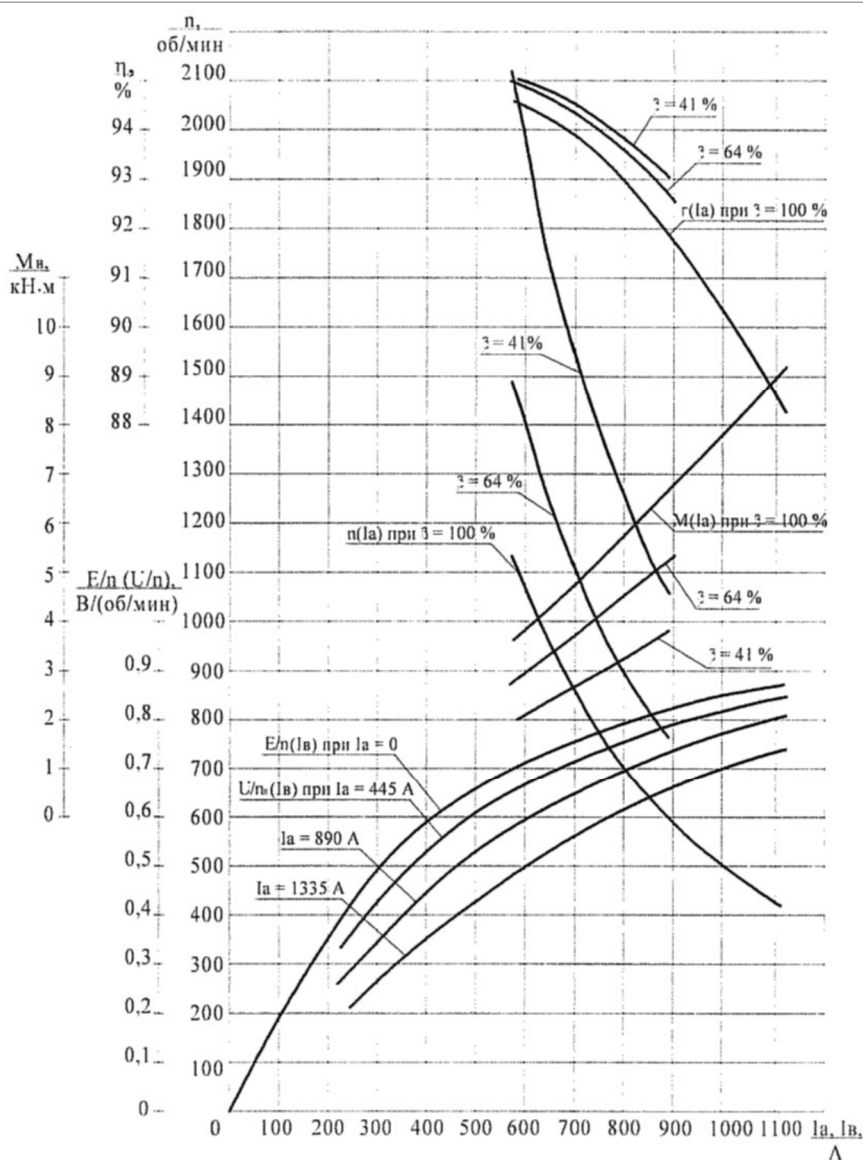


Рисунок 18 – Электромеханические характеристики тягового двигателя

Определение коэффициента полезного действия тяговых двигателей в процессе эксплуатации затруднительно, т.к. фактически можно узнать мощность, подводимую к ТЭД, а мощность, реализуемая на валу ТЭД, как правило, определяется расчетным путем, при этом используется зависимость КПД в функции тока

якоря  $\eta_{15\text{ПКМ}} = f(I_a)$ , приведенная в электромеханических характеристиках [56, 60, 74].

С учетом того, что электромеханические характеристики ТЭД получены при напряжении, соответствующего внешней характеристике тягового генератора для 15 ПКМ, а управление тяговыми двигателями постоянного тока (и для асинхронных в зоне низких скоростей движения) осуществляется за счет изменения подаваемого напряжения, то необходимо осуществлять перерасчет коэффициента полезного действия, для условий эксплуатации, либо вычислять мощность на валу через разность подводимой мощности и потерь, возникающих в процессе преобразования энергии [75]. Рассмотрим метод определения коэффициента полезного действия на примере двигателей постоянного тока [76]

$$\eta_{\text{ТЭД}} = \frac{P_{\text{ТЭД}}}{P_{\text{DC}}} = \frac{P_{\text{DC}} - \Delta P}{P_{\text{DC}}}, \quad (63)$$

где  $P_{\text{ТЭД}}$  – мощность на валу тягового двигателя;

$P_{\text{DC}}$  – мощность на зажимах канала выпрямительной установки;

$\Delta P$  – потери мощности в тяговом двигателе.

Тогда, при использовании электромеханических характеристик, формула для определения коэффициента полезного действия тягового двигателя в функции тока и мощности примет вид [76]

$$\eta_{\text{ТЭД}}(I, P_{\text{BX}}) = \left( 1 - \frac{(1 - \eta_n(I)) P_{\text{BX}}}{P_{\text{BX}}} \right). \quad (64)$$

При малых частотах вращения якоря ТЭД, основные потери приходятся на омические потери в обмотках ТЭД, которые определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{эл}} = I^2 r = I_a^2 r_a + (\alpha I_a)^2 \left( \frac{r_{\text{в}} r_{\text{ш}}}{r_{\text{в}} + r_{\text{ш}}} \right), \quad (65)$$

где  $I_a$  – ток якоря ТЭД;

$r_a$  – сопротивление якорной обмотки;

$\alpha$  – коэффициент ослабления поля;

$r_b$  – сопротивление обмотки возбуждения;

$r_{ш}$  – сопротивление шунтов ослабления поля.

Величину сопротивления шунта ослабления магнитного поля, можно определить через коэффициент ослабления поля по формуле [77]

$$r_{ш} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} r_b. \quad (66)$$

Сопротивления определяются по паспортным характеристикам ТЭД с учетом увеличения сопротивления при нагреве ТЭД [70]

$$r = r_H [1 + \delta \cdot (T_p - T_H)], \quad (67)$$

где  $r_H$  – сопротивление обмотки ТЭД, при нормальных условиях окружающей среды и температуре  $T_H$ , как правило, в характеристиках ТЭД указывается при температуре 20 °С;

$\delta$  – коэффициент изменения электрического сопротивления при изменении температуры, Ом/°С;

$T_p$  – рабочая температура обмоток ТЭД.

При отсутствии данных о рабочей температуре ТЭД, следует принимать расчетную рабочую температуру в соответствии с ГОСТ 25941-83 [78] в зависимости от класса применяемой изоляции.

Потери в переходном сопротивлении контакта щёток и коллектора определяются на основании данных о падении напряжения для устанавливаемых щеток и тока якоря

$$\Delta P_{щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_a, \quad (68)$$



где  $\Delta U_{\text{щ}}$  – падение напряжения в переходном сопротивлении контакта щеток и коллектора (принимается равным 1 В при применении графитовых щеток и 0,3 В при применении металлографитовых).

Добавочные и дополнительные потери определяются опытным путем, либо принимаются равными 1...1,5 % от входной мощности, при этом в частичных режимах нагрузки пересчитывают пропорционально квадрату тока [72].

Потери в стали магнитопровода остова и якоря  $\Delta P_{\text{ст}}$ , потери на гистерезис и вихревые токи и зависят от частоты вращения якоря и магнитной индукции в ярме и зубцах магнитопровода якоря [79]

$$\Delta P_{\text{ст}} \sim f^{1,5} B^2, \quad (69)$$

где  $f$  – частота перемагничивания сердечника ротора;

$B$  – магнитная индукция в магнитопроводе.

С учетом того, что магнитная индукция пропорциональна току возбуждения, то потери в магнитопроводе пропорциональны квадрату тока якоря, умноженному на коэффициент ослабления поля

$$\Delta P_{\text{ст}} \sim f^{1,5} (\alpha I_a)^2. \quad (70)$$

Механические потери  $\Delta P_{\text{мех}}$  состоят из потерь в подшипниках, потерь трения щеток о коллектор и вентиляционных потерь (при принудительной вентиляции величина данных потерь в самой машине будет на порядок меньше). С учетом того, что тяговые двигатели тепловозов имеют принудительную вентиляцию, то механические потери можно принять пропорционально частоте вращения якоря. При самовентиляции принимаются пропорционально квадрату частоты вращения.

$$\Delta P_{\text{мех}} \sim n, \quad (71)$$

где  $n$  – частота вращения ротора.

Если принять допущение, что потери на перемагничивание якоря можно принять пропорционально изменению частоты вращения якоря, то в результате получим, что общие потери в тяговом двигателе являются функцией тока якоря и частоты вращения (или скорости тепловоза)

$$\Delta P(I_a, n) = k_1 I_a^2 + k_2 n, \quad (72)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности квадрату тока якоря;

$k_2$  – коэффициент пропорциональности частоте вращения якоря.

Тогда выражение для определения коэффициента полезного действия примет вид

$$\eta_{\text{ТЭД}} = \frac{P_{DC} - \Delta P}{P_{DC}} = 1 - \frac{k_1 I_a^2 + k_2 n}{U_d I_a}. \quad (73)$$

Коэффициент  $k_1$  и  $k_2$  можно определить из электромеханических характеристик двигателя, исходя из максимального значения коэффициента полезного действия.

Условие, обеспечивающее максимально значение, можно записать в виде обращения в ноль частной производной коэффициента полезного действия по току якоря

$$\frac{\partial \eta_{\text{ТЭД}}}{\partial I_a} = \frac{k_1 I_a^2 - k_2 n}{(I_a)^2} = 0. \quad (74)$$

Известно, что дробь равна нулю тогда и только тогда, когда числитель равен нулю, а знаменатель отличен от нуля. В результате получим, равенство пере-

менных потерь зависящих от квадрата тока и условно постоянных потерь при фиксированной частоте вращения

$$k_1 I_a^2 = k_2 n. \quad (75)$$

Определение коэффициента  $k_1$  осуществляется из рассуждений, что при максимальном значении КПД, потери в равной степени будут разделены на две составляющие, в результате получим формулу для коэффициента  $k_1$  пропорциональности квадрату тока якоря [76]

$$k_1 = \frac{(1 - \eta_{max}) \cdot P_{DC}}{2 \cdot I^2}, \quad (76)$$

где  $\eta_{max}$  – максимальное значение коэффициента полезного действия;

$P_{DC}$  – входящая (электрическая) мощность ТЭД при максимальном значении коэффициента полезного действия;

$I$  – ток якоря ТЭД при максимальном значении коэффициента полезного действия.

или, если известна выходная мощность

$$k_1 = \left( \frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \frac{P_{ТЭД}}{2 \cdot I^2}, \quad (77)$$

где  $P_{ТЭД}$  – исходящая (механическая) мощность ТЭД при максимальном значении коэффициента полезного действия.

Аналогичным образом определяется и коэффициент  $k_2$  [76]

$$k_2 = \frac{(1 - \eta_{max}) \cdot P_{DC}}{2 \cdot n}, \quad (78)$$

или

$$k_2 = \left( \frac{1}{\eta_{max}} - 1 \right) \frac{P_{ТЭД}}{2 \cdot n}, \quad (79)$$

где  $n$  – частота вращения якоря ТЭД при максимальном значении коэффициента полезного действия, об/с.

Для повышения точности расчета коэффициента  $k_1$  и  $k_2$  следует определять для режима полного поля и каждой ступени ослабления поля.

Известно, что скорость движения локомотива можно определить через частоту вращения якоря ТЭД

$$V = \frac{3,6 \cdot \pi \cdot n \cdot D_K}{\mu}, \quad (80)$$

тогда

$$k_2^* = k_2 \frac{3,6 \cdot \pi \cdot D_K}{\mu}. \quad (81)$$

В результате получаем формулу для определения коэффициента полезного действия, как функцию трех переменных в зависимости от тока якоря, входной мощности и скорости движения локомотива [76]

$$\eta_{ТЭД}(I_a, P_{DC}, V, \alpha) = 1 - \frac{k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V}{P_{DC}}. \quad (82)$$

Практически на всех тепловозах с электрической передачей мощности управление происходит за счет изменения напряжения, что влияет на эффективность процесса электромагнитного преобразования энергии в магнитной системе

электрической машины. В этом случае необходимо использовать дополнительный коэффициент, учитывающий эффективность процесса преобразования энергии в зависимости от напряжения [76]

$$\eta_{\text{ГЭД}}(I_a, U_{DC}, V, \alpha) = 1 - \frac{k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V \cdot k_3(\alpha, U_{DC})}{I_a \cdot U_{DC}}, \quad (83)$$

где  $k_3(\alpha, U_{DC})$  – коэффициент, учитывающий эффективность преобразования энергии в магнитной системе.

Коэффициент эффективности преобразования энергии определяется по формуле

$$k_3(\alpha, U_{DC}, V) = 1 + \frac{\left| \left( U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2 - (U_{DC})^2 \right|}{\left( U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2}, \quad (84)$$

где  $U_{DC}^*(\alpha)$  – напряжение звена постоянного тока при максимальном значении коэффициента полезного действия, для соответствующей ступени ослабления поля;

$V^*$  – скорость локомотива, соответствующая максимальному значению коэффициента полезного действия.

Более подробно процесс преобразования энергии в электрических машинах будет рассмотрен в третьей и четвертой главах настоящей диссертации.

Окончательно получаем аналитическую функцию четырех переменных, позволяющую определить коэффициент полезного действия во всем диапазоне эксплуатационных режимов [76]

$$\eta_{\text{ТЭД}}(I_a, U_{DC}, V, \alpha) =$$

$$= 1 - \frac{1}{I_a \cdot U_{DC}} \left[ k_1(\alpha) \cdot I_a^2 + k_2^*(\alpha) \cdot V \cdot \left( 1 + \frac{\left| \left( U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2 - (U_{DC})^2 \right|}{\left( U_{DC}^*(\alpha) \frac{V}{V^*} \right)^2} \right) \right]. \quad (85)$$

Коэффициент полезного действия ТЭД (аналогично и для тягового генератора) в зависимости от позиции контроллера машиниста определим по формуле

$$\eta_{\text{ТЭД}j} = \frac{\sum \eta_i(I_a, U_{DC}, V, \alpha) \cdot P_{DCi} \cdot \Delta t_i}{\sum P_{DCi} \cdot \Delta t_i}, \quad \{i \in N \mid \text{ПКМ}_i = j\}. \quad (86)$$

Коэффициент полезного действия ТЭД за рассматриваемый период

$$\eta_{\text{ТЭД}} = \frac{\sum \eta_i(I_a, U_{DC}, V, \alpha) \cdot P_{DCi} \cdot \Delta t_i}{\sum P_{DCi} \cdot \Delta t_i}. \quad (87)$$

## 2.5 Метод оценки энергетической эффективности процессов преобразования энергии в тяговом оборудовании локомотивов в условиях эксплуатации

В эксплуатации время работы на частичных режимах может превышать время работы на максимальных позициях контроллера машиниста, поэтому актуальным является проведение анализа энергетической эффективности тепловозов различного рода службы в условиях их реальной работы, что позволит оценить режимы работы тягового оборудования и наметить пути повышения энергетической эффективности [80].

Энергия, переданная в звено постоянного тока, определяется для режима тяги по формуле

$$A_{DC} = \int_0^t \sum_{j=1}^n (U_{DCj} \cdot I_{DCj}) \cdot dt, \quad (88)$$

где  $U_{DCj}$  – напряжение звена постоянного тока  $j$ -го канала управляемого выпрямителя, В;

$I_{DCj}$  – ток звена постоянного тока  $j$ -го канала управляемого выпрямителя, А;

$t$  – время движения в режиме тяги, с;

$n$  – количество независимых каналов выпрямительной установки.

Средняя мощность за поездку определяется по формуле

$$P_{DC}^{cp} = \frac{A_{DC} \cdot 10^{-3}}{t}, \quad (89)$$

где  $A_{DC}$  – энергия, переданная в звено постоянного тока, Дж.

Использование мощности дизель-генераторной установки тепловоза определяется по формуле [81]:

$$\varepsilon = \frac{P_{DC}^{cp}}{P_e}, \quad (90)$$

где  $P_e$  – полная мощность дизеля.

Время работы на  $j$  позиции контроллера машиниста определяется по формуле [82]

$$t_j = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta t_k}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \cdot 100\%, \quad \{k \in N \mid ПКМ_i = j\}, \quad (91)$$

где  $\Delta t_k$  – интервал работы на  $j$  позиции контроллера машиниста;

$\Delta t_i$  – временной интервал между измерениями.

Для магистральных локомотивов целесообразно определять относительное время работы по позициям для режима движения локомотива [82], т.е.

$$t_j = \frac{\sum_{k=1}^m \Delta t_k}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \cdot 100\%, \quad \{k \in N \mid \text{ПКМ}_i = j; i \in N \mid V_i > 0\}, \quad (92)$$

где  $V_i$  – скорость локомотива во время  $i$ -го измерения.

Для более детальной оценки режимов работы предлагается исследовать непрерывное время работы ДГУ по позициям контроллера машиниста при условии, что возможно продолжен дальнейший набор позиций контроллера машиниста, тем самым можно определить максимальное непрерывное время работы тепловоза в режиме тяги.

$$t_j = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \{i \in N \mid V_i > 0 \wedge \text{ПКМ}_i \geq j\}. \quad (93)$$

Внешняя характеристика тягового генератора представляет собой зависимость напряжения от тока в звене постоянного тока, при этом каждой позиции машиниста, для большинства тепловозов, соответствует гиперболическая зависимость изменения напряжения от тока, что позволяет добиться постоянства выходной мощности выпрямительной установки, поэтому актуальным является построения точек работы тягового генератора на плоскости  $U = f(I)$  с целью анализа областей работы тягового оборудования в условиях реальной эксплуатации. Следует отдавать предпочтение областям с высокими значениями напряжения и минимальным значениям силы тока.

Расчет энергии, переданной в звено постоянного тока, для многоканального выпрямителя, определяется по формуле [82]

$$E_{DCj} = \int_0^T \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt, \quad (94)$$



где  $I_{DC_{nij}}$  – значение силы тока  $n$ -го канала выпрямительной установки на  $i$ -ом шаге измерения, А;

$U_{DC_{nij}}$  – значение напряжения на зажимах  $n$ -го канала выпрямительной установки на  $i$ -ом шаге измерения, В;

$n$  – номер канала выпрямительной установки;

$i$  – номер текущего измерения;

$j$  – номер позиции контроллера машиниста.

Количество непрерывно выработанной энергии (переданной в звено постоянного тока) определяет возможность применения различных накопителей энергии. Определим максимальное количество непрерывно выработанной энергии для каждой из позиции контроллера машиниста. С учетом того, что мощность для каждой позиции поддерживается в заданном диапазоне, для расчета энергии используем максимальные непрерывные временные интервалы работы на позиции [82]

$$E_{DC_j}^{\max} = \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt, \quad (95)$$

$$\text{при } \max(t_b - t_a), \{i \in N \mid a < i \leq b \wedge \text{ПКМ}_i = j\}$$

Максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, что происходит дальнейший набор позиций, определяется по формуле [82]

$$E_{DC_j}^{\max} = \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt, \quad (96)$$

$$\text{при } \max\left(\int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DC_{nij}} \cdot U_{DC_{nij}}) \cdot dt\right), \{i \in N \mid a < i \leq b \wedge \text{ПКМ}_i \geq j\}.$$

Аналогичным образом определяется максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, учета энергии на позициях предшествующих рассматриваемой, тогда энергия определяется по формуле

$$E_{DCj}^{\max} = \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DCnij} \cdot U_{DCnij}) \cdot dt, \quad (97)$$

$$\text{при } \max \left( \int_a^b \sum_{n=1}^m (I_{DCnij} \cdot U_{DCnij}) \cdot dt \right), \{i \in N \mid a < i \leq b \wedge \text{ПКМ}_i \leq j\}.$$

## 2.6 Анализ энергетической эффективности эксплуатации грузового тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup>

Тепловоз 2ТЭ25К<sup>М</sup> – грузовой тепловоз с осевой формулой 2×(3о–3о), мощность по дизелю составляет 2×2650 кВт (2×3604 л.с.) [83]. На тепловозе применена передача мощности переменного-постоянного тока (синхронный тяговый генератор – тяговые двигатели постоянного тока), с шестиканальной управляемой выпрямительной установкой, позволяющей оперативно регулировать силу тяги на каждой колесной паре. Тепловоз оборудован микропроцессорной системой управления тепловозом (МПСУ-ТП), которая обеспечивает регистрацию параметров работы основного оборудования тепловоза. К основному тяговому оборудованию относятся [83]:

- дизель 16ЧН26/26 (Д49);
- тяговый генератор ГС-501 АУ2 или ГСТ-2800-1000У2 или ГТСН-2800;
- преобразователь М-ТПП-3600М-1-У2;
- тяговые двигатели ДТК-417.

Дизель и тяговый генератор объединены в дизель-генераторную установку 18-9ДГ-04 на общей поддизельной раме.

Дизель 16ЧН26/26 – четырехтактный, с V-образным расположением шестнадцати цилиндров. На двигателе применяется газотурбинный наддув с охлаждением наддувочного воздуха перед подачей в цилиндры двигателя. Основные технические характеристики [83] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики дизеля 16ЧН26/26

Наименование параметра	Значение
Полная мощность дизеля, кВт	2650
Минимально-устойчивая частота вращения, об/мин	350
Мощность дизеля на минимальной частоте вращения, кВт	30 ... 200
Номинальная частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин	1000
Удельный расход топлива на полной мощности, г/кВт·ч	198
Удельный расход топлива при 60 % полной мощности, г/кВт·ч	202
Расход топлива при минимально устойчивой частоте вращения холостого хода, кг/мин	0,225
Коэффициент полезного действия при полной мощности, о.е.	0,426

Тяговый генератор имеет независимое возбуждение от возбудителя типа ВС-650В У2 или ВСТ-26-3300У2 или ВСН-26 мощностью 26 кВт и коэффициентом полезного действия 0,76. Основные технические параметры тягового генератора [83] представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технические параметры тягового генератора

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВт	2800
Линейное напряжение, В	580/335
Ток фазный, А	2×1500/2×2400
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	4,18
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,959/0,95

На тепловозе применяются коллекторные тяговые двигатели ЭДУ-133 или ДТК-417 [83], основные характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные технические характеристики ДТК-417

Наименование параметра	Значение
------------------------	----------

Мощность на валу, кВт	366
Напряжение, В	449/750
Ток якоря, А	890/533
Частота вращения якоря максимальная, с <sup>-1</sup> об/мин	38,7 (2320)
Момент на валу, кН·м	6592
Максимальный ток при трогании, А	1130
Мощность в тормозном режиме, кВт	450
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	1,3
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,914

Тяговый преобразователь М-ТПП-3600М-1-У2 [83] собран на тиристорах и состоит из шести автономно управляемых трехфазных выпрямителей. Одна трехфазная обмотка тягового генератора подключена к трем каналам тягового преобразователя, каждый из которых предназначен для питания одного тягового двигателя. Тяговый преобразователь имеет воздушное охлаждение, основные характеристики приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные технические характеристики тягового преобразователя

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, кВт	3600
Номинальное линейное входное напряжение, В	560
Диапазон линейного входного напряжения, В	0 ... 600
Число фаз на входе	2×3
Количество независимых каналов	6
Номинальный выпрямленный ток канала, А	1100
Выходное выпрямленное напряжение, В	0 ... 800
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	1,4
Коэффициент полезного действия при токе длительного режима, о.е.	0,98

Функциональная схема передачи мощности представлена на рисунке 19.

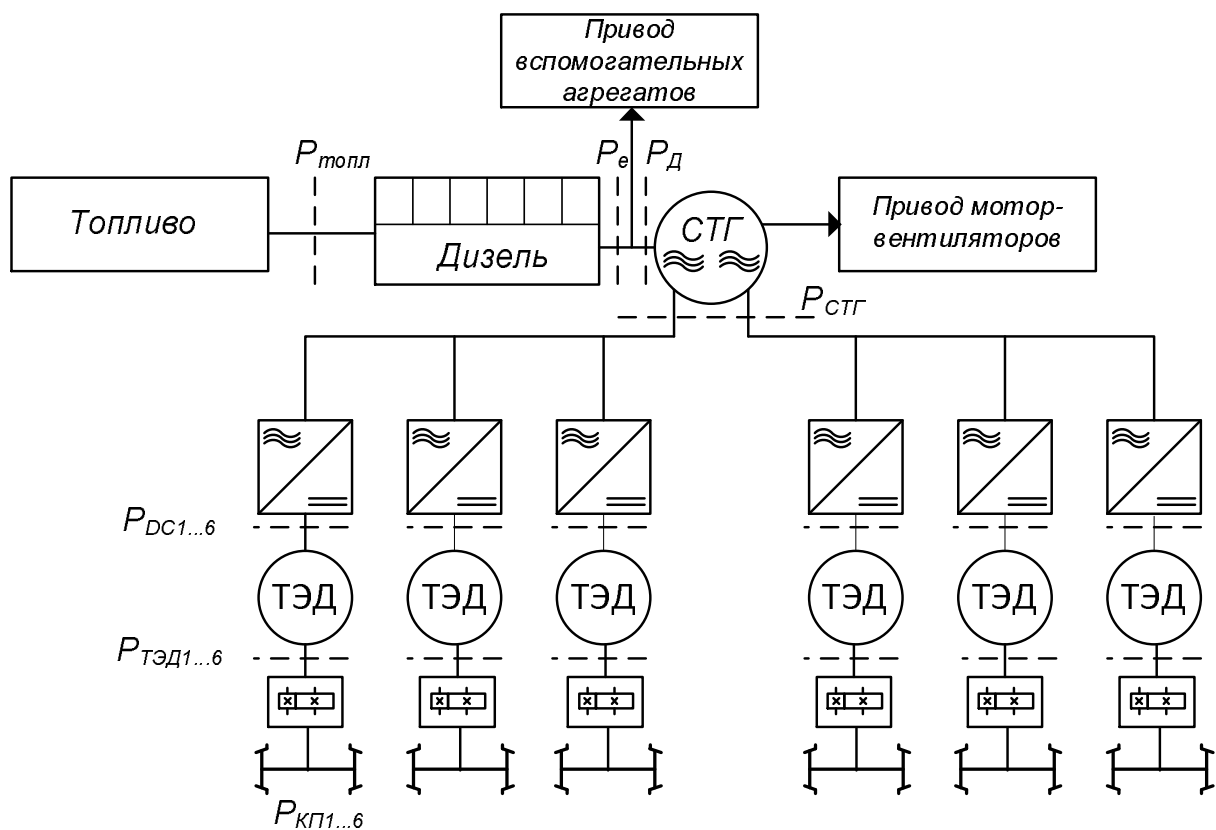


Рисунок 19 – Функциональная схема передачи мощности одной секции тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup>

Для управления системами тепловоза применяется многофункциональная микропроцессорная система управления (МПСУ-ТП), которая по результатам обработки сигналов от датчиков, формирует задание управляющих воздействий на контакторы, реле, электронному регулятору частоты оборотов и тяговому преобразователю [81]. Дополнительными функциями МПСУ-ТП являются анализ и регистрация информации, поступающей с датчиков, с целью дальнейшей диагностики оборудования тепловоза [84]. Записанная информация МПСУ-ТП расшифровывается при помощи программного обеспечения «ProViever», что позволяет проводить более детальный анализ эксплуатации тепловоза.

Проанализируем эксплуатационные показатели энергоэффективности грузовых тепловозов 2ТЭ25К<sup>М</sup>. Анализ проводился для случайно отобранного тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> на основании маршрутов машиниста, данных записанных системой МПСУ-ТП и данных регистрируемых системой АСК за один месяц эксплуатации

тепловоза на участке Северокавказской железной дороги «раз. 9км – Железный Рог». План участка показан на рисунке 20.

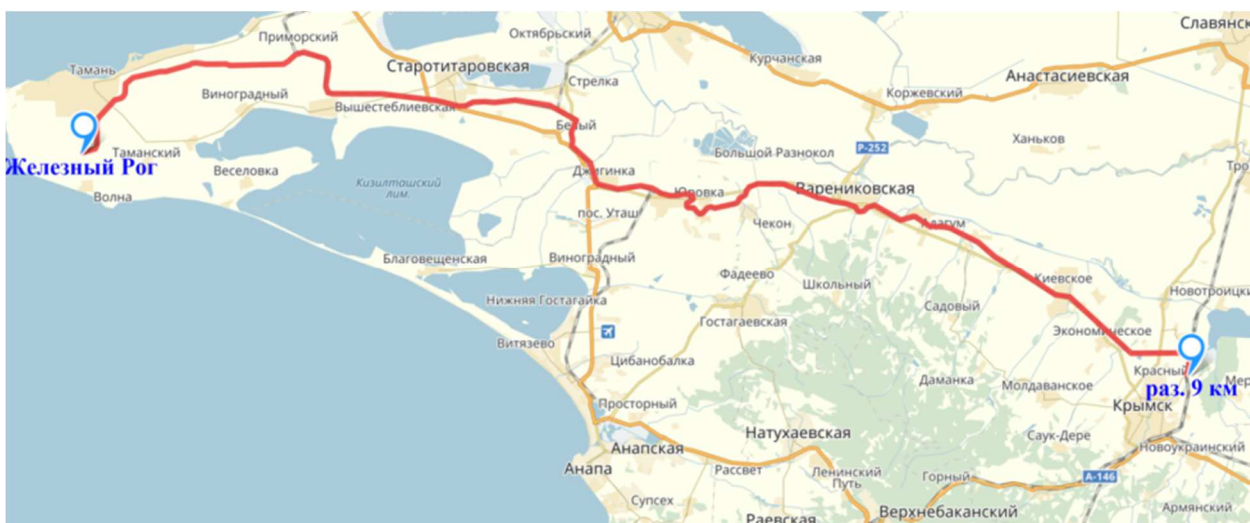


Рисунок 20 – Участок Северо-Кавказской железной дороги  
«раз. 9км – Железный Рог»

Профиль пути данного участка приведен на рисунке 21.

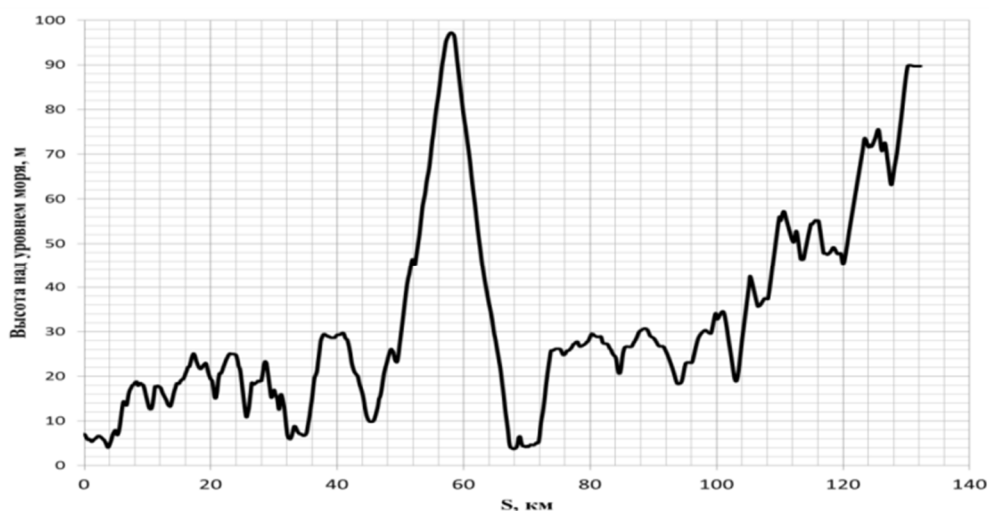


Рисунок 21 – Профиль участка «раз. 9км – Железный Рог»

Общий объем анализируемых данных составил более 400 МБ: регистрация данных несколько сотен параметров в определенный промежуток времени, дискретизация регистрации составляет 1 сек.

Небольшой фрагмент полученных данных с тепловоза представлен на рисунке 22.

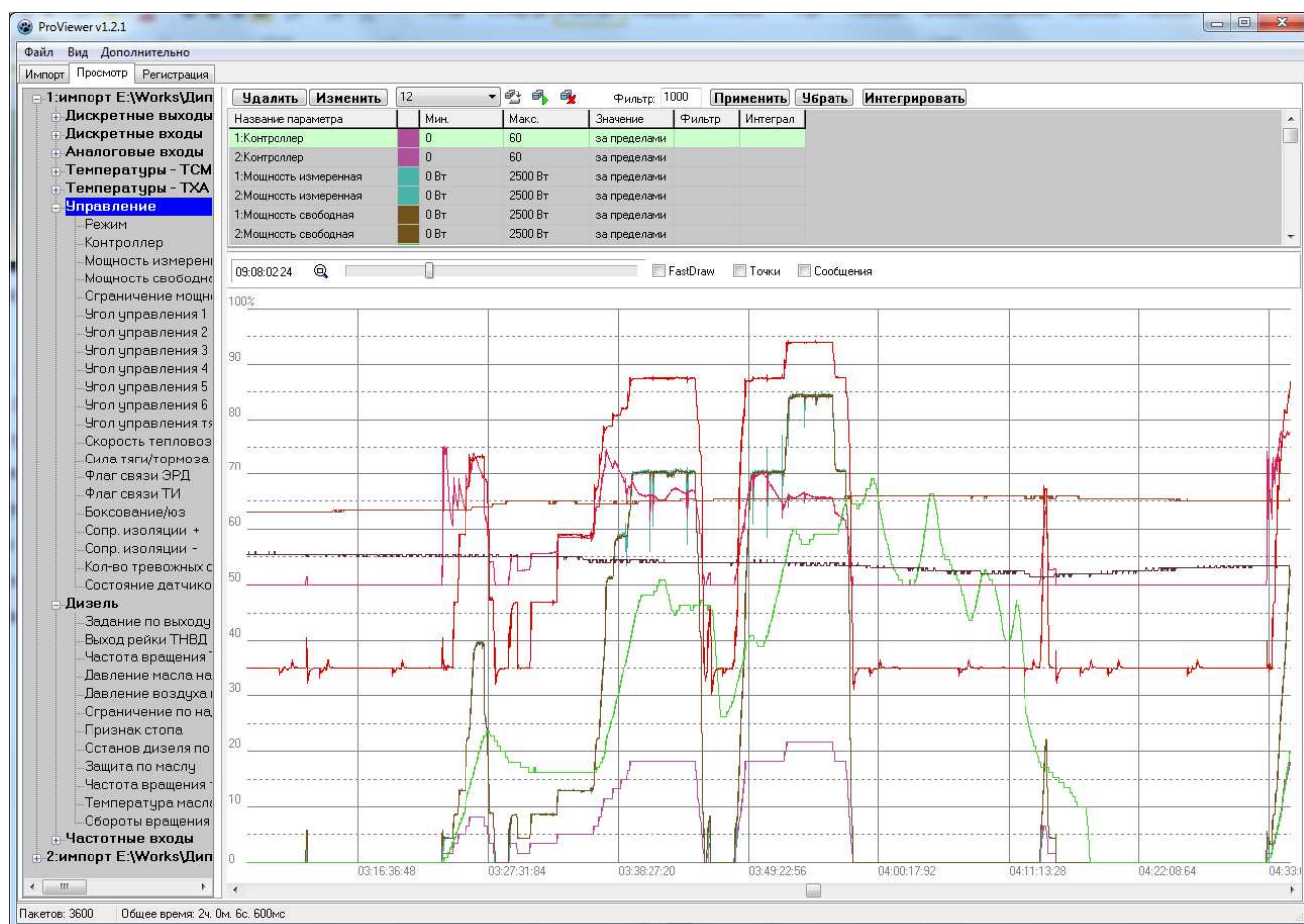


Рисунок 22 – Визуализация параметров в АРМ «ProViewer»

Анализ данных проводился при помощи программы MATLAB/Simulink [85]. Основные данные по выбранным поездкам приведены в таблице 5 и таблице 6.

Таблица 5 – Основные данные по направлению «раз. 9км – Железный Рог»

Номер поездки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Масса поезда, т	5972	4781	5584	3823	3903	5992	5440	5180	5756	5336
Количество осей, шт	260	232	252	176	188	292	256	248	252	252
Время движения, ч:мин	3:39	3:27	3:45	3:31	3:40	3:40	3:34	3:40	3:38	3:40
Время простоя, ч:мин	0:49	0:25	1:54	0:51	0:24	0:43	1:42	1:36	0:30	0:25
Тех. скорость, км/ч	36,71	38,84	35,73	38,10	36,55	36,55	37,57	36,55	36,88	36,55
Расход топлива, кг	1520	1176	1560	1020	1200	1350	1420	1100	1280	1084
Удельный расход топлива, кг/10 <sup>4</sup> ткмбр	18,99	18,36	20,85	19,91	22,94	16,81	19,48	15,85	16,60	15,16

Таблица 6 – Основные данные по направлению «Железный Рог – раз. 9км»

Номер поездки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Масса поезда, т	1748	1659	2136	935	1890	2235	2248	2123	2327	2074
Количество осей, шт	288	200	292	156	280	320	324	320	328	316
Время движения, ч:мин	3:19	3:30	3:40	4:28	3:20	3:43	3:17	3:32	3:38	3:20
Время простоя, ч:мин	2:15	0:22	0:43	2:21	0:50	1:39	0:51	2:57	1:15	1:49
Тех. скорость, км/ч	40,52	38,40	36,70	30,03	40,20	36,12	40,85	37,92	37,02	40,36
Расход топлива, кг	850	760	760	600	600	970	900	790	1070	970
Удельный расход топлива, кг/10 <sup>4</sup> ткмбр	36,29	34,19	26,55	47,89	23,69	32,39	29,88	27,77	34,31	34,90



Выбранный тепловоз 2ТЭ25К<sup>М</sup> эксплуатировался на тяговом плече «раз. 9км – Железный Рог», для дальнейшего анализа отобраны по 10 поездов в каждом направлении. Перевозочный процесс на данном участке характеризуется, как и на большинстве участков железных дорог, однонаправленностью грузового потока. В четном направлении тягового плеча преимущественно, груженые, тяжеловесные поезда с нагрузкой на ось 20 ... 23 тс, а в нечетном направлении – порожние поезда с нагрузкой на ось 6 ... 7,5 тс. В основе метода анализа лежит обработка регистрируемых данных с определением основных показателей, позволяющих оценить энергоэффективность использования тепловоза.

### **2.6.1 Четное направление «раз. 9км – Железный Рог»**

Как уже было отмечено ранее в четном направлении преобладают поезда с нагрузкой на ось 20 ... 23 тс. Для более детального анализа отобраны две поездки с номерами 5 и 10, имеющие наибольший и наименьший удельный расход топлива, соответственно, для выбранного направления.

На рисунке 23 приведены зависимости изменения скорости и позиции контроллера машиниста (ПКМ) для поездки №5 тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> с поездом массой 3903 т, в зависимости от пройденного пути.

На рисунке 24 приведены зависимости изменения скорости и позиции контроллера машиниста для поездки №10 тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> с поездом массой 5336 т, в зависимости от пройденного пути.

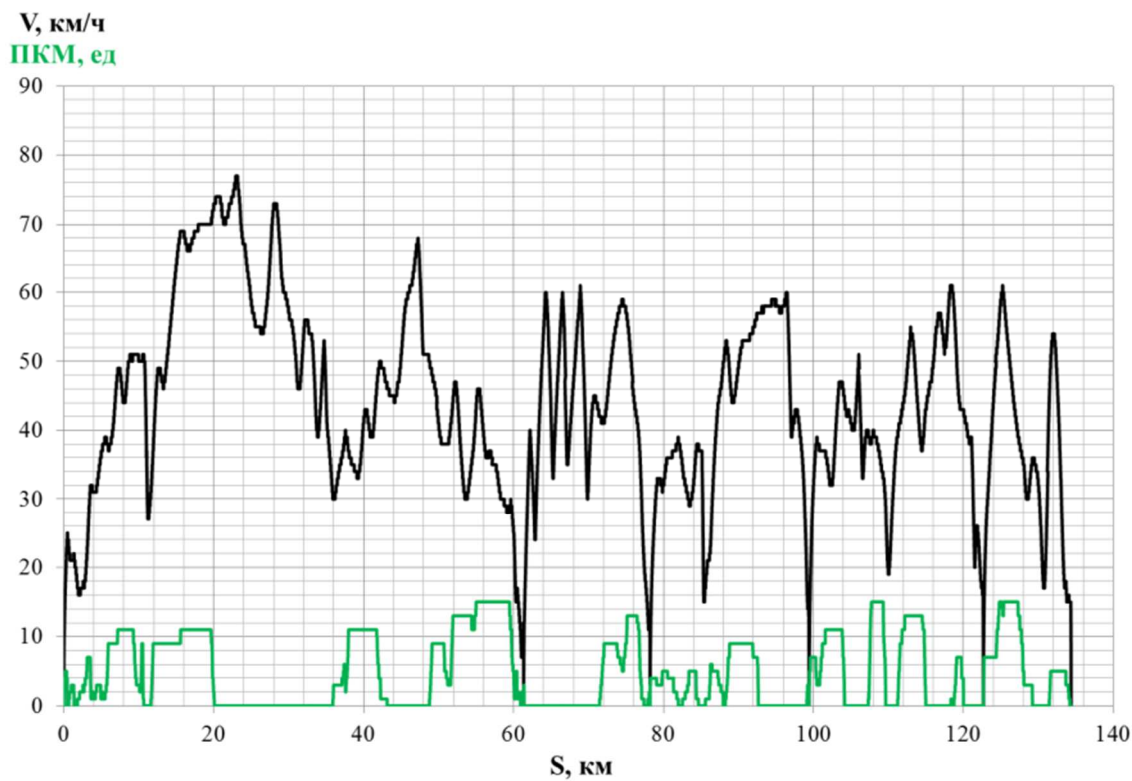


Рисунок 23 – График скорости и позиций КМ поездки №5 (масса 3903 т)

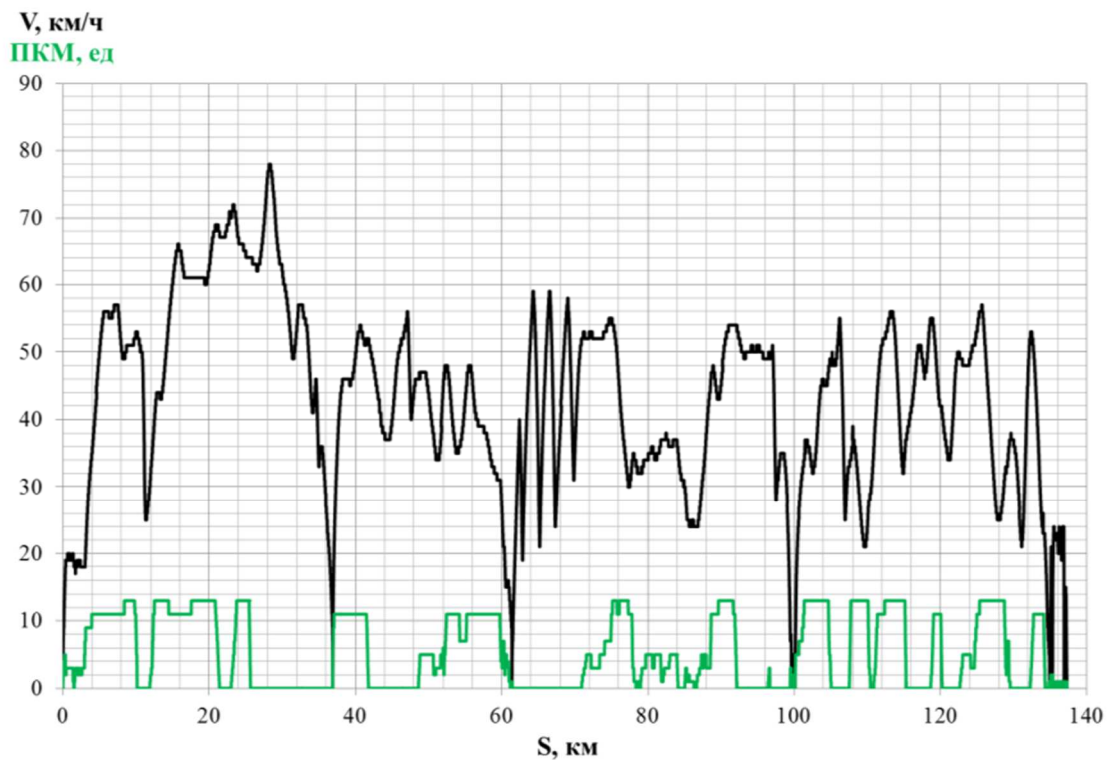


Рисунок 24 – График скорости и позиций КМ поездки №10 (масса 5336 т)

Из анализа данных поездок №5 и 10 видно, что техническая скорость одинакова и составила 36,55 км/ч, однако удельный расход топлива отличается на 51,3 %.

Из графиков скорости и ПКМ, представленных на рисунках 23 и 24 видно, что режимы управления выбраны различные. Так для поездки №10 максимальная ПКМ составляет №13, а для более легкого поезда массой 3903 т (поездка №5) используется 3 раза позиция №15, при этом имеется одна дополнительная остановка на промежуточной станции.

Произведем анализ времени работы на позициях контроллера машиниста для рассматриваемых случаев, данные представим в таблице 7.

Таблица 7 – Анализ времени работы по ПКМ

В минутах

№	Позиция контроллера машиниста															Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
5	14	9,9	15,2	8,7	12,1	2,5	8,9	1	16,4	0,6	18,1	0,7	9,8	0,3	13,1	131,3
10	13,5	9,6	16,7	3,6	15,4	0,9	5,5	0,6	3,6	0,5	33,6	0,4	33,4	0	0	137,3

Из таблицы 5 видно, что общее время в режиме тяги практически одинаково, разница составляет 6 мин. Однако имеется принципиальное отличие по использованию ПКМ. До 8 ПКМ принципиальной разницы во времени работы нет. Начиная с 9 ПКМ есть отличия в управлении тепловозом. Для поездки №5 – 9 ПКМ, 11 ПКМ, 13 ПКМ, 15 ПКМ. Для поездки №10 наиболее используемыми позициями стали 11 ПКМ и 13 ПКМ. Общее время работы на позициях с 9 по 15 составило 59 мин для поездки № 5 и 71,5 мин для поездки №10.

Одним из регистрируемых параметров систему «МПСУ-ТП» является мощность дизель-генераторной установки, построим график мощности ДГУ от пройденного пути.

На рисунке 25 представлен график мощности ДГУ для поездки №5, а на рисунке 26 для поездки №10.

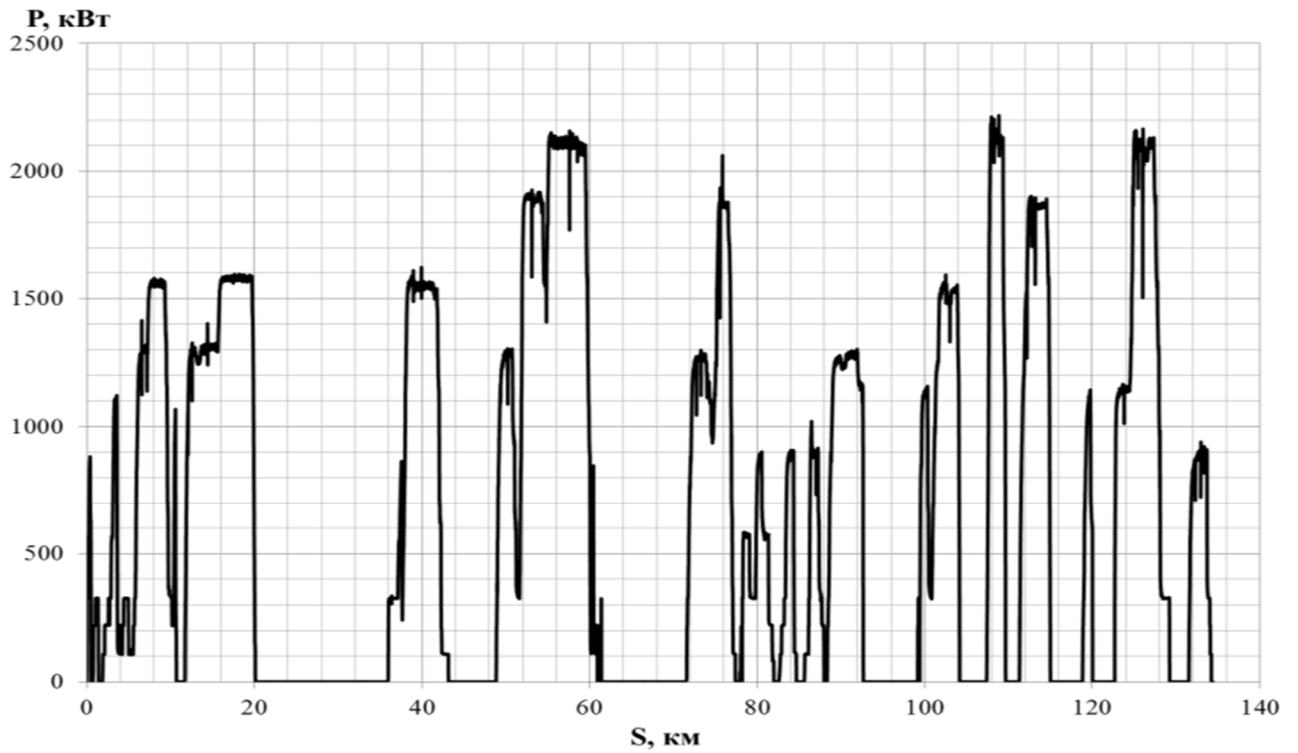


Рисунок 25 – График мощности ДГУ поездки №5 (масса 3903 т)

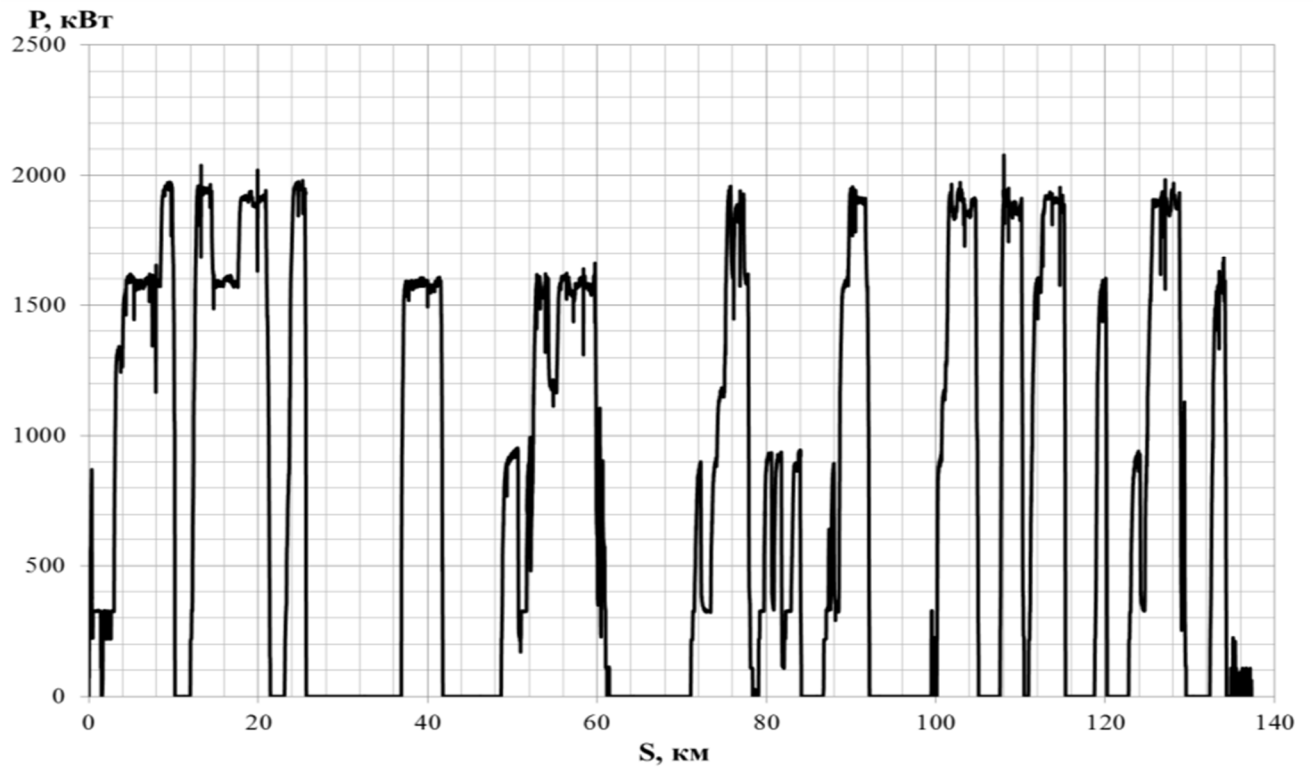


Рисунок 26 – График мощности ДГУ поездки №10 (масса 5336 т)

С помощью средств MATLAB [85] определена выработанная электрическая энергия синхронным тяговым генератором за поездку. Датчики тока и напряжения установлены в звене постоянного тока, поэтому определяется мощность после управляемых выпрямительных установок. Для поездки №10 – 5,092 МВт·ч, а для поездки №5 – 4,436 МВт·ч. Расход дизельного топлива составил для поездки №10 – 1084 кг, а для поездки №5 – 1200 кг. Средний удельный расход дизельного топлива составил для поездки №10 – 0,2016 кг/кВт·ч, а для поездки №5 – 0,2283 кг/кВт·ч. Паспортный расход дизельного топлива составляет на режиме 60 % от полной мощности составляет  $202^{10,1}$  г/кВт·ч, на режиме полной мощности –  $198^{9,9}$  г/кВт·ч. Таким образом, поездка №10 по удельному расходу соответствует паспортным данным тепловоза.

Результаты обработки данных поездок в четном направлении «Железный Рог – раз. 9км» представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет использования мощности тепловоза

№ поездки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вес поезда, т	5972	4781	5584	3823	3903	5992	5440	5180	5756	5336
Энергия ДС, МВт·ч	5,698	4,494	5,64	4,2774	4,436	5,65	5,372	5,17	5,204	5,092
Время тяги, мин	138,1	124,3	147,4	135,1	131,3	129,2	130,8	143,6	128,5	137,3
Средняя мощность, кВт	1237,8	1084,6	1147,9	949,8	1013,6	1311,9	1232,1	1080,1	1214,9	1112,6
Процент использования мощности, %	0,467	0,409	0,433	0,358	0,382	0,495	0,465	0,408	0,458	0,420
Удельный расход топлива, кг/кВт·ч <sub>ДС</sub>	0,2493	0,244	0,2612	0,2252	0,2283	0,2154	0,2485	0,2061	0,2353	0,2016

### 2.6.2 Нечетное направление «Железный Рог – раз. 9км»

Из таблицы 6 следует, что наименьший удельный расход топлива на измеритель перевозочной работы приходится на поездку №15.

На рисунке 27 приведен график скорости и позиций КМ поездки №15 поезд массой 1890 т, по маршруту «Железный Рог – раз. 9км», на рисунке 28 – график мощности ДГУ одной секции тепловоза.

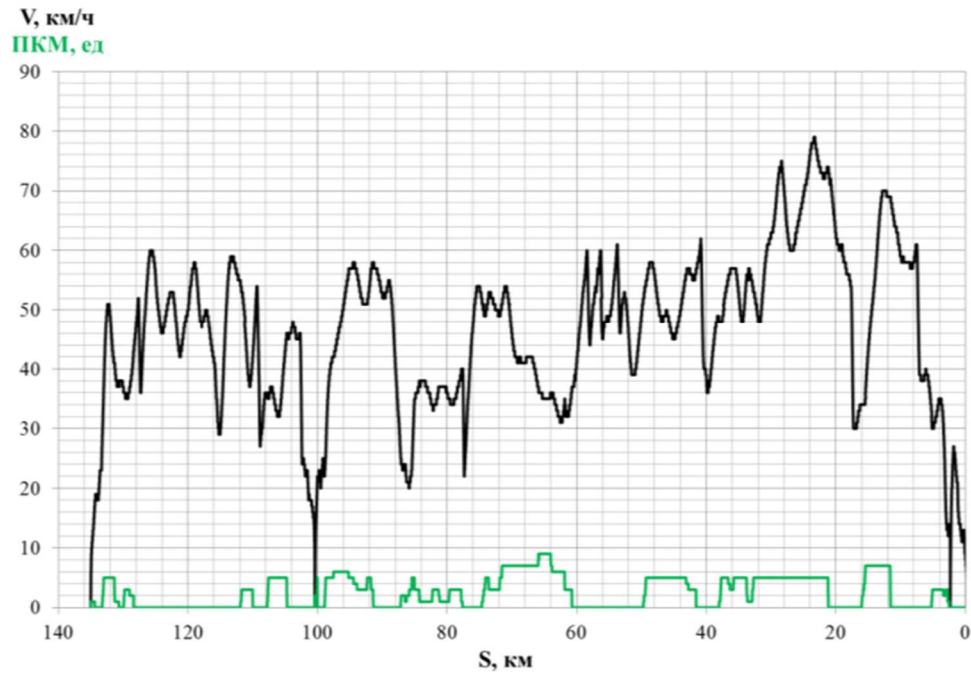


Рисунок 27 – График скорости и позиций КМ поездки №15 (масса 1890 т)

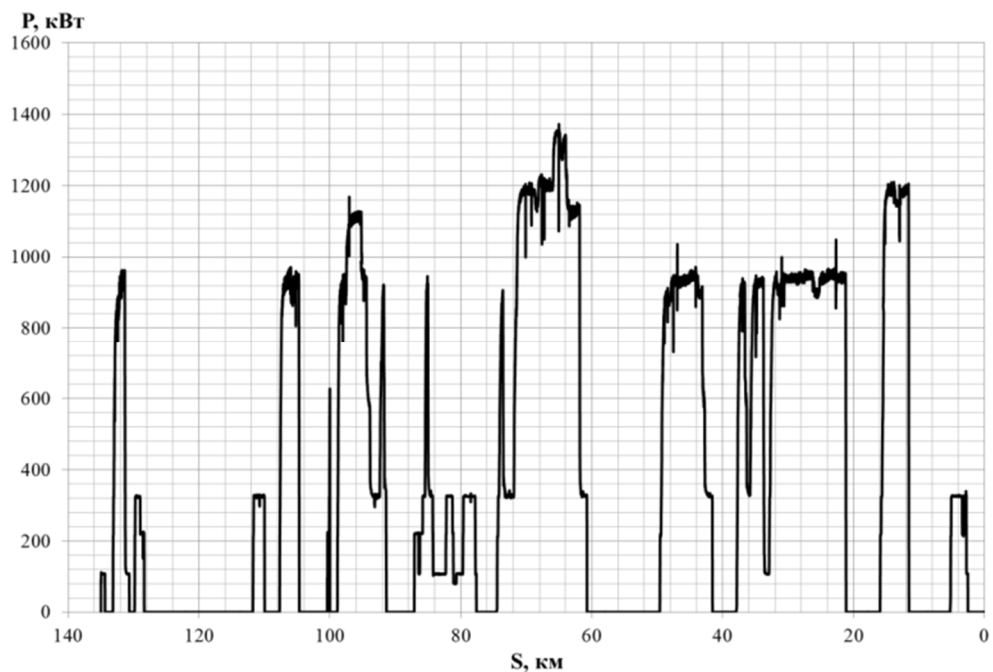


Рисунок 28 – График мощности ДГУ поездки №15 (масса 1890 т)

Проведем аналогичные построения для поездки с максимальным удельным расходом дизельного топлива. В соответствии с таблицей 8 такой поездкой является №4, состав массой 935 т, по маршруту «Железный Рог – раз. 9км».

На рисунке 29 приведен график скорости и позиций контроллера машиниста поездки №14 поезда массой 935 т, по маршруту «Железный Рог – раз. 9км», на рисунке 30 – график мощности ДГУ одной секции тепловоза.

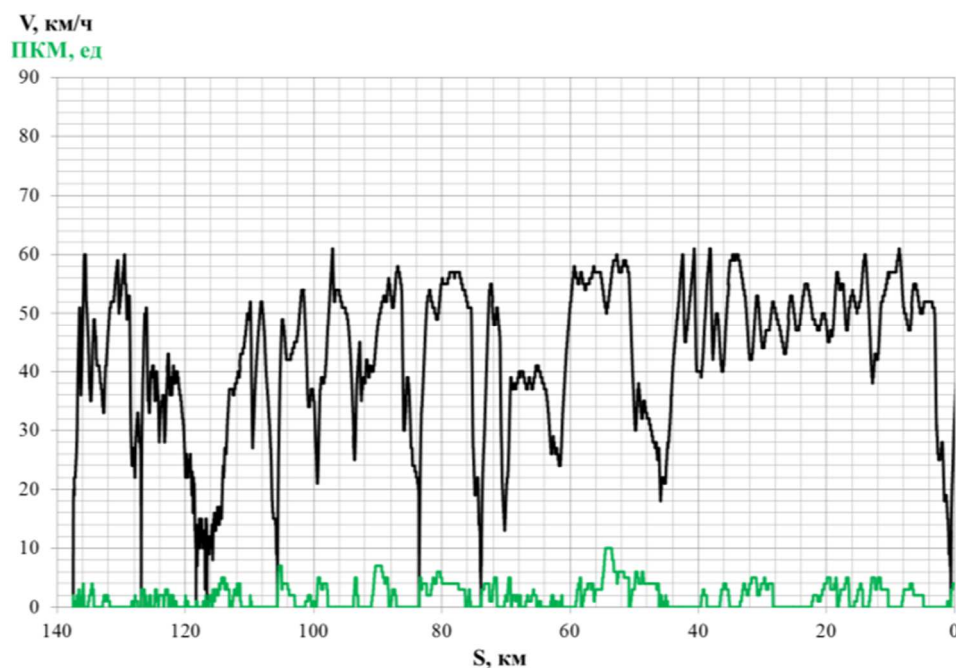


Рисунок 29 – График скорости и позиций КМ поездки №14 (масса 935 т)

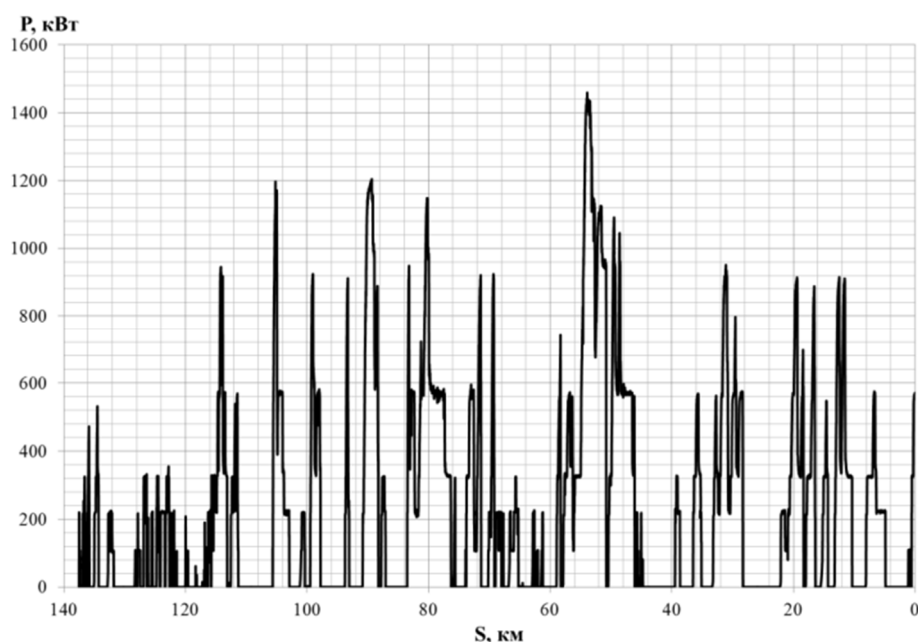


Рисунок 30 – График мощности ДГУ поездки №14 (масса 935 т)

Произведем анализ времени работы на позициях контроллера машиниста для поездок, приведенных в таблице 6, все результаты сведем в таблицу 9.

Таблица 9 – Анализ времени работы по ПКМ

В минутах

№	Позиция контроллера машиниста															Σ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
11	13,23	16,38	12,83	11,87	8,7	9,33	10,27	12,42	0,62	5,03	1,72	1,77	2,82	0	0	106,98
12	2,85	7,07	7,45	14,72	1,42	10,25	0,82	18,72	1,2	8,98	0,68	13,2	0	0	0	87,35
13	19,9	18,38	10,25	21,72	2,28	3,58	15,07	0,62	13,73	3,85	2,57	10,47	0	0	0	122,42
14	34,22	30,98	25,78	26,97	11,5	3,72	2,02	0,3	0,18	1,15	0	0	0	0	0	136,82
15	15,53	8,02	23,83	2,45	33,9	6,63	11,83	0,28	3,12	0	0	0	0	0	0	105,6
16	31,02	22,32	23,3	9,52	15,6	2,58	23,9	0,83	3,75	0,25	9,18	0	0	0	0	142,25
17	11,78	11,42	18,62	7,72	11,87	4,18	8,13	2,72	0,82	5,75	1,47	3,78	12,22	0	0	100,47
18	9,98	5,05	26,95	9,5	15,52	0,82	15,43	1,02	10,65	0,28	12,08	0,28	7,62	0,03	0	115,22
19	6,63	5,9	16,75	4,38	39,57	15,18	7,15	0,17	3,55	0	0	0	0	0	0	99,28
20	9,95	10,78	8,45	1,75	51,27	0,2	1,82	0,12	14,93	0	0	0	0	0	0	99,27

Сопоставляя таблицы 6 и 9 видно, что высокий удельный расход дизельного топлива соответствует продолжительному режиму работы на низких позициях контроллера машиниста (поездки 14, 16). При поездке №12, с низким расходом дизельного топлива, основное время работы дизеля приходилось на 6, 8, 10, 12 позиции контроллера машиниста, а общее время работы дизеля в режиме тяги составило минимальное из рассматриваемых – 87,35 мин.

Проведем теоретические исследования аналогично, а результаты представим в табличной форме в таблице 10. Данные, представленные в таблице 10 наглядно демонстрирует, что при низком использовании мощности тепловоза, будет наибольший удельный расход дизельного топлива на единицу выработанной энергии.

Таблица 10 – Расчет использования мощности тепловоза

№ поездки	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Энергия ДС, МВт·ч	2,6172	2,9138	2,9854	1,656	2,28	2,732	2,6728	2,4189	2,456	2,484
Время тяги, мин	106,98	87,35	122,42	136,82	105,6	142,25	100,47	115,22	99,28	99,27
Средняя мощность, кВт	736,5	1009,4	734,7	373,0	653,3	649,5	827,5	744,9	766,7	755,0
Процент использования мощности, %	27,8	38,1	27,7	14,1	24,7	24,5	31,2	28,1	28,9	28,5
Удельный расход топлива, кг/кВт·ч	0,2741	0,2384	0,2466	0,2868	0,2834	0,265	0,2664	0,2593	0,2489	0,3424



Из проведенных данных видно, что высокий удельный расход топлива на измеритель перевозочной работы связан не только с увеличением удельного сопротивления движению, но и с недоиспользованием мощности тягового оборудования при ведении порожних или груженых коротких поездов, особенно это ситуация очевидна на легком профиле пути.

### 2.6.3 Обобщенный анализ эксплуатации грузового тепловоза

Рассмотрим обобщённую картину эксплуатации выбранного тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> на сети железных дорог. Проанализируем все полученные данные эксплуатации для одной секции тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup>, общее число измерений параметров составило 2956680 шт, что составляет порядка 35 суток работы тепловоза.

На рисунке 31 показано распределение времени работы тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> по позициям контроллера машиниста за рассматриваемый период, полученные результаты коррелируют с исследования проведенными другими авторами [86, 87]. Так как тепловоз грузовой, то рассматривалось только время движения тепловоза, которое составило 390,82 ч.

Техническая скорость составила 35,78 км/ч. (средне-квадратичная скорость составила 40,02 км/ч). На 15 позиции тепловоз работал 2261 с, что составило 0,16 % от общего времени движения, на 14 позиции 4802 с – 0,34 %.

Время работы на  $j$  позиции контроллера машиниста представлено на рисунке 31.

Для оценки максимальной длительности работы ДГУ на каждой позиции контроллера машиниста, проведен анализ данных по результатам построена гистограмма показанная на рисунке 32.

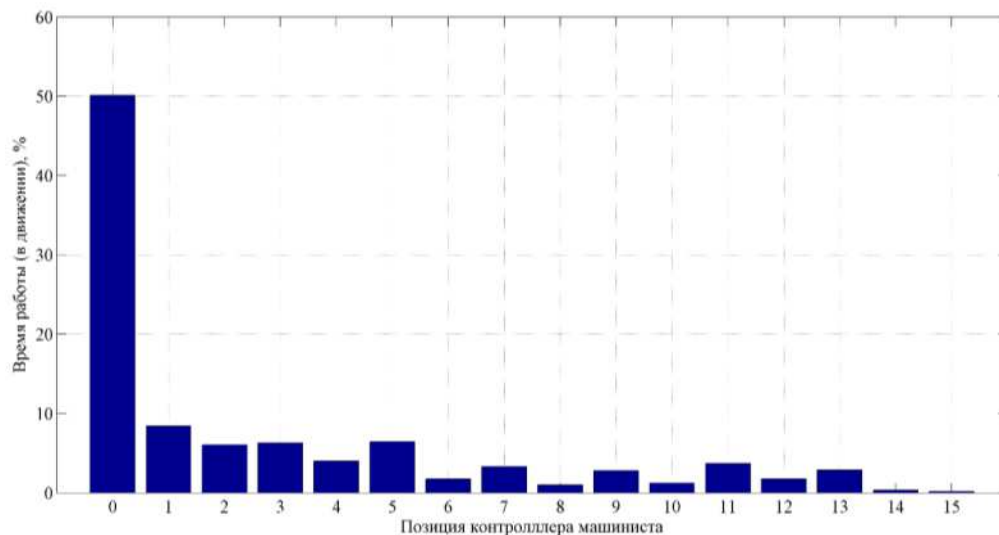


Рисунок 31 – Распределение времени работы тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> по позициям контроллера машиниста

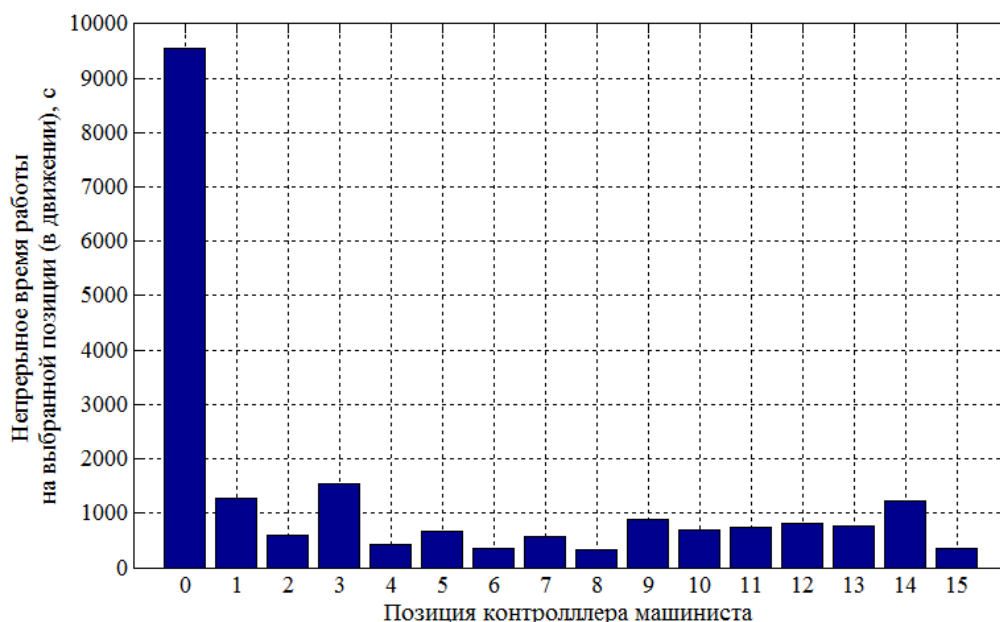


Рисунок 32 – Распределение максимального непрерывного времени работы на выбранной позициям контроллера машиниста

Видим, что за время эксплуатации существовал период, при котором ДГУ секции тепловоза работала в режиме холостого хода на протяжении практически 3 ч, что является нарушением режимов эксплуатации [88] и резко сокращает межремонтный срок эксплуатации дизель-генераторной установки [89]. На каждой тяговой из позиций контроллера машиниста непрерывное время составило не более 1600 с.

Результат расчетов непрерывного времени работы ДГУ по позициям контроллера машиниста при условии, что возможно продолжен дальнейший набор позиций контроллера машиниста, приведен на гистограмме на рисунке 33.

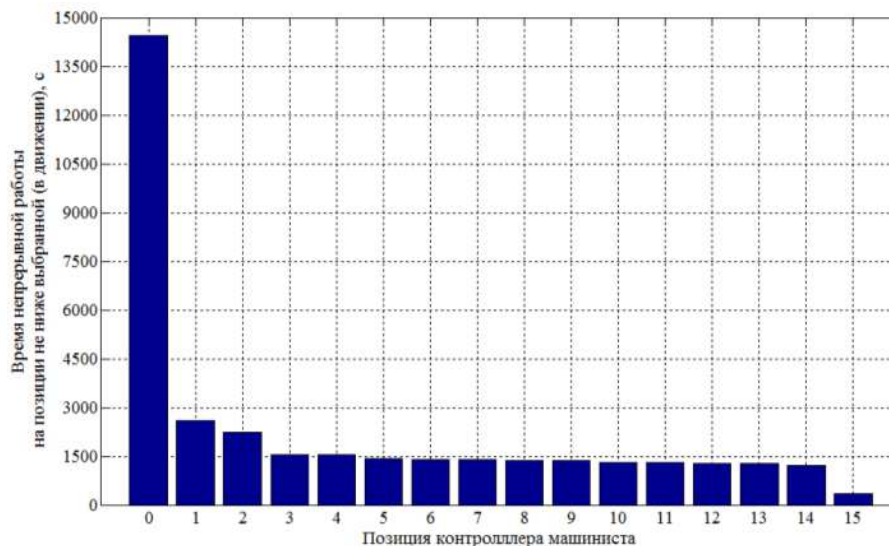


Рисунок 33 – Распределение непрерывного времени работы на позиции не ниже выбранной

Непрерывное время работы по позициям контроллера машиниста не в полной мере учитывает особенности значения выработанной энергии ДГУ.

Режимы работы электрической передачи мощности определяются системой МПСУ-ТП. Построим поле точек внешней характеристики тягового генератора (рисунок 34) в процессе эксплуатации, по данным МПСУ-ТП.

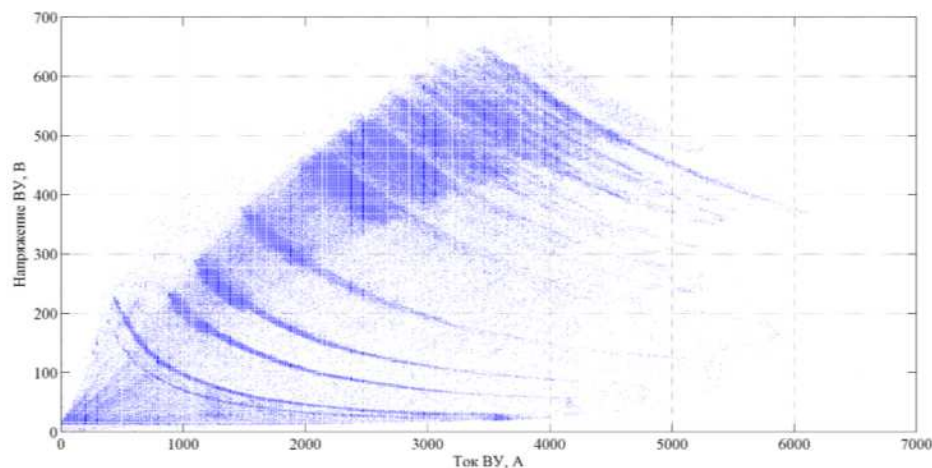


Рисунок 34 – Поле точек работы тягового генератора

Определим среднее значение мощности ДГУ при работе на тяговых позициях, в результате получим 822 кВт, с учетом работы в режиме холостого хода в движении 396 кВт и на стоянках 233,6 кВт.

В соответствии с предложенным методом, рассчитаем и построим (рисунок 35) поле коэффициента полезного действия выпрямительной установки в зависимости от мощности ДГУ.

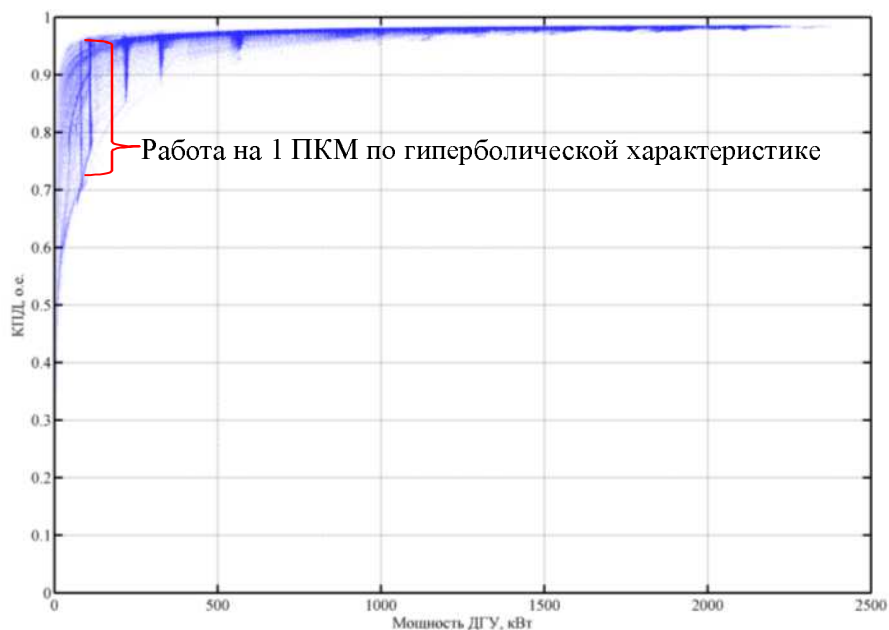


Рисунок 35 – Поле коэффициента полезного действия выпрямительной установки в зависимости от мощности ДГУ

Значение коэффициента полезного действия выпрямительной установки составило 0,975, что ниже номинального значения на 0,005, т.е. ниже на 0,5 п.п. Из представленных данных видно, что на первой позиции контроллера машиниста, значение КПД изменяется широко в диапазоне от 0,7 до 0,96, это обусловлено гиперболической внешней характеристикой тягового генератора, аналогичная ситуация на 2 и 3 позициях.

Результат расчета поля коэффициента полезного действия тягового генератора приведен на рисунке 36 в зависимости от мощности ДГУ.

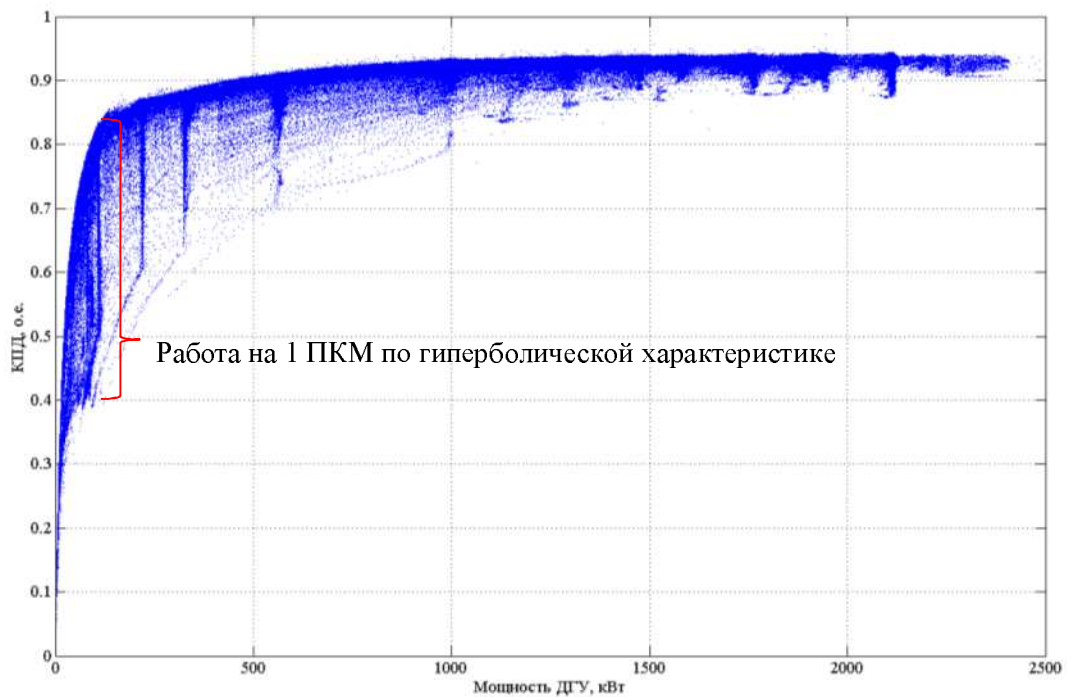


Рисунок 36 – Поле коэффициента полезного действия СТГ в зависимости от мощности ДГУ

Определим значение коэффициента полезного действия через энергию за весь рассматриваемый период с учетом работы на холостом ходу на стоянках, с учетом работы на холостом ходу в движении, и работы только на тяговых позициях в движении.

Значение коэффициента полезного действия тягового генератора при работе на тяговых позициях составило 0,92, с учетом работы на холостом ходу в движении 0,905, на стоянках 0,8783.

Расчет энергии, переданной в звено постоянного тока, в зависимости от позиции контроллера машиниста представлено на гистограмме (рисунок 37).

В результате получаем, что на 5 позиции КМ в звено постоянного тока было передано сопоставимое количество энергии, с позициями 11 и 13. Общее количество энергии, переданное в звено постоянного тока на 1 позиции больше в 2 раза, чем на 15 позиции КМ!

Количество непрерывно выработанной энергии (переданной в звено постоянного тока) представлено на рисунке 38.

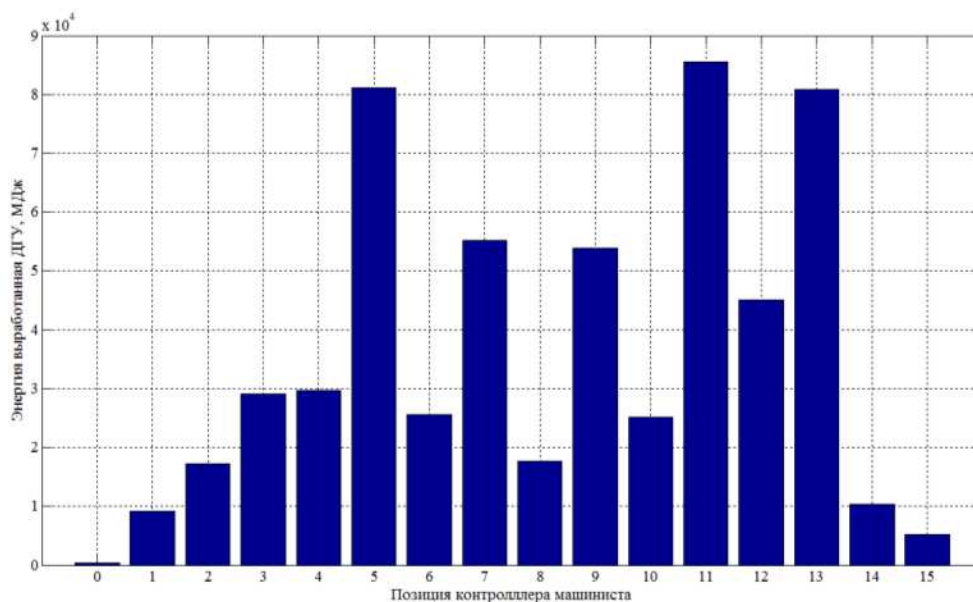


Рисунок 37 – Энергия, выработанная ДГУ

Максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, что происходит дальнейший набор позиций, представлено на рисунке 39. График изменения позиций контроллера машиниста для условия максимальной непрерывно выработанной энергии при позициях от первой и выше приведен на рисунке 40.

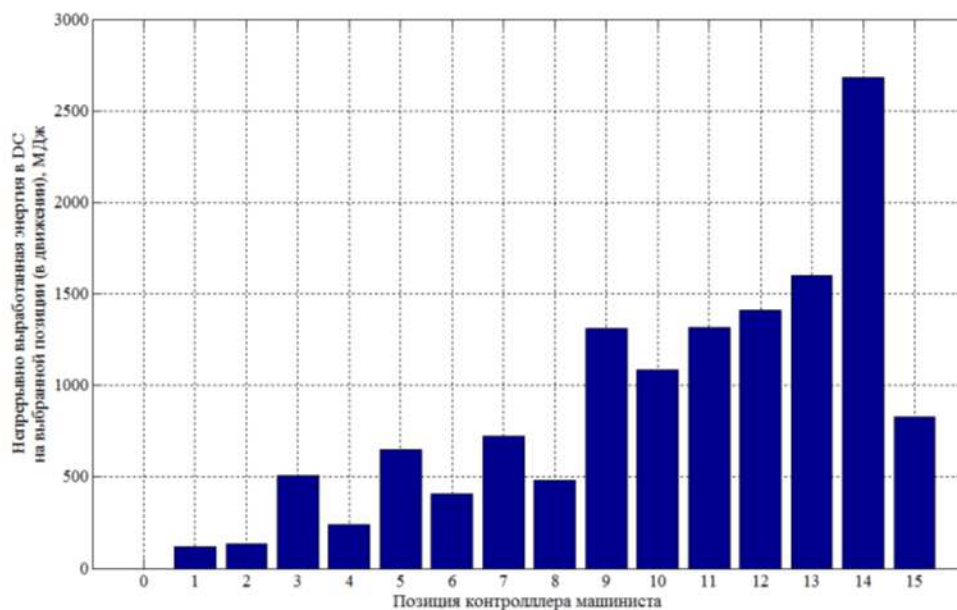


Рисунок 38 – Максимальная непрерывно переданная энергия в звено постоянного тока в зависимости от позиции контроллера машиниста

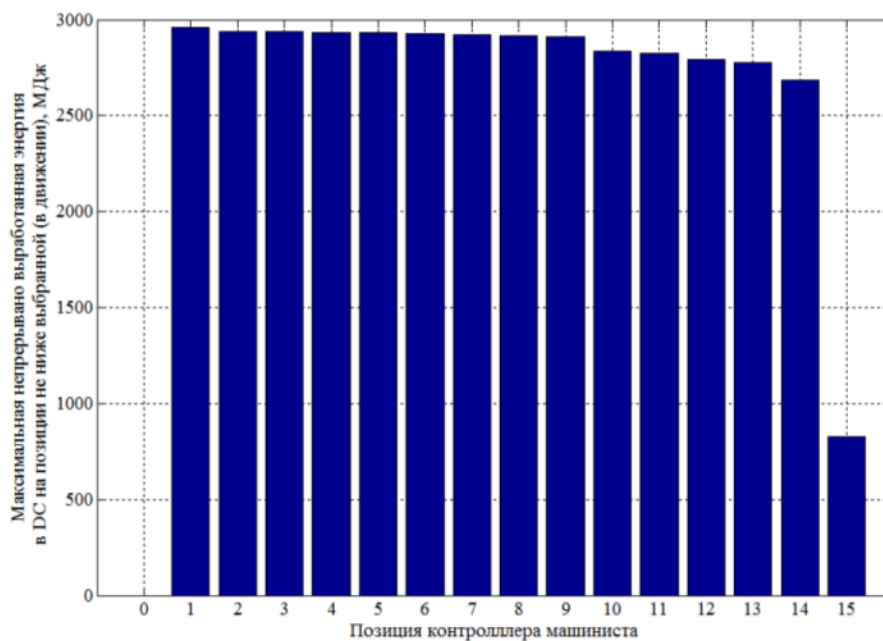


Рисунок 39 – Максимальная непрерывно переданная энергия в звено постоянного тока на позициях не ниже выбранной в зависимости от позиции контроллера машиниста

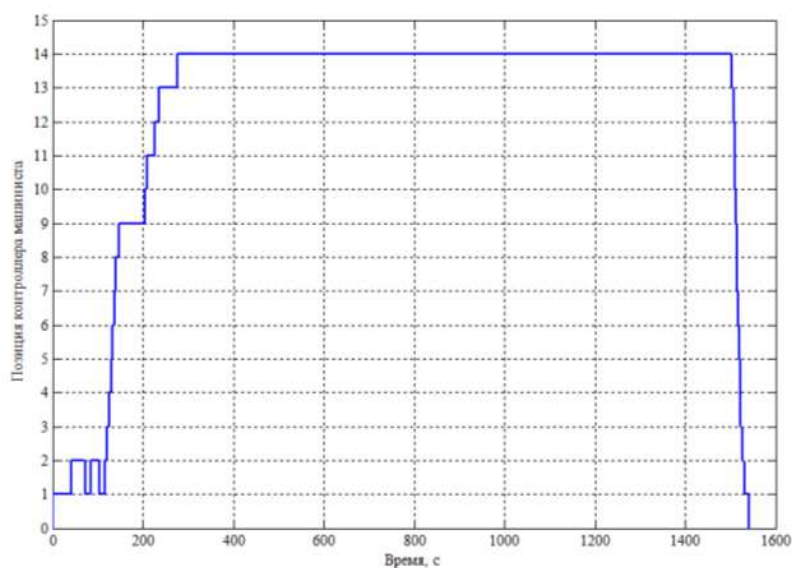


Рисунок 40 – Изменение позиций контроллера машиниста

Максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, учета энергии на позициях предшествующих рассматриваемой, представлено на рисунке 41.



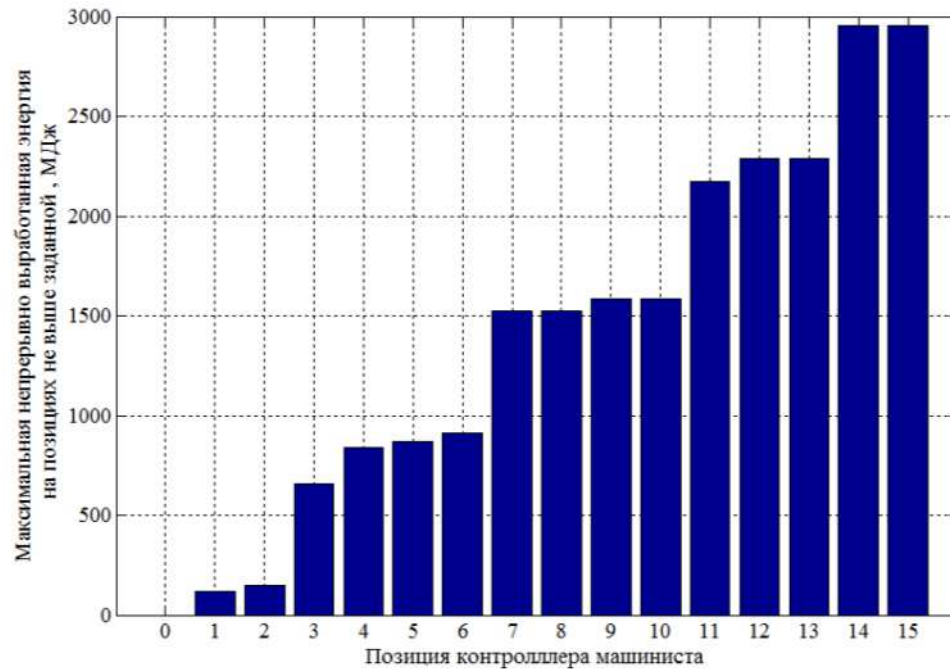


Рисунок 41 – Максимальная непрерывно переданная энергия в звено постоянного тока на позициях не выше выбранной в зависимости от позиции контроллера

Для наглядного представления распределения выработанной энергии в зависимости от скорости и позиции КМ, определим количество выработанной энергии и построим 3D-поверхность, представленную на рисунке 42.

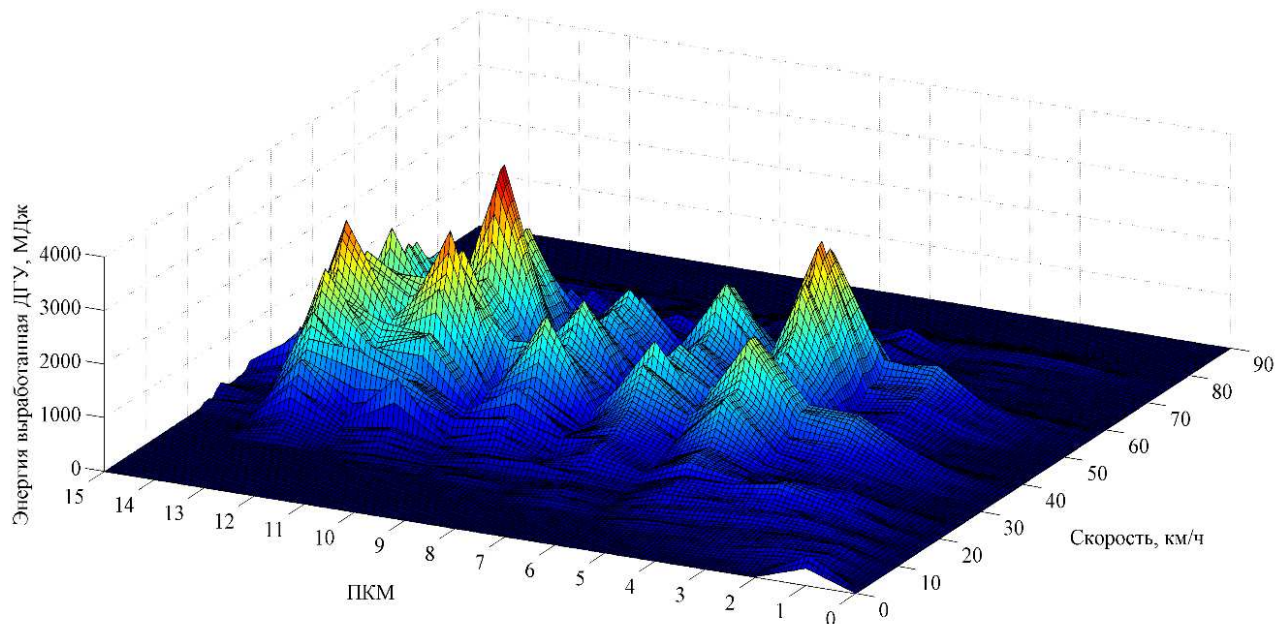


Рисунок 42 – Энергия, выработанная дизель-генераторной установкой и переданная в звено постоянного тока в зависимости от скорости и позиции контроллера машиниста



Обработка данных эксплуатации тепловоза позволила получить поле мгновенных значений коэффициента полезного действия тяговых электродвигателей (рисунок 43) в зависимости от мощности ДГУ. Вертикальные скопления точек соответствуют работе на фиксированных позициях контроллера машиниста, кроме этого видно изменение КПД в широком диапазоне, даже для фиксированных позиций, что объясняется гиперболической внешней характеристикой тягового генератора.

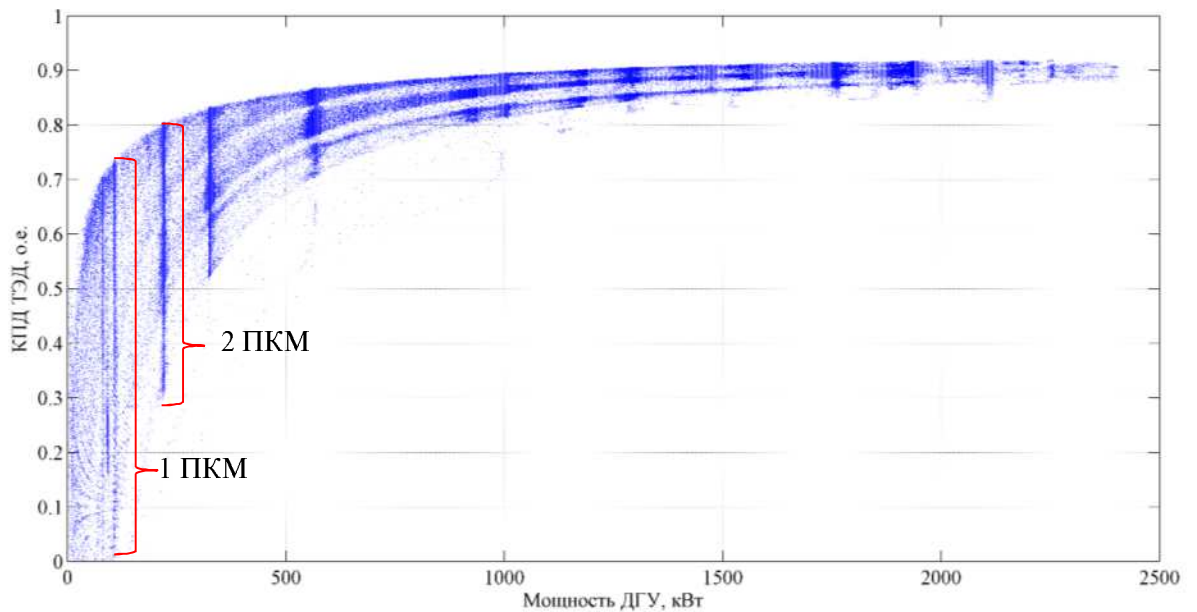


Рисунок 43 – Коэффициент полезного действия ТЭД в зависимости от мощности ДГУ

Значение коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости от позиции контроллера машиниста представлено на рисунке 44.

Значение коэффициента полезного действия ТЭД за весь рассматриваемый период составило 0,856. Среднее значение мощности одного ТЭД при работе на тяговых позициях составило 115 кВт. Среднее значение КПИМ тепловоза при работе на тяговых позициях составило 0,26.

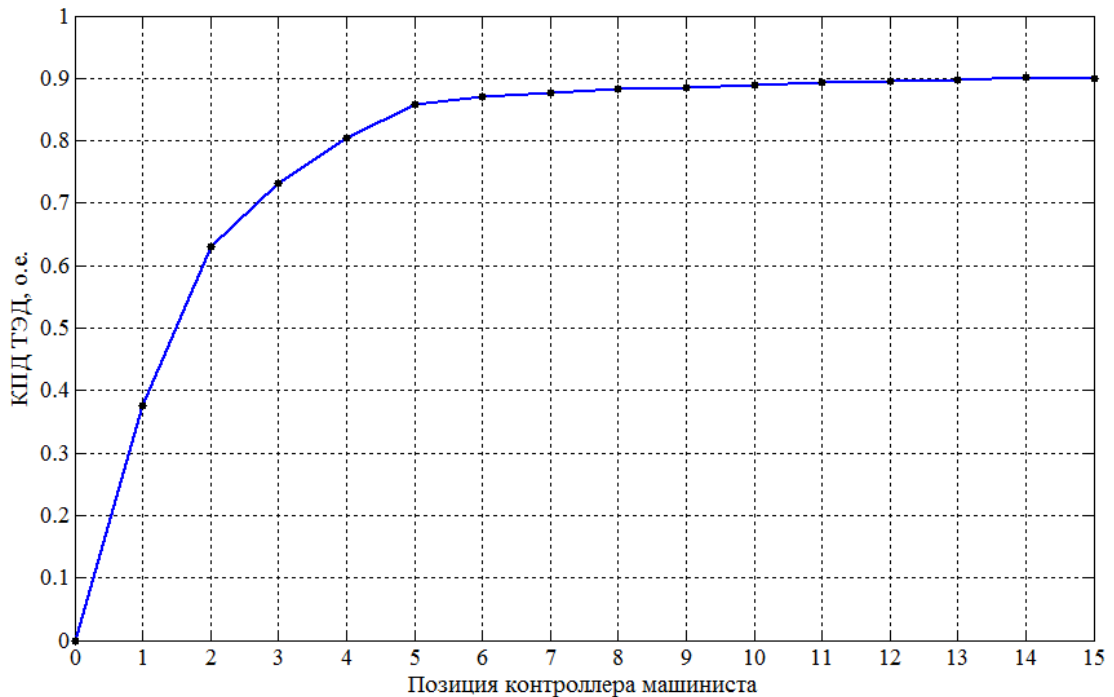


Рисунок 44 – Значение коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости позиции контроллера машиниста

## 2.7 Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС

Тепловоз ТЭП70БС – пассажирский односекционный тепловоз с осевой формулой (3о–3о), мощность по дизелю составляет 2942 кВт (4000 л.с.) [90]. На тепловозе применена передача мощности переменного-постоянного тока (синхронный тяговый генератор – тяговый двигатель постоянного тока), с микропроцессорной системы управления и диагностики локомотива (МСУ-ТЭ)[91]. Первый тепловоз выпущен в 2002 г, в серийное производство запущен в 2006 г. С 2018 г. выпускаются тепловозы с новой двухпроводной системой энергоснабжения поезда. Основная часть выпущенных тепловозов рассчитана на конструкционную скорость 120 км/ч, хотя есть исполнение и на 160 км/ч [92].

К основному тяговому оборудованию относится [90]:

- дизель 16ЧН26/26 (Д49);
- тяговый агрегат АСТМ 2800/600-1000;

- тяговый выпрямитель В-ТППДРЭ-6,3к-1к/0,2к-3к-01;
- тяговые двигатели ЭДУ-133Р.

Дизель и тяговый генератор объединены в дизель-генераторную установку 2А-9ДГ-01 на общей поддизельной раме.

Дизель 16ЧН26/26 – четырехтактный, с V-образным расположением шестнадцати цилиндров [90]. На двигателе применяется газотурбинный наддув с охлаждением наддувочного воздуха перед подачей в цилиндры двигателя. Основные технические характеристики [90] приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Основные технические характеристики дизеля тепловоза ТЭП70БС

Наименование параметра	Значение
Полная мощность дизеля, кВт	2942
Минимально-устойчивая частота вращения, об/мин	350
Мощность дизеля на минимальной частоте вращения, кВт	30 ... 200
Номинальная частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин	1000
Удельный расход топлива на полной мощности, г/кВт·ч	198
Удельный расход топлива при 60 % полной мощности, г/кВт·ч	200
Расход топлива при минимально устойчивой частоте вращения холостого хода, не более, кг/мин	0,485
Коэффициент полезного действия при полной мощности, о.е.	0,426

Источником электрической энергии является синхронный тяговый агрегат, который состоит из тягового синхронного генератора и вспомогательного генератора в одном корпусе, потребителем – коллекторные тяговые двигатели, питаемые от выпрямительной установки и система энергоснабжения пассажирского поезда мощностью 600 кВт.

Тяговый синхронный генератор имеет независимое возбуждение от управляемого тиристорного преобразователя типа В-ТПЕ-2-220-110-У3 [90] мощностью 22 кВт и коэффициентом полезного действия 0,98. Основные технические параметры синхронного тягового генератора [90] представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Основные технические параметры синхронного тягового генератора

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВт	2750
Линейное напряжение, В	580/405
Ток фазный, А	2×1475/2×2150
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	4,18
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,954/0,947

На тепловозе применяются коллекторные тяговые двигатели ЭДУ-133 [90], основные характеристики приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Основные технические характеристики ЭДУ-133

Наименование параметра	Значение
Мощность на валу, кВт	418
Напряжение, В	540/780
Ток якоря, А	830/577
Частота вращения якоря максимальная, с <sup>-1</sup> об/мин	38,7 (2320)
Момент на валу, кН·м	5916
Максимальный ток при трогании, А	1130
Мощность в тормозном режиме, кВт	450
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	1,3
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,929

Выпрямительная установка В-ТППДРЭ-6,3к-1к/0,2к-3к-У2 [90] состоит из тягового и вспомогательного выпрямителя. Вспомогательный выпрямитель получает питание от вспомогательного генератора, расположенного в тяговом агрегате, и предназначен для энергоснабжения пассажирских вагонов. Тяговый выпрямитель собран из диодов таблеточного типа и представляет собой два трехфазных выпрямителя, соединенных параллельно, что позволяет реализовать двенадцатипульсовую схему выпрямления, что позволяет существенно снизить пульсации выпрямленного напряжения. Выпрямительная установка имеет воздушное охлаждение. Основные характеристики [90] приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Основные технические характеристики тягового выпрямителя

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, кВт	6300
Номинальное входное напряжение, В	770
Число фаз на входе	2×3
Номинальный выпрямленный ток, А	6300
Номинальное выходное выпрямленное напряжение, В	1000
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,996

Функциональная схема передачи мощности представлена на рисунке 45.

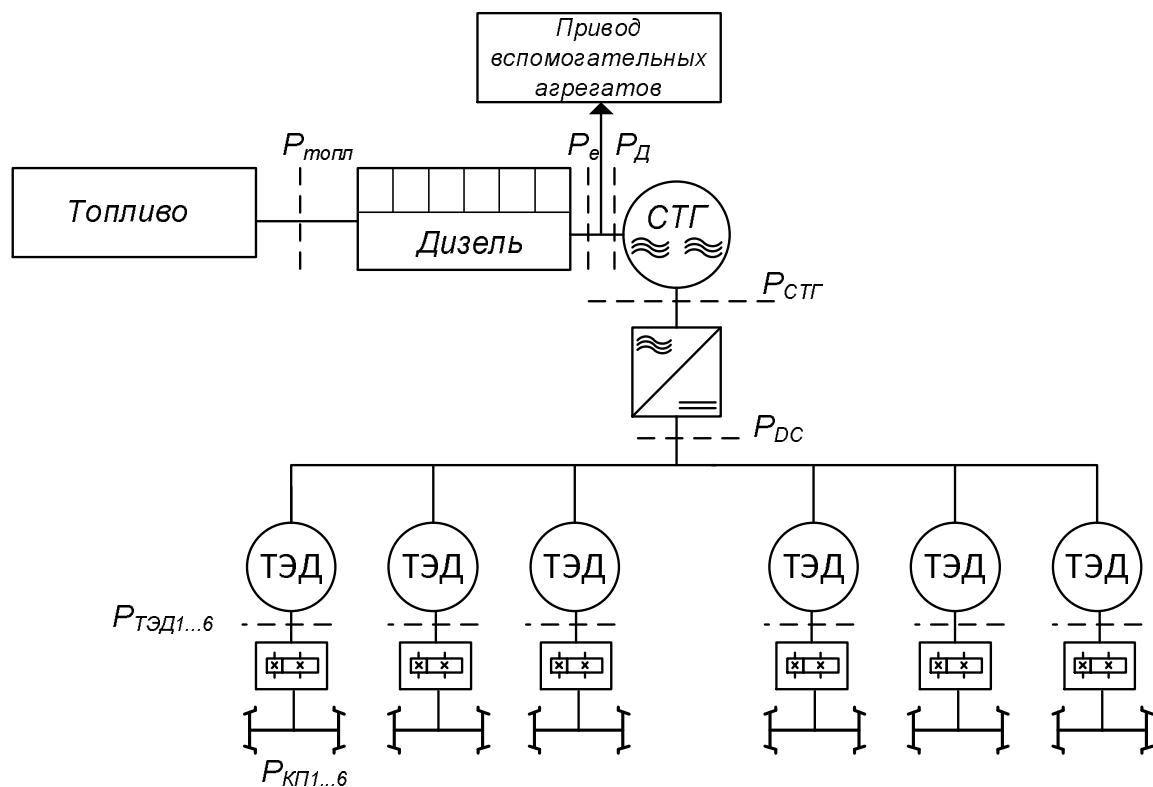


Рисунок 45 – Функциональная схема передачи мощности тепловоза ТЭП70БС

Для управления системами тепловоза применяется многофункциональная микропроцессорная система управления (МСУ-ТЭ) [91], которая по результатам обработки сигналов от датчиков, формирует задание управляющих воздействий на систему автоматического регулирования напряжения тягового генератора и производит бесконтактное управление исполнительными электрическими аппаратами. Дополнительными функциями МСУ-ТЭ являются анализ и запись информации, поступающей с датчиков, на энергонезависимый накопитель с целью дальнейшей диагностики оборудования тепловоза. Записанная информация МСУ-

ТЭ расшифровывается при помощи программного обеспечения «Осциллограф», что позволяет проводить более детальный анализ эксплуатации тепловоза.

Рассмотрим обобщённую картину эксплуатации выбранного тепловоза ТЭП70БС на сети железных дорог. Проанализируем все полученные данные эксплуатации для случайно отобранного тепловоза ТЭП70БС, общее число измерений параметров составило 5 993 375 шт, что составляет порядка 69 суток работы тепловоза [82].

На рисунке 46 показано распределение времени работы тепловоза ТЭП70БС по позициям контроллера машиниста за рассматриваемый период. Так как тепловоз пассажирский магистральный, то рассматривалось только время движения тепловоза, которое составило 702 ч. Техническая скорость составила 53,68 км/ч. (среднеквадратичная скорость составила 61 км/ч) [82]. На 15 позиции тепловоз работал 10728 с, что составило 0,424 % от общего времени движения, на 14 позиции 42404 с – 1,68 %.

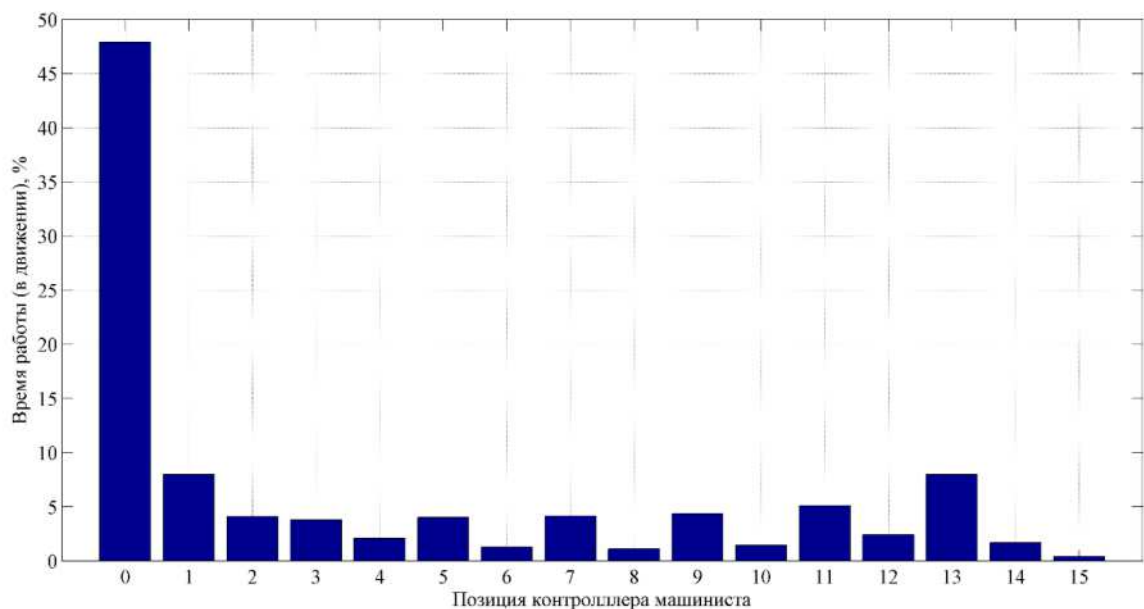


Рисунок 46 – Распределение времени работы тепловоза ТЭП70БС по позициям контроллера машиниста

Для оценки максимальной длительности работы ДГУ на каждой позиции контроллера машиниста, проведен анализ данных и по результатам построена гистограмма, показанная на рисунке 47.

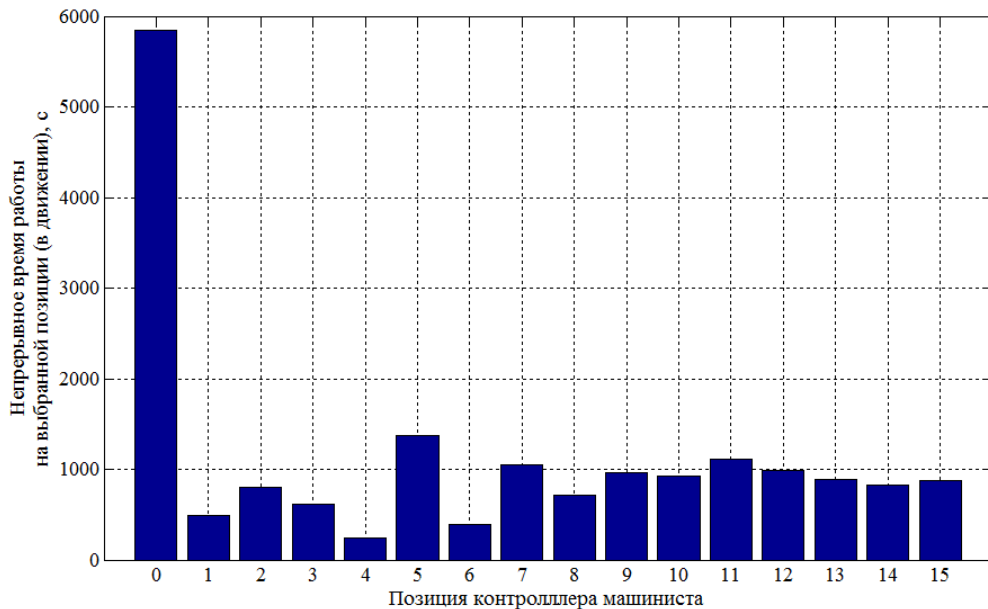


Рисунок 47 – Распределение непрерывного времени работы на выбранной позиции контроллера машиниста

Видим, что за время эксплуатации, максимальное непрерывное время работы на тяговой позиции (1375 с) приходится на пятую. На остальных тяговых позициях контроллера машиниста непрерывное время составило не более 1114 с. Максимальное время непрерывной работы на холостом ходу в движении составило 5844 с, что составляет 1 ч 37 мин.

Для более детальной оценки режимов работы исследовано непрерывное время работы ДГУ по позициям контроллера машиниста при условии, что возможно был продолжен дальнейший набор позиций контроллера машиниста, тем самым можно определить максимальное непрерывное время работы тепловоза в режиме тяги. Результат расчетов приведен на гистограмме на рисунке 48.

Режимы работы электрической передачи мощности определяются системой МСУ-ТЭ за счет формирования внешней характеристики тягового генератора, построим поле точек работы тягового генератора (рисунок 49) в процессе эксплуатации.

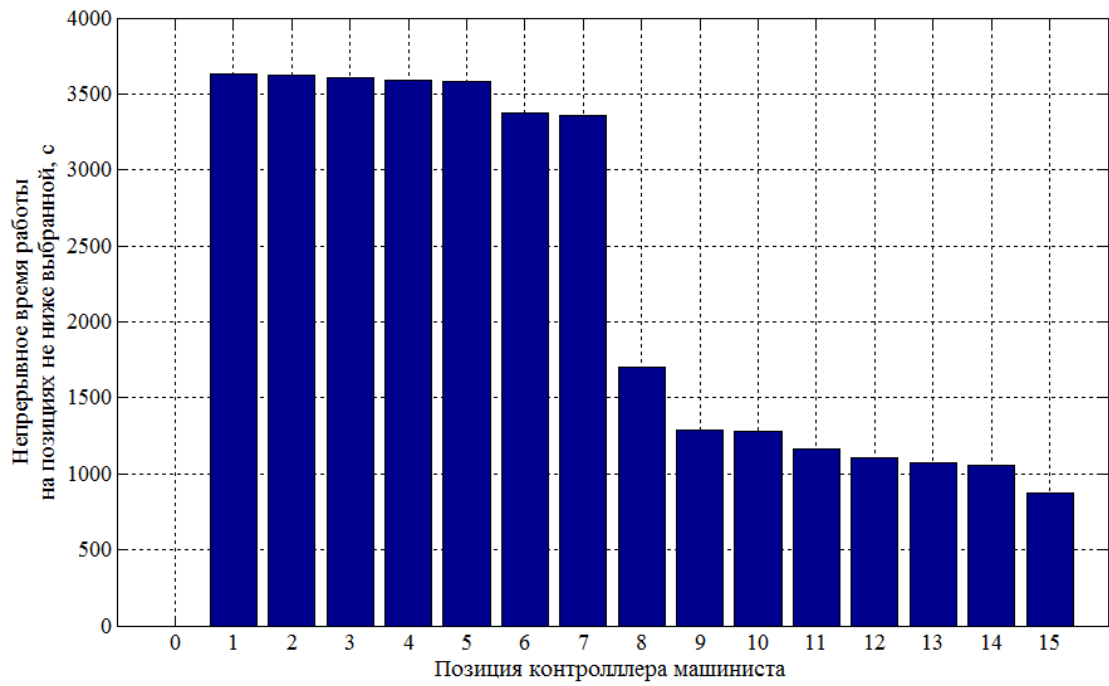


Рисунок 48 – Распределение непрерывного времени работы на позиции не ниже выбранной

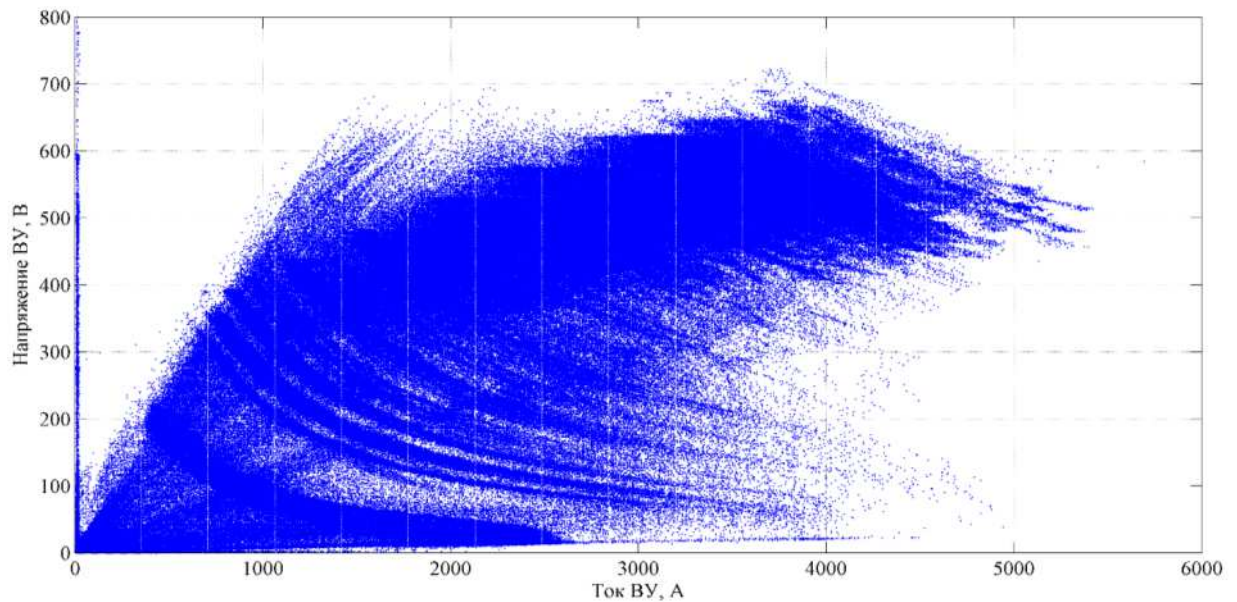


Рисунок 49 – Поле точек работы тягового генератора тепловоза ТЭП70БС

Обработка данных эксплуатации тепловоза позволила получить поле мгновенных значений коэффициента полезного действия выпрямительной установки



(рисунок 50) и синхронного тягового генератора (рисунок 51) в зависимости от мощности ДГУ.

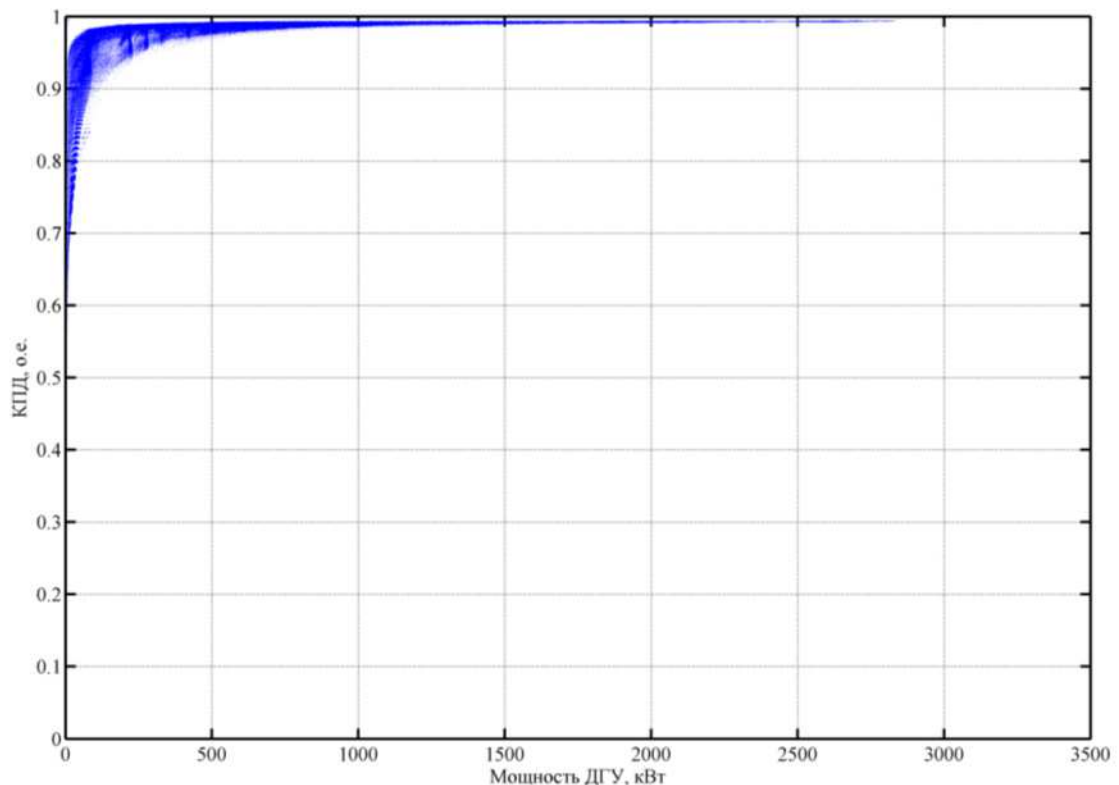


Рисунок 50 – Поле коэффициента полезного действия ВУ в зависимости от мощности ДГУ

Значение коэффициента полезного действия выпрямительной установки при работе составило 0,990, что ниже номинального значения на 0,006, т.е. ниже на 0,6 п.п.

Среднее значение мощности ДГУ при работе на тяговых позициях составило 808,3 кВт (КИМ 28,9 %), с учетом режима холостого хода при движении 460,4 кВт, с учетом времени работы на стоянках – 197,9 кВт.

Значение коэффициента полезного действия синхронного тягового генератора (рисунок 51) при работе на тяговых позициях составило 0,914, а с учетом работы на холостом ходу при движении локомотива 0,866.

Результат определения энергии, переданной в звено постоянного тока, представлен на гистограмме, показанной на рисунке 52.

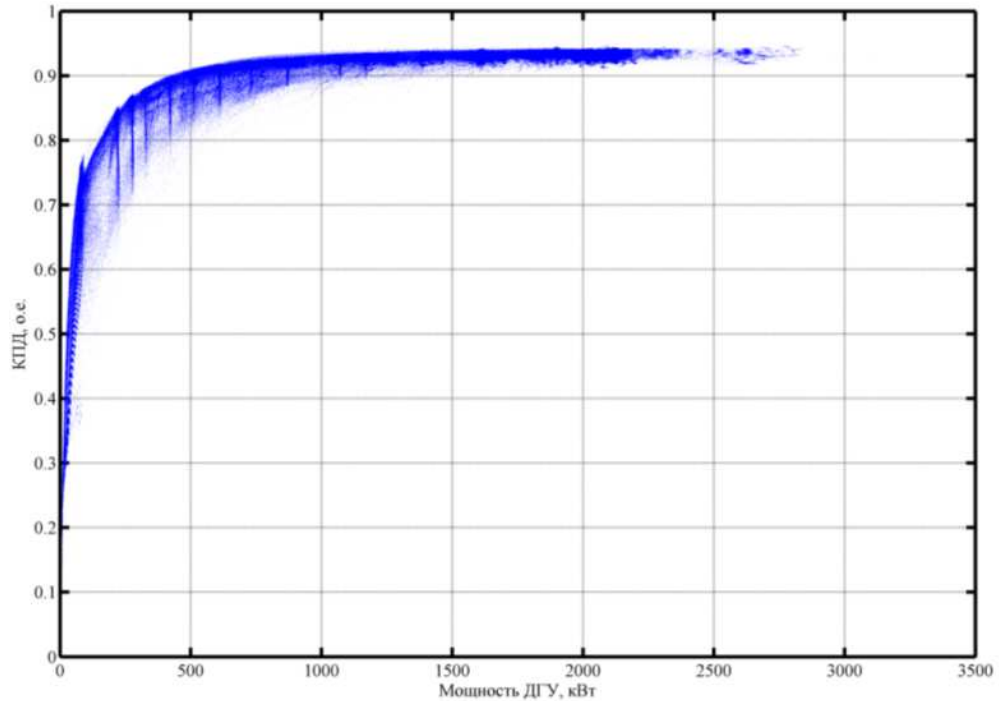


Рисунок 51 – Поле коэффициента полезного действия СТГ в зависимости от мощности ДГУ

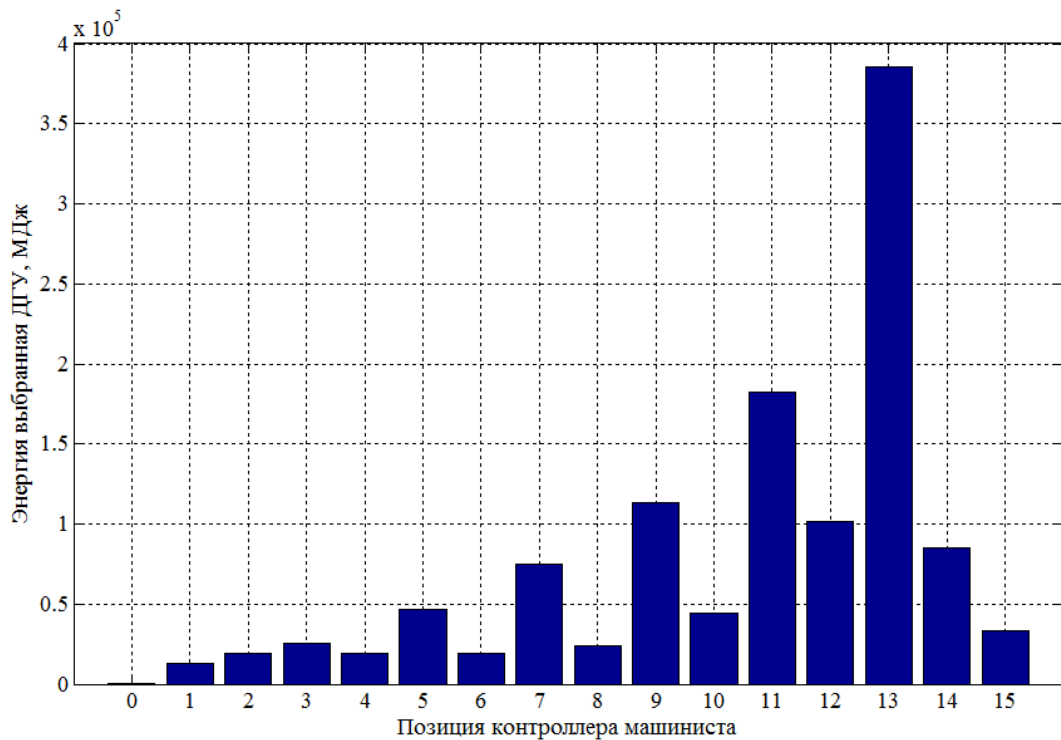


Рисунок 52 – Энергия, выработанная ДГУ

В результате получаем, что на 5 позиции контроллера машиниста в звено постоянного тока передано больше энергии, чем на 15 позиции. Максимально ко-

личество выработанной энергии приходится на 13 позицию контроллера машиниста.

Количество непрерывно выработанной энергии (переданной в звено постоянного тока) определяет возможность применения различных накопителей энергии. Определим максимальное количество непрерывно выработанной энергии для каждой из позиции контроллера машиниста. С учетом того, что мощность для каждой позиции поддерживается в заданном диапазоне, для расчета энергии используем максимальные временные интервалы, представленные на рисунке 53.

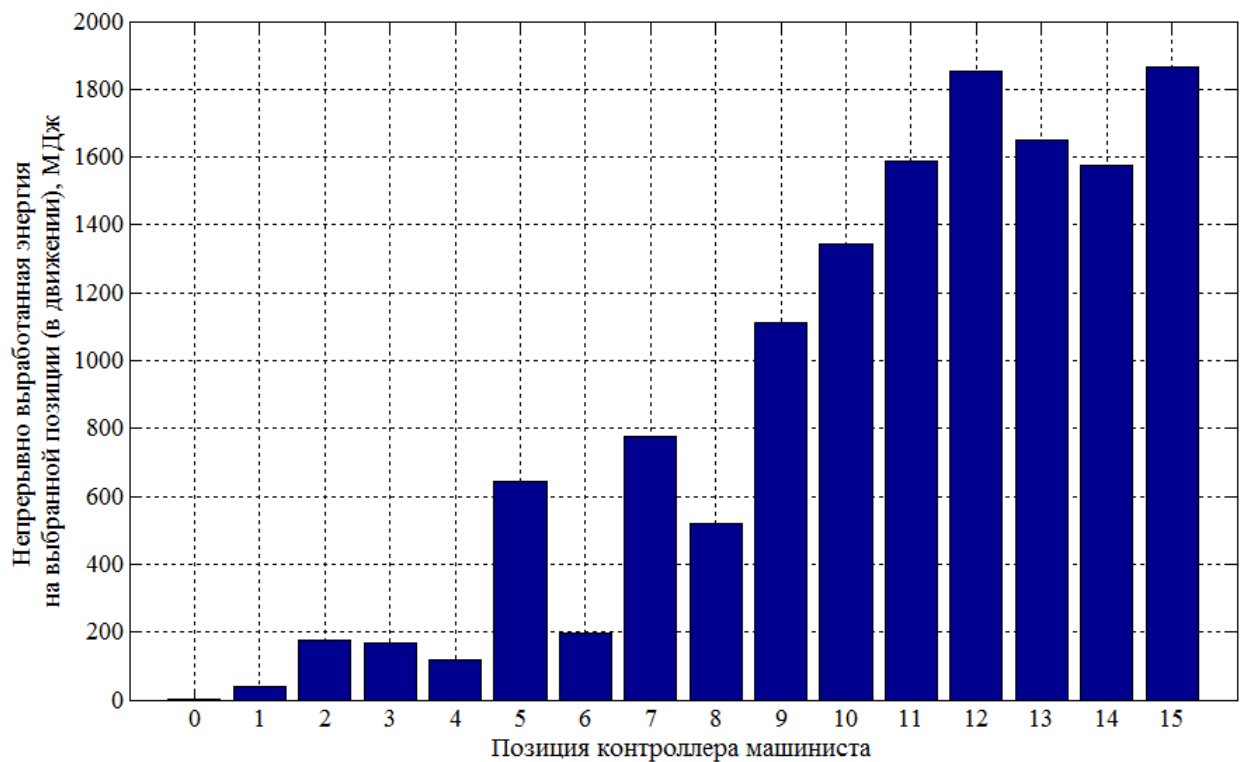


Рисунок 53 – Максимальная непрерывно переданная энергия в звено постоянного тока в зависимости от позиции контроллера машиниста

Максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, что происходит дальнейший набор позиций, представлено на рисунке 54. График изменения позиций контроллера машиниста и скорости для условия максимальной непрерывно выработанной энергии при позициях от первой и выше приведены на рисунках 55 и 56.



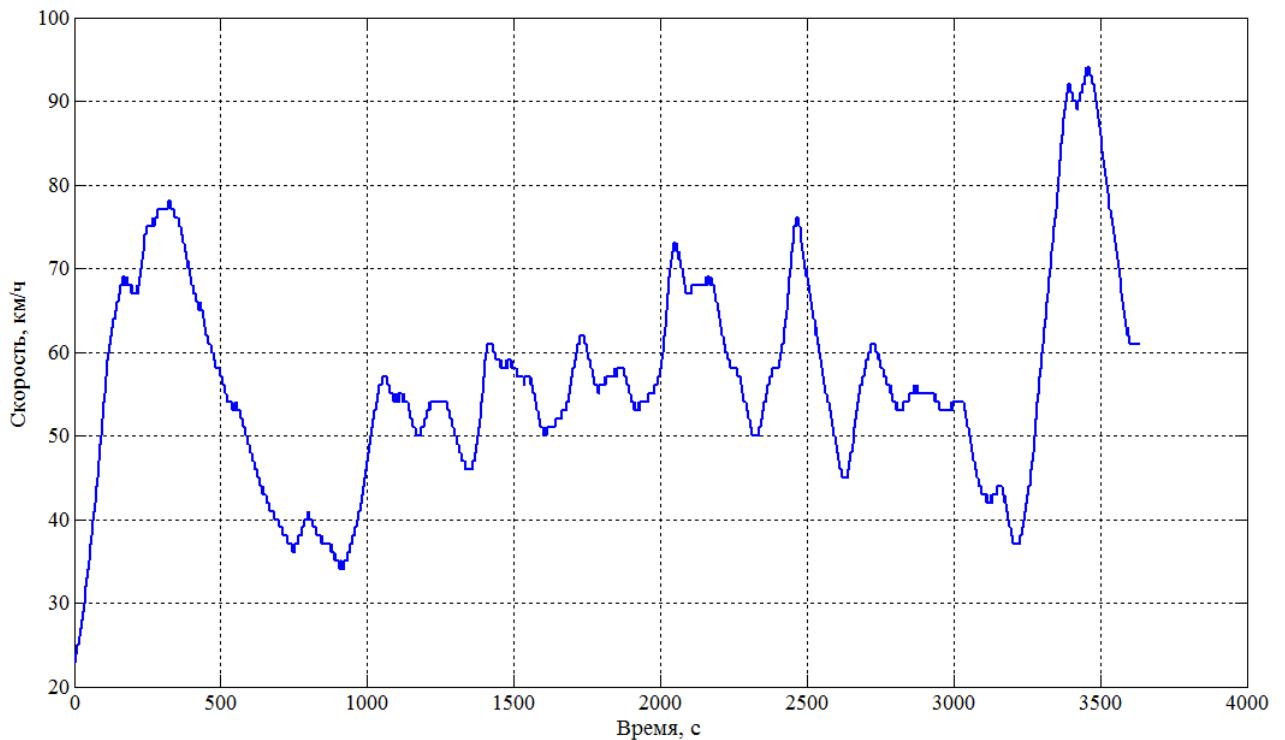


Рисунок 56 – Кривая скорости для временного интервала с наибольшей непрерывно выработанной энергией

Максимальное количество непрерывно выработанной энергии для интервала движения при условии, учета энергии на позициях предшествующих рассматриваемой представлено на рисунке 57.

Для наглядного представления распределения выработанной энергии в зависимости от скорости и позиций контроллера машиниста, определим количество выработанной энергии и построим 3D-поверхность [82], представленную на рисунке 58.

Обработка данных эксплуатации тепловоза позволила получить поле мгновенных значений коэффициента полезного действия тяговых электродвигателей (рисунок 59) в зависимости от мощности ДГУ. Вертикальные скопления точек соответствуют работе на фиксированных позициях контроллера машиниста, кроме этого видно изменение КПД в широком диапазоне, даже для фиксированных позиций, что объясняется гиперболической внешней характеристикой тягового генератора.

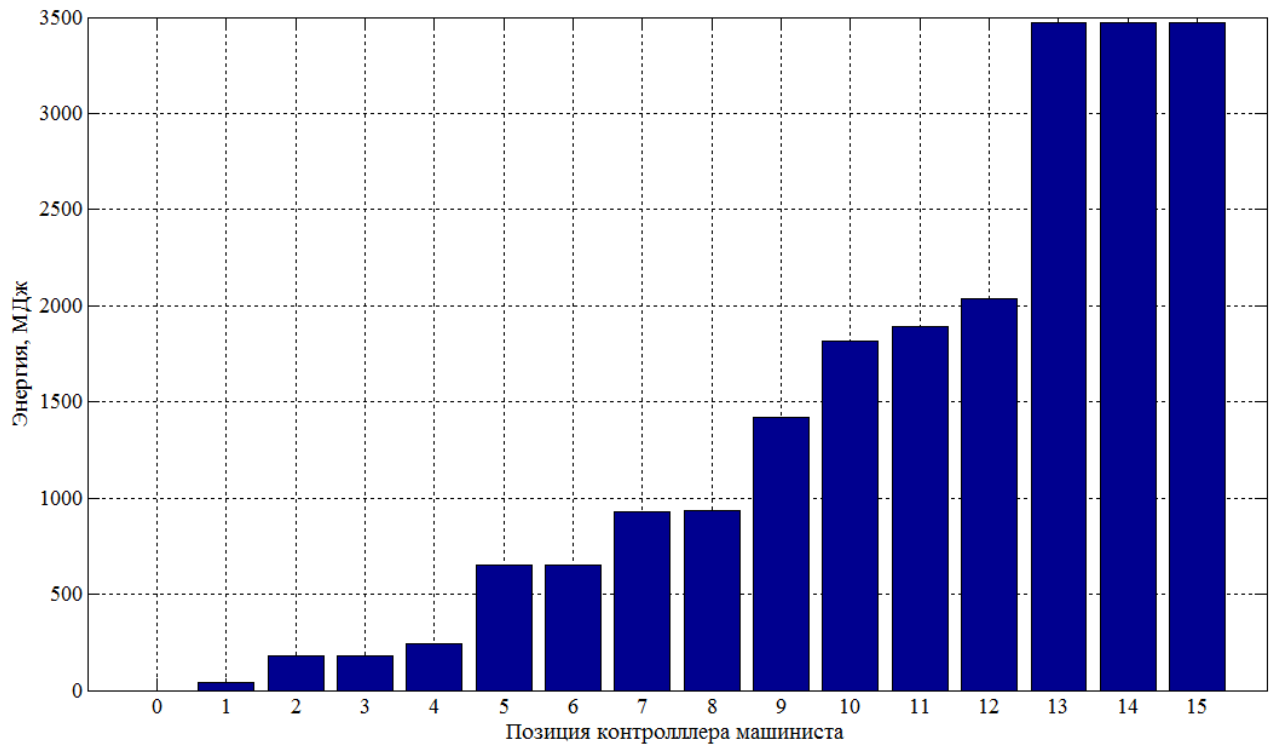


Рисунок 57 – Максимальная, непрерывно переданная, энергия в звено постоянного тока, на позициях не выше выбранной, в зависимости от позиции контроллера машиниста

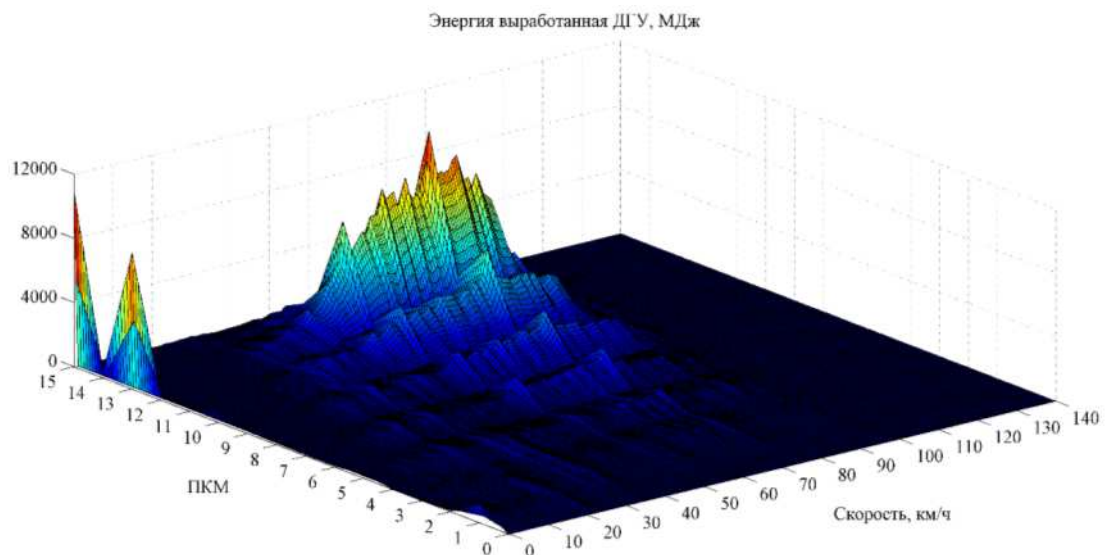


Рисунок 58 – Энергия, выработанная дизель-генераторной установкой и переданная в звено постоянного тока в зависимости от скорости и позиции контроллера машиниста

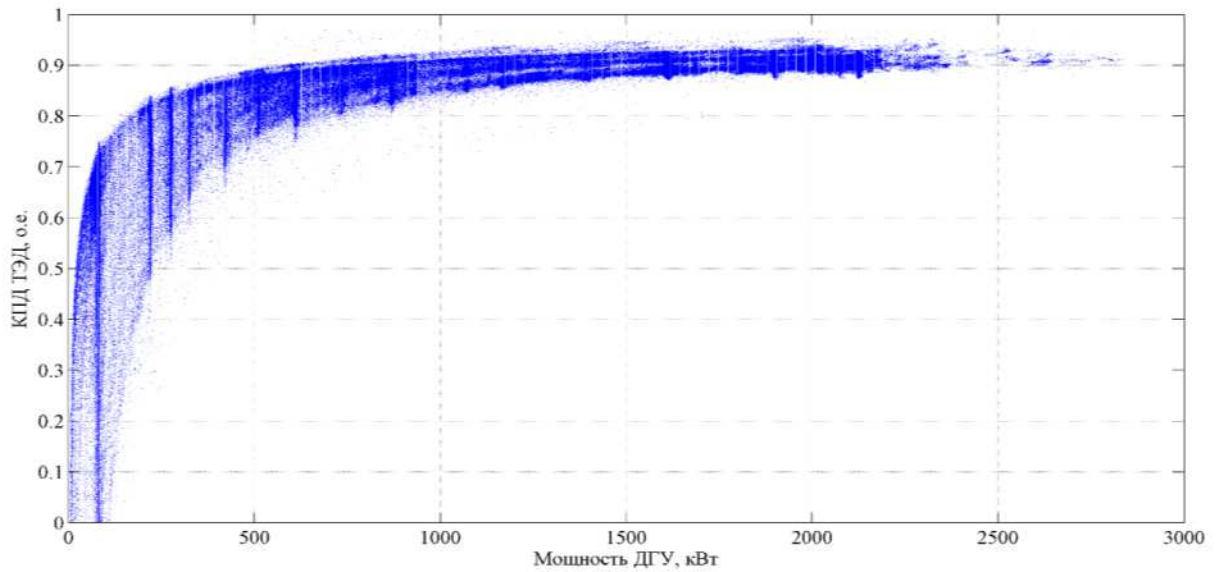


Рисунок 59 – Коэффициент полезного действия ТЭД в зависимости от мощности ДГУ

Значение коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости от позиции контроллера машиниста представлено на рисунке 60.

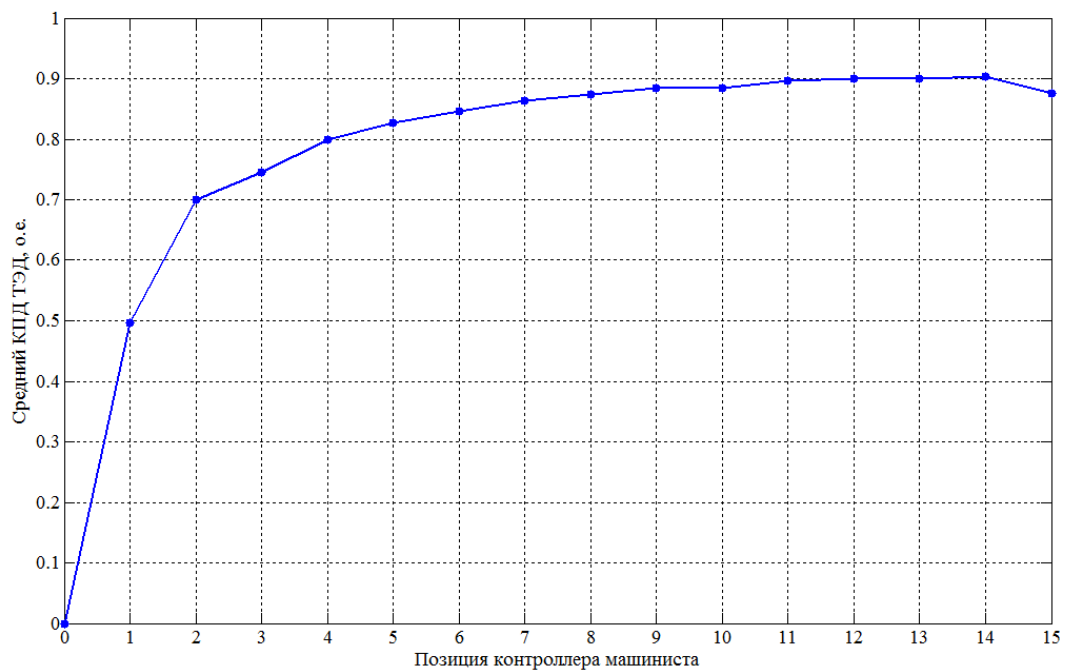


Рисунок 60 – Значение коэффициента полезного действия ТЭД в зависимости позиции контроллера машиниста

Значение коэффициента полезного действия ТЭД за весь рассматриваемый период составило 0,88. Среднее значение мощности одного ТЭД при работе ДГУ на тяговых позициях составило 118,2 кВт. Среднее значение КПИМ тепловоза при работе на тяговых позициях составит 0,24.

## **2.8 Анализ энергетической эффективности эксплуатации маневрового тепловоза ЧМЭЗ**

Тепловоз ЧМЭЗ – маневровый тепловоз с осевой формулой 3о–3о, мощность по дизелю составляет 993 кВт (1350 л.с.) [93]. На тепловозе применена передача мощности постоянного тока (генератор постоянного тока - тяговый двигатель постоянного тока). Электрическая передача постоянного тока характеризуется простотой конструкции, управления, возможностью запуска дизеля от тягового генератора, но при этом наличие коллекторно-щеточного аппарата в тяговом генераторе и тяговых двигателях относят к существенным недостаткам, кроме того достаточно низкое значение коэффициента полезного действия в частичных режимах работы ЭПМ. Соединение тяговых двигателей смешанное – три параллельных ветви, в каждой из которой два последовательно соединенных двигателя. К основному тяговому оборудованию относится [93]:

- дизель K6S310DR;
- тяговый генератор TD-802 мощностью 885 кВт;
- тяговые двигатели TE-006 мощностью 123 кВт.

Дизель K6S310DR – четырехтактный, с вертикальным расположением шести цилиндров [93]. На двигателе применяется газотурбинный наддув с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха. Основные технические характеристики приведены в таблице 15.

Источником электрической энергии является тяговый генератор постоянного тока, потребителем – коллекторные тяговые двигатели, соединенные в последовательно-параллельную схему. Напряжение на каждом ТЭД в два раза ниже, чем на выходе генератора.



Таблица 15 – Основные технические характеристики дизеля K6S310DR

Наименование параметра	Значение
Полная мощность дизеля, кВт	993
Минимально-устойчивая частота вращения, об/мин	350
Мощность дизеля на минимальной частоте вращения, кВт	30 ... 200
Номинальная частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин	750
Удельный расход топлива на полной мощности, г/кВт·ч	227
Удельный расход топлива при 60 % полной мощности, г/кВт·ч	208
Расход топлива холостого хода, не более, кг/мин	0,15
Коэффициент полезного действия при полной мощности, о.е.	0,371

Тяговый генератор постоянного тока TD-802 с независимым возбуждением, двухмашинный агрегат с самовентиляцией, от возбуждителя DT-706-4 мощностью 16,2 кВт и вспомогательного генератора DT-701-4 мощностью 14,4 кВт [93].

Основные технические параметры тягового генератора представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Основные технические параметры тягового генератора

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВт	885
Напряжение, В	565/377
Номинальный ток, А	1565/2350
Номинальная частота вращения, об/мин	750
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	4,18
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,945

На тепловозе применены тяговые электродвигатели ТЕ-006 – четырехполюсные с последовательным возбуждением, принудительной вентиляцией и опорно-осевым подвешиванием [93]. Все шесть ТЭД включены в три параллельные ветви по два электродвигателя последовательно в каждой. Технические характеристики тяговых двигателей приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Основные технические характеристики ТЕ-006

Наименование параметра	Значение
Мощность на валу, кВт	123
Напряжение, В	197/283
Ток продолжительного режима, А	750/522
Частота вращения якоря максимальная, с <sup>-1</sup> об/мин	27,7 (1660)
Момент на валу продолжительного режима, кН·м	3983
Максимальный ток при трогании, А	1100
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	1,0
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,835

Функциональная схема передачи мощности представлена на рисунке 61.

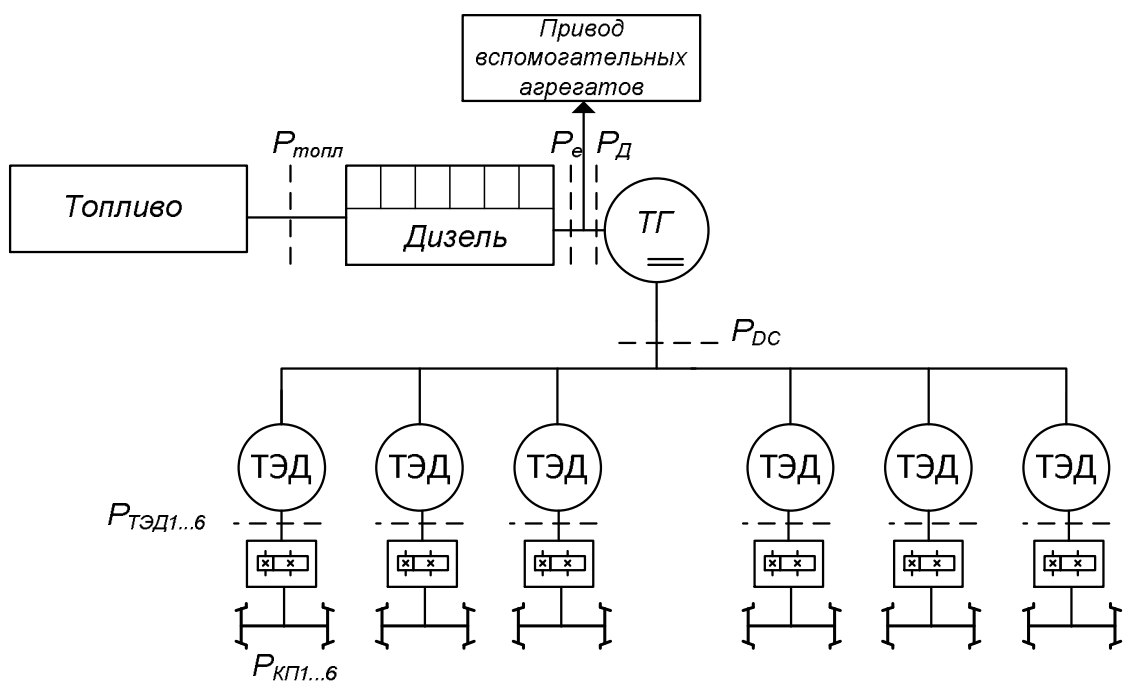


Рисунок 61 – Функциональная схема передачи мощности тепловоза ЧМЭЗ

Тепловозы ЧМЭЗ оборудуются РПРТ (регистратор параметров работы тепловоза), который позволяет контролировать параметры работы тепловоза и анализировать расход топлива [94].

Для анализа времени работы тепловоза ЧМЭЗ, были получены данные с системы регистрации РПРТ случайно отобранного тепловоза. Общее время записанных данных составило 13,5 суток.

С помощью рабочего места для расшифровки данных [95] (рисунок 62) получено, что продолжительное время тепловоз работал на холостом ходу, 68,8 часов дизель был заглушен. Распределение времени работы по позициям контроллера машиниста приведено в таблице 18 и на рисунке 63.

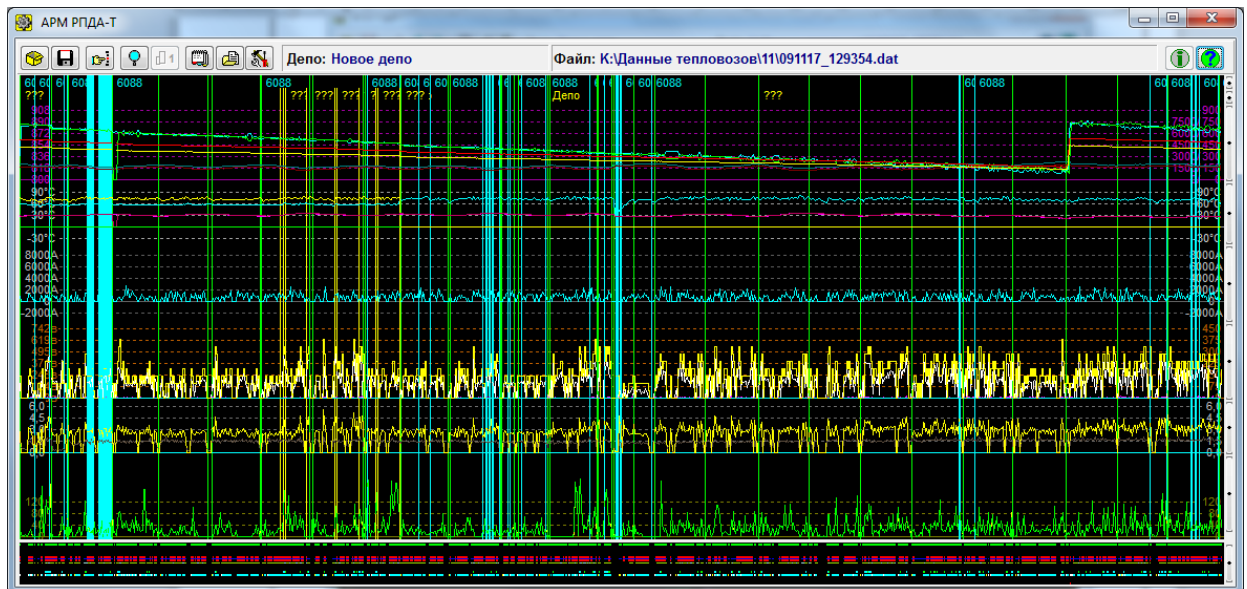


Рисунок 62 – Рабочее окно программы для расшифровки данных

Таблица 18 – Распределение времени работы по позициям КМ

Позиция	0	1	2	3	4	5	6	7	8	Всего
Время, мин	8411	1103,4	1304,1	819,2	442,4	309	154,8	22,4	0,6	12566,9
%	66,93	8,78	10,38	6,52	3,52	2,46	1,23	0,18	0,001	100

Простой с заглушенным дизелем составил 4316 мин.

Из приведенных данных видно, что 67 % времени тепловоз работал на 0 позиции машиниста.

В соответствии от 2 апреля 2012 г. №639р, с распоряжением «О внесении изменений в Методику планирования и нормирования расхода дизельного топлива на техническое обслуживание и ремонт тягового подвижного состава» норма расхода топлива на холостом ходу составляет 9 кг/ч.

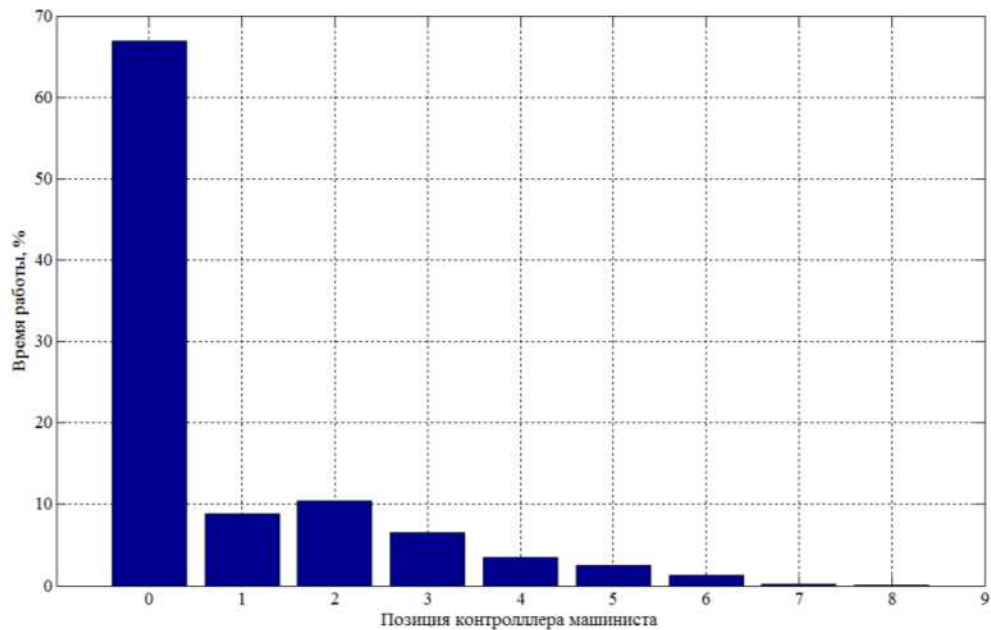


Рисунок 63 – Время работы тепловоза (по позициям)

Для анализа эффективности работы тепловоза, воспользуемся отчетами, которые доступны в программе АРМ РПДА-Т.

Увеличенный фрагмент смены работы тепловоза представлен на рисунке 64.

На рисунке 64 видно, что система РПРТ, регистрирует большое количество параметров, которые позволяют оценить энергоэффективность работы тепловоза. Кроме основных кнопок управления, в правой части окна программы имеются узкие вертикальные кнопки, каждая из которых влияет на отображение того параметра, напротив которого они находятся. Подсказки у этих кнопок показывают, какой режим отображения будет включен при нажатии на кнопку. В нижней части окна просмотра данных расположены дополнительные табличные данные. Табличные данные относятся к положению курсора на графике. При перемещении курсора соответственно меняются данные в таблице.



Рисунок 64 – Фрагмент смены работы тепловоза

На рисунке 64 представлены: уровень топлива в баке, плотность топлива, температура топлива, ток тягового генератора, напряжения тягового генератора, частота вращения дизеля, скорость тепловоза. Приведенные данные анализируются для каждой смены работы тепловоза. Основными параметрами, оценивающими режимы работы маневрового тепловоза являются: время работы на основных режимах, таких как: общее, в движении, на стоянке, с остановленным дизелем; пробег локомотива за смену; средняя техническая скорость; выработанная энергия дизель-генераторной установкой; расход дизельного топлива. Проведенный анализ данных для смен сведен в таблицу 19.

Таблица 19 – Сводная таблица основных параметров

Номер смены	Работа тепловоза							Расход топлива, кг	Удельный расход	
	Время, ч				Пробег, км	Ср.тех. скор., км/ч	Выраб. энергия, кВт*ч		кг/ 10км	кг/ час
	общее	в движен.	на стоянке	останов. дизеля						
1	11,49	3,29	8,2	7,31	76,826	19,245	182,25	253	32,93	22,02
2	10,22	3,26	6,96	2,41	22,29	6,83	157,25	142	63,69	13,9
3	10,72	5,77	4,95	4,22	72,69	12,59	189,75	102	14,03	9,51
4	11,49	3,48	8,01	2,12	13,87	3,98	152,75	122	87,95	10,62
5	11,42	4,09	7,33	0,84	18	4,39	105,25	116	64,43	10,16
6	11,38	5,08	6,31	1,53	55,59	10,95	225	144	25,9	12,65
7	11,77	4,71	7,06	4,04	62,36	13,24	264,5	177	28,39	15,04
8	0,61	0,16	0,45	0,61	0,633	3,93				
9	8,12	4,69	3,43	2,09	52,06	11,16	171,25	1563	300,21	192,47
10	11,15	3,57	7,58	2,49	20,02	5,6	126,75	100	49,96	8,97
11	11,72	4,49	7,23	1,49	28,26	6,29	165,75	140	49,55	11,94
12	3,02	1,08	1,94	0,99	6,762	6,26	28,75	25	36,97	8,28
13	0,98	0,26	0,72	0,64	1,221	4,71	11,5			
14	6,91	3,01	3,91	1,81	16,78	5,58	94,75	64	38,14	9,26
15	11,04	5,21	5,83	1,46	67,93	13,07	261	149	21,94	13,49
16	3,35	1,39	1,95	1,48	47,45	34,03	120	38	8,01	11,35
17	4,55	0,75	3,8	2,15	1,398	1,85	6	24		5,27
18	5,08	1,19	3,89	1,63	1,189	0,99	12	34		6,69
19	11,7	4,57	7,13	4,15	40,38	8,84	168,5	109	27	9,31
20	12,53	4,53	8	4,04	52,85	11,65	232,75	126	23,84	10,06
21	11,61	5,51	6,1	3,09	57,39	10,4	220	130	22,65	11,19
22	12,12	2,96	9,15	4,97	33,17	11,19	138	90	27,13	7,43
23	12,05	5,5	6,55	2,88	72,65	13,2	275,5	147	20,23	12,2
24	12	5,39	6,61	0,4	47,15	8,74	212	149	31,6	12,42
25	11,65	4,92	6,73	1,83	59,51	12,1	266	142	23,86	12,19
26	12,51	4,99	7,53	3,61	41,75	8,37	117	104	24,91	8,31
27	11,96	5,14	6,82	1,16	56,31	10,95	208,5	173	30,72	14,46
28	11,73	4,53	7,2	2,99	71,93	15,87	282,25	143	19,88	12,19
29	11,9	6,31	5,59	0,21	53,49	8,47	250,5	159	29,73	13,36
30	0,91	0,52	0,4	0,18	3,404	6,58	6			
<b>ИТОГО:</b>	<b>277,71</b>	<b>110,36</b>	<b>167,35</b>	<b>68,81</b>	<b>1155</b>	<b>10,47</b>	<b>4651,5</b>	<b>4412</b>	<b>38,19</b>	<b>15,89</b>

В таблице 20 приведена мощность дизель-генераторной установки на позициях, а также время работы на каждой позиции в соответствии с таблицей 18.

Таблица 20 – Средняя мощность дизель-генераторной установки тепловоза ЧМЭЗ

Позиция	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Мощность, кВт	0	30	89	176	272	393	525	696	837
Средняя мощность факт. кВт	0	10,2	39,9	73	106,8	174	306	449	721
Время работы, %	66,93	8,78	10,38	6,52	3,52	2,46	1,23	0,18	0,001

Среднее значение КПД ДГУ тепловоза по данным приведенным в отчете составляет

$$\eta = \frac{3600 \cdot A_{\text{ДГУ}}^{\text{итого}}}{E^{\text{итого}} \cdot Q_{\text{H}}}, \quad (98)$$

где  $A_{\text{ДГУ}}^{\text{итого}}$  – суммарная энергия, выработанная дизель-генераторной установкой;

$E^{\text{итого}}$  – суммарный расход топлива;

$Q_{\text{H}}$  – низшая теплота сгорания топлива.

$$\eta = \frac{3600 \cdot 4651,5}{4412 \cdot 42700} = 0,089.$$

Проведем анализ данных, полученных с регистратора параметров тепловоза, общее количество измерений 1 011 436. Поле рабочих точек тягового генератора показано на рисунке 65.

Среднее значение мощности дизеля при работе на тяговых позициях составило 67,93 кВт (КИМ 8,1 %), а с учетом работы на холостом ходу 22,54 кВт (КИМ 2,7 %). Коэффициент полезного действия тягового генератора (рисунок 66) при работе на тяговых позициях составил 0,75, с учетом работы на холостом ходу 0,61.

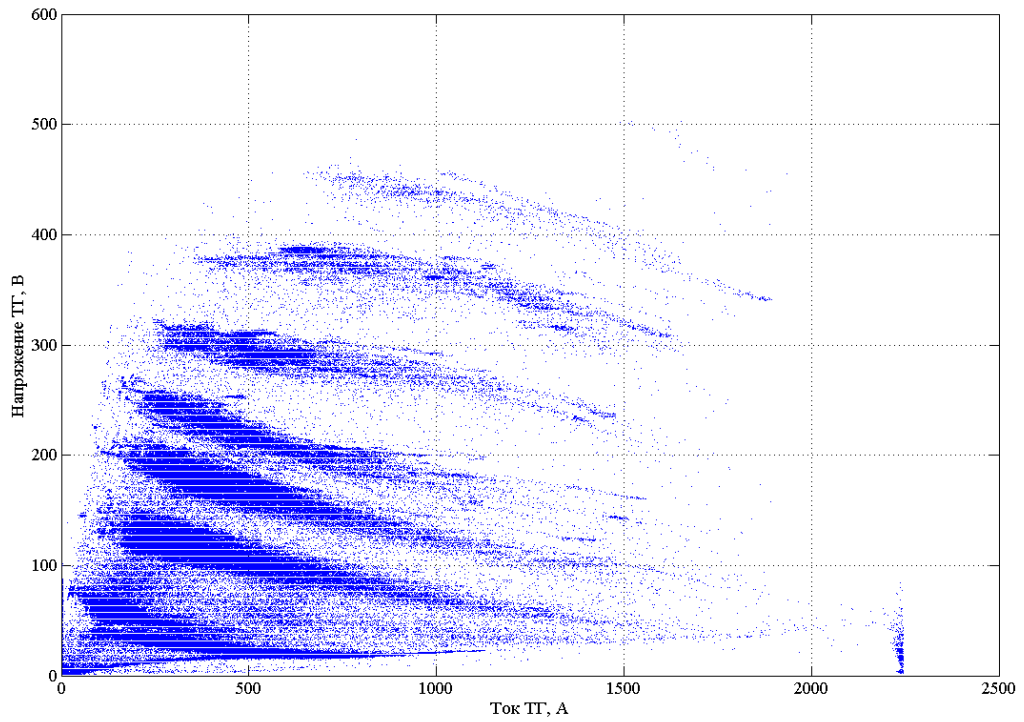


Рисунок 65 – Поле рабочих точек тягового генератора тепловоза ЧМЭЗ

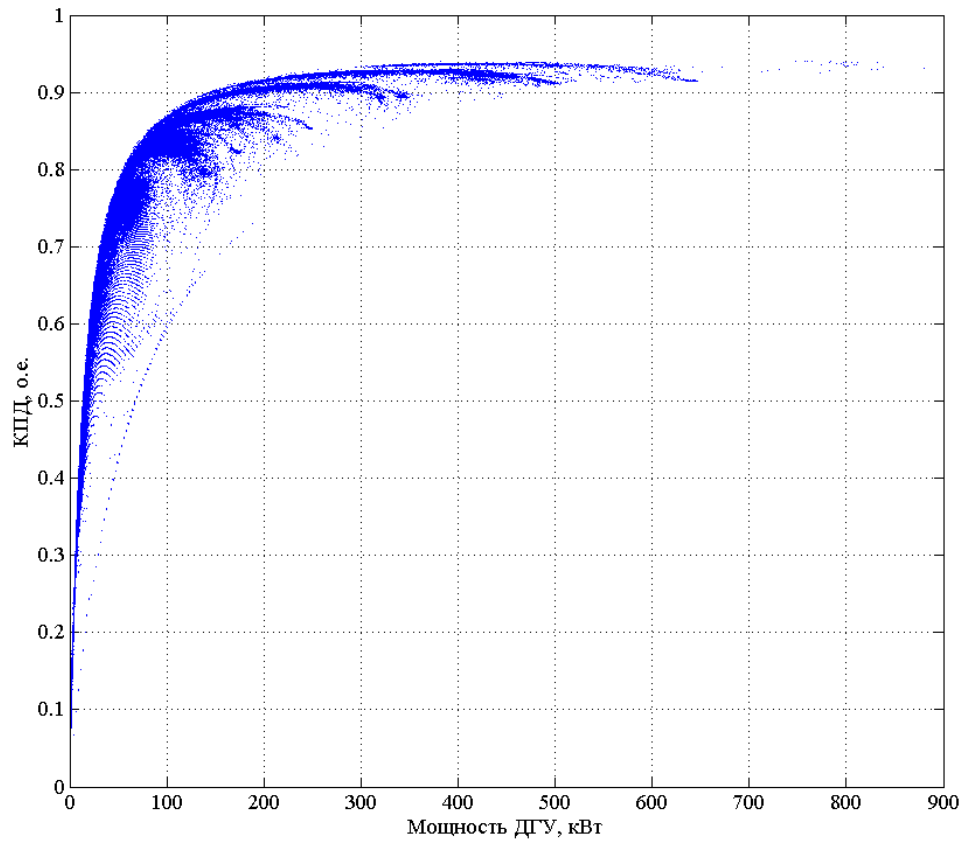


Рисунок 66 – Поле коэффициента полезного действия ТГ в зависимости от мощности ДГУ



Построим зависимость мощности дизель-генераторной установки от времени (рисунки 67 – 69).

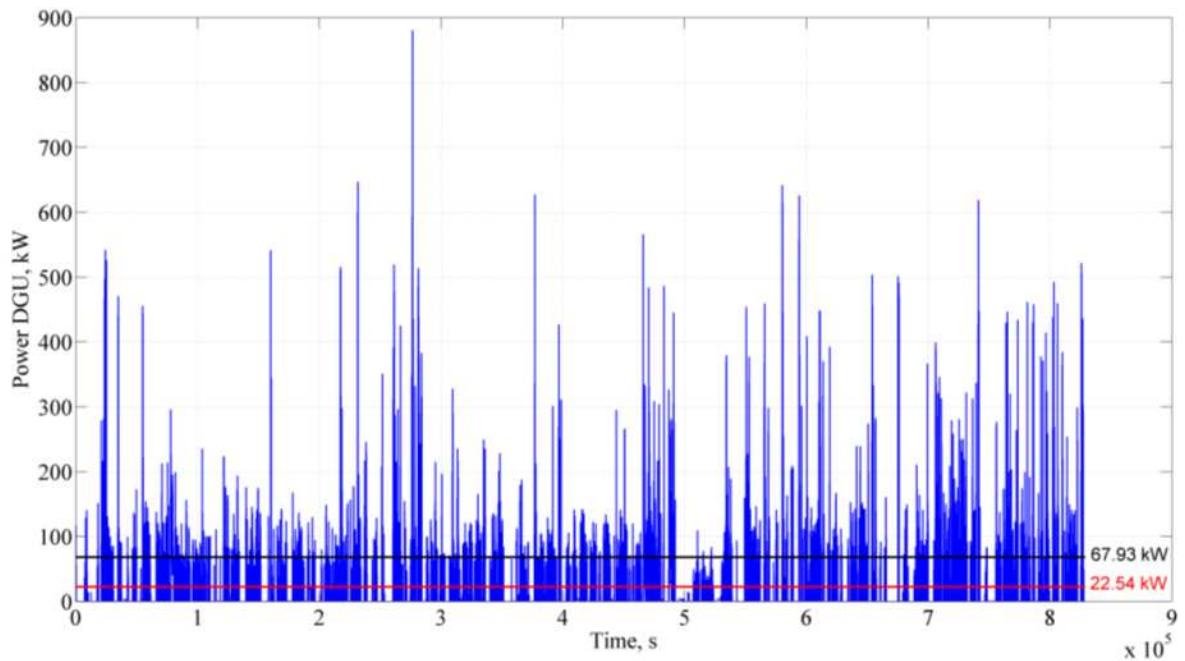


Рисунок 67 – Зависимость мощности дизель-генераторной установки

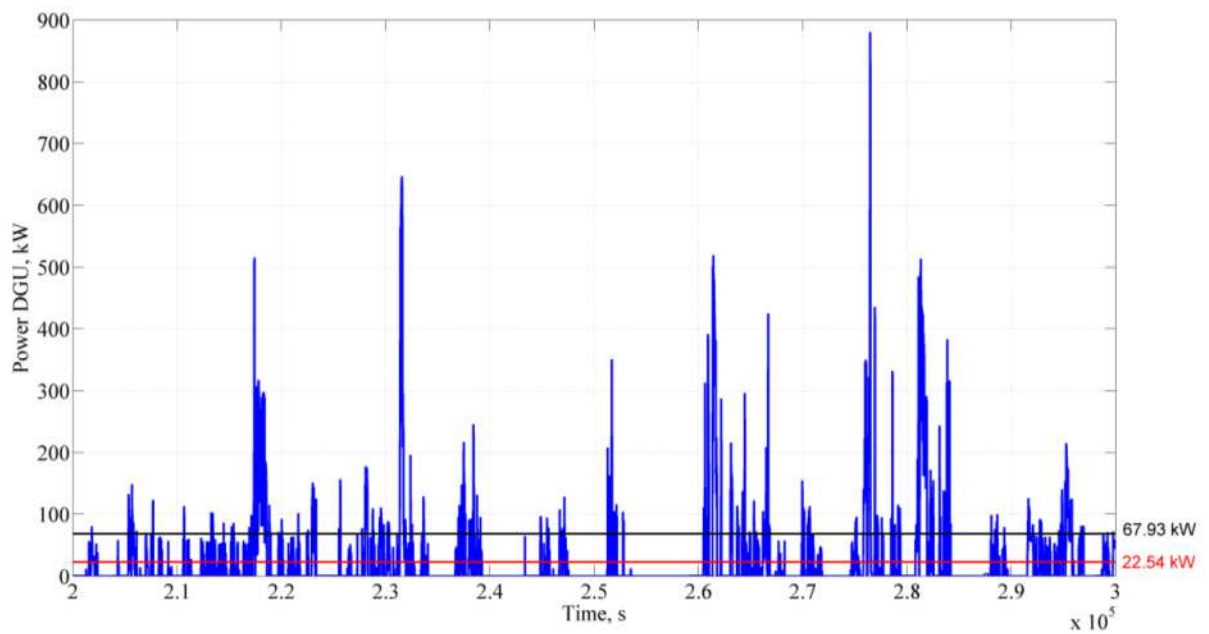


Рисунок 68 – Зависимость мощности дизель-генераторной установки  
(увеличенный фрагмент)

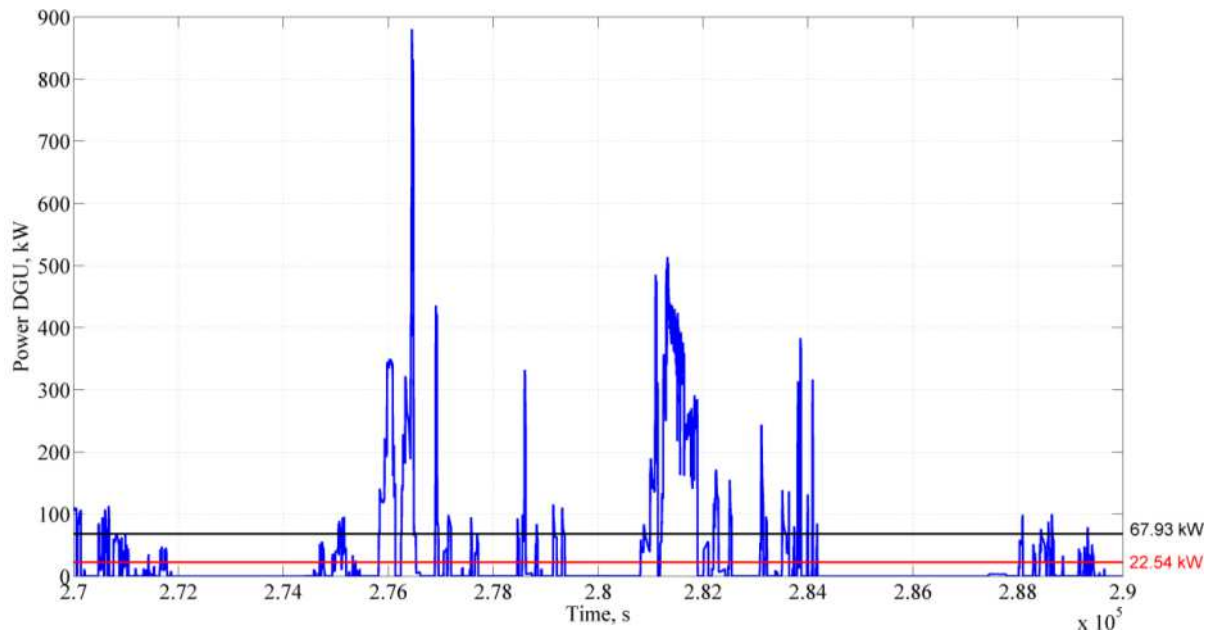


Рисунок 69 – Зависимость мощности дизель-генераторной установки (увеличенный фрагмент)

Обработка данных эксплуатации тепловоза позволила получить поле мгновенных значений коэффициента полезного действия тяговых электродвигателей в зависимости от мощности ТГ (рисунок 70) и от мощности на валу ТЭД (рисунок 71).

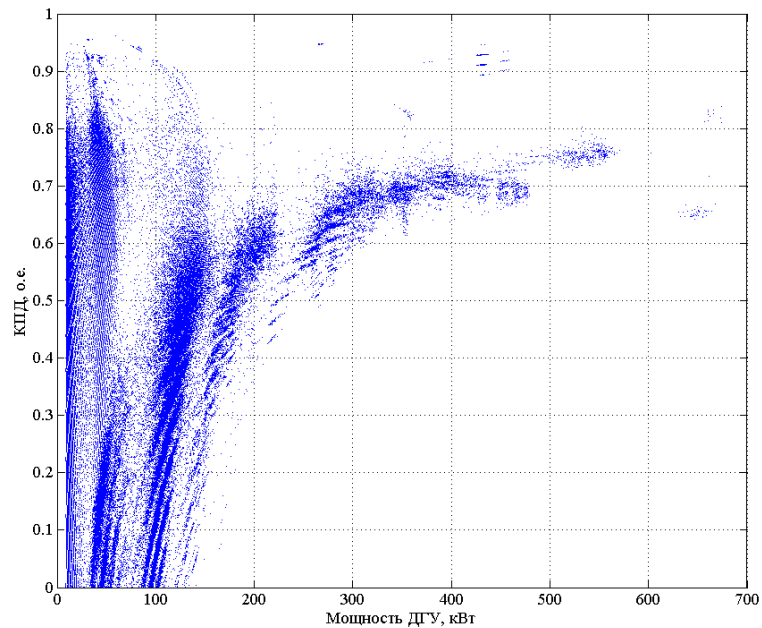


Рисунок 70 – Коэффициент полезного действия ТЭД в зависимости от мощности ДГУ

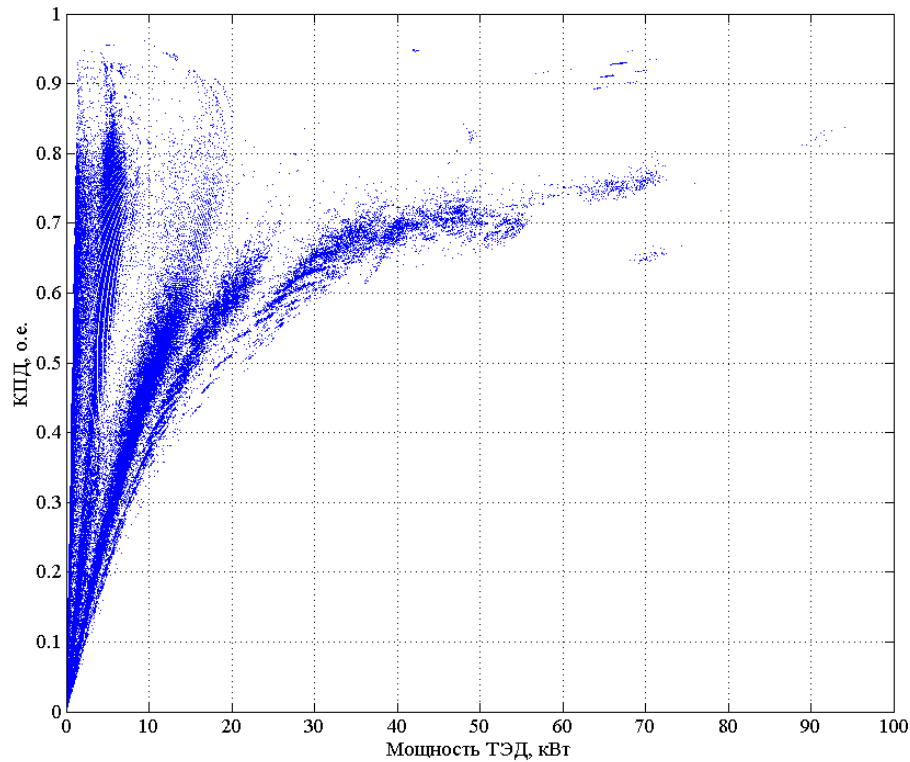


Рисунок 71 – Коэффициент полезного действия ТЭД в зависимости от мощности на валу ТЭД

Скопления рабочих точек соответствуют работе на фиксированных позициях контроллера машиниста, кроме этого видно изменение КПД в широком диапазоне, даже для фиксированных позиций, что объясняется гиперболической внешней характеристикой тягового генератора и условиями работы маневрового тепловоза в зоне низких скоростей в основном на позициях не выше третьей.

Коэффициент полезного действия ТЭД за весь рассматриваемый период составил 0,36. Среднее значение мощности одного ТЭД при работе ДГУ на тяговых позициях составило 3,18 кВт.

Для определения эксплуатационного коэффициента полезного действия необходимо знать расход топлива. Используя данные, полученные с регистратора маневрового тепловоза, построим на рисунке 72 зависимость количества дизельного топлива на тепловозе.

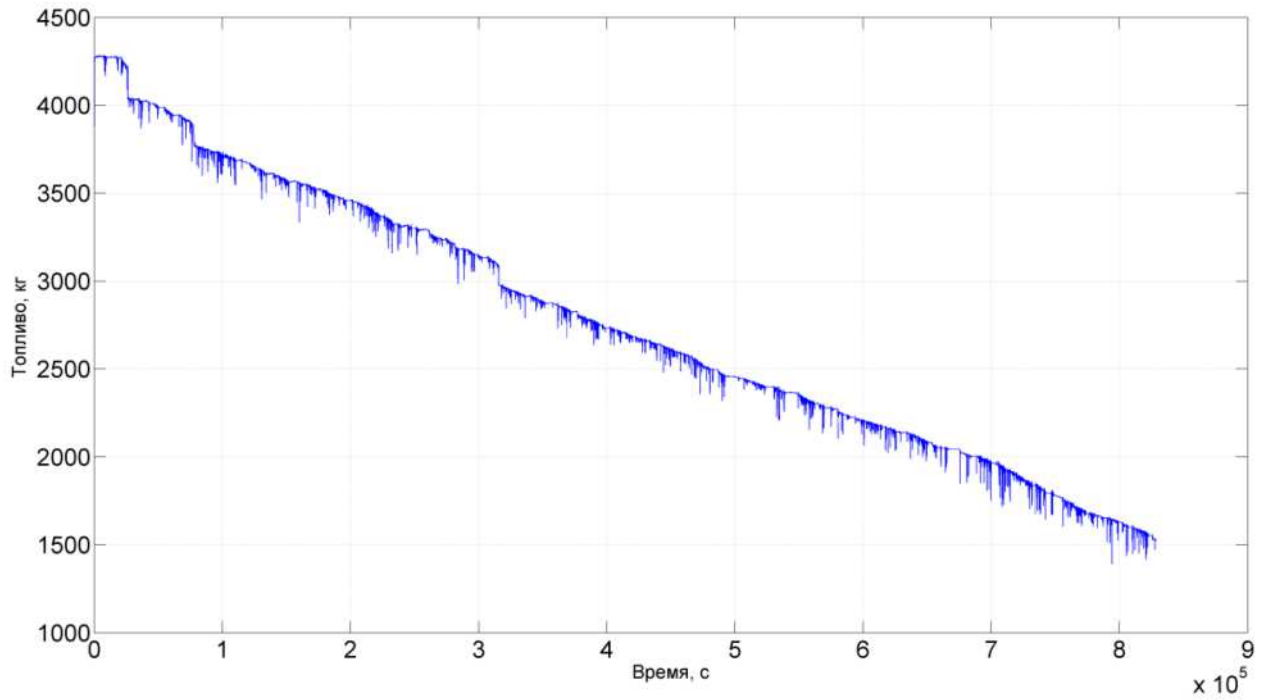


Рисунок 72 – Количество дизельного топлива на тепловозе

На рисунке 73, приведены результаты расчета энергии выработанной тяговым генератором (синяя кривая) одновременно совместив с энергией, израсходованного топлива.

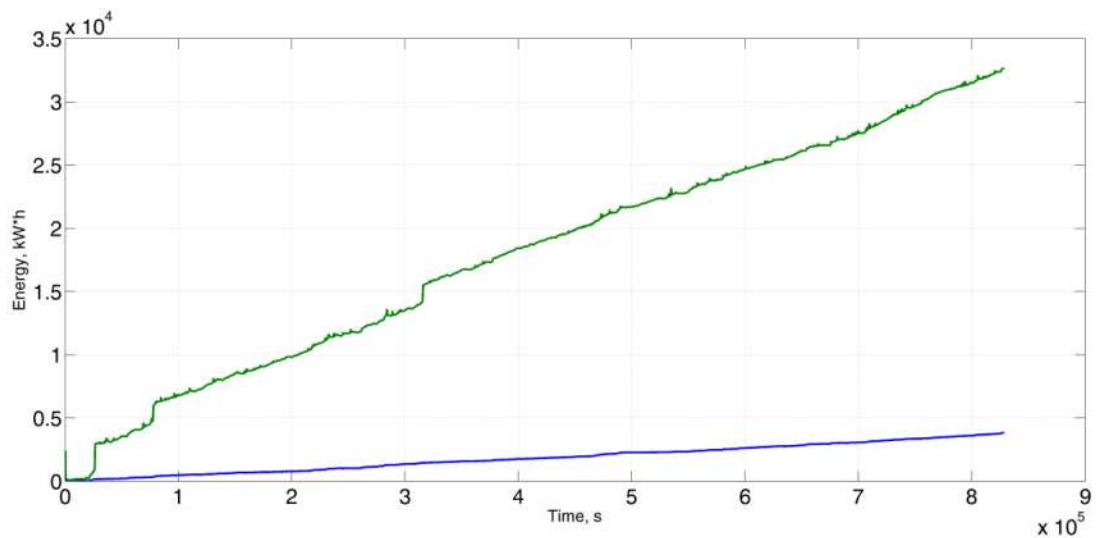


Рисунок 73 – Затраченная энергия топлива и энергия ДГУ

Рассчитаем коэффициент полезного действия на основе данных, представленных на рисунке 73. Результаты расчета приведем в графическом виде на рисунке 74.

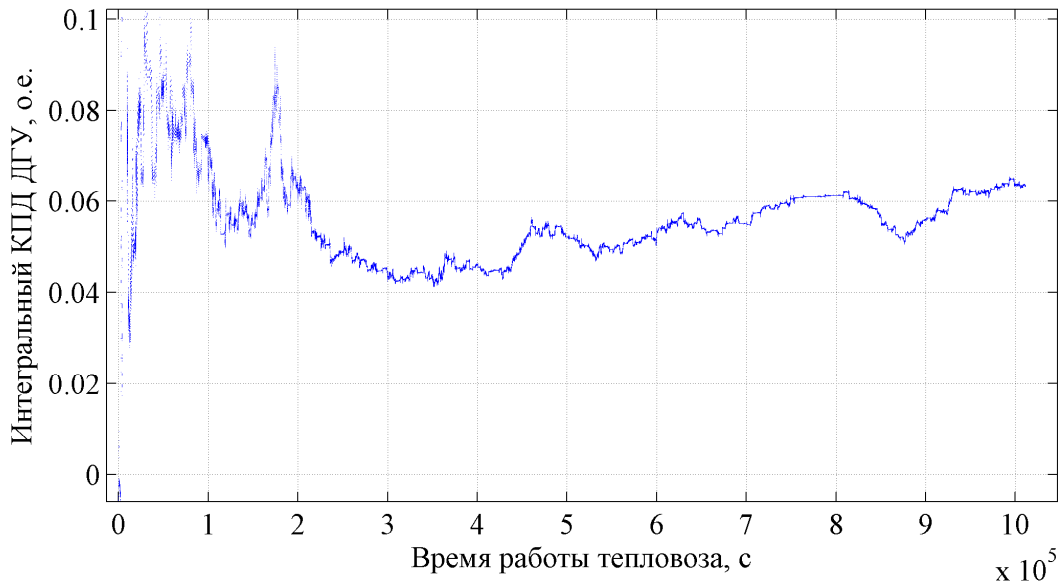


Рисунок 74 – Коэффициент полезного действия ДГУ

Полученные данные свидетельствуют о крайне низком качестве использовании мощности маневровых тепловозов. При длительном простое тепловоза, остановка дизеля позволяет снизить удельный расход топлива. При этом увеличение времени непосредственной работы маневрового тепловоза, что также способствует снижению удельного расхода топлива. Потенциал увеличения использования мощности маневровых локомотивов большой.

## 2.9 Анализ энергетической эффективности эксплуатации грузового тепловоза 2ТЭ25А

Тепловоз 2ТЭ25А – грузовой тепловоз с осевой формулой  $2 \times (3o-3o)$ , мощность по дизелю составляет  $2 \times 2500$  кВт ( $2 \times 3400$  л.с.). На тепловозе применена передача мощности переменного тока (синхронный тяговый генератор – асинхронный тяговый двигатель), с неуправляемой выпрямительной установкой и

управляемыми инверторами напряжения для каждого тягового двигателя, что позволяет оперативно регулировать силу тяги на каждой колесной паре. Тепловоз оборудован микропроцессорной системой управления тепловозом (МПСУ-ТП), которая обеспечивает регистрацию параметров работы основного оборудования тепловоза. К основному тяговому оборудованию относятся:

- дизель 12ЧН 26/26 (Д49);
- агрегат синхронный тяговый АСТГ2-2800/400-1000;
- тяговый статический преобразователь частоты М-ТЗТП-Т-1-У2;
- асинхронные тяговые двигатели ДАТ-350-6.

Дизель и агрегат синхронный тяговый объединены в дизель-генераторную установку 21-26ДГ- 01 на общей поддизельной раме.

Дизель 12ЧН26/26 – четырехтактный, с V-образным расположением двенадцати цилиндров. На двигателе применяется газотурбинный наддув с охлаждением наддувочного воздуха перед подачей в цилиндры двигателя. Основные технические характеристики приведены в таблице 21.

На тепловозе 2ТЭ25А применена электрическая передача мощности переменного-переменного тока. Источником электрической энергии является синхронный тяговый генератор, потребителями – асинхронные тяговые двигатели, питаемые от управляемых инверторов напряжения, что позволяет добиться плавного регулирования силы тяги в случае возникновения боксования или юза.

Таблица 21 – Основные технические характеристики дизеля тепловоза 2ТЭ25А

Наименование параметра	Значение
Полная мощность дизеля, кВт	2500
Минимально-устойчивая частота вращения, об/мин	350
Мощность дизеля на минимальной частоте вращения, кВт	30 ... 200
Номинальная частота вращения коленчатого вала дизеля, об/мин	1000
Удельный расход топлива на полной мощности, г/кВт·ч	204,8
Удельный расход топлива при 60 % полной мощности, г/кВт·ч	214,2
Расход топлива при минимально устойчивой частоте вращения холостого хода, кг/мин	0,183
Коэффициент полезного действия при полной мощности, о.е.	0,412

Тяговый агрегат представляет собой, скомпонованные в одном корпусе, тяговый генератор ГС-501А и вспомогательной синхронный трехфазный генератор. Тяговый синхронный генератор имеет независимое возбуждение от управляемого тиристорного преобразователя типа В-ТПЕ-220-220-100-У2 мощностью 20 кВт и коэффициентом полезного действия 0,98. Основные технические параметры тягового генератора представлены в таблице 22.

Таблица 22 – Основные технические параметры тягового генератора тепловоза 2ТЭ25А

Наименование параметра	Значение
Мощность, кВт	2300
Линейное напряжение, В	1450
Ток фазный, А	2×498
Номинальная частота вращения, об/мин	1000
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	4
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,955

Тяговый статический преобразователь частоты М-ТЗТП-Т-1-У2 (рисунок 75) состоит из выпрямительной установки, выполненной по схеме последовательного соединения двух трехфазных выпрямителей, питание каждого осуществляется своей трехфазной статорной обмотки тягового генератора и 3 автономных инверторов напряжения собранных на IGBT модулях, которые состоят из шести силовых модулей и входного фильтрового конденсатора и чопперного модуля для реализации электрического реостатного торможения. На одной секции тепловоза установлено два статических преобразователя, каждый для питания трех двигателей одной тележки.

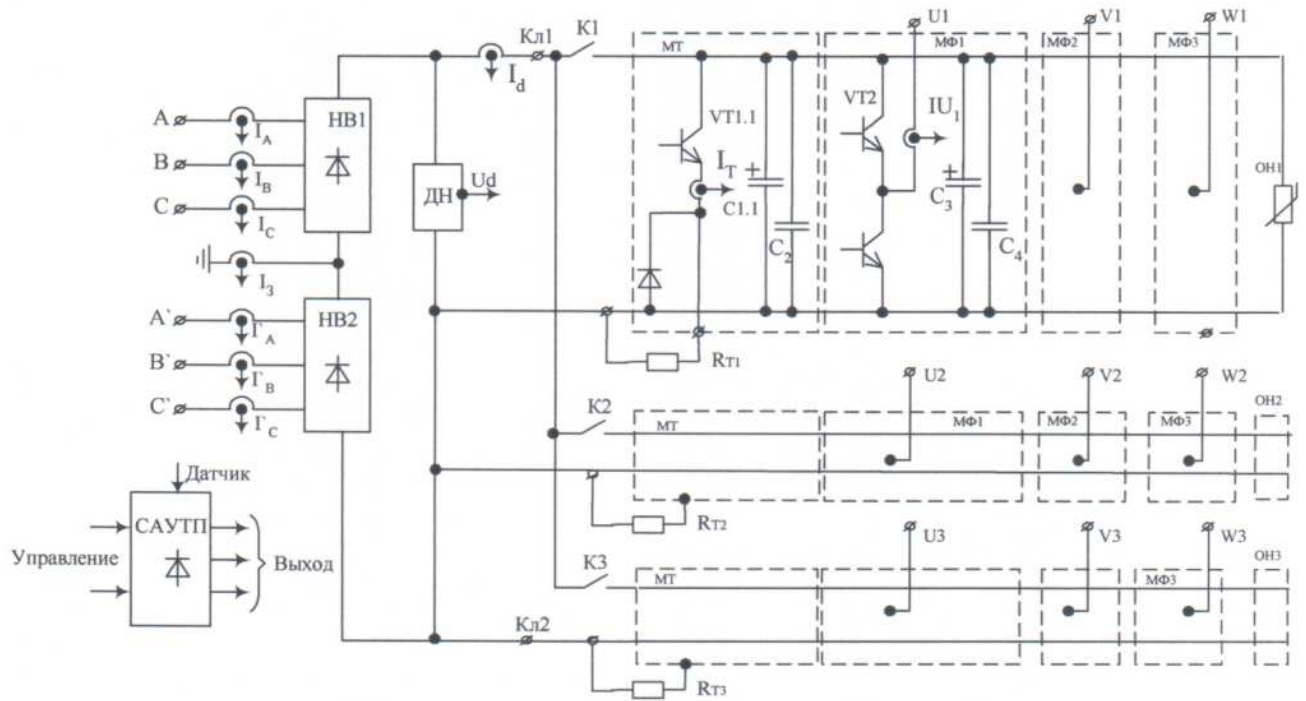


Рисунок 75 – Схема электрическая принципиальная силовой части статического преобразователя

Основные характеристики приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Основные технические характеристики статического тягового преобразователя тепловоза 2ТЭ25А

Наименование параметра	Значение
Число фаз на входе/выходе	1×3/3×3
Номинальная выходная мощность, кВт	3×370
Действующее значение входного напряжения, В	1450
Диапазон входного линейного напряжения, В	360 ... 1460
Номинальное действующее значение выходного тока, А	314
Номинальное действующее значение выходного напряжения, В	800
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,98

На тепловозе применяются асинхронные тяговые двигатели с короткозамкнутым ротором ДАТ-350-6, основные характеристики приведены в таблице 24.



Таблица 24 – Основные технические характеристики тягового двигателя ДАТ-350-6

Наименование параметра	Значение
Мощность на валу, кВт	350
Максимальное действующее значение линейного напряжения, В	1410
Действующее значение линейного напряжения в точке выхода на полную мощность дизель-генератора, В	750
Действующее значение тока в точке выхода тягового генератора на полную мощность, А	420
Частота вращения якоря максимальная, с <sup>-1</sup> об/мин	38,3 (2300)
Момент на валу, кН·м	9150
Действующее значение тока при трогании, А	470
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /с	1,2
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,923

Для управления системами тепловоза применяется многофункциональная микропроцессорная система управления (МПСУ) верхнего уровня, которая формирует задание управляющих воздействий на систему автоматического регулирования напряжения тягового генератора и система автоматического управления тяговым преобразователем (САУТП), которая результатам обработки сигналов от датчиков, формирует управляющие импульсы для управления IGBT-транзисторами в соответствии с заданным законом управления. Функциональная схема передачи мощности представлена на рисунке 76.

МПСУ, аналогично другим системам, регистрирует, анализирует и производит запись, хранение и накопление информации, поступающей с датчиков, на энергонезависимый накопитель с целью дальнейшей диагностики оборудования тепловоза. Записанная информация МПСУ расшифровывается при помощи программного обеспечения «Осциллограф» или «ProViever», что позволяет проводить более детальный анализ эксплуатации тепловоза.

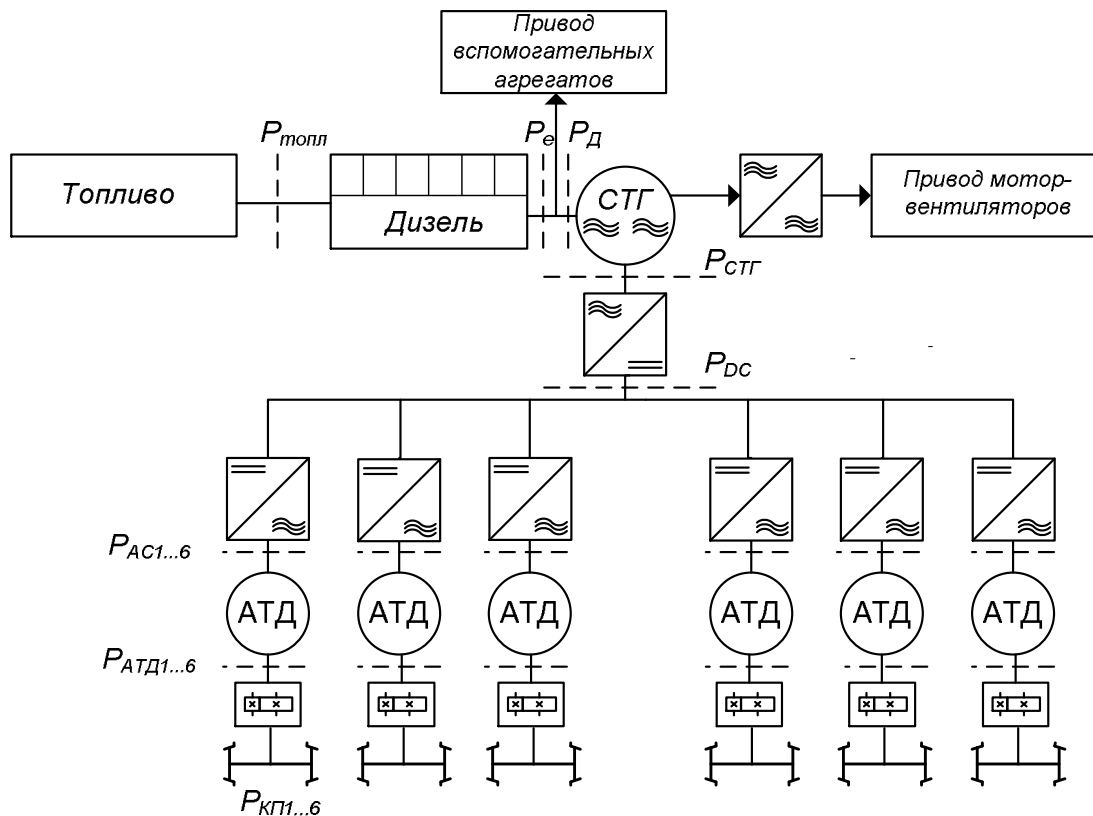


Рисунок 76 – Функциональная схема передачи мощности тепловоза 2ТЭ25А

Рассмотрим обобщённую картину эксплуатации выбранного тепловоза 2ТЭ25А на сети железных дорог. Проанализируем все полученные данные эксплуатации для случайно отобранного тепловоза 2ТЭ25А, общее число измерений параметров составило 2 788 761 шт, что составляет порядка 32 суток работы тепловоза.

На рисунке 77 показано распределение времени работы тепловоза 2ТЭ25А по позициям контроллера машиниста за рассматриваемый период. Так как тепловоз грузовой магистральный, то рассматривалось только время движения тепловоза, которое составило 342 ч. Техническая скорость составила 36,52 км/ч. (средне-квадратичная скорость составила 40,04 км/ч). На 15 позиции тепловоз работал 13583 с, что составило 1,1 % от общего времени движения, на 14 позиции 82897 с – 6,72 %.

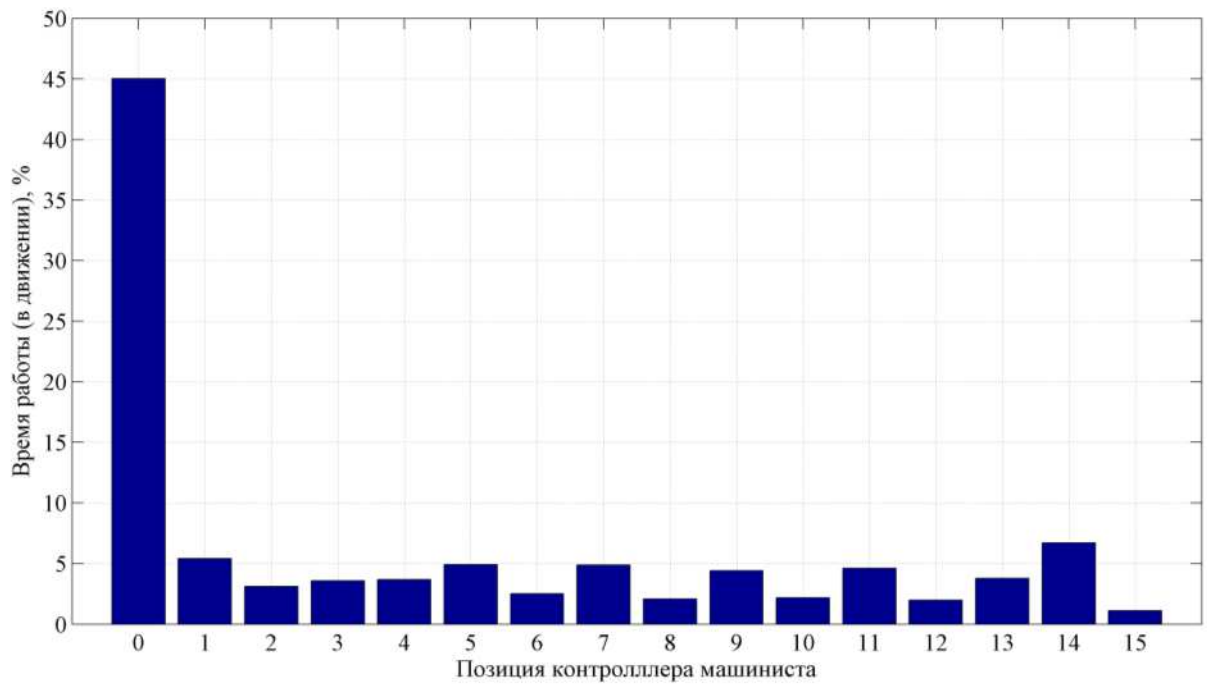


Рисунок 77 – Распределение времени работы тепловоза 2ТЭ25А по позициям контроллера машиниста

Для оценки максимальной длительности работы ДГУ на каждой позиции контроллера машиниста, проведен анализ данных и по результатам построена гистограмма, показанная на рисунке 78. Видим, что за время эксплуатации, максимальное непрерывное время работы на тяговой позиции (3417 с) приходится на 14 позицию контроллера машиниста, при этом на 13 и 15 позиции тепловоз работал непрерывно более 2300 с. На остальных тяговых позициях контроллера машиниста непрерывное время составило не более 1550 с. Максимальное время непрерывной работы на холостом ходу в движении составило 7325 с, что составляет 2 ч 2 мин.

Определим время работы ДГУ по позициям контроллера машиниста при условии, что возможно был продолжен дальнейший набор позиций контроллера машиниста, тем самым можно определить максимальное непрерывное время работы тепловоза в движении в зависимости от позиции контроллера машиниста. Результат расчетов приведен на гистограмме на рисунке 79.

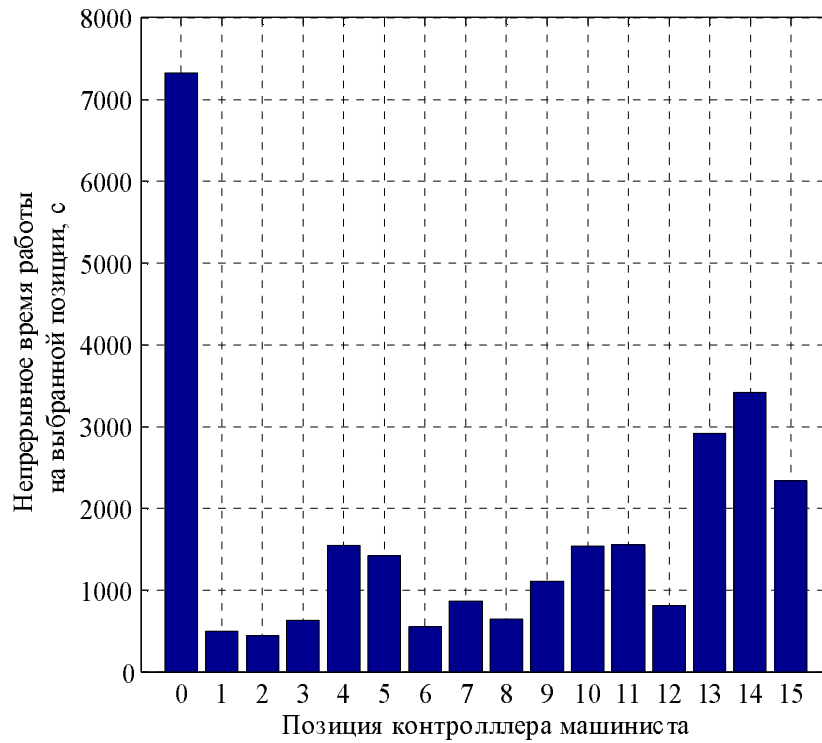


Рисунок 78 – Распределение непрерывного времени работы на выбранной позиции

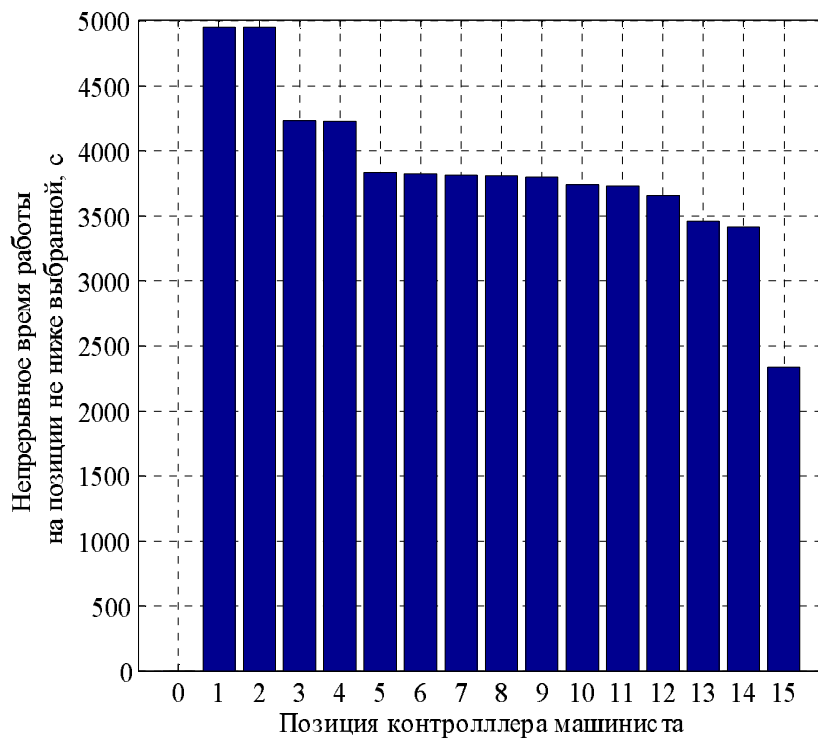


Рисунок 79 – Распределение непрерывного времени работы на позиции не ниже выбранной

Режимы работы электрической передачи мощности определяются системой МПСУ за счет формирования внешней характеристики тягового генератора, построим поле точек работы тягового генератора (рисунок 80) в процессе эксплуатации.

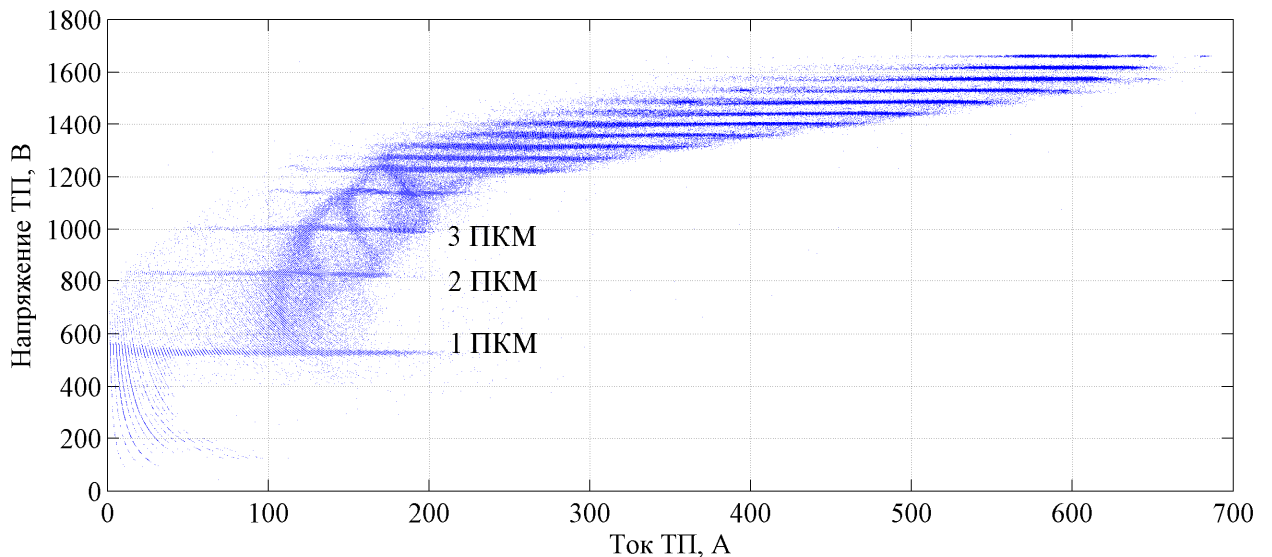


Рисунок 80 – Поле точек работы тягового генератора тепловоза 2ТЭ25А

Среднее значение мощности ДГУ при работе на тяговых позициях составило 928,8 кВт, а с учетом работы на холостом ходу в движении 510,6 кВт и с учетом работы на холостом ходу на стоянках 243,4 кВт.

Значение коэффициента полезного действия тягового генератора (рисунок 81) при работе на тяговых позициях составило 0,944, с учетом работы в режиме холостого хода в движении – 0,934, на стоянках – 0,909.

Для наглядного представления распределения выработанной энергии в зависимости от скорости и позиций контроллера машиниста, определим количество выработанной энергии и построим 3D-поверхность (рисунок 82).

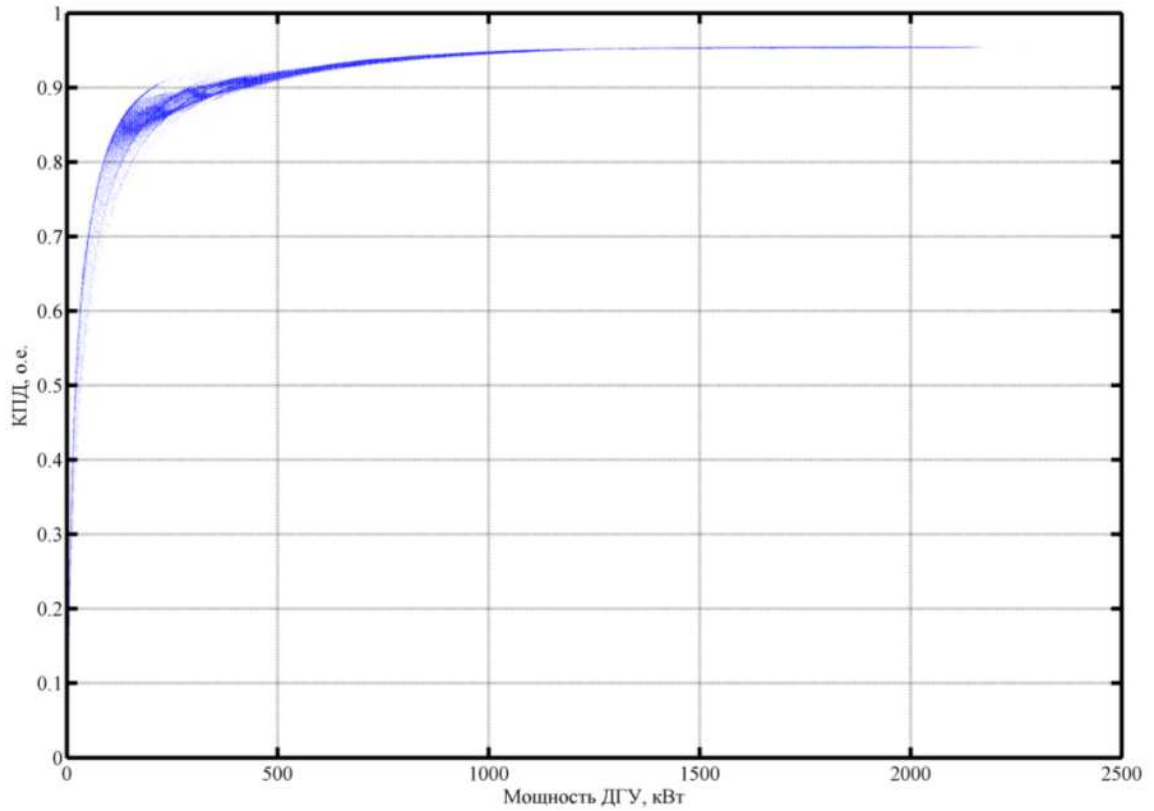


Рисунок 81 – Поле коэффициента полезного действия тягового генератора тепловоза 2ТЭ25А

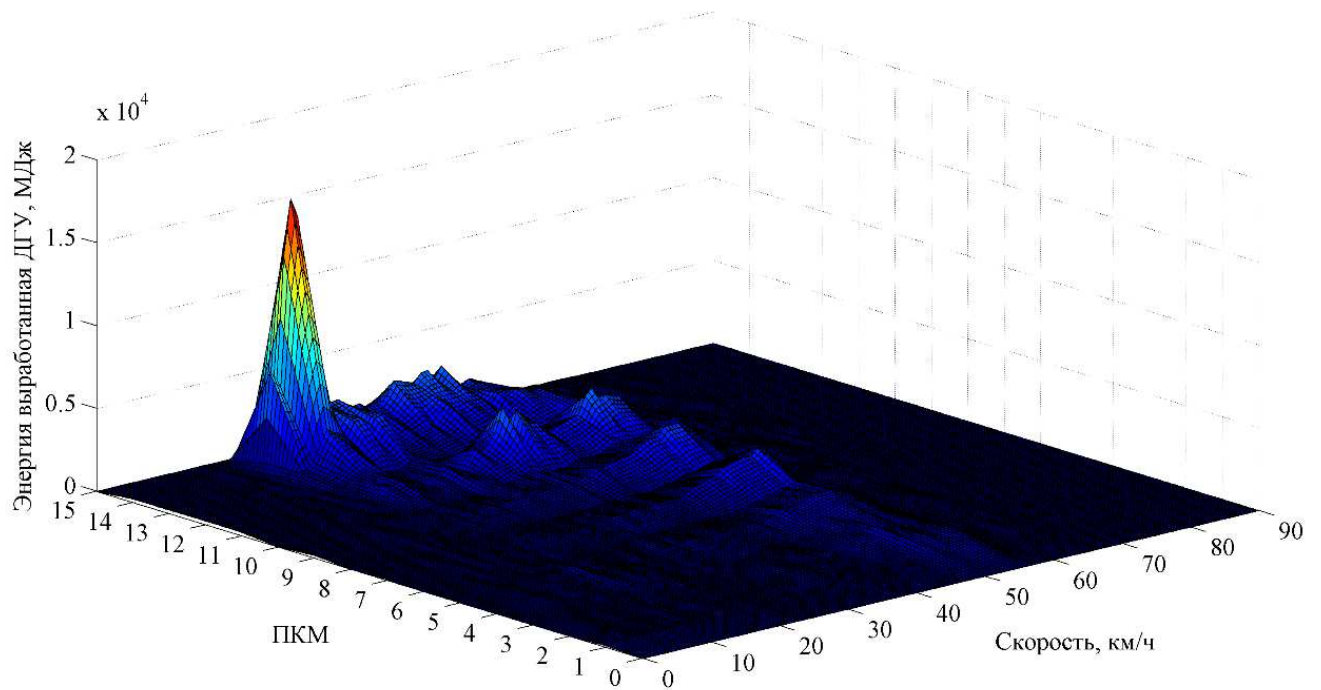


Рисунок 82 – Энергия, выработанная дизель-генераторной установкой и переданная в звено постоянного тока в зависимости от скорости и позиции контроллера машиниста

На рисунке 83, приведены результаты расчета энергии выработанной тяговым генератором (синяя кривая) одновременно совместив с энергией, израсходованного топлива.

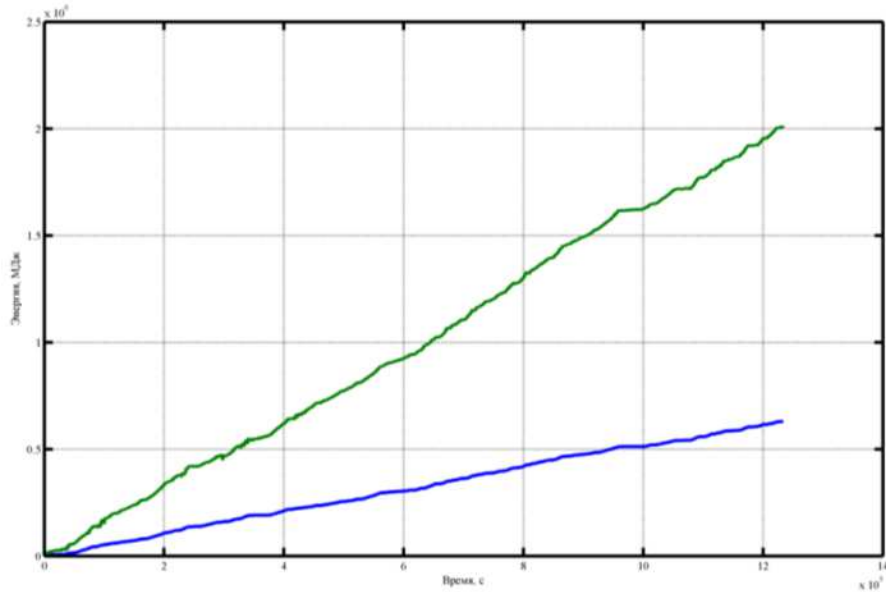


Рисунок 83 – Затраченная энергия топлива и энергия ДГУ

Рассчитаем коэффициент полезного действия на основе данных, представленных на рисунке 83. Результаты расчета приведем в графическом виде на рисунке 84.

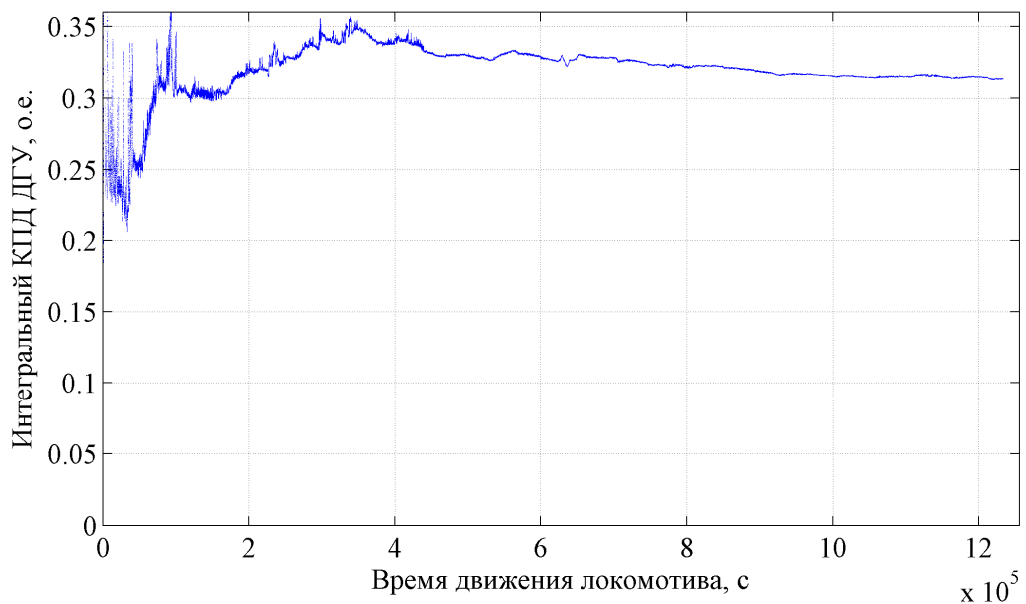


Рисунок 84 – Коэффициент полезного действия ДГУ

## 2.10 Сводные результаты и выбор направлений по повышению энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов

В результате анализа данных микропроцессорных систем управления и средств регистрации параметров локомотива, удалось оценить энергоэффективность процессов преобразования в электрических передачах мощности локомотивов.

Из анализа данных энергоэффективности работы тепловозов в реальных условиях можно сделать следующие основные выводы:

- высокая доля времени работы дизеля на 0 позиции контроллера машиниста (на холостом ходу), 40...50 % времени независимо от рода службы;
- коэффициент полезного использования мощности для маневрового тепловоза составляет 0,02;
- коэффициент полезного использования мощности для магистральных тепловозов составил 0,24...0,3;
- управление передачей мощности по гиперболической характеристике увеличивает долю омических потерь во всех силовых элементах привода;
- поддержание значения постоянного значения напряжения для каждой позиции (2ТЭ25А), позволило существенно уменьшить потери в синхронном тяговом генераторе, коэффициент эффективности использования составил 99 %, при этом эффективность использования аналогичного генератора на тепловозе ТЭП70БС составила 96 %;

Обобщенные результаты представим в форме таблицы 25.



Таблица 25 – Результаты анализа энергетической эффективности локомотивов в реальных условиях эксплуатации

Серия тепловоза	ЧМЭЗ	2ТЭ25К <sup>М</sup>	ТЭП70БС	2ТЭ25А
Род службы	маневровый	грузовой	пассажирский	грузовой
Тип электрической передачи мощности	постоянного тока	переменно - постоянного тока с многоканальным управляемым выпрямителем	переменно - постоянного тока с неуправляемым выпрямителем	переменно - постоянного тока
Тип тягового двигателя	Постоянного тока	Постоянного тока	Постоянного тока	Асинхронный
Длительность периода работы доступного для анализа	8,73 суток	35 суток	69 суток	32 суток
Время в движении, ч	71,8	390,8	702	342
Техническая скорость	8,93	35,78	53,68	36,52
Среднеквадратичная скорость, км/ч	9,79	40,02	61	40,04
Время работы на холостом ходу, %	66,93	49,9	47,9	45,1
Время работы на максимальной позиции, %	0,001 (0,6 мин)	0,16 (0,63 ч)	0,4 (2,98 ч)	1,1 (3,77 ч)
Полная мощность дизеля, кВт	993	2650	2942	2500
Средняя мощность ДГУ, кВт	67,93	822	808,3	928,8
КИМ ДГУ	0,068	0,31	0,27	0,37
Эксплуатационный КПД / КЭИ тягового генератора: - на тяговых позициях	0,75 / 0,79	0,92 / 0,96	0,914 / 0,958	0,944 / 0,99
- с учетом холостого хода	0,61 / 0,65	0,905 / 0,944	0,866 / 0,908	0,934 / 0,98
Эксплуатационный КПД / КЭИ выпрямительной установки	–	0,975 / 0,995	0,990 / 0,994	
Эксплуатационный КПД / КЭИ Инвертора напряжения	–	–	–	Недостаточно данных
Эксплуатационный КПД/КЭИ тяговых электродвигателей	0,36 / 0,43	0,856 / 0,936	0,88 / 0,947	Недостаточно данных
Средняя мощность на валу ТЭД, кВт	3,18	115	118,2	Недостаточно данных
Эксплуатационный КПИМ	0,02	0,26	0,24	Недостаточно данных
Перерасход дизельного топлива из-за отклонения параметров работы элементов передачи мощности от номинальных значений, %	194	12	11	–

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Разработана методология оценки энергоэффективности процесса преобразования энергии в тяговом оборудовании по данным, получаемых с регистраторов параметров локомотивов. В основе используемых методов лежит энергетический подход с применением паспортных характеристик тягового оборудования, с дальнейшим пересчетом их, под условия эксплуатации, определяемые по данным, полученных с систем управления локомотивов, что позволяет аналитически определить коэффициент полезного действия тяговых электрических машин в зависимости от тока, напряжения звена постоянного тока и частоты вращения якоря (ротора).

2. Разработан метод оценки энергоэффективности процесса преобразования энергии, который учитывает особенности преобразования энергии в тяговом оборудовании в условиях эксплуатации автономных локомотивов, при этом отличается минимальными затратами времени для проведения расчетов, что позволит использовать предлагаемый метод непосредственно в системах управления, для контроля и управления мгновенным значением энергоэффективности перспективных автономных локомотивов.

3. Проведен анализ времени работы и выработанной энергии по позициям контроллера машиниста, показано, что дизель грузовых и пассажирских локомотивов продолжительное время работает с нагрузками менее 50 %, что обуславливает необходимость применения многодизельных локомотивов не только для маневрового движения, но и для магистральных локомотивов.

4. Проведен анализ энергетической эффективности локомотивов разного рода службы и с различными вариантами исполнения электрической передачи мощности. Определены условия работы элементов тяговой передачи мощности и выявлено недоиспользование энергоэффективности преобразования энергии в электрических передачах мощности особенно в передачах с двигателями постоянного тока за счет низкого коэффициента использования мощности ДГУ и электрической передачи мощности в целом. Только за счет изменения законов управ-

ления электрической передачей мощности, можно добиться до 10 % экономии дизельного топлива.

5. Выявлена качественная закономерность увеличения энергетической эффективности тягового оборудования при увеличении коэффициента использования мощности локомотива, что позволяет для локомотивов, оснащенных многодвигательным тяговым приводом, построить алгоритм, обеспечивающий стабилизацию мгновенного значения КПД при частичной нагрузке на уровне, близком к значению КПД номинального режима.

6. Предложено использование принципа масштабируемости нагрузки, как наиболее перспективного способа снижения эксплуатационного расхода энерго-ресурсов, за счет способности распределенной системы тягового оборудования легко расширять и сокращать свои ресурсы для адаптации к более тяжелым или более легким эксплуатационным нагрузкам.

### 3 Методы и концепция повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов с электрической передачей мощности

Анализ эксплуатации автономных локомотивов различного рода службы, выполненный во второй главе настоящей диссертации, показал, что для повышения эффективности перевозочного процесса не достаточно повышать секционную мощность локомотивов, но и необходимо решить ряд задач по эффективному использованию локомотива как тяговой единицы [96]. Существует ряд условий эксплуатации, при которых достаточно только 25 % или 50 % мощности локомотива для выполнения перевозочной работы, даже на сложном профиле пути, но в этих режимах большинство локомотивов показывают низкую энергоэффективность, поэтому необходимо разработать возможные пути решения данной проблемы.

Энергоэффективность автономного локомотива может быть достигнута различными средствами [97, 64]: применение автоведения поезда, применение экономичных двигателей внутреннего сгорания, применение гибридных накопителей энергии, применение электрических передач мощности имеющих высокий КПД, применение модульной структуры тягового оборудования [98], применение альтернативных источников первичной энергии [21].

В основе математического описания движения поезда лежит уравнение движения поезда [61]

$$\frac{dV}{dt} = \zeta(f_K - w_K - b_T), \quad (99)$$

где  $V$  – скорость;

$t$  – время;

$\zeta$  – коэффициент пропорциональности, определяющий ускорение при единичной равнодействующей удельной силе;

$f_K$  – удельная касательная сила тяги;

$w_K$  – удельная касательная сила сопротивления;

$b_T$  – удельная тормозная сила.

Основное назначение данного уравнения является построение кривой скорости движения поезда. Кроме того, зная закон изменения скорости, можно определить равнодействующую силу, действующую на поезд. Если из полученной равнодействующей силы вычесть силы сопротивления движению поезда, то можно определить силу тяги (торможения) локомотива [54], тогда уравнение примет вид [99]

$$(F_K - B_T) = \left( \frac{1}{\zeta} \frac{dV}{dt} + w_K \right) (P + Q), \quad (100)$$

где  $F_K$  – касательная сила тяги;

$B_T$  – тормозная сила;

$P$  – масса локомотива;

$Q$  – масса состава.

Также следует учитывать то, что удельная касательная сила сопротивления является функцией двух переменных: скорости и пути, т.е.  $w_K = f(V, s)$ . В общем виде удельное сопротивление движению можно определить по формуле [61]

$$w_K(V, s) = \frac{P \cdot (w'_0 + w_i) + Q \cdot (w''_0 + w_i)}{P + Q}, \quad (101)$$

где  $w'_0$  – основное удельное сопротивление локомотива;

$w''_0$  – основное удельное сопротивление состава;

$w_i$  – удельное сопротивление от профиля пути.

Основное удельное сопротивление для локомотива зависит от скорости движения и типа локомотива, в общем виде определяется по формуле [99]

$$w'_0(V) = a + b \cdot V + c \cdot V^2, \quad (102)$$

где  $a, b, c$  – эмпирические коэффициенты [61].

Основное удельное сопротивление для вагонов зависит от скорости движения, типа вагонов и их загрузки, в общем виде определяется по формуле [61]

$$w''_0(V) = a + \frac{b + c \cdot V + d \cdot V^2}{q_0}, \quad (103)$$

где  $a, b, c, d$  – эмпирические коэффициенты [61];

$q_0$  – нагрузка на ось вагона.

Удельное сопротивление от профиля пути численно равно сумме уклона профиля пути и фиктивного подъема от кривой [61]:

$$w_i(s) = i' + \frac{700 S}{L_t R}, \quad (104)$$

где  $i'$  – уклон профиля пути;

$S$  – длина кривой (при наличии);

$R$  – радиус кривой (при наличии);

$L_t$  – длина поезда.

Для повышения точности расчетов удельное сопротивление от профиля пути необходимо вычислять с учетом расположения поезда на профиле пути. За точку отсчета принимается голова поезда.

Тогда зависимость удельного дополнительного сопротивления от пройденного пути примет вид

$$w_i(s) = \frac{1}{L_t} \left( \sum_{n=1}^m i_n l_n + 700 \sum_{k=1}^p \frac{S_n}{R_n} \right), \quad (105)$$

где  $i_n$  – крутизна уклона элементов профиля пути находящихся на занятом поезде участке;

$l_n$  – длина элементов профиля пути находящихся на занятом поезде участке;

$S_n, R_n$  – параметры кривых на элементах профиля пути находящихся на занятом поезде участке.

От скорости зависит основное удельное сопротивление движению состава и локомотива, а от пути (профиля пути) зависит дополнительное сопротивление. Поэтому, необходимыми данными для решения задачи определения силы тяги (торможения) являются: тип и количество вагонов в составе поезда, масса поезда или масса вагонов, спрямленный профиль пути, кривая скорости движения поезда.

Баланс мощностей сил тяги [54], сил сопротивления и сил инерции определяется на основании уравнения движения поезда, для чего обе части уравнения умножим на скорость  $V$ , и тогда уравнение баланса мощностей примет вид [99]

$$(F_K - B_T) \cdot V = \frac{1}{\zeta} \frac{dV}{dt} (P + Q) \cdot V + W_K(V, s) \cdot V. \quad (106)$$

Мощность силы тяги или торможения локомотива определяется через произведение сил тяги/торможения на текущее значение скорости [54]

$$P_{T(B)} = F_K \cdot V. \quad (107)$$

Производная полной кинетической энергии поезда (поступательное движение поезда и вращательное движение частей подвижного состава) по времени соответствует мощности сил инерции

$$P_{ин} = \frac{1}{\zeta} \frac{dV}{dt} (P + Q) \cdot V = \frac{dT}{dt}, \quad (108)$$

где  $\zeta$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий вращательное движение колесных пар подвижного состава.

Мощность касательной силы сопротивления поезда

$$P_{\text{сопр}} = W_K(V, s) \cdot V. \quad (109)$$

Мощность силы дополнительного сопротивления от уклона определяется по формуле [54]

$$P_{\text{доп}} = m \cdot g \cdot i \cdot V. \quad (110)$$

В каждый момент времени для поезда сохраняется баланс сил тяги или торможения, сил сопротивления и сил инерции, а значит сохраняется и баланс мощностей, в результате можно записать уравнение баланса мощностей:

$$P_{\text{Т(В)}} = P_{\text{ин}} + P_{\text{сопр}} + P_{\text{доп}}. \quad (111)$$

Для локомотива с многодвигательным тяговым приводом касательная мощность равна сумме касательных мощностей создаваемых тяговыми двигателями на каждой колесной паре.

С другой стороны полезную мощность локомотива  $P_T$  можно определить через произведение затраченной мощности топлива на коэффициент полезного действия локомотива

$$P_T = P_{\text{потр}} \cdot \eta. \quad (112)$$

Анализ режимов ведения поезда является приоритетной задачей в эксплуатационных локомотивных депо. От правильного управления машинистом поездом зависят безопасность и комфорт при перевозке пассажиров и, как следствие,



имидж компании ОАО «РЖД». Благодаря данным, полученным из регистратора параметров движения, появляется возможность комплексной оценки действий локомотивной бригады, с целью дальнейшей выработки корректирующих и предупреждающих мероприятий для обеспечения условий безопасного и энергоэффективного вождения поездов.

Сила тяги и тормозная сила являются взаимоисключающими силами, т.е. одновременно возникать не могут, значит, по знаку равнодействующей силы можно делать вывод, в каком режиме двигается поезд на заданном участке. Если равнодействующая сила меньше нуля, значит режим торможения, если больше нуля, то режим тяги, если сила находится в окрестности нуля, то это режим выбега.

После определения касательной силы тяги и режимов движения поезда, происходит расчет мощности идущей на тягу поезда по формуле [99]:

$$P_T = \frac{F_K V}{3,6}. \quad (113)$$

Средняя мощность одной секции локомотива за поездку определяется по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Ti}}{n \cdot m}, \quad (114)$$

где  $\sum_{i=1}^n P_{Ti}$  – сумма мгновенных значений мощности на тягу;

$m$  – количество секций;

$n$  – количество значений.

Коэффициент полезного использования мощности показывает эффективность использования доступной мощности тепловоза и определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{н}}} \quad (115)$$

где  $P_{\text{н}}$  – номинальная мощность дизель-генераторной установки.

### 3.1 Энергетический баланс при движении поезда по заданному участку

Определение полезной работы, которую совершает локомотив при перемещении поезда, затруднительно, поэтому для ее определения используют интегрирование по времени баланса мгновенных мощностей

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{доп}} dt. \quad (116)$$

В результате интегрирования мгновенной мощности на тягу по времени прохождения поезда элементарного участка железнодорожного пути получаем элементарную полезную работу при ведении поезда в режиме тяги

$$A_{12}^{\text{пол}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt. \quad (117)$$

Для определения полной полезной работы необходимо просуммировать элементарные работы на каждом элементарном участке пути для всего маршрута движения поезда.

Работа сил инерции определяется через изменение кинетической энергии поезда при преодолении элементарного участка пути

$$A_{12}^{\text{ин}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt = \int_{t_1}^{t_2} dT = T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \cdot (V_2^2 - V_1^2). \quad (118)$$

Работа сил инерции возникает при изменении скорости движения и может быть как положительной, при снижении скорости, так и отрицательной при разгоне. Следует отметить, что сумма работ сил инерции на элементарном участке пути для всего маршрута движения поезда будет равна нулю вне зависимости от режимов ведения поезда. При ведении поезда в режимах трогания и разгона основная часть полезной работы идет на преодоление работы сил инерции поезда, т.е. на увеличение кинетической энергии, а при торможении эта энергия, как правило, рассеивается в виде тепла в окружающую среду. Исследования, направленные на применение различных накопителей энергии на подвижном составе, в первую очередь ориентированы на возможность преобразования кинетической энергии в электрохимическую с целью дальнейшего использования при разгоне.

Работа сил сопротивления движению поезда возникает всегда при движении поезда и, в общем виде, будет иметь квадратичную зависимость от скорости движения поезда. Для элементарного участка пути определяется по формуле

$$A_{12}^{\text{сопр}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt. \quad (119)$$

Работа сил дополнительного сопротивления от уклона определяется по формуле

$$A_{12}^{\text{доп}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{доп}} dt. \quad (120)$$

с учетом определения силы дополнительного сопротивления от уклона

$$A_{12}^{\text{доп}} = mg \int_{t_1}^{t_2} iV dt = mg(h_2 - h_1). \quad (121)$$

Это означает, что работа сил дополнительного сопротивления от уклона равна работе сил тяжести на рассматриваемом элементарном участке, т.е. фактически изменение потенциальной энергии поезда. Следует отметить, что сумма работ сил дополнительного на элементарном участке пути для всего маршрута движения поезда будет равна работе силы тяжести при перемещении поезда из начальной координаты с высотой  $h_1$  в конечную точку с высотой  $h_2$ , при этом известно, что траектория такого перемещения не влияет на общее изменение потенциальной энергии. Но в условиях реального ведения поезда основная часть полезной работы идет при преодолении затяжных подъемов на участке железнодорожного пути, а при движении на спуске эта энергия, частично переходит в кинетическую энергию, до достижения поездом допустимой скорости движения, а далее, как правило, рассеивается в виде тепла в окружающую среду при применении торможения. Применение накопителей энергии на подвижном составе, позволит частично преобразовывать потенциальную энергию в электрохимическую с целью дальнейшего использования при разгоне. А в настоящее время основное преобразование возможно между кинетической и потенциальной энергиями поезда, что определяется опытом машинистом или алгоритмами управления систем автоведения поезда.

При движении поезда по элементарному участку пути уравнение энергетического баланса представляет собой сумму работ сил инерции, тяжести и сопротивления, тогда формула принимает вид

$$A_{12}^{\text{пол}} = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \cdot (V_2^2 - V_1^2) + mg(h_2 - h_1) + A_{12}^{\text{сопр}}. \quad (122)$$

В результате анализа уравнения энергетического баланса видно, что полезная работа расходуется на изменение кинетической и потенциальной энергий поезда, и на преодоление сил касательного сопротивления движению поезда. С учетом того, что начальная (отправление со станции) и конечная (прибытие на станцию) скорость поезда для всего участка равна нулю, то изменение кинетической

энергия в процессе движения влияет на эффективность управления поездом, что является одним из основных требований для выбора режимов управления поездом машинистом или системой автоведения. Одним из способов рационального управления является, разработка режимных карт для участков железной дороги, позволяющих наиболее рационально использовать энергию движения поезда, а в современных средствах автоведения эти карты заложены изначально, поэтому дальнейшее существенное снижение значения полезной работы при ведении магистральных поездов затруднительно.

### 3.2 Классическая постановка задачи минимизации энергопотребления

Задачи минимизации энергопотребления состоят в определении режимов ведения поезда по участку железнодорожного пути и подробно рассмотрены в ряде публикаций [100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107].

В общем виде, при постановке задачи минимизации энергопотребления, вводится ряд ограничений на управление поездом:

- время движение по перегону должно соответствовать графику движения

$$t_{\Sigma} = \text{const.} \quad (123)$$

- скорость и ускорения не должны превышать установленных значений, как для отдельных режимов работы, так и для отдельных участков пути

$$|V| \leq [V], \quad |a| \leq [a]. \quad (124)$$

Следовательно, задача минимизации энергопотребления сводится к минимизации потребленной энергии при выполнении всех ограничений для заданного участка пути

$$E_{\Sigma} = \int_0^{t_{\Sigma}} P_{\text{потр}} dt \rightarrow \min, \quad (125)$$

где  $P_{\text{потр}}$  – мгновенное значение мощности потребляемой локомотивом.

Потребляемую мощность для автономных локомотивов определяют по тепловому эквиваленту удельного расхода топлива. В результате можно перейти к задаче Лагранжа, по критерию потребления топлива с учетом движения поезда по заданному участку, тогда

$$E_{\Sigma} = \int_0^{t_{\Sigma}} P_{\text{потр}} dt, \quad (126)$$

При этом практически во всех подходах используется начальная исходная допустимая траектория движения поезда с последующим изменением управляющих воздействий позволяющих уменьшить расход энергоресурсов на каждом последующем вариационном расчете [103].

Известно, что расход топлива автономного локомотива складывается из расхода непосредственно на тягу поезда и расхода топлива при работе дизеля в режиме холостого хода, что характерно для режимов выбега и торможения при ведении поезда [61]. Тогда расхода топлива автономного локомотива при ведении поезда составит

$$E = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{Ti}}{\eta_{\text{ЭПМ}}} + P_{\text{ВСП}} \right) \cdot g_e \cdot \Delta t + \sum_{i=1}^n g_{\text{ХХ}} \cdot \Delta t, \quad (127)$$

где  $P_{Ti}$  – мощность, затрачиваемая на тягу;

$\eta_{\text{ЭПМ}}$  – коэффициент полезного действия электрической передачи мощности автономного локомотива;

$P_{\text{ВСП}}$  – мощность, затрачиваемая на привод вспомогательного оборудования автономного локомотива;

$g_e$  – удельный расход топлива автономного локомотива в режиме тяги;

$g_{XX}$  – удельный расход топлива автономного локомотива в режимах холостого хода и торможения;

$\Delta t$  – интервал времени между измерениями.

Следует отметить, что в [103, 104] и других публикациях по энергооптимальному тяговому расчету и систем автоведения поездов, фактически проводится минимизация не потребленной локомотивом энергии, а полезной работы, совершенной локомотивом  $A_{\Sigma}^{\text{пол}}$ , т.к. значение коэффициента полезного действия локомотива принимается постоянным на весь период расчета, как правило, это связано с отсутствием реальных зависимостей коэффициента полезного действия от условий эксплуатации локомотива, данные зависимости для основных элементов тягового оборудования локомотива подробно рассмотрены во второй главе настоящей диссертации.

И в результате такой оптимизации энергопотребления многодвигательного автономного локомотива (тягового подвижного состава), оказывается не принятым во внимание снижение коэффициента полезного действия локомотива при работе с неполной нагрузкой (ведение легковесных поездов или тяжеловесных, но по равнинным участкам), и тем самым не учитывается неэффективное использование энергии в режимах работы с неполной нагрузкой, это обстоятельство упоминается во многих публикациях [108, 97, 109, 110, 37, 111] главным образом для электрической тяги, т.к. там более просто выявить данную закономерность по показаниям счетчиков электроэнергии.

Это позволяет ставить вопрос о разработке концепции повышения энергетической эффективности локомотивов используя принцип масштабируемости нагрузки, что позволит добиться повышения энергетической эффективности автономных локомотивов, за счет управления режимами работы тягового оборудования многодизельных и многодвигательных автономных локомотивов. При этом, чем мощнее локомотив, тем актуальнее становится данная проблема управления энергетической эффективностью [112].

### 3.3 Концепция повышения энергетической эффективности автономных ЛОКОМОТИВОВ

Концепция повышения энергетической эффективности автономных локомотивов с электрической передачей мощности состава базируется на принципе масштабируемости нагрузки, т.е. способности распределенной системы легко расширять и сокращать свои ресурсы для адаптации к более тяжелым или более легким нагрузкам.

Рассмотрим основные составляющие коэффициента полезного действия локомотива

$$\eta_{\text{л}} = \beta \cdot \eta_{\text{е}} \cdot \eta_{\text{эпм}} \cdot \eta_{\text{зр}}, \quad (128)$$

где  $\beta$  – доля мощности дизель-генераторной установки, идущая на тягу;

$\eta_{\text{е}}$  – эффективный коэффициент полезного действия дизеля;

$\eta_{\text{эпм}}$  – коэффициент полезного действия электрической передачи мощности.

На практике обычно определяют эффективный коэффициент полезного действия дизель-генераторной установки, который включает в себя эффективность преобразования энергии сразу в трех элементах тягового оборудования локомотива

$$\eta_{\text{дгу}} = \eta_{\text{е}} \cdot \eta_{\text{ТГ}} \cdot \eta_{\text{ВУ}}. \quad (129)$$

где  $\eta_{\text{ТГ}}$  – коэффициент полезного действия тягового генератора;

$\eta_{\text{ВУ}}$  – коэффициент полезного действия выпрямительной установки.



### 3.3.1 Исследование возможности применения модульных энергетических установок на различных сериях автономных локомотивов

Зависимость коэффициента полезного действия дизель-генераторной установки, полученная при проведении реостатных испытаний [113], приведена на рисунке 85.

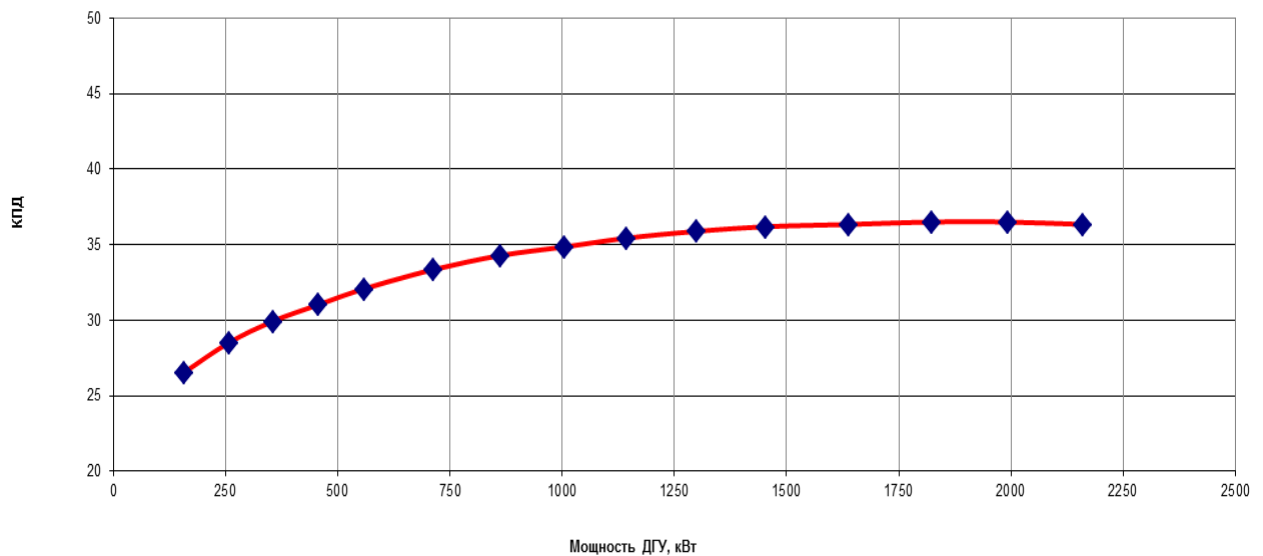


Рисунок 85 – Коэффициент полезного действия дизель-генераторной установки в зависимости от мощности

Из рисунка 85 видно, что коэффициент полезного действия дизель-генераторной установки при работе с малой нагрузкой составляет 26,5 %, т.е. уменьшается на 10 п.п. по сравнению с работой при номинальной нагрузке (36,5 %). В результате получаем, что коэффициент эффективного использования мощности дизель-генераторной установки для первой позиции составляет 72 %, это означает повышение затрат топлива на производство такого же количества энергии, что и при номинальном режиме составят на 38,4 %. Для шестой позиции коэффициент эффективного использования мощности дизель-генераторной установки составит 92 %, т.е. перерасход дизельного топлива на 8,7 %. На рисунке 86 представлена зависимость перерасхода дизельного топлива, в зависимости от ис-

пользуемой позиции контроллера машиниста, при выработке одного и того же количества энергии. Это обстоятельство объясняет необходимость применение многодизельных силовых энергетических установок не только на маневровых локомотивах, но и на магистральных, что позволит снизить расход дизельного топлива примерно на 10 % только за счет оптимизации режимов работы дизель-генераторных установок при ведении легких поездов и груженых на легком профиле пути.

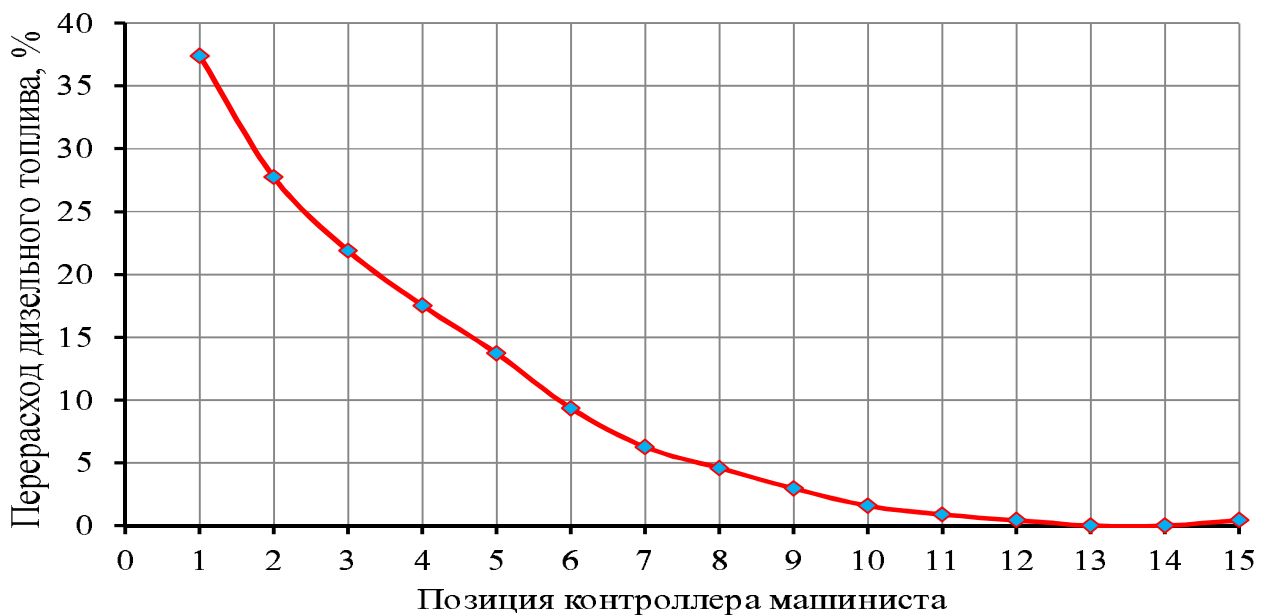


Рисунок 86 – Перерасход дизельного топлива в зависимости от позиции контроллера машиниста

В результате, получаем первый способ повышения энергетической эффективности локомотивов, который заключается к переходу к модульным энергетическим установкам. На рисунке 87 представлена модульная энергетическая установка производства Siemens так называемой «последней мили», предназначенная для установки на электрический подвижной состав.

Фирма Bombardier несколько лет назад реализовала идею многодизельного тепловоза Traxx DE ME который оснащается четырьмя серийными промышленными шестицилиндровый четырехтактными дизелями Caterpillar C18 [11]. Данная линейка тепловозов работает в пассажирском до 160 км/ч и грузовом до 140 км/ч

движении. Применение многодизельной установки позволило не только сократить расход энергоресурсов на 10 %, но и снизить вредное воздействие на окружающую среду.



Рисунок 87 – Модульная энергетическая установка «последней мили»

Применение многодизельной установки требует ее согласованной работы для различных условий эксплуатации с выравниванием ресурса работы дизельных двигателей в процессе эксплуатации.

Рассмотрим возможность применения многодизельной установки для магистральных локомотивов на сети железных дорог ОАО «РЖД», для этого проведем исследование количества и общей продолжительности поездок (разгон-движение-остановка) для магистральных локомотивов, рассмотренных во второй главе настоящей диссертации, в зависимости от максимально используемой позиции контроллера машиниста.

На рисунке 88 представлено семейство кривых изменения скорости секции тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> при движении на 0 ПКМ с работающим дизелем. При этом рассматривались именно поездки, т.е. трогание с места, разгон, потом торможение.

ние до 0 км/ч. В результате зафиксировано 14 поездок за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 1,22 часа.

На рисунке 89 представлено семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> с максимальной 5 ПКМ. В результате выявлено 87 поездок за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 1,65 часа. Общее время таких поездок составило 25,62 часа.

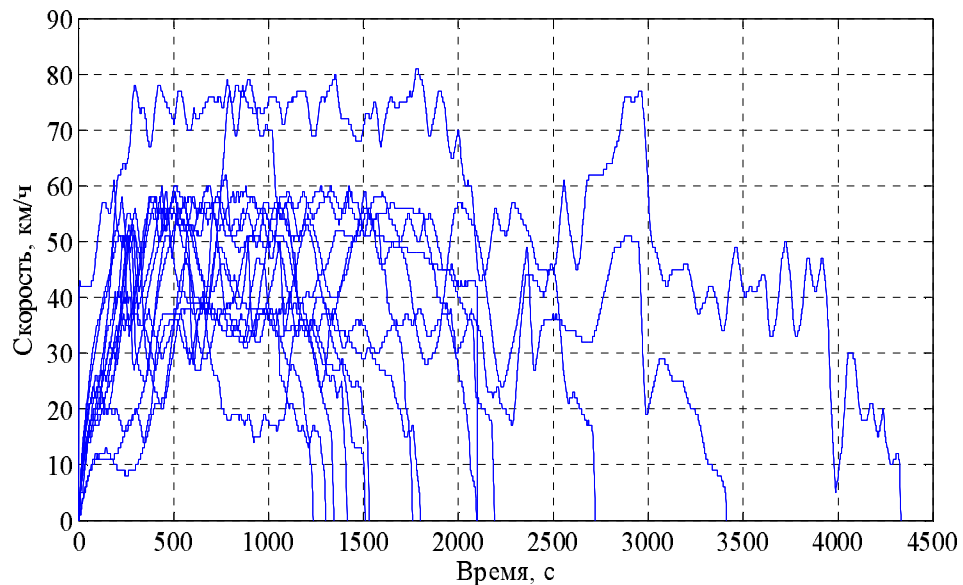


Рисунок 88 – Семейство кривых скорости секции тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> при движении на 0 ПКМ с работающим дизелем

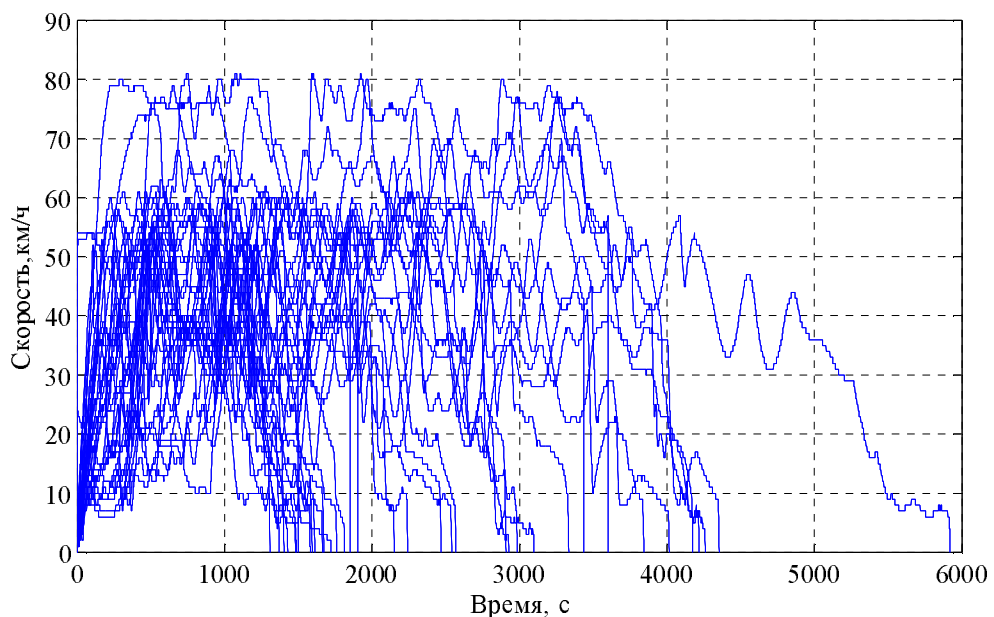


Рисунок 89 – Семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> с максимальной 5 ПКМ

На рисунке 90 представлено семейство кривых изменения скорости секции тепловоза 2ТЭ25А при движении на 0 ПКМ с работающим дизелем. В результате зафиксировано 11 поездок за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 1,32 часа.

На рисунке 91 представлено семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25А с максимальной 5 ПКМ. В результате выявлено 50 поездок за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 4,6 часа. Общее время таких поездок составило 10,57 часа. На рисунке 92 представлено семейство кривых частот вращения коленчатого вала дизеля при движении тепловоза 2ТЭ25А с максимальной 5 ПКМ. Дополнительно проведен анализ максимально длительной поездки, из которого видно, что непрерывное время работы дизеля на холостом ходу составило 2 часа.

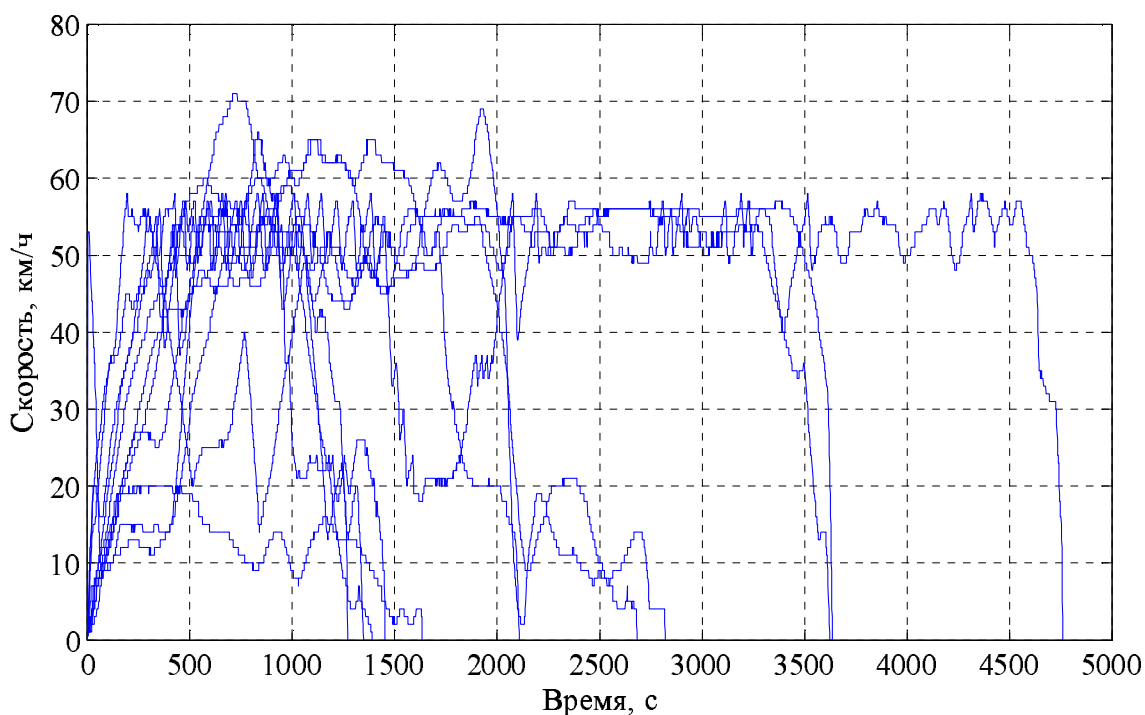


Рисунок 90 – Семейство кривых скорости секции тепловоза 2ТЭ25А при движении на 0 ПКМ с работающим дизелем

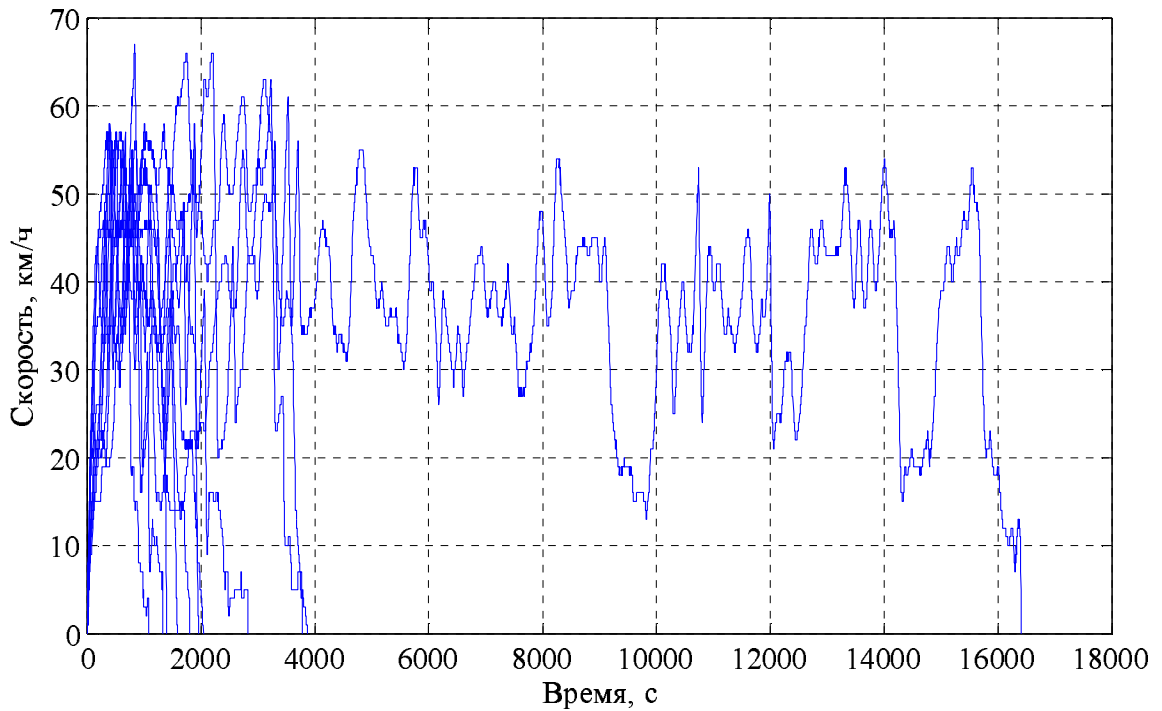


Рисунок 91 – Семейство кривых скорости при движении тепловоза 2ТЭ25А с максимальной 5 ПКМ

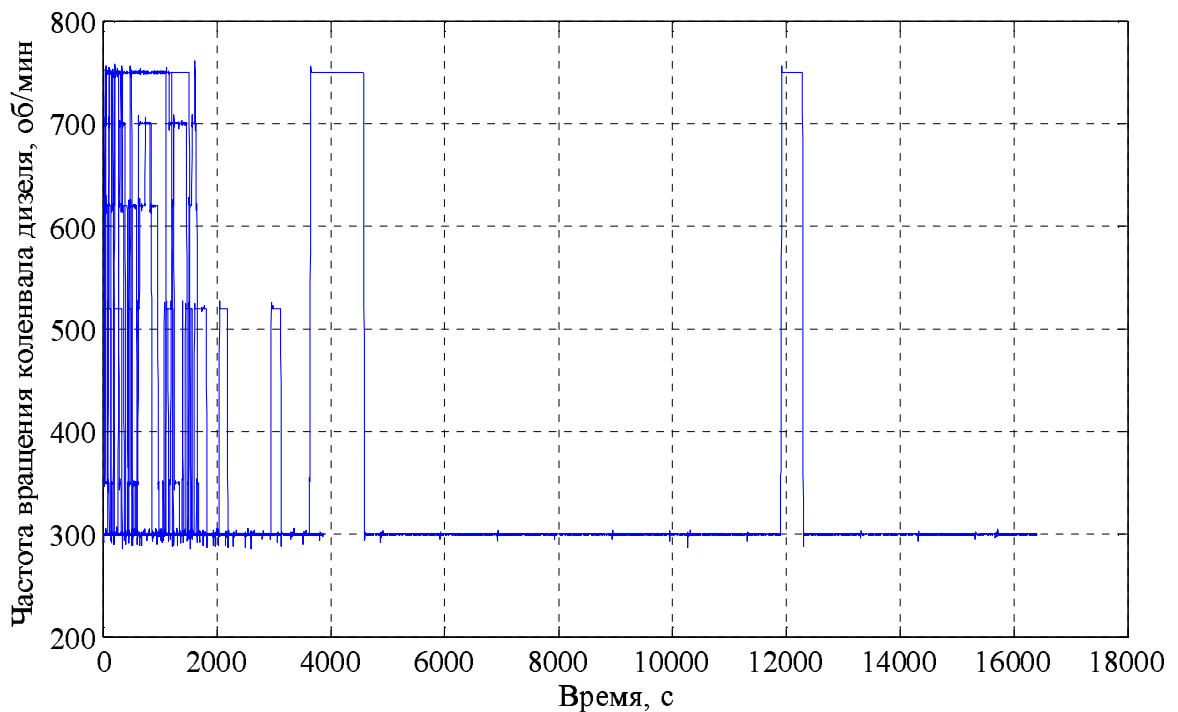


Рисунок 92 – Семейство кривых частоты вращения коленчатого вала дизеля при движении тепловоза 2ТЭ25А с максимальной 5 ПКМ

На рисунке 93 представлено семейство кривых изменения скорости тепловоза ТЭП70БС при движении на 0 ПКМ с работающим дизелем. В результате зафиксировано 25 поездов общей продолжительностью 16,56 часа за рассматриваемый период при максимальной продолжительности до 1,61 часа.

На рисунке 94 представлено семейство кривых скорости при движении тепловоза ТЭП70БС с максимальной 7 ПКМ. В результате выявлено 37 поездов за рассматриваемый период с максимальной продолжительностью до 3,8 часа. Общее время таких поездов составило 34,3 часа.

Анализ проведен для всех позиций контроллера машиниста для тепловозов 2ТЭ25К<sup>М</sup>, 2ТЭ25А, ТЭП70БС. При анализе, поездки продолжительностью менее 17 мин не учитывались и не рассматривались. Позиция контроллера машиниста фактически определяет используемую мощность дизель-генераторной установки.

Сводные результаты исследований анализа поездов представлены накопительным итогом по позициям контроллера машиниста в таблице 26.

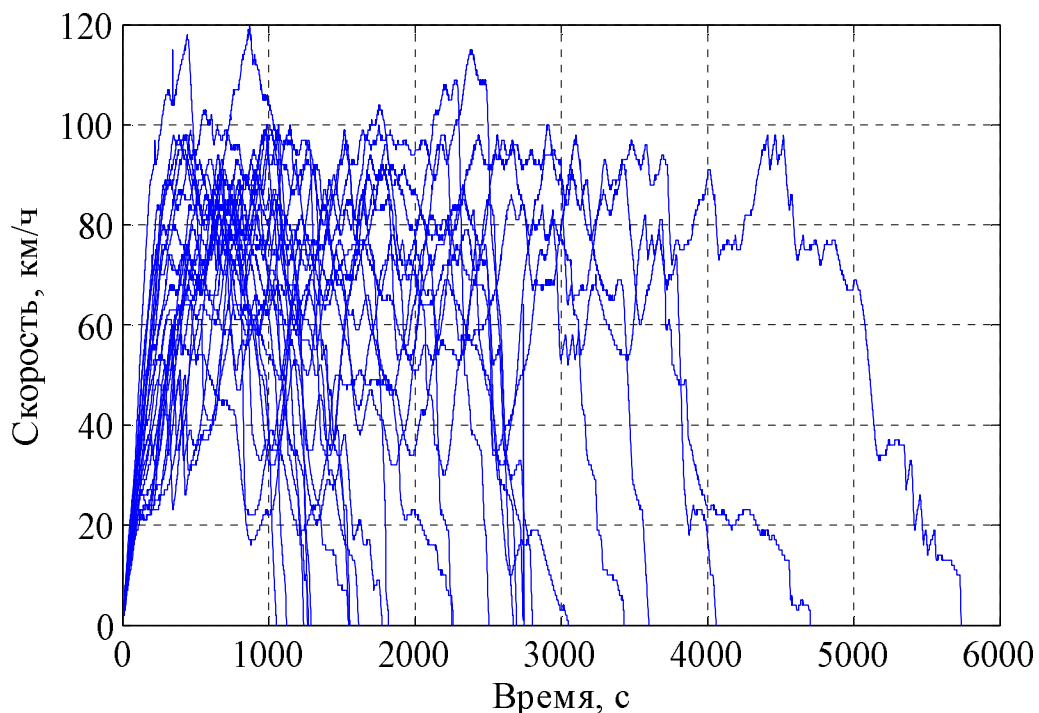


Рисунок 93 – Семейство кривых скорости тепловоза ТЭП70БС при движении на 0 ПКМ с работающим дизелем

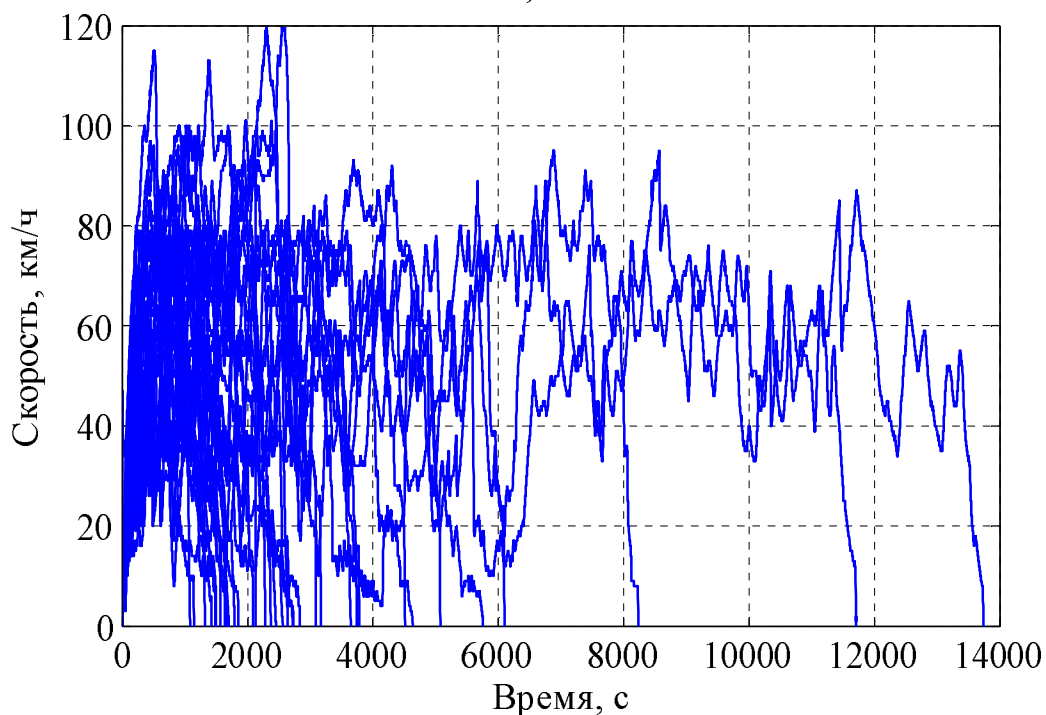


Рисунок 94 – Семейство кривых скорости при движении тепловоза ТЭП70БС с максимальной 7 ПКМ

Таблица 26 – Результаты исследований поездок с ограничением по максимальной позиции контроллера машиниста

№ ПКМ	2ТЭ25К <sup>М</sup>		2ТЭ25А		ТЭП70БС	
	Время, ч	Кол-во	Время, ч	Кол-во	Время, ч	Кол-во
0	25,7	31	7,4	11	16,6	25
1	26,4	33	10,4	15	16,9	26
2	27,3	35	12,5	19	17,6	28
<b>3</b>	<b>33,6</b>	<b>42</b>	<b>18,7</b>	<b>27</b>	<b>24,6</b>	<b>36</b>
4	39,1	51	26,4	39	32,6	43
5	64,7	87	37	50	55	70
6	72,7	98	39,3	54	62,2	76
7	91,4	122	48,8	66	96,6	113
<b>8</b>	<b>98,5</b>	<b>130</b>	<b>54,7</b>	<b>74</b>	<b>104,6</b>	<b>124</b>
9	128,2	162	81	100	140,2	180
10	140,1	172	95,7	115	153,9	198
11	187	214	139,5	148	208,2	287
<b>12</b>	<b>216,6</b>	<b>239</b>	<b>156,9</b>	<b>172</b>	<b>246,2</b>	<b>343</b>
13	292,7	313	193,6	208	475	658
14	317	332	287,8	284	555,6	754
15	332,5	350	323,1	307	591,2	799



Из результатов исследований видно, что применение двухдизельной энергетической установки на магистральных локомотивах целесообразно, т.к. примерно в 30 % поездках грузового движения дизель-генераторная установка используется с КИМ не более 0,5, а в пассажирском – до 23 % поездок.

Дальнейший анализ проведен для использования позиций контроллера машиниста не выше рассматриваемой для фрагмента поездки, при этом дальнейший набор позиций не происходит, что позволит оценить целесообразность использования многодизельных энергетических установок при оперативном управлении их работой во время движения. При анализе фрагменты поездок, удовлетворяющие условиям выборки, продолжительностью менее 1 мин не учитывались и не рассматривались. Время представлено накопительным итогом по позициям контроллера машиниста. Сводные результаты представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Результаты исследований фрагментов поездок с ограничением по максимальной позиции контроллера машиниста

№ ПКМ/КИМ	2ТЭ25КМ			2ТЭ25А			ТЭП70БС		
	Время, ч	Кол-во	Время, о.е.	Время, ч	Кол-во	Время, о.е.	Время, ч	Кол-во	Время, о.е.
0/0	169,8	4439	0,49	143	1391	0,43	291,9	3858	0,47
1/0,05	173,1	113	0,5	146,4	119	0,44	296,6	189	0,47
2/0,1	179,6	185	0,52	152,1	142	0,46	308,5	312	0,49
<b>3/0,23</b>	<b>188,6</b>	<b>186</b>	<b>0,55</b>	<b>157,7</b>	<b>103</b>	<b>0,48</b>	<b>322</b>	<b>310</b>	<b>0,51</b>
4/0,3	200,9	223	0,59	163	74	0,49	330,8	164	0,53
5/0,35	226,5	293	0,66	169,8	84	0,52	347,3	279	0,55
6/0,43	233,3	83	0,68	174,3	46	0,53	350,8	68	0,56
7/0,46	248,2	145	0,72	185,1	105	0,56	373,5	291	0,6
<b>8/0,49</b>	<b>251,3</b>	<b>32</b>	<b>0,73</b>	<b>190,1</b>	<b>57</b>	<b>0,58</b>	<b>378,4</b>	<b>58</b>	<b>0,6</b>
9/0,55	267,3	133	0,78	208,7	127	0,63	410,4	336	0,65
10/0,61	272,3	37	0,79	218,4	49	0,66	420,6	98	0,67
11/0,7	296,5	155	0,86	240,6	112	0,73	463,6	369	0,74
<b>12/0,78</b>	<b>309,6</b>	<b>78</b>	<b>0,9</b>	<b>252,2</b>	<b>50</b>	<b>0,77</b>	<b>487</b>	<b>209</b>	<b>0,78</b>
13/0,86	335,7	142	0,98	276,8	110	0,84	589,6	767	0,94
14/0,93	340,2	28	0,99	316,5	122	0,96	619,6	214	0,99
<b>15/1</b>	<b>343,4</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>329,6</b>	<b>28</b>	<b>1</b>	<b>627,3</b>	<b>54</b>	<b>1</b>

Произведена оценка времени работы дизель-генераторных установок в составе модульного исполнения, результаты представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Время работы модулей ДГУ для различного исполнения

Вариант модульной ДГУ		Время работы модулей ДГУ, %		
		2ТЭ25КМ	2ТЭ25А	ТЭП70БС
двухдизельная	1 ДГУ (0,5 Рн)	73	58	60
	2 ДГУ (1,0 Рн)	27	42	40
трехдизельная	1 ДГУ (0,25 Рн)	55	48	51
	2 ДГУ (0,5 Рн)	18	10	9
	3 ДГУ (1,0 Рн)	27	42	40
четырёхдизельная	1 ДГУ (0,25 Рн)	55	48	51
	2 ДГУ (0,5 Рн)	18	10	9
	3 ДГУ (0,75 Рн)	17	19	18
	4 ДГУ (1,0 Рн)	10	23	22

Из результатов исследований видно, что применение модульной энергетической установки на магистральных локомотивах целесообразно, и позволит более 48 % времени движения локомотива использовать одну силовую установку для всех видов движения, что позволит сократить расходы энергоресурсов, снизить вредные выбросы в окружающую среду и снизить затраты на ремонт моноблочных ДГУ за счет сокращения времени их работы на холостом ходу [114].

### **3.3.2 Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях за счет применения дискретно-адаптивного управления**

Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой (дискретно-адаптивное управление), позволяет реализовать принцип масштабируемости распределенной системы, путем приведения количества работающих тяговых двигателей к текущим условиям нагрузки на локомотив, и должен стать одним из ключевых элементов цифровой системы управления локомотива (в том числе и будущих систем на основе искусственного интеллекта).

та), что позволит существенно сократить расход топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов.

Для тепловозов с электрической передачей мощности постоянного или переменного тока данная проблема недоиспользования мощности стоит еще острее, чем на электровозах, что объясняется гиперболической характеристикой тягового генератора (рисунок 95) [70].

Тепловозы последних выпусков предусматривают возможность полного использования эффективной мощности дизеля, т.е. чтобы всё время выдерживалось соотношение

$$P_e = P_{\Gamma} + P_{\text{всп}}. \quad (130)$$

В результате, мощность тягового генератора (при наличии выпрямительной установки, мощность тягового генератора определяется на выходе выпрямительной установки), для выбранной позиции, может возрастать или уменьшаться на величину изменения мощности вспомогательных нужд, что вносит дополнительные возмущающие воздействия в процесс управления поездом.

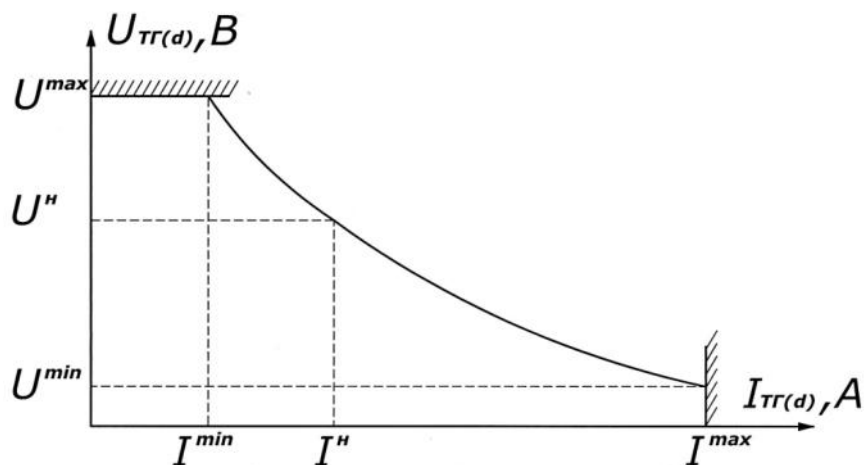


Рисунок 95 – Внешняя характеристика тягового генератора

Внешняя и частичные характеристики тягового генератора имеют вид гиперболы, т.е. мощность генератора поддерживается постоянной на каждой пози-

ции контроллера машиниста, что позволяет обеспечить полное использование свободной мощности дизеля во всем рабочем диапазоне скоростей движения тепловоза [70]. Поле точек работы тягового генератора тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> в реальных условиях получено во второй главе настоящей диссертации и для наглядности рассуждений приведем еще раз (рисунок 96) .

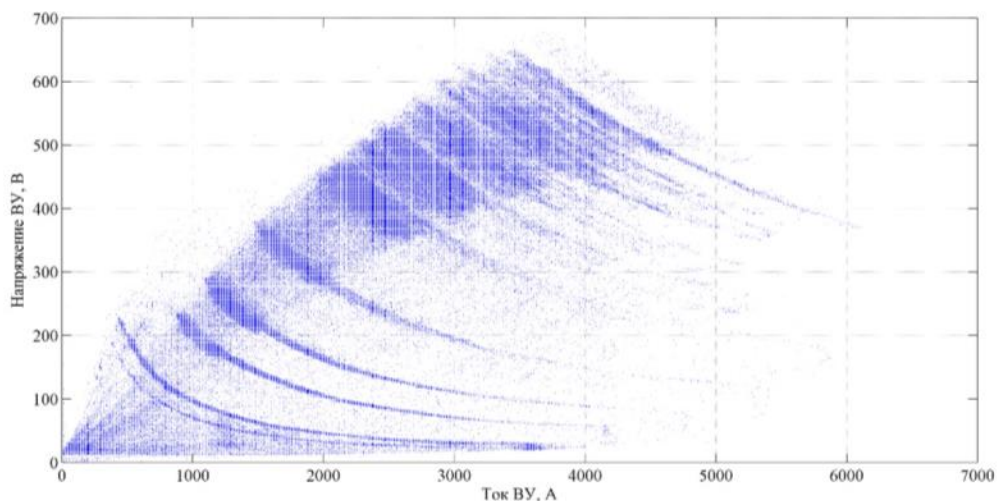


Рисунок 96 – Поле точек работы тягового генератора 2ТЭ25К<sup>М</sup>

Из гиперболической характеристики тягового генератора следует, в том числе и из экспериментальных данных, что на первой позиции ток тягового генератора изменяется в диапазоне от 400 А до 4000 А, т.е. в 10 раз. Известно что, омические потери в электрических машинах пропорциональны квадрату тока, т.е. изменение омических потерь будет в 100 раз

$$\Delta P_{\text{эл}} = I^2 r. \quad (131)$$

Сто кратное изменение электрических потерь при работе по гиперболической характеристике является первой причиной низкой энергоэффективности тяговых электрических машин в режимах с неполной нагрузкой.

Второй причиной снижения энергоэффективности является управления тяговым приводом по напряжению, что так же приводит к увеличению токовой

нагрузки тяговых электрических машин, и как следствие к существенному увеличению доли потерь, зависящих от квадрата тока.

$$\eta_{\text{ТЭД}} = 1 - \frac{I_{\text{ТЭД}}^2 \cdot r + \Delta P_{\text{пост}}}{I_{\text{ТЭД}} U_{\text{DC}}}, \quad (132)$$

где  $I_{\text{ТЭД}}$  – ток тягового двигателя;

$U_{\text{DC}}$  – напряжение на зажимах канала выпрямительной установки;

$\Delta P_{\text{пост}}$  – величина условно-постоянных потерь.

Из формулы (132) видно, что применяя регулирование по напряжению, изменяется подводимая мощность, но при этом потери мощности в электрической машине остаются такими же, что приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических машин (тягового генератора и тягового двигателя) [115].

Применение дискретно-адаптивного управления количеством тяговых двигателей в работе позволит рационально использовать доступную мощность каждого двигателя, что снизит затраты энергии на потери, зависящие от токовой нагрузки [115].

Результаты расчета внешних характеристик при работе с разным количеством тяговых электродвигателей [115] приведены в таблице 29. По расчётным точкам, а также используя теоретические исследования на ПК, строим внешние характеристики тягового генератора (рисунок 97) в зависимости от числа работающих тяговых электродвигателей.

Систему адаптивного регулирования числа работающих ТЭД на локомотиве можно реализовать с помощью штатной микропроцессорной системы управления тепловозом 2ТЭ25К<sup>М</sup> (МПСУ-ТП) [115], в алгоритм работы которой необходимо внести следующие изменения: количество включаемых ТЭД должно соответствовать определенной позиции контроллера машиниста согласно таблице 30.

Таблица 29 – Расчет внешней характеристики тягового генератора

Ud, В	Id, А					
	Количество, работающих ТЭД					
	1	2	3	4	5	6
750	549	1099	1648	2198	2747	3296
652	632	1264	1895	2527	3159	3791
577	714	1428	2143	2857	3571	4285
517	797	1593	2390	3187	3983	4780
469	879	1758	2637	3516	4395	5274
452	912	1824	2736	3648	4560	5472
436	945	1890	2835	3780	4725	5670
421	978	1956	2934	3912	4890	5868
408	1011	2022	3033	4044	5054	6065
395	1044	2088	3132	4175	5219	6263

U, В

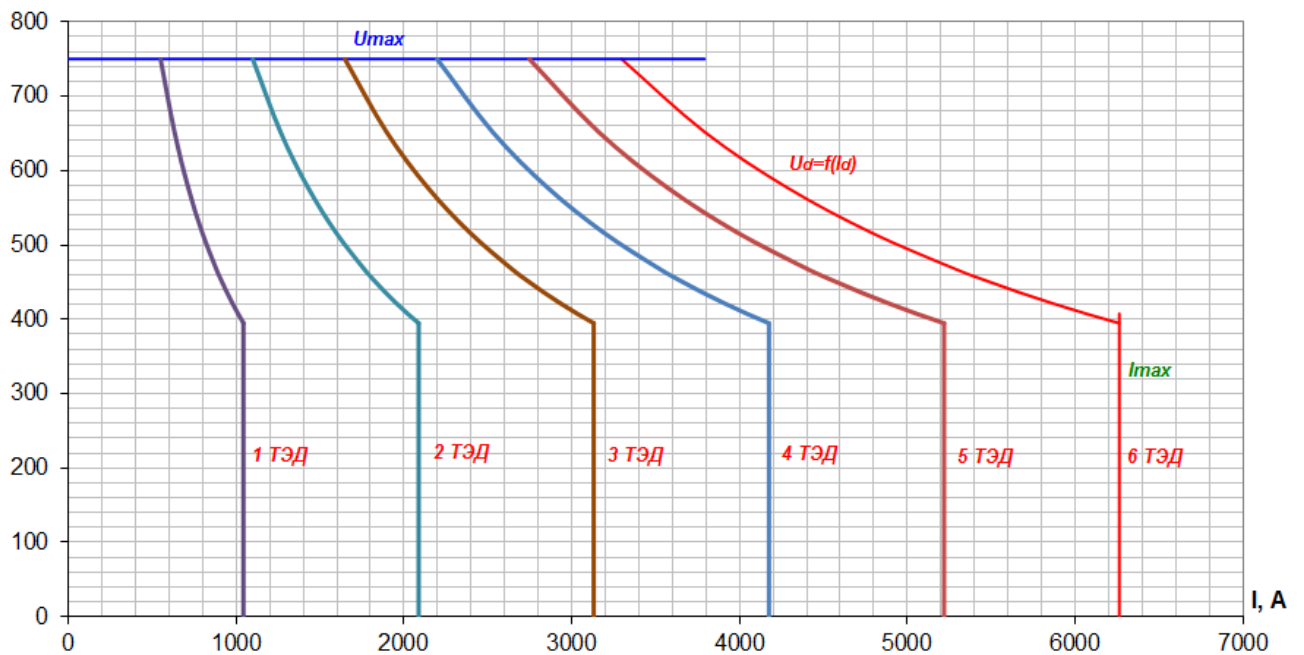


Рисунок 97 – Внешние характеристики тягового генератора

При скоростях меньше 20 км/ч включаются удвоенное количество ТЭД от расчетного значения, приведенного в таблице 30, для позиций контроллера машиниста от 1 до 5, начиная с 6 позиции включены все шесть тяговых двигателей секции тепловоза с целью предотвращения боксования [115].

Таблица 30 – Соответствие работающих ТЭД позиции контроллера машиниста

Позиция контроллера машиниста	Количество работающих ТЭД	Суммарная мощность на зажимах выпрямительной установки, кВт	Мощность одного работающего канала выпрямительной установки, кВт
0	0	0	0
1	1	120	120
2	1	220	220
3	1	330	330
4	2	550	275
5	2	735	368
6	3	882	294
7	3	1029	343
8	3	1176	392
9	4	1323	331
10	4	1470	368
11	5	1617	323
12	5	1764	353
13	5	1911	382
14	6	2058	343
15	6	2210	368

Управление режимами работы тяговых двигателей предлагается осуществлять дискретно (включение или отключение) при помощи управляемой многоканальной выпрямительной установки путем уменьшения напряжения на соответствующих тяговых электродвигателях до нуля по сигналам системы МПСУ-ТП.

Установленное оборудование на тепловозе 2ТЭ25К<sup>М</sup> позволяет реализовать энергоэффективное управления тяговой электрической передачей мощности тепловоза путем отключения части электродвигателей. Реализовать систему отключения ТЭД можно путем доработки программного обеспечения МПСУ-ТП. В разрабатываемом алгоритме необходимо предусмотреть учет работы каждого ТЭД и отключать первыми те, у которых время работы будет наибольшим, следовательно, будет реализовываться алгоритм выравнивания ресурса ТЭД. Кроме того необходимо предусмотреть смену работающих ТЭД при превышении допустимого времени не работающего ТЭД с целью снижения износа коллекторно-щеточного аппарата.

Таким образом, в случае использования предлагаемой системы адаптивного регулирования числа работающих тяговых двигателей в режиме тяги, коэффициент полезного действия ТЭД по предварительным оценкам возрастет на 10 %, а, следовательно, и уменьшается расход дизельного топлива на 10 %, только за счет оптимизации работы режимов тягового электрического оборудования тепловозов.

### **3.3.3 Применение бесколлекторных тяговых электрических машин**

Интенсивное развитие силовой электроники и микропроцессорной техники создало предпосылки разработки и широкого применения электромеханических трансмиссий переменного-переменного тока транспортных средств [116].

Наибольшее распространение в электрических передачах мощности получили асинхронные и синхронные электрические машины с электронными преобразователями. Асинхронные машины характеризуются хорошим соотношением цена/качество [116]. В асинхронном приводе работа с ограничением мощности обеспечивается при ограничении напряжения питания двигателя за счет соответствующего ослабления поля [117]. В синхронном приводе с постоянными магнитами поле практически не регулируется, что приводит к необходимости завышения установленной мощности преобразователя в 3...10 раз. Для средних и тяжелых транспортных средств это приводит к недопустимому удорожанию системы электрической передачи мощности. К тому же асинхронные и синхронные электрические машины имеют активный ротор, снабженный обмотками или постоянными магнитами, что, по мере роста мощности снижает их механические свойства и затрудняет передачу механического движения на колеса с большим моментом.

Одним из альтернативных перспективных типов электрических машин являются реактивные индукторные двигатели и генераторы [118, 119]. Эти электрические машины имеют пассивный зубчатый ротор с большой механической прочностью, что снимает ограничения на передачу механического момента [120, 121], характерные для традиционных электрических машин. Они обладают свойством



электромагнитной редукиции, имеет простую конструкцию статорных обмоток с сосредоточенными катушками. Кроме того, эти электрические машины обладают высоким значением КПД в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, за счет отсутствия обмоток на роторе, а их преобразователи имеют простую топологическую схему [122].

Все эти свойства позволяют прогнозировать возможность создания системы электрической передачи мощности бесколлекторным тяговым приводом с повышенными тягово-энергетическими [123, 124] и эксплуатационными характеристиками [125].

Хотя демонстрационные проекты на транспорте с бесколлекторным тяговым приводом, показали, что это направление является областью потенциальных возможностей улучшения тягово-энергетических, эксплуатационных и экономических показателей [126], до сих пор существует определенный скептицизм в отношении этих систем. Сложность заключается в объективном сравнении конструкций и характеристик разных типов электроприводов, так как топология бесколлекторного привода включает в себя не только электрическую машину, но и преобразователь с системой управления, а выходные характеристики зависят от выбранного алгоритма управления, поэтому «выпячивание» преимуществ только по одному из критериев приводит к некорректному сопоставлению различных типов электрических передач мощности).

Поэтому актуальным является проведение исследований, направленных на разработку принципов проектирования систем электрической передачи мощности с бесколлекторным тяговым приводом с учетом параметров автономных локомотивов, ограничений со стороны двигателя внутреннего сгорания, силовой электроники, обеспечивающий достижение оптимальных характеристик компонентов по массе, габаритам, КПД, цене, с учетом технологических ограничений промышленного производства.

Динамические характеристики тягового привода и эффективность использования бесколлекторных тяговых машин в первую очередь достигаются схемами преобразования и принципами управления, реализуемыми микропроцессорными

системами управления тяговым приводом. Ключевым вопросом, при разработке автономного тягового подвижного состава нового поколения, является разработка энергоэффективных систем управления бесколлекторными тяговыми приводами, обеспечивающими достижение высоких тяговых и энергетических характеристик для всех эксплуатационных режимов работы локомотива.

К актуальным задачам относятся:

- определение принципов функционирования и построения систем автоматического управления бесколлекторным тяговым приводом;
- формирование заданных значений потокосцепления и выходного момента на валу.

Поскольку процесс работы каждого узла локомотива определяется его конструкцией, устройством и параметрами системы управления, то разработку бесколлекторного тягового привода следует сочетать с проектированием других узлов тягового электропривода – тягового генератора, тягового двигателя, тягового преобразователя генератора и тягового преобразователя двигателя. В результате необходимо рассматривать автономный локомотив как комплексную электромеханическую систему с бесколлекторным тяговым приводом и системой управления верхнего уровня.

Например, для асинхронного тягового двигателя имеются несколько способов управления в зависимости от выбранного контролируемого параметра. В отличие от двигателей постоянного тока, в котором можно управлять как током статора, так и током якоря (ослабление поля или применение независимого возбуждения), и с учетом того, что на роторе находится короткозамкнутая обмотка, то управление асинхронным электродвигателем осуществляется путем изменения амплитуды и частоты тока статора [127, 128].

В зависимости от выбранного способа управления можно получить мягкую [128] механическую характеристику (управление с заданным напряжением статора и постоянством частоты скольжения ротора) или жесткую [128] механическую характеристику (управление с постоянным магнитным потоком). Выбранный способ управления осуществляется через задание необходимых значений ам-

плитуды и частоты тока статора асинхронного двигателя по средствам управления силовыми транзисторами в преобразователе по сигналам системы управления.

В результате получаем еще большую неопределенность при разработке бесколлекторного тягового привода, т.к. все характеристики управляемого бесколлекторного тягового привода с микропроцессорными системами управления определяются не только конструкцией электрической машины, но и алгоритмами его управления. Поэтому разработка бесколлекторного тягового привода должна сопровождаться исследованием влияния параметров управления на моментные и энергетические характеристики.

### **3.4 Формулирование основных положений концепции повышения энергетической эффективности автономных локомотивов**

Концепция повышения энергетической эффективности автономных локомотивов заключается в разработке модульной конструкции, позволяющей оперативно осуществлять принцип масштабируемость нагрузки, использование тягового и вспомогательного оборудования локомотива должно соответствовать текущим условиям работы локомотива [129]. Поэтому при разработке структурных схем перспективных автономных локомотивов должны учитывать следующие основные подходы:

- применение модульных энергетических установок [130], позволяющих обеспечить требуемую мощность в соответствии с текущими условиями движения [131]. Наиболее перспективным видится применение двух (для грузового локомотива) и четырех (для пассажирского и маневрового локомотива) энергетических установок на одной секции локомотива. Применение двух энергетических установок на грузовых тепловозах обусловлено несколькими секциями тепловоза, т.е. для двух секционному локомотива будет 4 энергетических установки, а для 3 секционному 6 энергетических установок;

- применение общего звена постоянного напряжения (тока) с фиксированным значением напряжения (не менее 600 В) для всех режимов работы тягового и

вспомогательного оборудования, что позволит выработать единые требования для разработки, проектирования и модульной структуры оборудования локомотива с одной стороны, и обеспечить снижение доли потерь, зависящих от токовой нагрузки, кроме этого становится возможным использование тягового генератора в режиме стартера для запуска дизеля, и модернизированной штатной аккумуляторной батареи с тяговыми аккумуляторами, как накопителя энергии [132], для кратковременных режимов нагружения;

- питание тяговых бесколлекторных двигателей осуществляется от статических тяговых преобразователей, подключенных к звену постоянного напряжения. Управление инверторами индивидуальное с поосным регулированием момента тяговых двигателей, с возможностью полного отключения;

- применение двухуровневого дискретно-адаптивного управления тяговым оборудованием автономных локомотивов при вождении поездов;

- питание вспомогательного оборудования должно обеспечиваться многоканальными статическими преобразователями с независимыми каналами, позволяющими индивидуально управлять каждым элементом вспомогательного оборудования [133], это позволит добиться упрощения и унификации преобразователей собственных нужд и снизить затраты энергии на привод вспомогательных машин и агрегатов;

- применение накопителей энергии целесообразно только после обеспечения рациональных алгоритмов прямого и обратного электромеханического преобразования энергии в тяговых электрических машинах и рационального расхода энергии на собственные нужды, что требует сначала применения вышеизложенных основных положений.

Функциональная схема энергоэффективной передачи мощности на примере тепловоза приведена на рисунке 98.

В соответствии с функциональной схемой энергоэффективной передачи мощности тепловоза предусмотрено общее звено постоянного напряжения, к которому подключаются все компоненты тягового оборудования, такое решение позволяет реализовать принцип модульной структуры, можно использовать две,

как показано на рисунке 98, или четыре энергетических установки, работающих на общее звено постоянного напряжения.

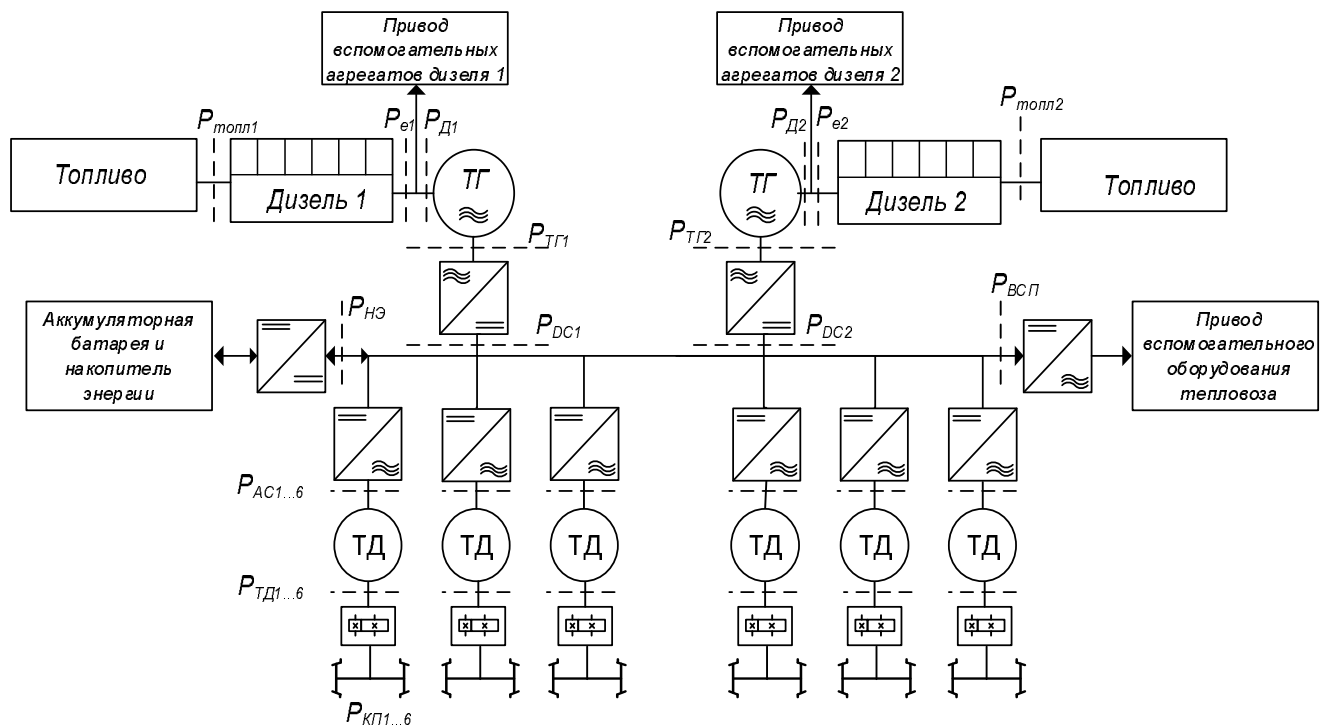


Рисунок 98 – Функциональная схема энергоэффективной передачи мощности тепловоза

Выбор количества ДГУ обусловлен условиями профиля пути, потока грузоперевозок и родом службы локомотива. От звена постоянного напряжения, через многоканальные управляемые преобразователи собственных нужд получают питание электрические машины собственных нужд. От звена постоянного напряжения, через DC-DC преобразователь получает питание аккумуляторная батарея и цепи управления локомотивом, так же DC-DC преобразователь предназначен для преобразования напряжения при использовании накопителя энергии, небольшой емкости, для обеспечения кратковременных режимов работы, с целью исключить непродолжительные запуски второй или последующей энергетической установки локомотива.

Таким образом, в энергоэффективной передаче мощности локомотива должны использоваться не только современные бесколлекторные электрические машины, но и должно быть реализовано управление энергетической эффективно-

стью использования тягового и вспомогательного оборудования путем многоуровневой оптимизации работы оборудования (модульная энергетическая установка, тяговые двигатели, вспомогательное оборудование) в условиях реальной эксплуатации, что позволит значительно повысить энергоэффективность автономных локомотивов.

### **3.5 Разработка научных основ проведения тяговых расчетов методом конечных элементов через изменение энергетического состояния поезда**

Метод конечных элементов широко используется для решения задач прикладной физики, механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики, электродинамики, электромагнетизма [134]. В 30 годах XX века в условиях необходимости решения сложных задач в области строительной механики и сопротивления материалов возник метод конечных элементов [135]. Основателями формулирования основ метода конечных элементов являются Александр Хренников и Рихард Курант, опубликовавшие свои работы в 1940-х годах. Впервые эффективность реализации метода конечных элементов продемонстрирована в 1944 году с применением электронно-вычислительной машины Иоаннисом Аргирисом [135].

Очередной виток развития метод конечных элементов получил в 1963 году, когда была доказана возможность рассмотрения метода Рэлея – Ритца, используемого в строительной механике, через минимизацию потенциальной энергии системы как систему линейных алгебраических уравнений равновесия [135].

Метод конечных элементов получил широкое распространение в различных типах задач с минимизацией энергией, описываемых уравнениями Лапласа и Пуассона. В 1968 году применение метода взвешенных невязок (метод Галёркина или метод наименьших квадратов) позволило получать систему уравнений для описания элементов в данном типе задач, что теоретически обосновало и существенно расширило область применения метода конечных элементов для решения различных дифференциальных уравнений. В результате метод конечных элемен-

тов стал общим метод численного решения дифференциальных уравнений или систем дифференциальных уравнений [134].

Из теории тяги поездов известно, что движение поезда описывается дифференциальным уравнением движения, а методы расчета энергооптимальных расчетов направлены на минимизацию энергии [136], таким образом, многовариантная задача поиска рациональной траектории движения поезда может быть однозначно решена методом конечных элементов, что является, безусловно, новым направлением в развитии методов теории тяги поездов, первые основы которой были заложены ещё в 1813 году англичанином Уильямом Гедли [137], а в настоящее время используются классические методы расчета, основанные на решении уравнения движения поезда в форме задачи Коши [137].

Потребности в энергоэффективном управлении движении поездов с локомотивами с дискретно-адаптивным управлением работы тягового оборудования требует разработки новых, комплексных для участка пути, методов расчета движения одного поезда или нескольких поездов на участке, в том числе и с применением технологий «виртуальной автосцепки», где основной задачей должно являться не поддержание фиксированного расстояния между поездами, а обеспечение безопасности движения при энергоэффективном ведении поездов.

### **3.5.1 Основные положения метода конечных элементов**

В основе метода конечных элементов лежит идея представления непрерывно изменяющейся величины отдельными элементами или участками, т.е. производится разбиение рассматриваемой области задачи на конечное число элементов. Для каждого из элементов исследуемая величина аппроксимируется кусочно-непрерывной функцией, определяемая через ее значения в узловых точках отдельных элементов [134].

В методе конечных элементов состояние исследуемого объекта приближенно описывается конечным числом степеней свободы, а за степени свободы принимаются перемещения известной совокупности точек объекта, т.е. узлов [134].

Узлы служат вершинами конечных элементов. В пределах каждого конечного элемента поле перемещений аппроксимируется с помощью функций формы, которая выбирается в виде линейных, квадратичных или кубических полиномов по известным перемещениям узлов [138]. Для каждого конечного элемента определить полином, с обязательным условием непрерывности его величины вдоль границ элемента [139]. Функция формы позволяет проводить дальнейшую аппроксимацию изменения геометрии элемента или поля определяемых величин [139].

Метод конечных элементов представляет возможность преодолеть бесконечность точек связей реального объекта моделирования путем разбиения задачи сплошной структуры на элементарные элементы, имеющие возможность взаимодействия только в точках соединения (узлах), в которых приложены фиктивные силы равные проекции энергетического эквивалента состоянию системы по границам элементарного элемента [140].

Основные этапы расчета методом конечных элементов:

- разбиение соответствующей структуры объекта моделирования на конечное число подобластей (конечных элементов), имеющих общие узловые точки и в совокупности аппроксимирующих форму конструкции (дискретизация тела);
- представление полной энергии объекта, как функции перемещений его узлов;
- составление системы линейных алгебраических уравнений для перемещений узлов, обеспечивающих минимум полной энергии упругого тела;
- решение системы линейных алгебраических уравнений и определение перемещений узлов;
- определение напряженного состояния объекта исследования по перемещениям ее узлов.

Напряженное и деформированное состояние конечного элемента определяется через его узловые перемещения, поэтому важным является определение функции перемещений.

Полная энергия  $E$  рассматриваемого объекта или системы представляется как функция  $m$  неизвестных узловых перемещений. Согласно вариационному



принципу Лагранжа возможно образование системы  $m$  линейных алгебраических уравнений задачи

$$\frac{\partial E}{\partial V_i^0} = 0. \quad (133)$$

Таким образом, задача расчета рациональной траектории движения поезда сводится к разбиению области координатно-скоростной плоскости возможного нахождения поезда на конечные элементы, формирование системы линейных алгебраических уравнений равновесия и определение узловых перемещений траектории движения поезда на координатно-скоростной плоскости.

Движение поезда предлагается рассматривать как изменение энергетического состояния системы зависящего от профиля пути, скорости движения, сил сопротивления движению, режимов работы тягового и вспомогательного оборудования. Переход из одного энергетического состояния в другое осуществляется с учетом потерь энергии при ее преобразовании и возможно лишь с учетом соблюдения ряда ограничений: ограничения по сцеплению, ограничения по доступной мощности, ограничения по торможению, кроме того существует ряд постоянных действующих ограничений по максимальной скорости движения. Целевой функцией является траектория движения поезда с минимальными затратами энергоресурсов на преодоление заданного участка.

### 3.5.2 Метод расчет энергетического состояния поезда

Для определения метода и структуры уравнения определения энергетического состояния будем рассматривать поезд как материальную точку, где сосредоточена вся его масса. Переход к модели «нерастяжимой нити» осуществляется через определение эквивалентного подъема для всего поезда, с учетом неравномерности распределения массы поезда по его длине [104].

Полная энергия поезда в заданный момент времени складывается из потенциальной и кинетической энергии [104]

$$E = \Pi + T. \quad (134)$$

Потенциальная энергия поезда зависит от высоты нахождения поезда над уровнем моря и в общем виде определяется по формуле [104]

$$\Pi = mgh, \quad (135)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$h$  – высота профиля участка пути, для расположения поезда.

Кинетическая энергия поезда в любой момент времени зависит от скорости движения и определяется по формуле [104]

$$T = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (136)$$

где  $V$  – скорость поступательного движения поезда;

$J$  – суммарный полярный момент инерции вращающихся частей поезда, приведенный к радиусу колеса;

$\omega$  – угловая скорость вращающихся частей поезда.

$$\omega = \frac{V}{R}, \quad (137)$$

где  $R$  – радиус колеса.

$$J = m_{\text{вп}} \cdot R^2. \quad (138)$$

где  $m_{\text{ВР}}$  – масса вращающихся частей поезда, приведенная к радиусу колеса.

Тогда выражение для определения кинетической энергии примет вид

$$T = \frac{mV^2}{2} + \frac{m_{\text{ВР}} \cdot R^2 V^2}{2 \cdot R^2} = \frac{V^2}{2} (m + m_{\text{ВР}}), \quad (139)$$

$$T = m \cdot \frac{V^2}{2} (1 + \gamma). \quad (140)$$

Изменение кинетической энергии поезда, возможно при приложении внешних сил, т.е. совершение работы со стороны внешних сил. При этом работа может быть как положительная (режим тяги), так и отрицательная (режим выбега или режим торможения).

Тогда изменение кинетической энергии поезда, на элементарном отрезке пути определяется по формуле

$$dT = (F_K - W_K - B_T) \cdot ds, \quad (141)$$

где  $ds$  – элементарный отрезок пути.

Определение энергетического состояния поезда на участке пути в координатах  $V, s$ .

$$E(V, s) = \Pi(s) + T(V). \quad (142)$$

Исходными данными для расчета являются: профиль пути, масса поезда, количество и тип вагонов, максимальная допустимая скорость движения на заданном участке.

Для каждой точки пространства возможного расположения поезда можно определить энергетическое состояние поезда, т.е. каким количеством полной энергии обладает рассматриваемый поезд в данной точке.

$$E_{i,j}(s, V) = \Pi_{i,j}(s) + T_{i,j}(V), \quad (143)$$

где  $i \in s, j \in V$

Расчет осуществляется с учетом изменения кинетической энергии, при переходе на следующий элементарный отрезок пути на величину элементарной работы сил сопротивления движению поезда при заданной скорости, т.е.

$$dT_w = - \frac{(W_o + W_d) \cdot ds}{1000}, \quad (144)$$

где  $W_o$  – сила основного сопротивления движению поезда;

$W_d$  – сила дополнительного сопротивления движению поезда, за исключением сил дополнительного сопротивления от профиля пути.

Работа сил дополнительного сопротивления от профиля пути учитывается при определении изменения потенциальной энергии поезда, т.к.

$$d\Pi = m \cdot g \cdot (h(s + ds) - h(s)). \quad (145)$$

Что эквивалентно элементарной работе сил дополнительного сопротивления от профиля пути

$$A_{W_i} = \frac{W_i \cdot ds}{1000}, \quad (146)$$

где  $W_i$  – сила дополнительного сопротивления от профиля пути

$$W_i = m \cdot w_i = m \cdot g \cdot i, \quad (147)$$

где  $i$  – крутизна уклона, ‰.

$$i = 1000 \frac{h(s + ds) - h(s)}{ds}. \quad (148)$$

Тогда подставив, получим

$$A_{W_i} = m \cdot g \cdot 1000 \frac{h(s + ds) - h(s)}{ds} \cdot \frac{ds}{1000} = m \cdot g \cdot (h(s + ds) - h(s)). \quad (149)$$

Таким образом, видно, что изменение потенциальной энергии поезда это и есть элементарная работа сил дополнительного сопротивления от профиля пути

$$d\Pi = A_{W_i}. \quad (150)$$

### 3.5.3 Формирование карты энергетического состояния поезда

Для удобства рассмотрим равномерную прямоугольную сетку для построения карты энергетического состояния поезда. Рассмотрим диапазон скоростей от 0 до 100 км/ч, участок обращения примем 10 км, т.е. 10000 м

Шаг по скорости определим 10 км/ч, по перемещению 100 м. В результате, формируется матрица размерностью 11x101 (нумерация начинается с 1), каждая ячейка которой определяет энергетическое состояние поезда в текущей координатно-скоростной плоскости (рисунок 99) [141].

Формирование карты энергетического состояния поезда происходит для всего диапазона скоростей и всего участка пути [141], т.е.

$$E_{i,j}(s, V) = \Pi_{i,j}(s) + T_{i,j}(V), \quad (151)$$

где  $i \in s, j \in V$ .

или можно записать в матричной форме

$$[E] = \{\Pi\} \times [V1] + \{S1\} \times [T], \quad (152)$$

где  $\{\Pi\}$  – матрица-столбец потенциальной энергии рассматриваемого участка;

- $[T]$  – матрица-строка кинетической энергии поезда;  
 $[V1]$  – единичная матрица-строка, с размерностью равной матрице  $[T]$ ;  
 $\{S1\}$  – единичная матрица-столбец, с размерностью равной матрице  $\{П\}$ .

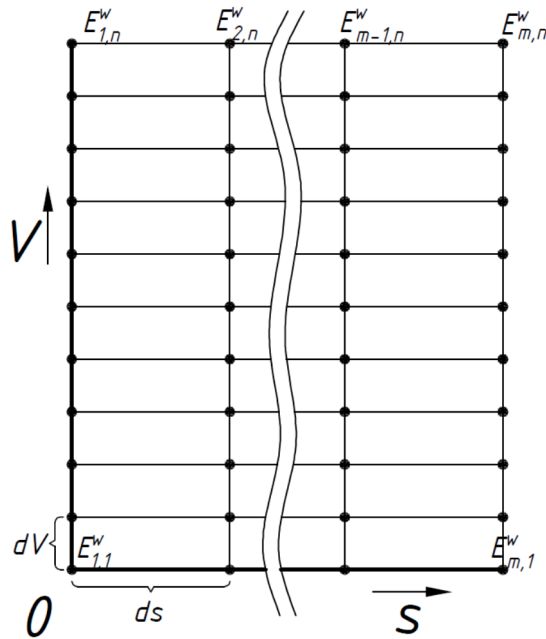


Рисунок 99 – Расчет энергетического состояния поезда в координатно-скоростной плоскости

Принимаем, что полная энергия поезда в начале координат равна некоторой величине потенциальной энергии, определенной через высоту над уровнем моря, обозначим как  $\Pi_0$

$$\Pi_0 = m \cdot g \cdot h_0. \quad (153)$$

Начальная кинетическая энергия поезда равна 0, т.к. скорость равна нулю, Тогда полная энергия поезда, в начальный момент, определяется только потенциальной энергией [141], т.е.

$$E_{1,1} = \Pi_0. \quad (154)$$

Расчет энергии поезда (без учета сил сопротивления) для любой точки на плоскости осуществляется по формуле [141]

$$E_{i,j} = m \cdot \left[ g \cdot h_i + \frac{V_j^2}{2} (1 + \gamma) \right]. \quad (155)$$

С учетом того, что для перемещения поезда вдоль пути необходимо затратить энергию, равную работе совершаемой силами основного и дополнительного сопротивления. Это эквивалентно, тому, что поезд будет двигаться на фиктивный подъем, где будет совершаться такая же работа. Тогда необходимая энергия поезда, с учетом затрачиваемой работы со стороны сил трения, для его нахождения в произвольной точке координатно-скоростной плоскости составит [141]

$$E_{i,j}^w = E_{i,j} - \frac{(W_o(V) + W_d(V)) \cdot (s_i - s_{i-1})}{1000}. \quad (156)$$

Для примера, построим карту энергетического состояния поезда для следующих исходных данных: Участок пути – прямой, горизонтальный, высота над уровнем моря 10 м; Масса локомотива  $P = 150$  т; количество груженых 4-хосных вагонов  $m = 50$  шт; масса одного вагона  $q = 90$  т; В среднем для поезда принимаем  $\gamma = 0,0583$ ; масса поезда составит 4650 т.

Удельное сопротивление определяется в соответствии с [61] по формуле

- для локомотива

$$w'_0 = 18,6 + 0,08 \cdot V + 0,0024 \cdot V^2, \quad (157)$$

$$w_x = 23,5 + 0,09 \cdot V + 0,034 \cdot V^2, \quad (158)$$

- для вагонов

$$w_o'' = 5,2 + \frac{34,2 + 0,732 \cdot V + 0,022 \cdot V^2}{q_o}, \quad (159)$$

где  $V$  – скорость движения в км/ч;

$q_o$  – нагрузка на ось, т.

Тогда сила основного сопротивления движения поезда, при движении в режиме выбега составит

$$W_o(V) = W_x'(V) + W_o''(V), \quad (160)$$

$$W_x'(V) = \frac{P \cdot w_x}{1000}, \quad (161)$$

$$W_o''(V) = \frac{m \cdot (5,2 + (34,2 + 0,732 \cdot V + 0,022 \cdot V^2) \cdot 4)}{1000}. \quad (162)$$

В результате получаем расчет для каждого элемента сетки на координатно-скоростной плоскости. На рисунке 100 представлена карта энергетического состояния поезда [141]. На рисунке 101 представлены изолинии энергетического состояния поезда [141].

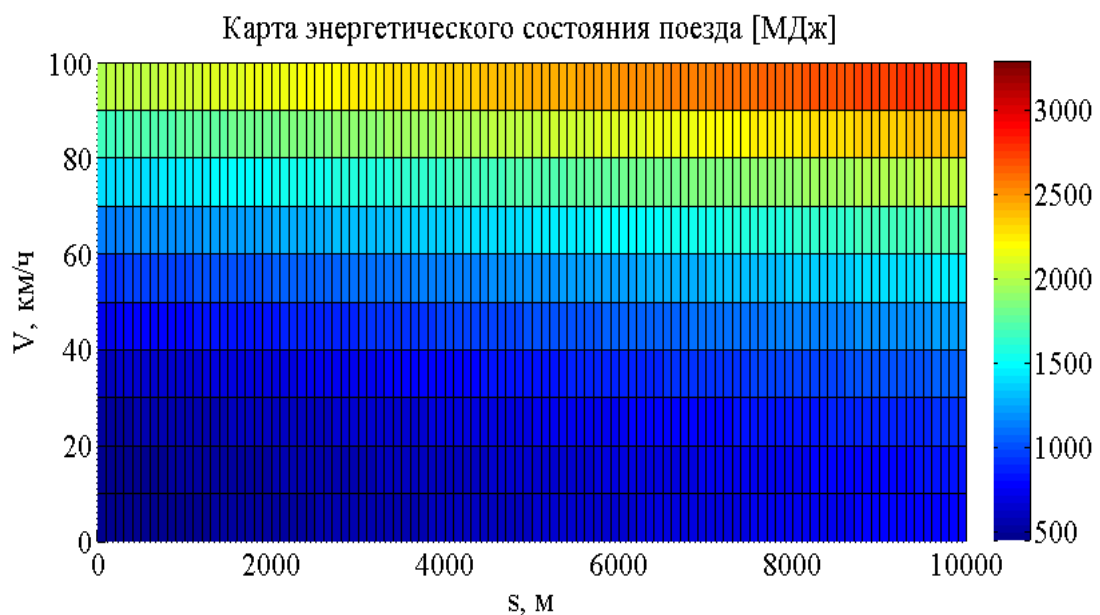


Рисунок 100 – Карта энергетического состояния поезда



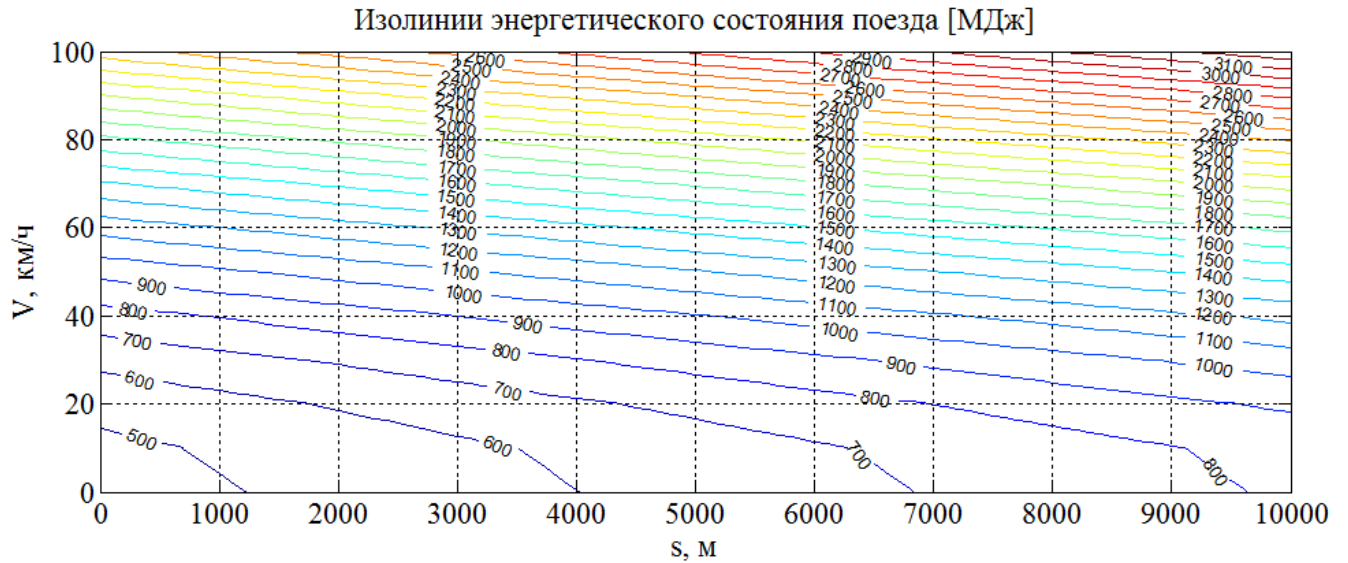


Рисунок 101 – Изолинии энергетического состояния поезда

Из расчетных данных следует, что в точке с координатами (0,0) энергия поезда составила  $E_{1,1}^w$  456,165 МДж, а в точке (10000,0) энергия поезда (с учетом затрат на преодоление основного сопротивления) составила  $E_{m,1}^w$  812,898 МДж, таким образом, минимальное количество энергии (на ободе колеса) необходимое для перемещения составит

$$E_{\min(1,1-m,1)}^w = E_{m,1}^w - E_{1,1}^w, \quad (163)$$

$$E_{\min(1,1-m,1)}^w = 812,898 - 456,165 = 356,733 \text{ МДж} = 99,09 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При этом видно, что есть бесконечное множество траекторий изменения полной энергии, приводящих к достижению поставленной цели, при минимальных затратах энергии на перемещение поезда.

Если начальная скорость равна 0 км/ч, то для преодоления заданного участка необходимо дополнительно передать на обод колеса 99,09 кВт · ч энергии, а вот как это будет сделано, это зависит от выбора траектории управления.

Предположим, что есть возможность мгновенно сообщить данную энергию всему поезду, то тогда его скорость мгновенно изменится до следующей величины [141]

$$V = 3,6 \sqrt{\frac{2 \cdot dT}{m \cdot (1 + \gamma)}} \quad (164)$$

И далее будет происходить движение в режиме выбега. Так же альтернативным является, начало движения при начальной скорости 43,3 км/ч например достигнутой до начала данного участка.

Время прохождения участка определяется по формуле [141]

$$t = \int_0^s \frac{ds}{V_{\text{ср}}}, \quad (165)$$

где  $V_{\text{ср}}$  – средняя скорость движения на элементе  $ds$ .

При начальной скорости 0 км/ч необходимо приложить силу тяги к ободу колеса, тем самым работа, совершаемая в результате действия силы тяги, пойдет на увеличение кинетической энергии поезда, т.е. скорость движения будет увеличиваться.

Приведем расчет траектории изменения энергии поезда при движении в режиме тяги при нахождении поезда в начале координат. Расчет проведем по тяговой характеристики **одной** секции 2ТЭ25К.

Энергия, передаваемая поезду, при движении в режиме тяги равна элементарной работе силы тяги и определяется по формуле [141]

$$E^F = dA_{F_K} = \frac{F_K(V) \cdot ds}{1000}, \quad (166)$$

где  $F_K(V)$  – касательная сила тяги, реализуемая на ободу колеса.

Полная энергия поезда на координатно-скоростной плоскости, при движении в режиме тяги, составит

$$E_{i,j}^{Fw} = E_{1,1}^w + \frac{F_{K_j}(V) \cdot (s_i - s_{i-1})}{1000} - (E_{i,j}^w - E_{i-1,j}^w). \quad (167)$$

В результате расчета получаем изменение скорости в режиме тяги (рисунок 102, черная линия).

Приведем расчет траектории изменения энергии поезда при движении в режиме полного служебного торможения, с остановкой в конечной точке.

Энергия тормозной силы равна работе на заданном перемещении

$$E^B = dA_{B_T} = \frac{k_B \cdot B_T(V) \cdot ds}{1000}, \quad (168)$$

где  $k_B$  – коэффициент, учитывающий режим работы пневматических тормозов (для экстренного торможения  $k_B = 1$ , для полного служебного торможения  $k_B = 0,5$ , для регулировочного торможения  $k_B = 0,1 \dots 0,4$ ).

Тормозная сила равна сумме всех тормозных сил, реализуемых на подвижных единицах в составе поезда

$$B_T = 1000 \cdot \varphi_{KP} \sum K_P, \quad (169)$$

где  $\varphi_{KP}$  – расчетный коэффициент трения;  $K_P$  – расчетная сила нажатия тормозной колодки

Расчетный коэффициент трения и сила нажатия для композиционных колодок

$$\varphi_{KP}^K = 0,36 \frac{V + 150}{2V + 150}, \quad (170)$$

$$K_P^K = 1,22K \frac{0,1K + 20}{0,4K + 20}. \quad (171)$$

Расчет проведем для полного служебного торможения  $k_B = 0,5$ , при композиционных колодках с расчетным тормозным нажатием  $K_p^K = 35$ .

Полная энергия поезда на координатно-скоростной плоскости, при движении в режиме торможения [141], составит

$$E_{i,j}^{Bw} = E_{1,1}^w - \frac{k_B \cdot B_T(V) \cdot (s_i - s_{i-1})}{1000} - (E_{i,j}^w - E_{i-1,j}^w). \quad (172)$$

В результате расчета получаем изменение скорости при полном служебном торможении (рисунок 102, красная линия).

Аналогичным образом можно построить энергетическое состояние поезда для любого профиля пути. Для примера приведен расчет энергетической карты для участка реального профиля пути Лихая – Ростов-Главный (рисунок 103).

Из рисунка 102 видно, что в области диаграммы, находящейся выше кривой скорости в режиме тяги (черная линия), поезд не может находиться (при начальной скорости равной 0 км/ч), так как тяговые свойства секции ограничены, а следовательно данную область можно исключить из дальнейших расчетов, что позволит сократить объем хранящейся информации и уменьшить количество расчетов.

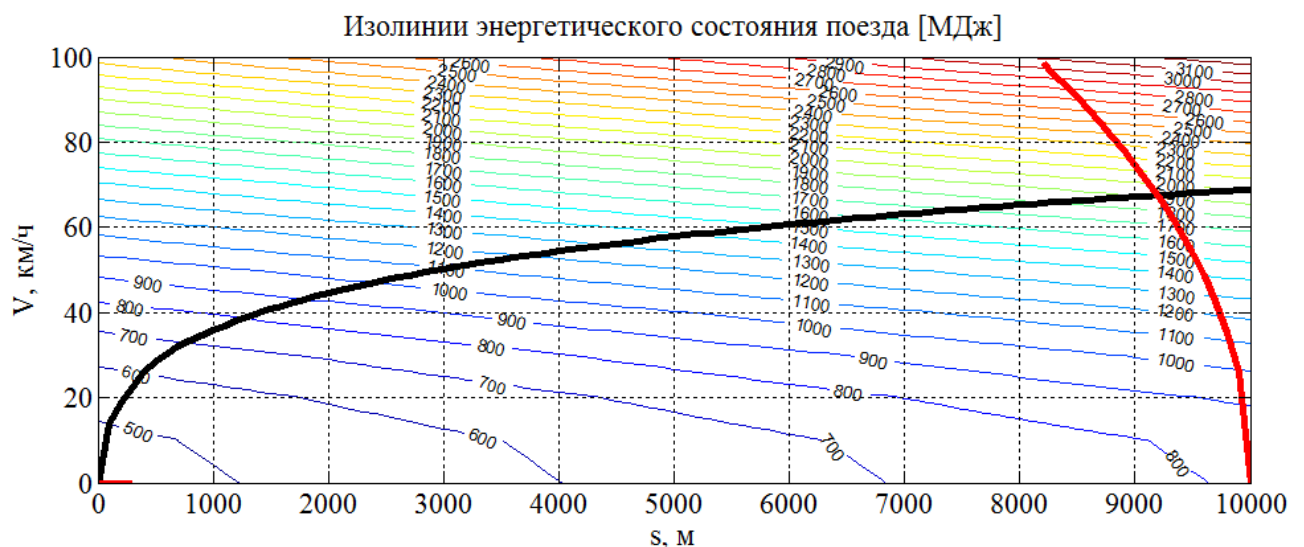


Рисунок 102 – Изолинии энергетического состояния поезда с максимально возможным изменением скорости при трогании с места и при торможении

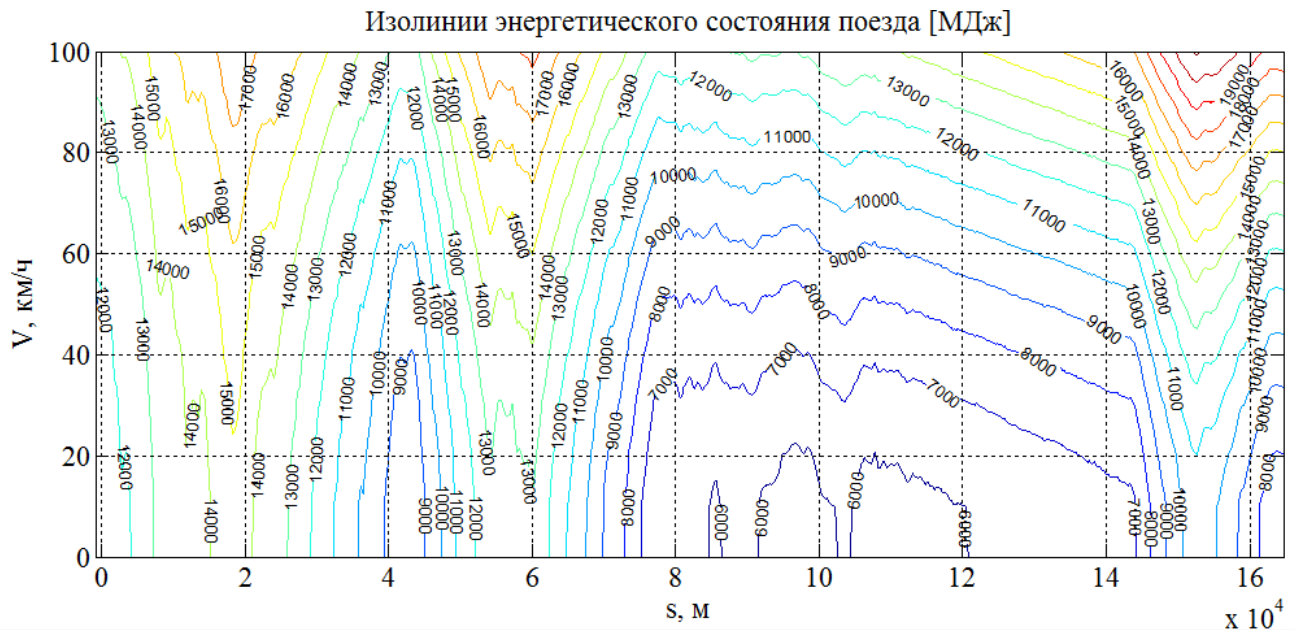


Рисунок 103 – Изолинии энергетического состояния поезда для участка Лихая – Ростов-Главный

Изолинии энергетического состояния (рисунок 103) удобно использовать при определении режимов движения поезда, т.е. составления режимной карты. Каждая изолиния представляет собой кривую изменения скорости для режима выбега. Переход с одной изолинии на другую возможен в режиме тяги (увеличение энергии) или торможения (уменьшение энергии). Максимально возможное изменение энергии определяется тягово-тормозными средствами поезда, с другой стороны через изменение энергии можно определить режим работы оборудования, обеспечивающий необходимое изменение энергии.

Кроме этого, карта энергетического состояния поезда позволяет произвести расчет накопителей энергии и их режимов работы. Для этого заранее определяется необходимое количество отдаваемой (исходящей) энергии от накопителя для преодоления участка  $s_3 - s_4$ , при этом скорость изменяется от  $V_3$  до  $V_4$  [141].

$$E_{Н.Э.}^{исх} = \frac{(E_{s_4, V_4}^w - E_{s_3, V_3}^w)}{\eta_{зр} \cdot \eta_{ТЭД} \cdot \eta_{СП} \cdot \eta_{Н.Э.}^{исх}}, \quad (173)$$

где  $\eta_{зр}$  – коэффициент полезного действия зубчатого редуктора;

$\eta_{ТЭД}$  – коэффициент полезного действия тягового двигателя;

$\eta_{СП}$  – коэффициент полезного действия статического преобразователя;

$\eta_{Н.Э.}^{исх}$  – коэффициент полезного действия накопителя энергии.

Количество запасаемой (входящей) энергии в накопителе при прохождении произвольного участка  $s1-s2$  определяется по формуле

$$E_{Н.Э.}^{ВХ} = (E_{s1,V1}^w - E_{s2,V2}^w) \cdot \eta_{ЗР} \cdot \eta_{ТЭД}^{рек} \cdot \eta_{СП} \cdot \eta_{Н.Э.}^{ex} \quad (174)$$

где  $\eta_{ТЭД}^{рек}$  – коэффициент полезного действия тягового двигателя при рекуперации;

$\eta_{Н.Э.}^{ex}$  – коэффициент полезного действия накопителя энергии при зарядке.

Приравняв количество запасаемой и отдаваемой энергии, определим необходимое изменение энергии  $\Delta E^w$  энергетического состояния поезда на участке  $s1-s2$  для рекуперации энергии в накопитель, с целью ее дальнейшего использования для преодоления участка  $s3-s4$ .

$$\Delta E^w \left( \begin{matrix} s1, V1 \\ s2, V2 \end{matrix} \right) = (E_{s1,V1}^w - E_{s2,V2}^w) = \frac{(E_{s4,V4}^w - E_{s3,V3}^w)}{(\eta_{ЗР} \cdot \eta_{СП})^2 \cdot \eta_{ТЭД} \cdot \eta_{ТЭД}^{рек} \cdot \eta_{Н.Э.}^{исх} \cdot \eta_{Н.Э.}^{ex}} \quad (175)$$

Анализируя кривую скорости движения поезда до участка  $s3-s4$ , определяется участок  $s1-s2$ , на котором происходит изменение энергетического состояния поезда на величину  $\Delta E^w$  при постоянстве или увеличении скорости движения.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Установлено, что для увеличения коэффициента полезного действия локомотива при реализации необходимой силы тяги в многодвигательном тяговом

приводе автономных локомотивов в условиях эксплуатации целесообразно использовать минимальное количество тягового оборудования, которое позволяет обеспечить необходимую мощность.

2. Применение разработанных методов управления режимами работой тяговых двигателей, позволит добиться экономии топливно-энергетических ресурсов за счет малозатратных мероприятий, так как вопрос оперативного отключения/подключения тягового двигателя одной или нескольких осей в автоматическом режиме обеспечивается на верхнем уровне системы управления (т.е. на большинстве современных локомотивах достаточно изменить программное обеспечение верхнего уровня управления локомотивов, так как современный тяговый подвижной состав имеет возможность поосного (индивидуального) регулирования мощности каждого двигателя вплоть до его полного вывода из тяги).

3. Проведенный комплекс исследований, позволил формализовать методы принятий решений для выбора количества работающих ТЭД, соответствующего наибольшей эффективности использования локомотива, что способствует повышению энергоэффективности транспортного комплекса РФ.

4. Разработанный метод расчета энергетического состояния поезда можно использовать для поиска оптимальной траектории движения поезда, для чего необходимо ввести дополнительные ограничения, которые смогут определить однозначный выбор траектории движения. Данный метод дает наглядное представление о процессах изменения энергетического состояния поезда, как механической системы, что позволит определять затрачиваемую (тяга) или возвращаемую (электродинамическое торможение) энергию в процессе построения оптимальной траектории, что особенно важно при расчете накопителей энергии для перспективного автономного подвижного состава. Необходимая мощность на тягу (или сила тяги) вычисляется через изменение энергии на рассматриваемом участке, формируется закон управления с постоянной мощностью на ободу колеса, при задании допустимого отклонения скорости, или оперативное управление мощностью позволяет поддерживать значения заданной скорости.

5. Разработана научно обоснованные методы и концепция управления энергетической эффективностью автономного локомотива с электрической передачей мощности модульной структуры, что позволит более 48 % времени движения локомотива использовать одну силовую установку для всех видов движения, что обеспечит сокращение расходов энергоресурсов и снижение вредных выбросов в окружающую среду.

6. Экономический эффект от внедрения концепции повышения энергетической эффективности локомотивов, по предварительным оценкам, составит не менее 10 % экономии энергоресурсов на тягу поездов, при уменьшении количества отказов дизель-генераторной установки из-за длительной работы на холостом ходу не только во время стоянок, но и во время движения.



#### **4 Комплексная компьютерная модель автономного локомотива с электрической передачей мощности с модульной структурой тягового оборудования**

Для проведения исследований по применению разработанных методов и концепции повышения энергетической эффективности автономных локомотивов необходимо разработать математическую модель автономного локомотива, в виде комплексной компьютерной модели. Электрическая передача мощности автономного локомотива представляет собой сложную электромеханическую систему, которую возможно описать общей системой уравнений, однако такой подход не считается рациональным, т.к. затруднено восприятия полученного результата. Оптимальным вариантом является составление функциональной схемы основных компонентов электрической передачи мощности (ДВС, тяговый генератор, тяговый двигатель и т.д.) с дальнейшим математическим описанием всех ее элементов, при этом использование современных пакетов для математического моделирования, таких как MATLAB/Simulink [85, 142] и Универсальный механизм существенно ускоряет процесс построения моделей [143, 144, 145, 146].

В локомотиве с автономными источниками энергии (ДВС) создание высокоэффективной электрической передачи мощности возможно только путем рассмотрения всех компонентов энергетических и кинематических звеньев, участвующих в процессе преобразования и использования энергии [147]. Эти компоненты можно разделить на следующие взаимосвязанные элементы: первичный двигатель, электромеханические преобразователи, промежуточные передачи и контакт колесо-рельс.

В современном автономном локомотиве основным видом первичного двигателя является дизель. Наибольший интерес представляет электрическая передача, обладающая возможностью рекуперации энергии.

Электрическая передача мощности (рисунок 104) с электрическими машинами, в общем виде, состоит из двух электрических машин тягового генератора ТГ и тягового двигателя ТД, двух статических преобразователей (преобразователя

генератора СПГ и преобразователя двигателя СПД) с общим звеном постоянного тока (ЗПТ), от тягового двигателя ТД механическая энергия передается на колесную пару КП через зубчатый редуктор ЗР. Параллельно ЗПТ возможно подключение накопителя энергии НЭ (аккумуляторной батареи или супер конденсатора). В электрической передаче мощности предусматривается рекуперация энергии, а также возможность её накопления. При использовании накопителя энергии достаточно большой емкости предусматривается работа локомотива от него, при остановленном двигателе внутреннего сгорания, что позволит сократить расход дизельного топлива. Разнообразие вариантов исполнения электрической передачи мощности (рисунок 104) требует разработки общего подхода к разработке компьютерной модели, позволяющей легко трансформироваться под любой тип автономных локомотивов. Поэтому для дальнейших исследований рассмотрим разработку компьютерной модели тягового модуля передачи мощности, включающего все основные компоненты. Разработка комплексных компьютерных моделей локомотивов является актуальной задачей [148, 149], а применение специализированных программ позволяет исследовать различные варианты реализации схем передачи мощности.

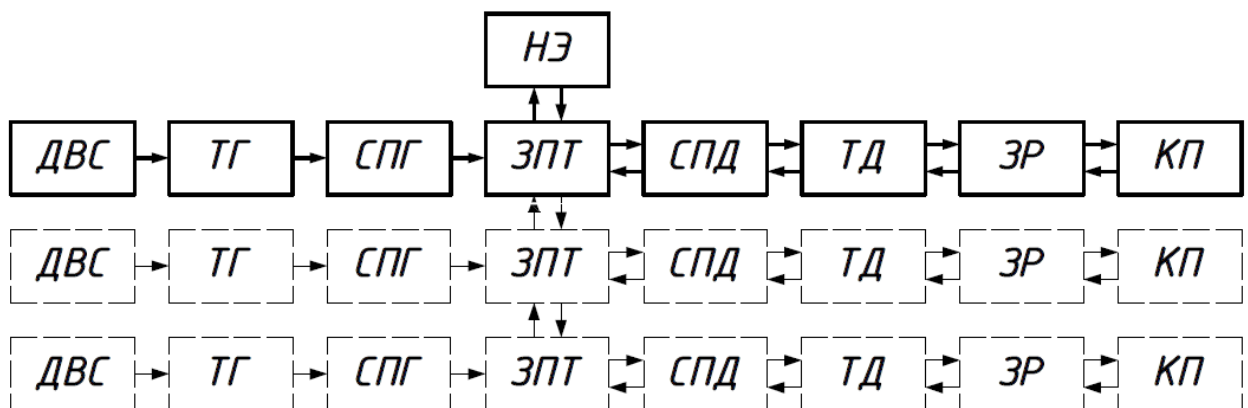


Рисунок 104 – Функциональная схема тягового модуля передачи мощности

#### 4.1 Компьютерная модель дизеля

Первичным источником энергии является двигатель внутреннего сгорания, механическая энергия которого передается непосредственно на вал тягового гене-

ратора. Дизель полностью характеризуется внешней характеристикой [150] (рисунок 105).

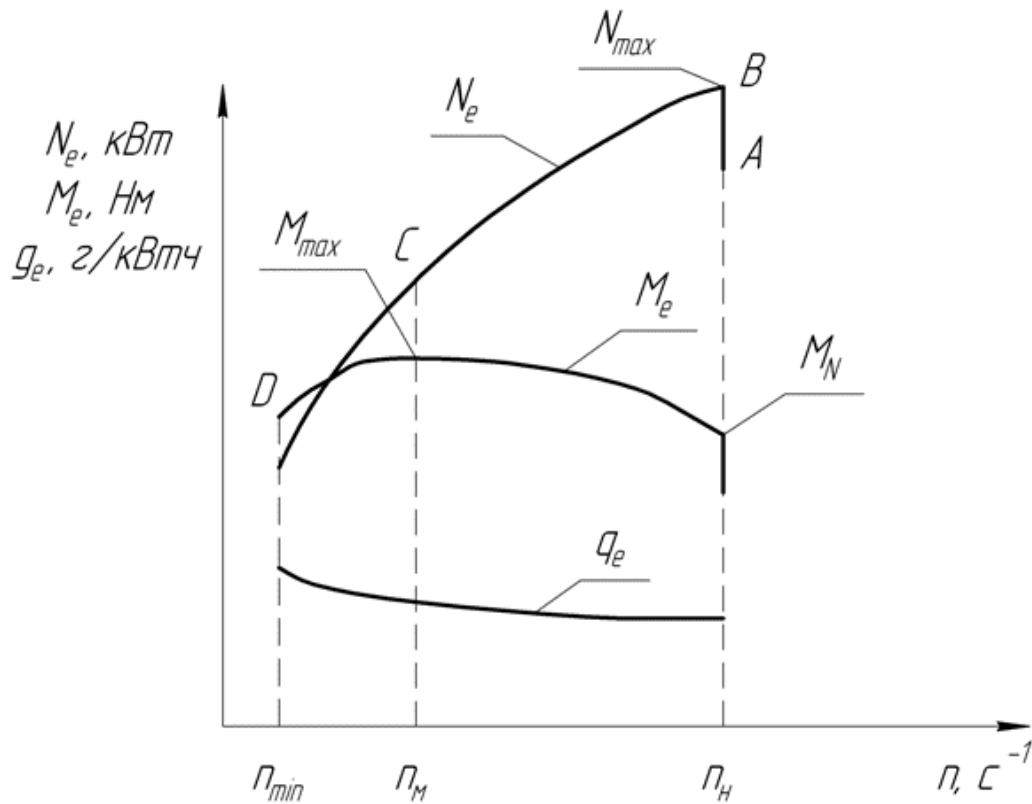


Рисунок 105 – Внешняя (скоростная) характеристика дизеля

Управление дизельным двигателем сводится к изменению количества топлива подаваемого в цилиндры. Машинист локомотива путем воздействия на орган управления дизеля, фактически задает желаемую частоту вращения коленчатого вала. Регулятор частоты оборотов (РЧО) дизеля при изменении нагрузки на дизель поддерживает заданную органом управления частоту вращения коленчатого вала путём регулирования подачи топлива (меняя выход реек ТНВД) [150, 151, 82].

Как правило, на локомотиве применяется регулятор частоты вращения коленчатого вала двигателя, задачей которого является обеспечение заданной частоты вращения коленчатого вала через изменение количества подаваемого топлива в цилиндры двигателя. Такой подход позволяет поддерживать заданную частоту вращения коленчатого вала практически постоянную вне зависимости от измене-

ния нагрузки в процессе работы на фиксированной позиции контроллера машиниста, что обеспечивает экономичную и надежную работу двигателя. Во всережимном регуляторе реализована функция защиты двигателя от превышения допустимой частоты вращения. Принцип действия механического регулятора основан на взаимодействии центробежных сил грузов и усилия пружины. В настоящее время широко применяются электронные регуляторы частоты вращения, где аналогичный функционал заложен при помощи аналого-цифровых или программных устройств.

Модель дизеля в программном комплексе MATLAB/Simulink представлена блоком, показанным на рисунке 106.

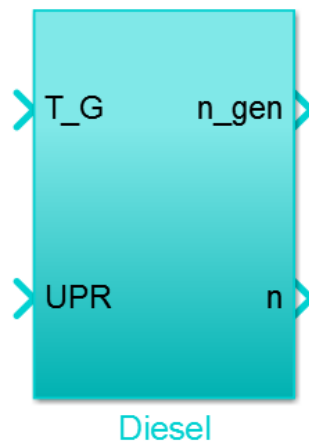


Рисунок 106 – Модель дизеля в программном комплексе MATLAB/Simulink

Входными параметрами являются момент генератора ( $T_G$ ) и управляющее воздействие ( $UPR$ ), выходными параметрами – частота вращения генератора ( $n_{gen}$ ) и дизеля ( $n$ ). Если между дизелем и генератором отсутствует редуктор, то  $n_{gen}=n$ .

Управляющее воздействие задается в системе привычной для данного типа локомотива: для тепловоза – позиция контроллера машиниста, для перспективного подвижного состава – сила тяги. Далее в блоке ( $Upr\_to\_n$ ) (рисунок 107), по заданной характеристике, происходит преобразование управляющего воздействия в заданную частоту вращения дизеля (аналогично работе РЧО). В сумматоре, стоя-

щем после блока (Upr\_to\_n), происходит сравнение текущей частоты вращения дизеля с заданной и разница значений подается на ПИ регулятор (PI Controller) [152].

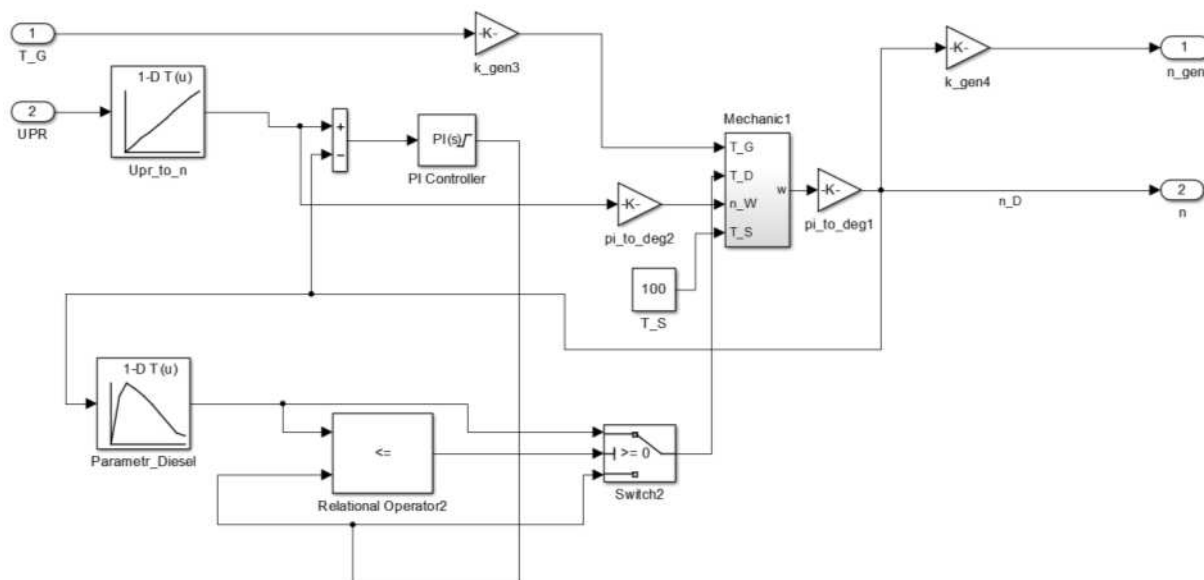


Рисунок 107 – Структура модели дизеля в программном комплексе MATLAB/Simulink

Настройки ПИ регулятора [152] позволяют достаточно точно смоделировать поведение дизеля. Выходом ПИ регулятора является вращающий момент дизеля, который в дальнейшем сравнивается с внешней характеристикой дизеля (Parametr\_Diesel), при превышении значения принимается равным ограничению по внешней характеристике. При отрицательном значении момента – принимается равным нулю (блоки Switch2 и Relational Operator2). Полученный момент дизеля поступает на блок (Mechanic1) (рисунок 108) где происходит решение уравнения механики:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{ген} + M_{диз} - M_{comp} \quad (176)$$

где  $\omega$  – частота вращения ротора;

$M_{ген}$  – электромагнитный момент генератора (подается с отрицательным знаком);

$M_{диз}$  – вращающий момент дизеля;

$M_{сопр}$  – момент сопротивления дизеля;

$J$  – приведенный момент инерции дизеля.

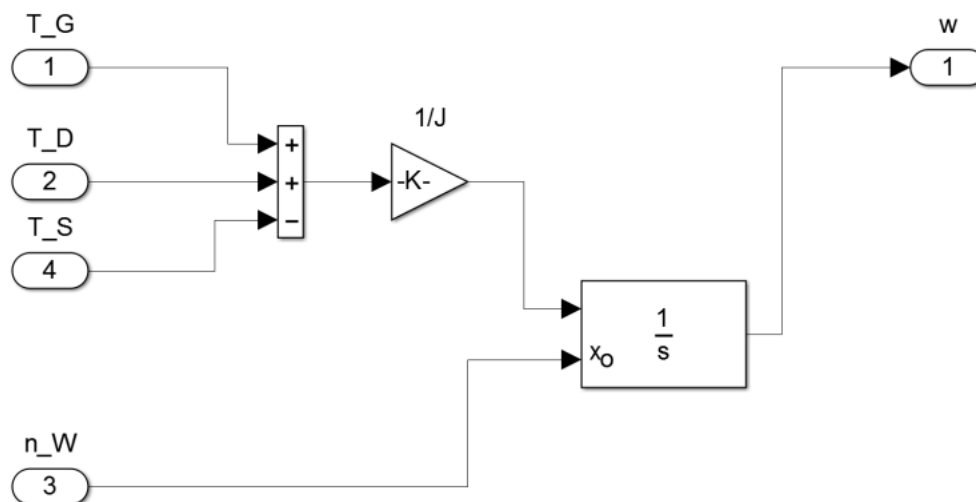


Рисунок 108 – Модель блока Mechanic1

Блоки (pi\_to\_deg) (см. рисунок 107) необходимы для перевода частоты вращения дизеля (рад/с) в обороты дизеля (об/мин) и обратно. При наличии редуктора между дизелем и генератором блоки (k\_gen) учитывают передаточное отношение редуктора.

Таким образом, разработанная компьютерная модель дизеля позволяет моделировать работу дизеля в тяговом канале электрической передачи мощности по его внешним характеристикам, приведенным в технической документации. При наличии микропроцессорной системы управления дизелем, возможно непосредственное задание частоты вращения дизеля, при этом необходима система управления верхнего уровня, которая бы согласовывала работу всей электрической передачи в целом [153].

## 4.2 Математическая и компьютерная модель электромеханического преобразования энергии в тяговых электрических машинах автономных ЛОКОМОТИВОВ

Электромеханическими преобразователями энергии на локомотиве являются тяговые электрические машины, которые преобразуют электрическую энергию в механическую (двигатель) или, наоборот, из механической энергии в электрическую (генератор) [154]. Любой процесс преобразования энергии сопровождается ее потерями, с обязательным выделением тепла.

Для процесса преобразования энергии должен сохраняться баланс энергий и мощностей, который описывается уравнениями на основании второго закона Кирхгофа для цепи, состоящей из источника питания и фазной обмотки.

Рассмотрим разработку модели в общем виде, данный подход может быть использован для любых типов электрических машин (ЭМ), однако он получил наибольшее распространение для реактивных индукторных машин (РИМ). Фаза ЭМ представляет собой группу соединённых катушек. Каждая группа катушек обладает активным и индуктивным сопротивлениями [154]. Известно, что второй закон Кирхгофа имеет вид [155]

$$u + e = iR, \quad (177)$$

где  $u$  – напряжение, приложенное к фазе;

$e$  – электродвижущая сила, наведенная в фазе;

$i$  – сила тока фазы;

$R$  – сопротивление фазы.

Тогда, с учетом того, что электродвижущая сила равна производной потока сцепления по времени

$$e = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (178)$$

$$u = iR + \frac{d\psi}{dt}, \quad (179)$$

где  $\psi$  – потокосцепление фазной обмотки.

Энергия, поступающая из источника в электрическую машину, расходуется на потери на активном сопротивлении фазы  $W_{эл}$ , на приращение энергии магнитного поля  $W$  и совершение механической работы  $W'$ , (рисунок 109) [156].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W'(i_n, \theta)}{\partial i_n} \right) + R_n \cdot i_n = u_n, n \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad (180)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \mp T_L, \quad (181)$$

$$W'(i_n, \theta) = \sum_{n=1}^N \int_0^{i_n} \psi_n(i_1, \dots, i_N, \theta) di_n. \quad (182)$$

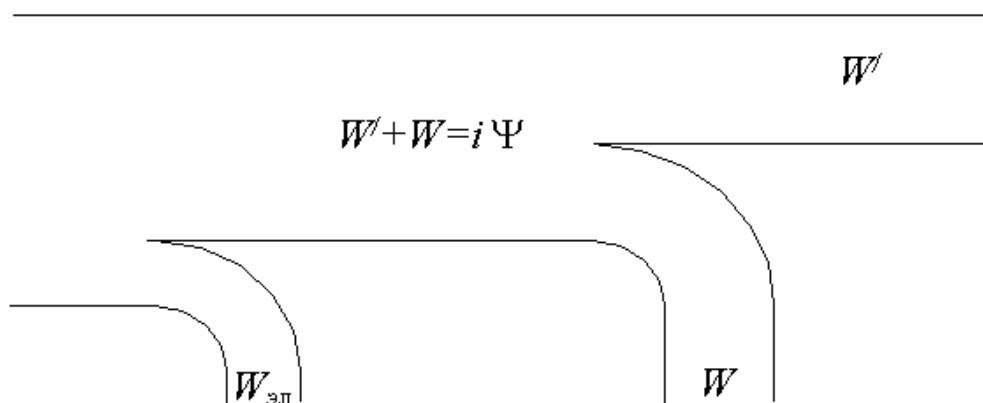


Рисунок 109 – Диаграмма электромеханического преобразования энергии

Для РИМ особое значение занимают кривые намагничивания для согласованного и рассогласованного положения для реактивных индукторных машин [157]. Кривые намагничивания при других положениях ротора относительно статора на плоскости  $(\psi, i)$  занимают промежуточное положение [158] между кривыми в согласованном и рассогласованном положениях (рисунок 110).



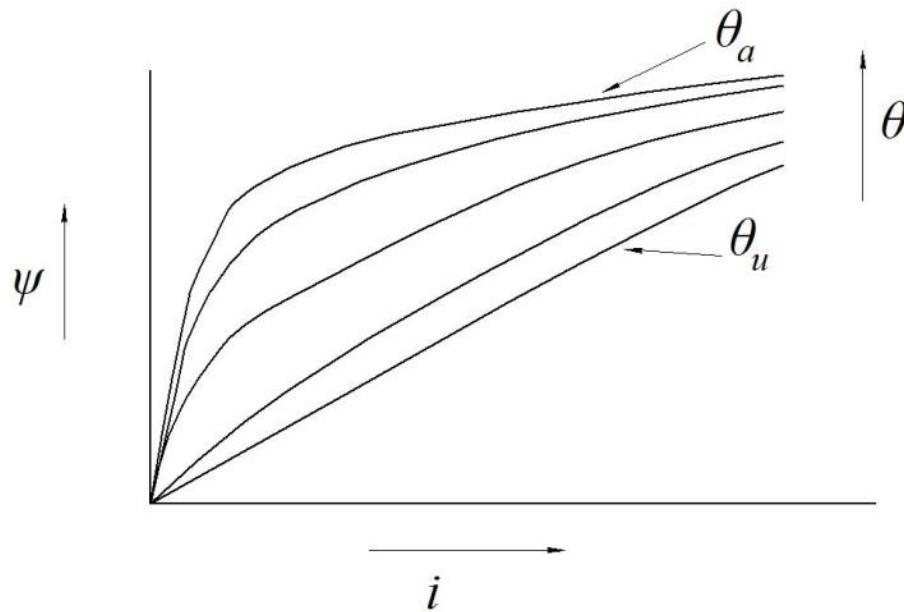


Рисунок 110 – Семейство кривых намагничивания РИМ

Мгновенный электромагнитный момент фазы определяется произведением тока фазы и производной потокосцепления фазы по углу поворота ротора [154]

$$M = i \frac{\partial \psi(i, \theta)}{\partial \theta}. \quad (183)$$

С другой стороны, для определения электромагнитного момента можно использовать производную коэнергии [154]

$$dW' = i\omega \frac{\partial \psi(i, \theta)}{\partial \theta} dt. \quad (184)$$

учитывая что, соотношение для угловой частоты вращения  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  [154]

$$dW' = i \frac{\partial \psi(i, \theta)}{\partial \theta} d\theta. \quad (185)$$

В результате, формула, определяющая электромагнитный момент РИМ через производную коэнергии [154] выглядит следующим образом

$$M = \left. \frac{dW'}{d\theta} \right|_{i=\text{const}} . \quad (186)$$

Следовательно, мгновенный электромагнитный момент ЭМ определяется суммой производных коэнергии всех фаз ЭМ по углу поворота ротора или же через отношение приращения коэнергии при виртуальном повороте ротора, осуществленном при постоянстве фазного тока (суммируется для всех фаз), к величине этого поворота.

Другим способом определения электромагнитного момента является определение через энергию магнитного поля  $W$ , в этом случае расчет проводится при постоянстве потокосцепления фаз ЭМ.

На интервале коммутации годограф движения рабочей точки фазы РИМ на плоскости  $(\psi, i)$  имеет вид замкнутой кривой [159]. В частном случае годограф имеет вид, представленный на рисунке 111.

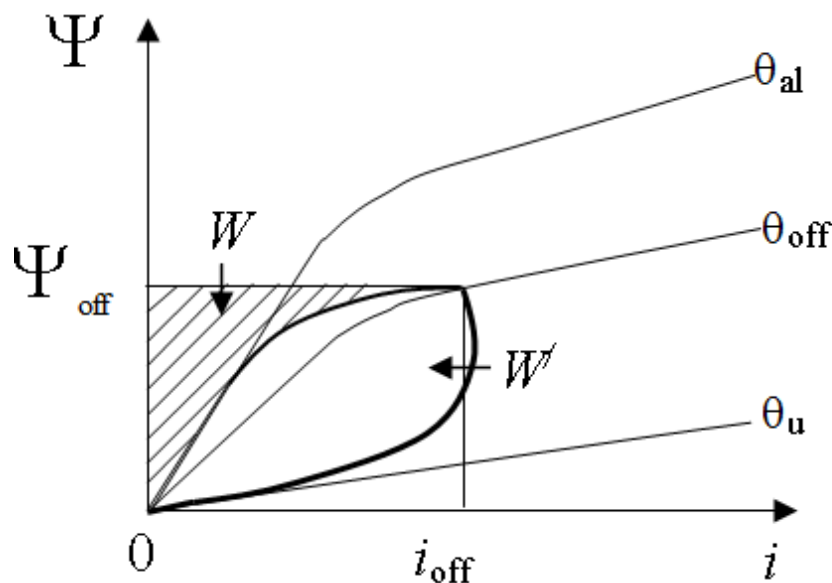


Рисунок 111 – Годограф интервала коммутации фазы РИМ

Коэнергия  $W'$  (см. рисунок 111), т.е. энергия, подвергшаяся электромагнитному преобразованию, численно равна площади внутри годографа [154]. Заштрихованная область представляет собой энергию, запасенную в магнитном поле, и в

большинстве типов РИМ она возвращается в источник питания, что повышает реактивную энергию при преобразовании, поэтому стремятся снизить возврат энергии через электрическое поле и обеспечить передачу энергии через магнитное поле соседним фазам РИМ.

На рисунке 112 показаны годографы токов на плоскости  $i - \psi$ , при одинаковых амплитудах тока. Если амплитуда тока ограничена, то максимальное преобразование энергии можно добиться в случае (б) [161]. У кривой (а) самый высокий коэффициент мощности, а у кривой (с) самый низкий. Траектория движения рабочей точки на плоскости  $i - \psi$  зависит от качества проектирования магнитной системы, напряжения питания, частоты вращения и законов управления [162].

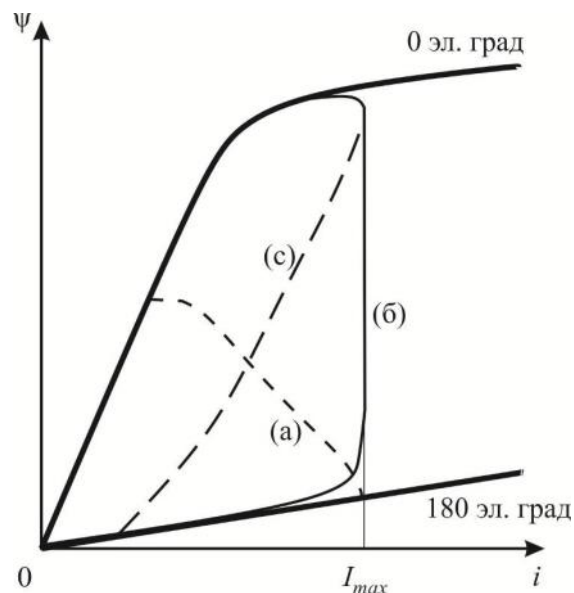


Рисунок 112 – Годографы движения рабочей точки для различных режимов управления

Если пренебречь  $R$ , то основное уравнение для РИМ можно переписать как:

$$V_{DC} = L \frac{di}{dt} + e,$$

где  $u = V_{DC}$  – напряжение в звене постоянного тока.

Скорость, при которой  $e = V_{DC}$  при номинальном токе называют номинальной (базовой) скоростью [161]. Если управляют значением  $V_{DC}$  из условия  $V_{DC} = e$  и ток поддерживается постоянным в промежутке  $\theta_{off}$  до значения  $\theta_{1d}$ , при условии  $\theta_{off} > \theta_a$ .

Схема управления которая регулирует  $V_{DC}$  в зависимости от скорости вращения, что бы получить максимальную эффективность преобразования энергии, поддерживая условие  $V_{DC} = e$  была предложена [161].

Формой протекающего тока РИМ можно управлять следующим образом:

а) форма тока показанная на рисунке 112 (а) должна быть тогда, когда ток возбуждения мал и пиковое значение тока ограничено устройством, меньше его максимального значения, в этом случае потери минимальны, а  $V_{DC}$  поддерживается в заданном диапазоне;

б) форма тока показанная на рисунке 112 (б) соответствует режиму использования максимального преобразования энергии, доступную для данного максимального тока.  $V_{DC}$  поддерживается из условия  $V_{DC} = e$ .

Показатель эффективности электромеханического преобразования энергии в электрической машине определяется отношением коэнергии к энергии поступившей в фазу за вычетом потерь на активном сопротивлении фазы и может быть определен по формуле [154]

$$K_{\varepsilon} = \frac{W'}{W' + W}, \quad (187)$$

где  $W$  – энергия, идущая на приращение энергии магнитного поля;

$W'$  – энергия магнитного поля, идущая на совершение электромеханического преобразования энергии (механической работы) – коэнергия.

Чем выше показатель, тем наиболее полно используется магнитная система РИМ для преобразования энергии.

По энергетической диаграмме фазы РИМ возможно определить интегральные величины [154] энергии и коэнергии, тем самым можно определить показатель преобразования энергии.

Эффективность преобразования энергии в РИМ повышается при работе в режимах с насыщением магнитной системы, что хорошо видно при анализе энергетической диаграмме, соответствующих режимам работы с полной нагрузкой тогда коэффициент  $K_Э$  растет [163].

Тяговые электрические машины работают в режимах с насыщением магнитопровода, в результате чего возникает необходимость учитывать нелинейность процессов при насыщении магнитопровода [164]. Расчет электромагнитных процессов сводится к решению дифференциального уравнения связывающего процессы в магнитной системе и в электрических цепях [165].

Если, с учетом зубчатой структуры ротора и сосредоточенных обмоток на полюсах статора возникают существенные затруднения к аналитическому описанию зависимости потокосцепления в функции от тока и угла поворота (переходных характеристик), то необходимо рассчитывать зависимость  $\psi = f(i, \theta)$ , которая является основополагающей для дальнейшего расчета и моделирования тяговых электрических машин [166]. Точность расчета переходных характеристик способствует качественному моделированию электромагнитных процессов и нахождения токов фаз и электромагнитного момента РИМ [167]. Для определения переходных характеристик  $\psi = f(i, \theta)$  используют метод конечных элементов. Расчет проводят для заданного диапазона токов и углов поворота ротора относительно статора с выбранным шагом значений [168].

Расчет производится для магнитной системы, или в случае симметрии магнитной системы, для выбранного сектора, что позволяет снизить время расчета.

Общепринятые допущения при моделировании реактивных индукторных машин следующие [167, 168]:

- взаимное насыщение и взаимная индуктивность фаз не учитываются;
- потери в стали и механические потери не учитываются;
- временные задержки и падение напряжения на ключах не учитываются.

При переходе на методы компьютерного моделирования количество принятых допущений можно существенно сократить, что позволит повысить точность расчетов, как электромеханических характеристик, так и энергетических характеристик электрических машин [169]. Поэтому при дальнейшей разработке компьютерной модели будем учитывать потери в стали и механические потери, а в качестве ключей используем модели IGBT транзисторов с учетом их реальных характеристик.

Система уравнений для математического описания РИМ примет вид [167]

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_k}{dt} = \frac{1}{\frac{\partial \Psi_k(i_k, \theta)}{\partial i_k}} \cdot \left( u_c - i_k \cdot R - \frac{\partial \Psi_k(i_k, \theta)}{\partial \theta} \cdot \omega \right), \quad k = 1, 2, \dots, N; \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{i_c}{C}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{z_R}{J} \left( \sum_1^m M_k - M_c \right), \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega, \\ \Psi_k = f(i_k, \theta), \\ M_k = f(i_k, \theta). \end{array} \right. \quad (188)$$

где  $J$  – приведенный момент инерции ротора РИМ;

$z_R$  – число зубцов ротора РИМ;

$M_k$  – электромагнитный момент РИМ;

$M_c$  – внешний момент сопротивления.

Ориентировочный вид зависимостей  $\frac{\partial \Psi_a}{\partial i_a} = f(i_a, \theta)$  и  $\frac{\partial \Psi_a}{\partial \theta} = f(i_a, \theta)$  представ-

лен на рисунках 113, 114 [167].

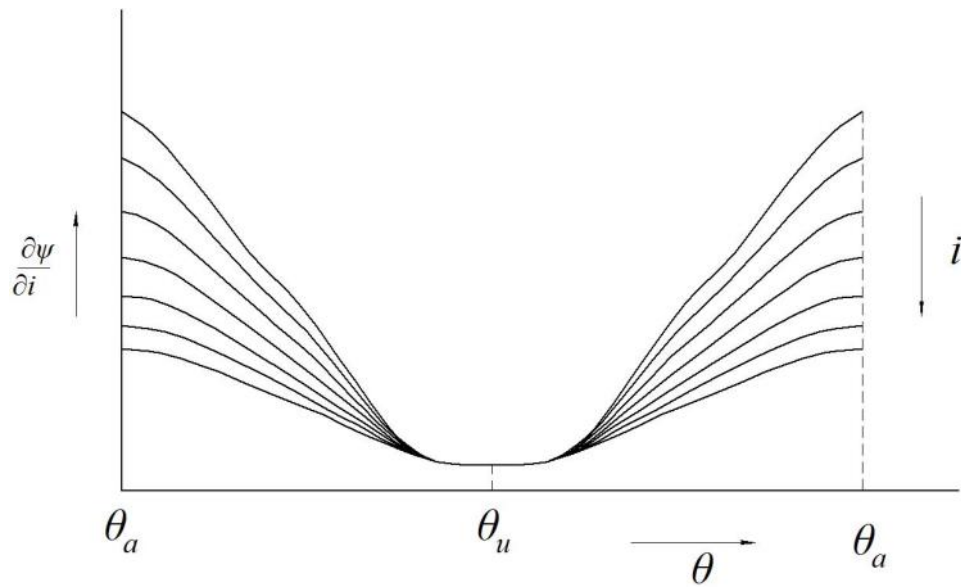


Рисунок 113 – Зависимость  $\frac{\partial \psi_a}{\partial i_a} = f(i_a, \theta)$

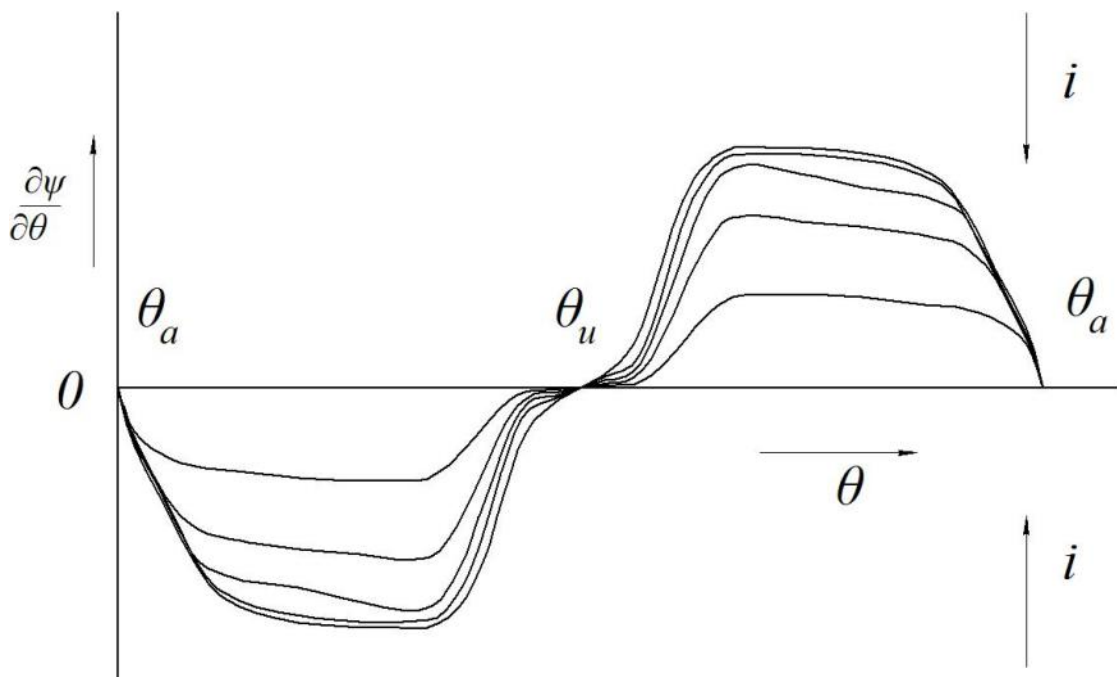


Рисунок 114 – Зависимость  $\frac{\partial \psi_a}{\partial \theta} = f(i_a, \theta)$

Для определения структуры схемы замещения магнитной цепи расчетной области, т.е. получения зависимости  $\psi(\theta, i_a)$  необходимо рассчитать магнитное поле при различных значениях угла поворота ротора относительно статора и для диапазона рабочих токов [168].

Построение математической модели магнитной системы РИМ основывается на системе уравнений Максвелла, что позволяет произвести расчет распределения магнитной индукции в магнитной системе и потокосцепления фазных обмоток при заданных фазных токах и пространственном положении ротора относительно статора [170, 171]

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \vec{J}_e, & \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, & \vec{J}_e = \gamma \vec{E}, \end{cases} \quad (189)$$

где  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля;

$\vec{J}$  – вектор плотности фазного тока;

$\vec{J}_e$  – вектор плотности вихревых токов в стали и меди;

$\vec{B}$  – магнитная индукция;

$\vec{E}$  – напряженность электрического поля

В качестве допущения принимается, что магнитное поле является плоско-параллельным. Связь между  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  осуществляется через магнитную проницаемость среды. Для определения статических гистерезисных траекторий решается дифференциальное уравнение [170, 171]

$$\frac{\partial B}{\partial H_{cm}} = \mu(B, H_{cm}, \operatorname{sign} \partial B), \quad (190)$$

где  $H_{cm}$  – функция, которая вместе с  $B(t)$  описывает статическую гистерезисную траекторию;

$\partial B, \partial H_{cm}$  – частные (временные) дифференциалы;

$\mu$  – магнитная проницаемость среды.

При заданных начальных условиях  $B(0)$  и  $H_{cm}(0)$  уравнение (190) определяет функцию  $H_{cm}(t)$ .



В основу моделирования динамического гистерезиса (магнитной вязкости) положим уравнение Джорджи [171, 172]:

$$T \frac{\partial H}{\partial t} + H = H_{cm} + \frac{T}{\mu_0} \cdot \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (191)$$

где 
$$T = \frac{T_0}{1 - \left(\frac{B - \mu_0 H}{B_s}\right)^2}, \quad T_0 = \frac{H_{cd} - H_c}{B_m f};$$

$B_s \approx 2,3$  Тл – индукция насыщения;

$H_{cd}$  – коэрцитивная сила экспериментальной динамической петли гистерезиса при синусоидальном изменении средней по листу сердечника индукции с амплитудой  $B_m$  (Тл) и частотой  $f$  (Гц);

$H_c$  – коэрцитивная сила динамической петли, полученной расчетом при тех же условиях, но без учета магнитной вязкости;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Магнитная проницаемость среды  $\mu$  определяется с учетом гистерезиса, с учетом восходящей и нисходящей ветвей кривой намагничивания [173] материала.

Для электрических машин характерна сложная геометрия зубцовой зоны ротора и статора, несколько обмоток, предназначенных для протекания электрического тока, что требует применения методов конечных элементов.

Для решения подобного класса задач применен пакет FEMM (Finite Element Method Magnetics).

При этом были приняты следующие ограничения и допущения [171, 174]:

- магнитное поле считается плоскопараллельным;
- магнитное поле за пределами расчетной области отсутствует;
- кривые намагничивания ферромагнитных материалов однозначны;
- токи равномерно распределены по токонесущим областям.

В основе решателя FEMM использует уравнения Максвелла, приведенные выше. Токи смещения не учитываются. В пакете FEMM реализовано три типа

граничных условий (условие Дирихле, условие Неймана и условие Робина), которые необходимо применить для получения единственного верного расчета магнитной системы рассматриваемой электрической машины. Решение происходит в 2D постановке, для чего расчетная область разбивается на треугольные элементы, размеры которых можно изменять в зависимости от характера распределения магнитного поля (например, в воздушном зазоре необходимо уменьшить размеры сетки, так как распределение энергии на элементе аппроксимируется линейной функцией). Система уравнений, для решения поставленной задачи, строится на основе минимизации полной энергии в расчетной области магнитной системы.

Исходными данными для постановки и решения полевой задачи:

- геометрические размеры магнитной системы;
- геометрические размеры и положение проводников с током;
- магнитные свойства материала элементов расчетной зоны (воздух, медь, электротехническая сталь);
- граничные условия распределения магнитного поля.

По результатам расчета в пакете FEMM строится зависимость потокосцепления от угла поворота ротора и тока вида  $\psi_k = f(i_k, \theta)$ , которая представлена на рисунке 115. При нулевом значении угла  $\theta$  имеем рассогласованное положение зубьев ротора и статора, при  $\theta = 180$  эл. град –согласованное положение зубьев.

В таблице 31 приведены расчетные значения потокосцепления для РИМ. Расчеты производились методом конечных элементов. Картина распределения магнитного поля РИМ для согласованного и рассогласованного положения показана на рисунках 116 и 117, соответственно.

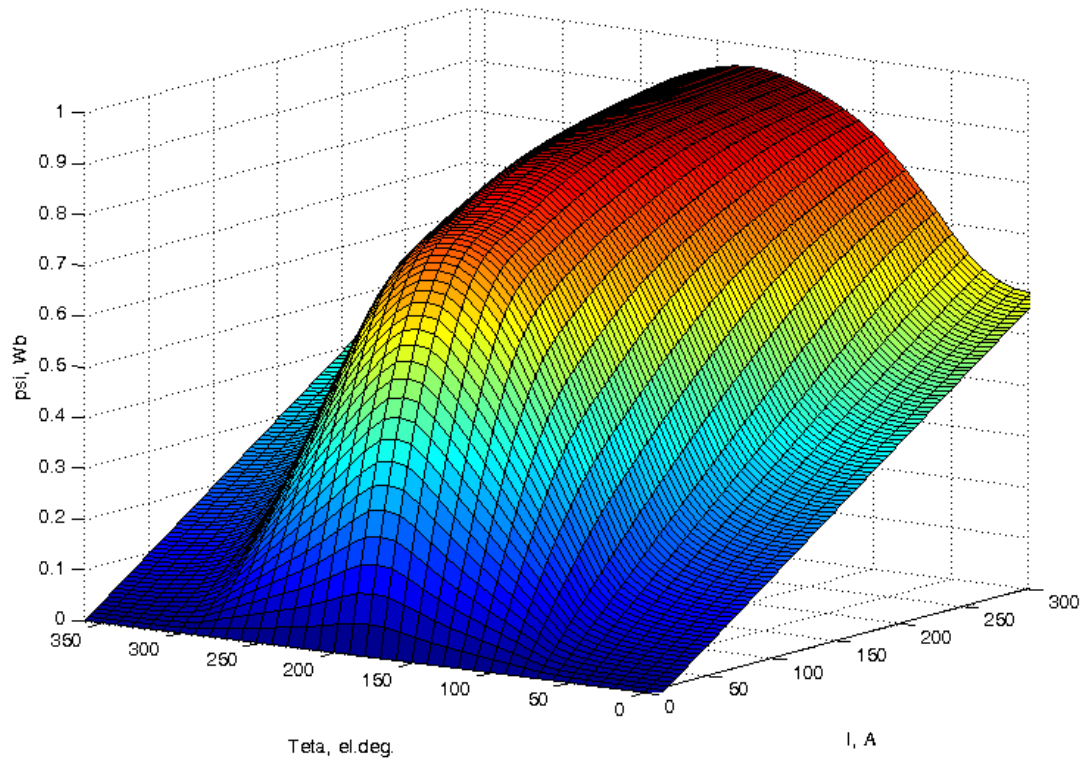


Рисунок 115 – Кривые намагничивания РИМ

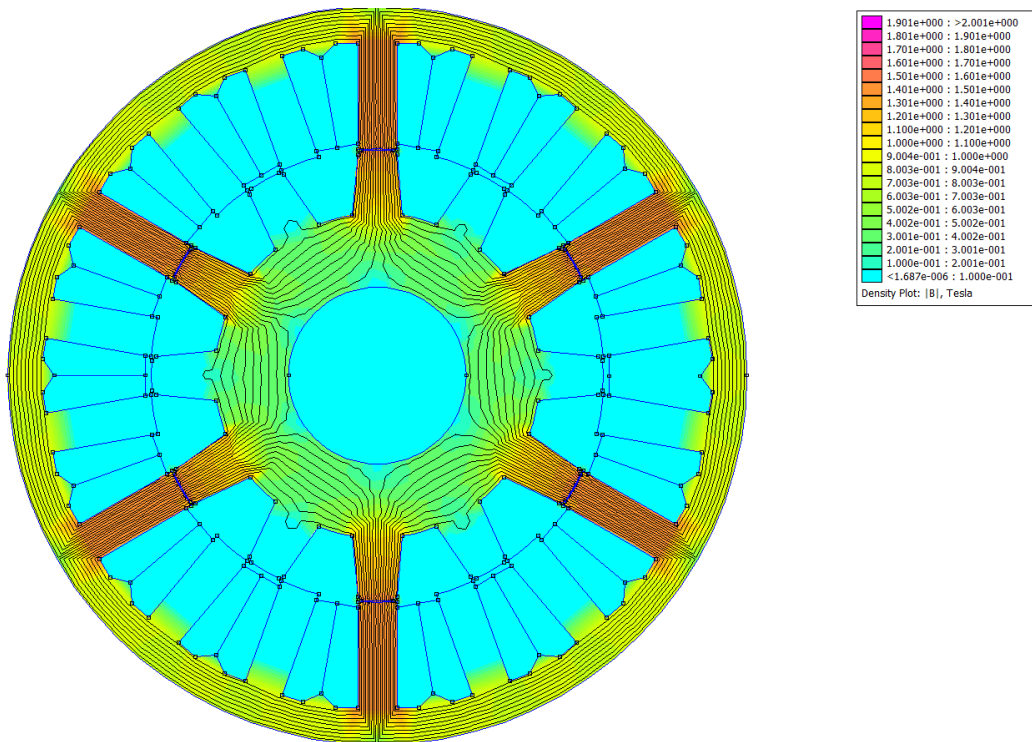


Рисунок 116 – Распределение магнитного поля РИМ для согласованного положения

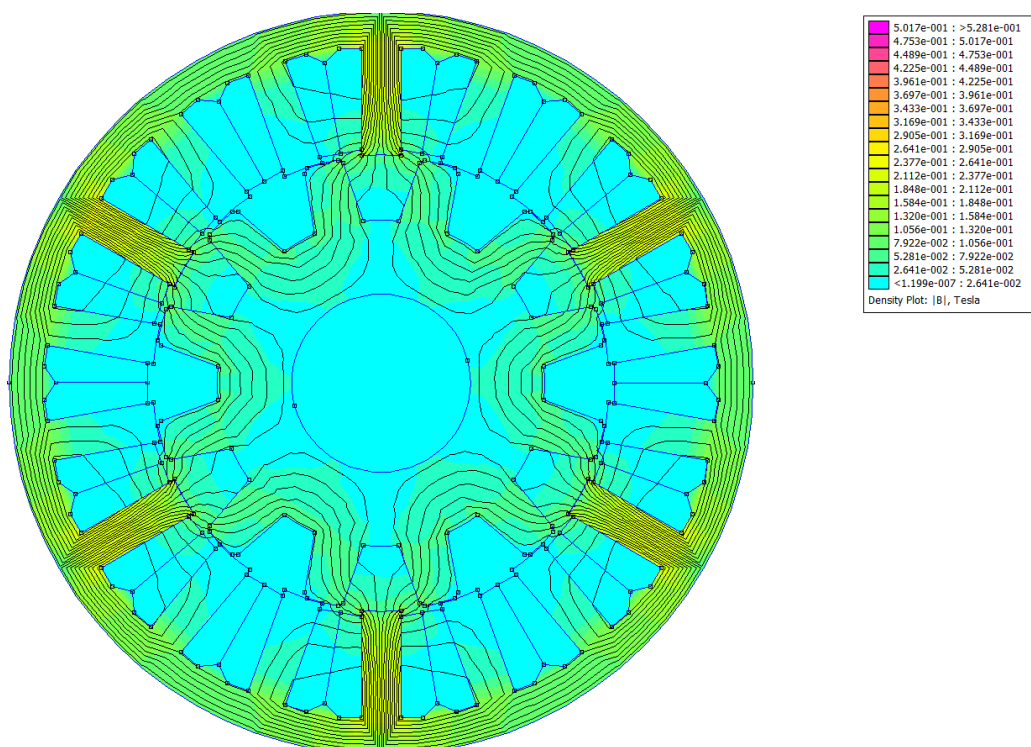


Рисунок 117 – Распределение магнитного поля РИМ для рассогласованного положения

Таблица 31 – Зависимость потокосцепления РИМ от тока и угла поворота ротора

I, A	$\theta$ , эл. град																		
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0.058	0.059	0.060	0.062	0.066	0.072	0.082	0.103	0.143	0.184	0.225	0.265	0.305	0.345	0.383	0.420	0.455	0.482	0.488
60	0.117	0.118	0.120	0.125	0.132	0.144	0.164	0.204	0.267	0.335	0.403	0.469	0.534	0.595	0.645	0.683	0.712	0.729	0.734
90	0.176	0.177	0.180	0.187	0.198	0.216	0.246	0.299	0.366	0.435	0.504	0.571	0.635	0.690	0.734	0.765	0.786	0.797	0.801
120	0.234	0.236	0.241	0.250	0.264	0.287	0.326	0.386	0.454	0.521	0.588	0.649	0.703	0.747	0.782	0.812	0.836	0.849	0.853
150	0.293	0.295	0.301	0.312	0.330	0.358	0.404	0.467	0.533	0.598	0.657	0.709	0.752	0.789	0.822	0.852	0.874	0.886	0.889
180	0.351	0.354	0.361	0.375	0.396	0.429	0.479	0.543	0.605	0.661	0.712	0.753	0.791	0.826	0.857	0.881	0.898	0.907	0.910
210	0.410	0.412	0.421	0.437	0.461	0.498	0.551	0.611	0.665	0.712	0.754	0.791	0.827	0.858	0.882	0.900	0.914	0.922	0.924
240	0.468	0.471	0.480	0.498	0.525	0.564	0.616	0.669	0.714	0.753	0.791	0.826	0.857	0.881	0.900	0.915	0.926	0.933	0.936
270	0.525	0.529	0.539	0.558	0.586	0.625	0.672	0.715	0.754	0.790	0.825	0.854	0.878	0.898	0.914	0.926	0.936	0.943	0.945
300	0.580	0.584	0.595	0.614	0.641	0.677	0.717	0.754	0.790	0.823	0.852	0.875	0.894	0.911	0.925	0.936	0.945	0.951	0.953

На рисунке 118 показаны кривые потокосцепления фазы РИМ в зависимости от тока катушки и углового положения ротора относительно статора.

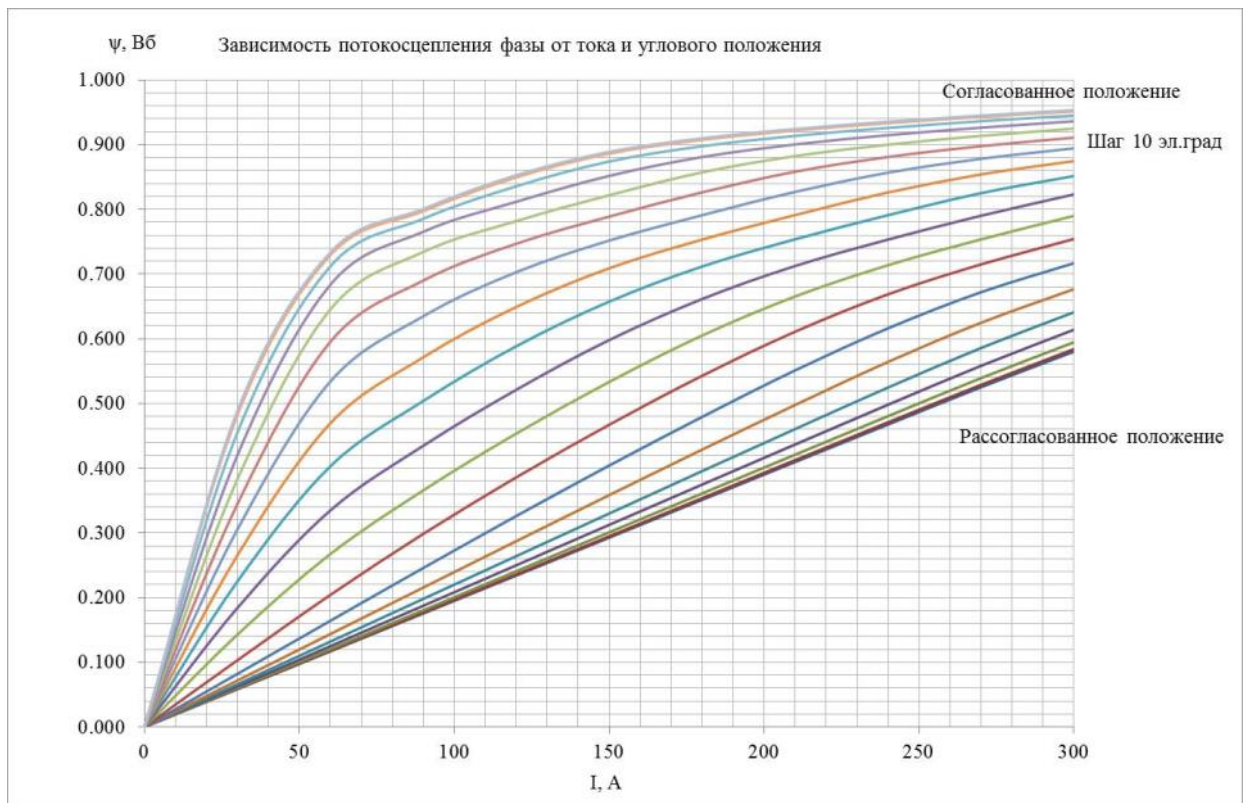


Рисунок 118 – Зависимость потокосцепления фазы реактивного индукторного двигателя

При разработке компьютерной модели электромеханического преобразователя энергии необходимо произвести связь механических и электрических параметров электрической машины (тяговый генератор, тяговый двигатель) (рисунок 119) [175].

Вход **TL** предназначен для подачи момента нагрузки, для двигательного режима или угловой скорости – для генераторного режима (в этом случае из решения исключается уравнение механики). Выводы **A1, A2, B1, B2, C1, C2** являются выводами фаз РИМ и служат для подключения к статическому преобразователю. Выход **mm** является комплексным выходом, и несет следующую информацию: фазные напряжения, токи, моменты, потокосцепление, угловое положение; частота вращения; суммарный электромагнитный момент. Выход **Loss** содержит информацию об электрических и магнитных потерях в РИМ.

Блок SRM имеет основные электрические и геометрические входные параметры, представленные на рисунке 120.

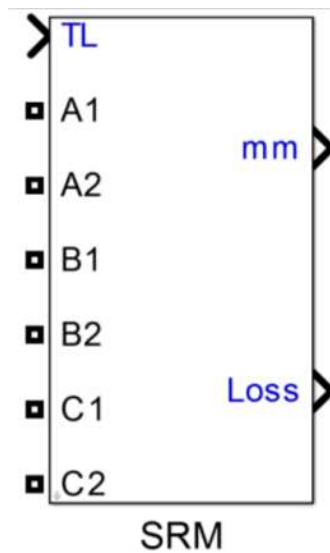
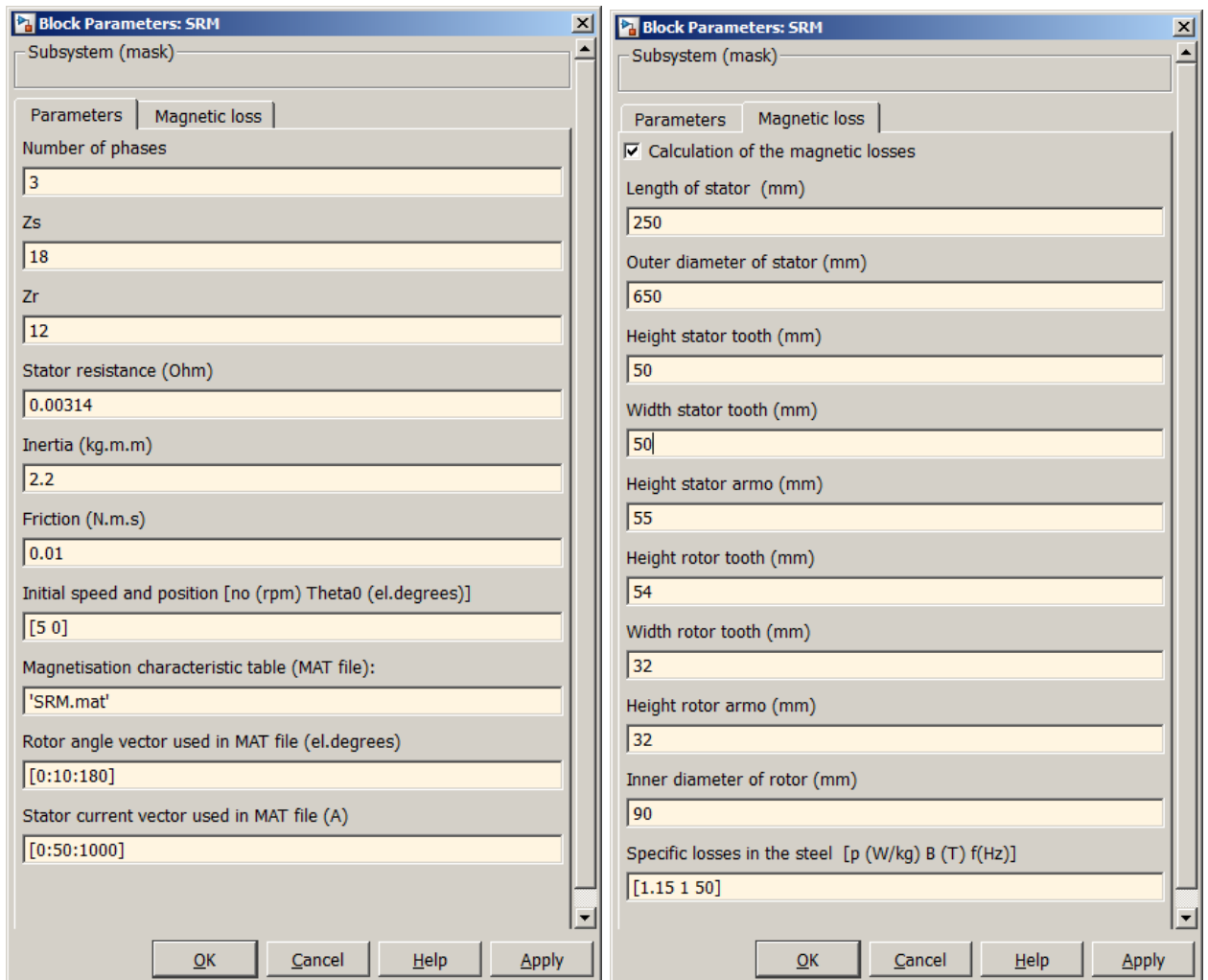


Рисунок 119 – Модель РИМ в программном комплексе MATLAB/Simulink



а)

б)

Рисунок 120 – Входные параметры блока SRM

На рисунке 120 представлены параметры, дающие полное описание исследуемой электрической машины. На первой вкладке **Parameters**, задаются: число фаз, число зубцов статора, число зубцов ротора, активное сопротивление статора, момент инерции, сопротивление в механической части, начальная угловая скорость и угловое положение, файл с кривыми намагничивания для данной РИМ, вектор значений углового положения и вектор значений тока, для которых посчитаны кривые намагничивания в приведенном файле. Во второй вкладке **Magnetic loss** приводятся необходимые параметры для расчета магнитных потерь возникающих в статоре и роторе, такие как длина статора, внешний диаметр статора, высота зубца статора, ширина зубца статора, высота ярма статора, высота зубца ротора, ширина зубца ротора, высота ярма ротора, внутренний диаметр ротора, характеристики стали, из которой изготовлен магнитопровод электрической машины.

Фаза РИМ моделируется как управляемый источник тока (рисунок 121) подключенный на большое активное сопротивление.

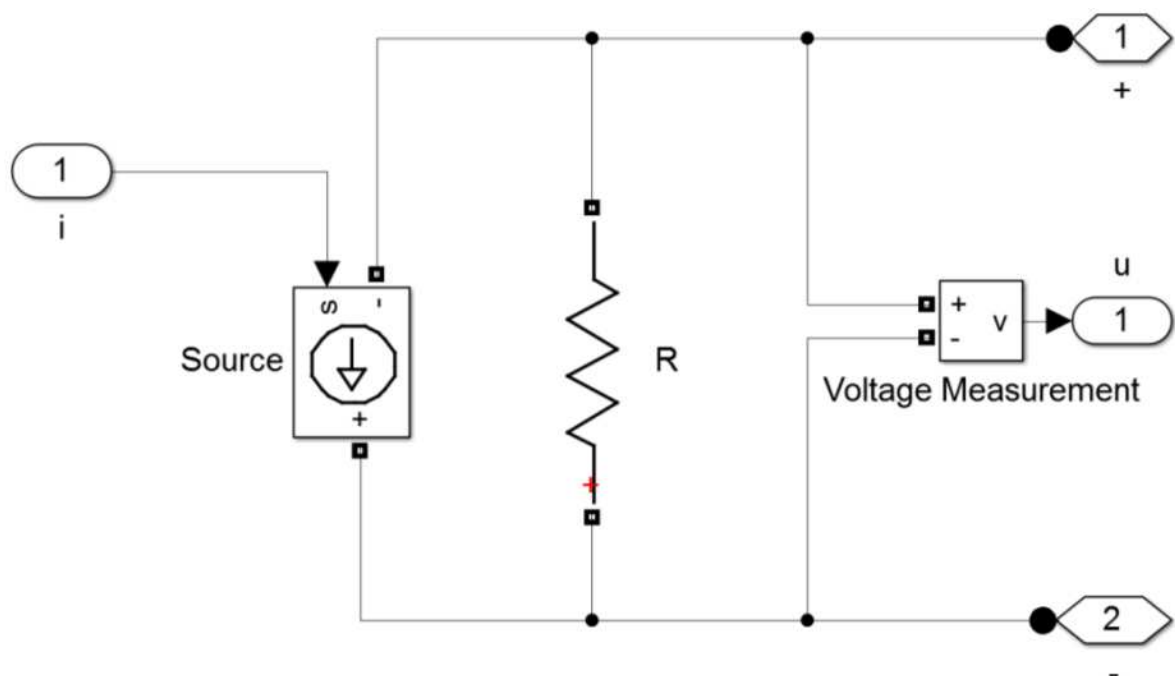


Рисунок 121 – Модель фазы РИМ

На вход  $i$  подается значение тока, полученное в результате решения дифференциального уравнения РИМ, выход  $u$  – значение напряжение, приложенного к фазе передается в блок решения ДУ. Клеммы «+» и «-» служат для подключения фазы РИМ к статическому преобразователю. На рисунке 122 представлена модель трехфазной РИМ. Блоки фаз (А, В, С) содержат модель фазы РИМ представленную на рисунке 121.

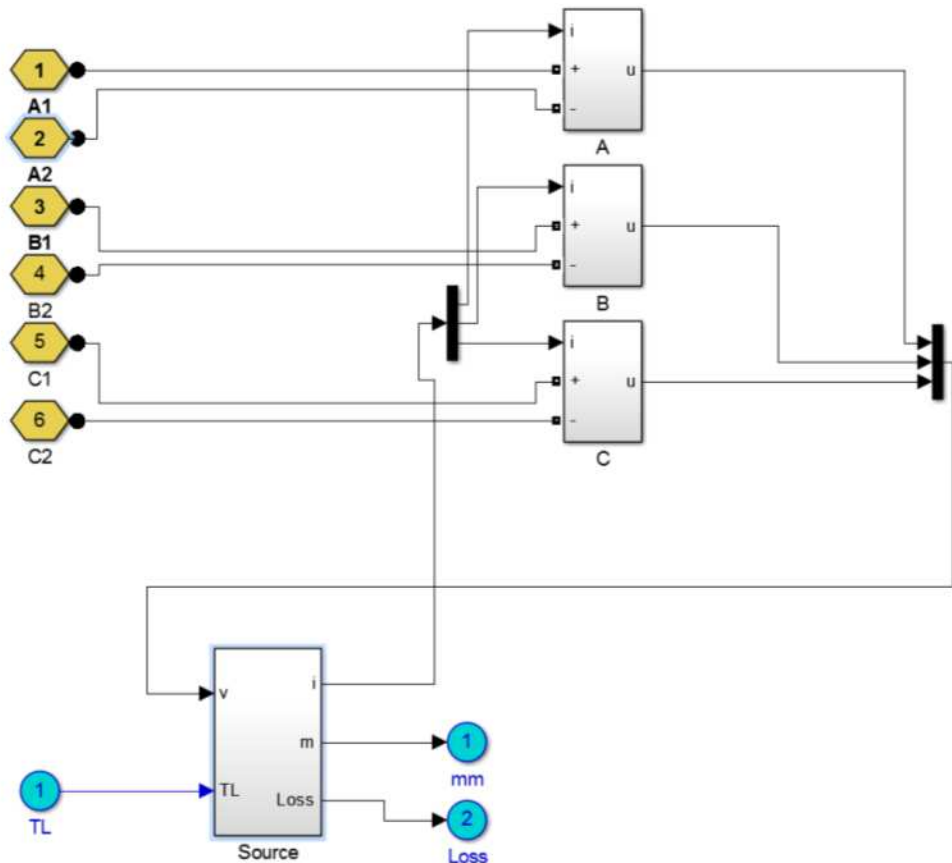


Рисунок 122 – Модель РИМ

Тогда с учетом (188) уравнение, описывающее электромагнитные процессы в фазе РИМ, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \psi = \int (u - R \cdot i) dt, \\ i = f(\psi, \theta), \end{cases} \quad (192)$$

где  $u$  – напряжение на фазе (приложенное к фазе);





статора и табличным данным кривых намагничивания определяем значение фазного тока, и передаем его на выход  $i$  блока **Source**. Тем самым происходит управление источником тока в модели фазы РИМ.

Функции потокосцепления и момента зависят от углового положения ротора, что означает необходимость его определения в процессе моделирования:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \cdot N_R \cdot 180/\pi, \quad (193)$$

где  $\theta$  – угловое положение ротора относительно статора, эл. град.;

$\omega$  – угловая скорость, рад/с;

$N_R$  – число зубцов ротора.

Блок **Pos\_sensor** (рисунок 124) производит интегрирование угловой скорости, тем самым получает угол поворота ротора относительно статора. Используя переводной коэффициент  $K$ , зависящий от числа зубцов ротора, получаем угловое положение ротора в электрических градусах. Блок **mod** служит для построения развертки углового положения (в диапазоне от 0 до 360 эл.град.) от времени рисунок 125.

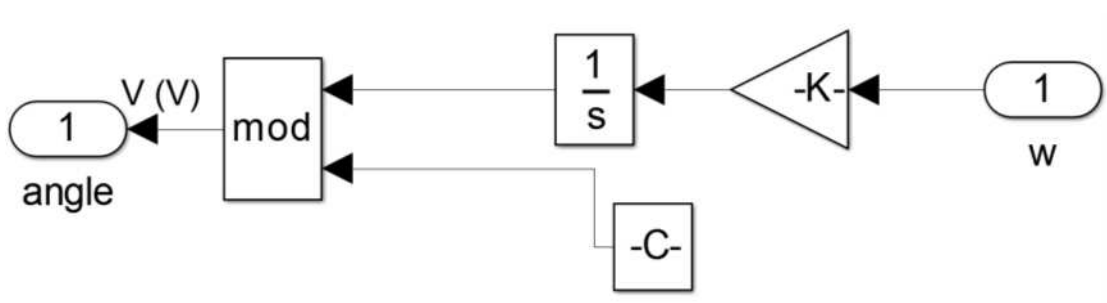


Рисунок 124 – Структура блока **Pos\_sensor**

В блоке **TTBL** происходит определение мгновенного электромагнитного момента, в соответствии с (188), каждой фазы по табличным данным [176]. Значения фазных моментов передаются на комплексный выход. Сумма фазных моментов поступает на блок **Mechanic** (см. рисунок 123), в котором происходит ре-

шение уравнения механики, а также происходит вычисление потерь в стали магнитопровода (рисунок 126).

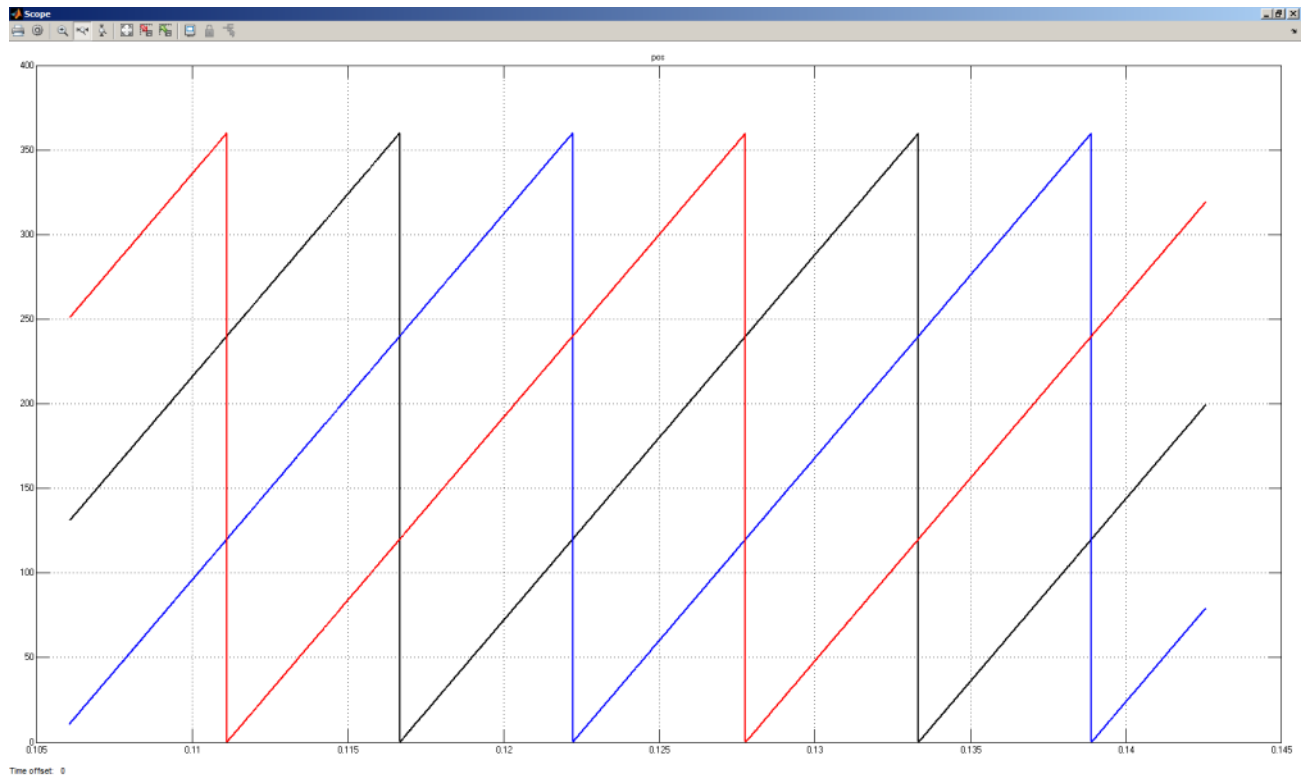


Рисунок 125 – Развертка углового положения от времени (фазы А, В, С)

Блок **Mechanic** служит для решения уравнения механики

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{эл.маг} - M_{сопр} - M_{ном} - M_n \quad (194)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения ротора;

$M_{эл.маг}$  – электромагнитный момент (является входом **Te** блока **Mechanic**);

$M_{ном}$  – момент приведенного сопротивления от потерь в стали магнитопровода (является выходом **M\_loss** блока **Loss**);

$M_{сопр}$  – момент сопротивления трения (является выход блока **B**);

$M_n$  – момент сопротивления от нагрузки (является входом **TL** блока **Mechanic**);

$J$  – приведенный момент инерции ротора.

Магнитные потери в сердечниках ротора и статора определяются с учетом массо-габаритных параметров магнитопровода и приводятся к моменту сопротивления [177]. В общем виде потери в магнитопроводе складываются из потерь на гистерезис (из-за перемагничивания стали) и потерь на вихревые токи. За счет несинусоидальности тока, а следовательно и магнитной индукции, определение магнитных потерь для РИМ затруднено [178].

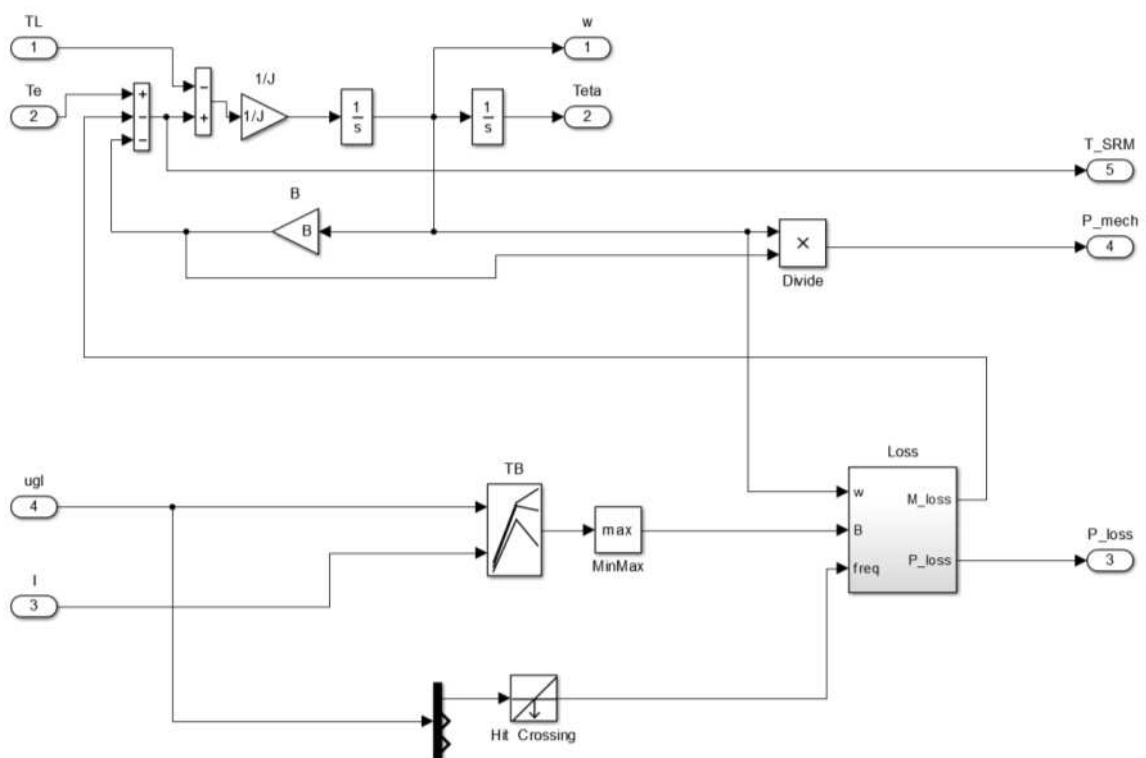


Рисунок 126 – Структура блока **Mechanic**

Вместе с тем для приближенной оценки магнитных потерь в РИД можно воспользоваться формулами, применяемыми при расчете потерь в традиционных электрических машинах [156], с уточнением входящих в эти формулы коэффициентов исходя из имеющегося опыта проектирования РИД.

Определяем индукцию в стальных участках магнитопровода:

- в ярме статора

$$B_{aS} = B_{ZS} \frac{b_{ZS}}{2h_{ZS}}, \text{ Тл} \quad (195)$$

- в зубцах ротора

$$B_{ZR} = B_{ZS} \frac{b_{ZS}}{b_{ZR}}, \text{ Тл} \quad (196)$$

- в ярме ротора

$$B_{aR} = B_{ZS} \frac{b_{ZS}}{2h_{aR}}, \text{ Тл} \quad (197)$$

Из приведенных выше формул видно, что для магнитная индукция в участках магнитопровода определяется через магнитную индукцию в зубцах статора. Значение магнитной индукции в зубце статора определяется при проведении полевых расчетов совместно с определением переходных характеристик (кривых намагничивания для различных положений) [179]. Полученные результаты расчета, в табличном виде задаются в блоке ТВ (рисунок 126).

Потери в магнитопроводе статора определяются по формуле

$$P_{CS} = \frac{P_{yD}}{B_H^2} \left( \frac{f_C}{f_H} \right)^{1.3} (k_{da} B_{aS}^2 m_{aS} + k_{dZ} B_{ZS}^2 m_{ZS}), \text{ Вт} \quad (198)$$

где  $k_{da}$  и  $k_{dZ}$  – коэффициенты, учитывающие увеличение потерь в стали ярма и зубцов РИД вследствие влияния технологических факторов;

$p_{yD}$  – удельные потери для выбранной марки стали, Вт/кг;

$B_H, f_H$  – индукция и частота при определении потерь.

Потери в магнитопроводе ротора

$$P_{CR} = \frac{P_{yD}}{B_H^2} \left( \frac{f_C}{f_H} \right)^{1.3} (k_{da} B_{aR}^2 m_{aR} + k_{dZ} B_{ZR}^2 m_{ZR}), \text{ Вт} \quad (199)$$

## Общие потери в магнитопроводе

$$P_C = P_{CS} + P_{CR}. \quad (200)$$

Решение этих уравнений происходит в блоке **Loss** (рисунок 127). Необходимые величины для расчета (частота вращения ротора, магнитная индукция в зубце статора) передаются в качестве выходных значений.

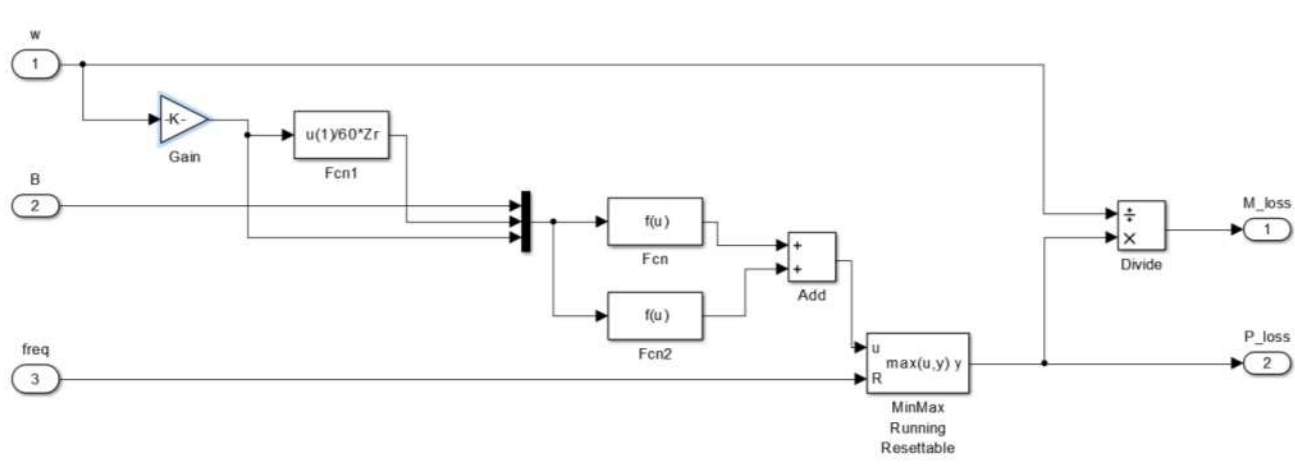


Рисунок 127 – Структура блока **Loss**

### 4.3 Компьютерная модель статического преобразователя

Для питания реактивных индукторных машин наибольшее распространение получила классическая схема статического преобразователя, представляющая собой полумостовой преобразователь с двумя силовыми транзисторами и двумя диодами, включенными по диагонали (рисунок 128). В такой схеме при открытии обоих транзисторов к обмотке прикладывается полное напряжение питания, при открытии только одного из транзисторов обмотка оказывается замкнутой накоротко через ключ и диод что позволяет поддерживать величину магнитного потока обмотки постоянной. Чередования режимов включения фазной обмотки с относительно небольшой частотой переключения силовых ключей позволяет поддерживать заданное значение фазного тока [180]. При запираии транзисторов к фазной обмотке через обратные диоды прикладывается отрицательное напряже-

ние, что приводит к быстрому гашению магнитного поля за счет вывода энергии из электромагнитного контура в конденсатор.

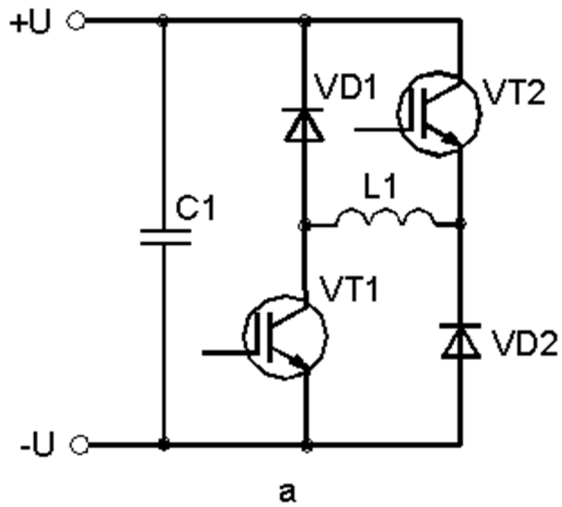


Рисунок 128 – Полумостовой преобразователь

Модель статического преобразователя, выполненная в программном комплексе MATLAB/Simulink, показана на рисунок 129.

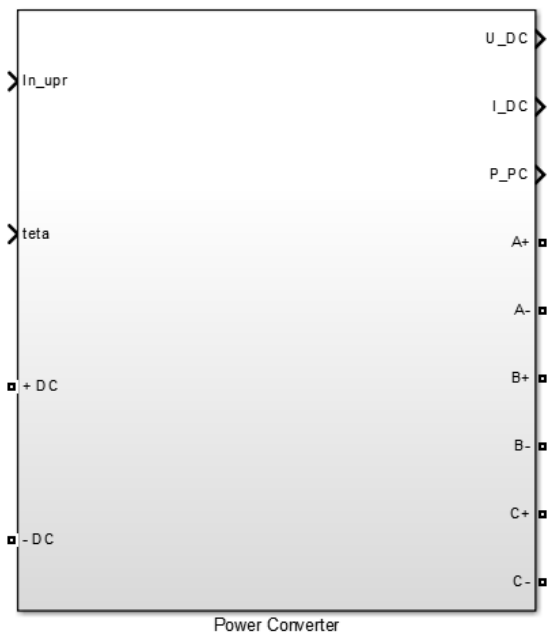


Рисунок 129 – Модель статического преобразователя

В основе модели лежат стандартные силовые элементы библиотеки SimPowerSystems. Структура блока **Power Converter** представлена на рисунке 130.

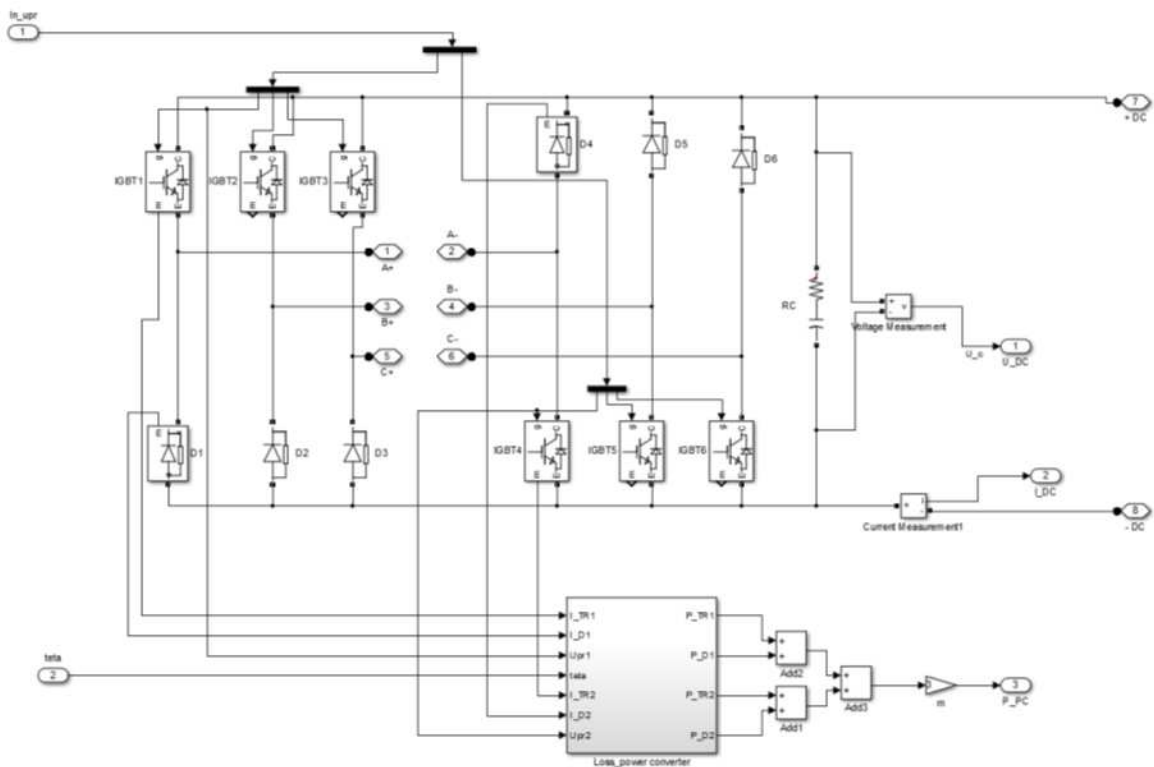
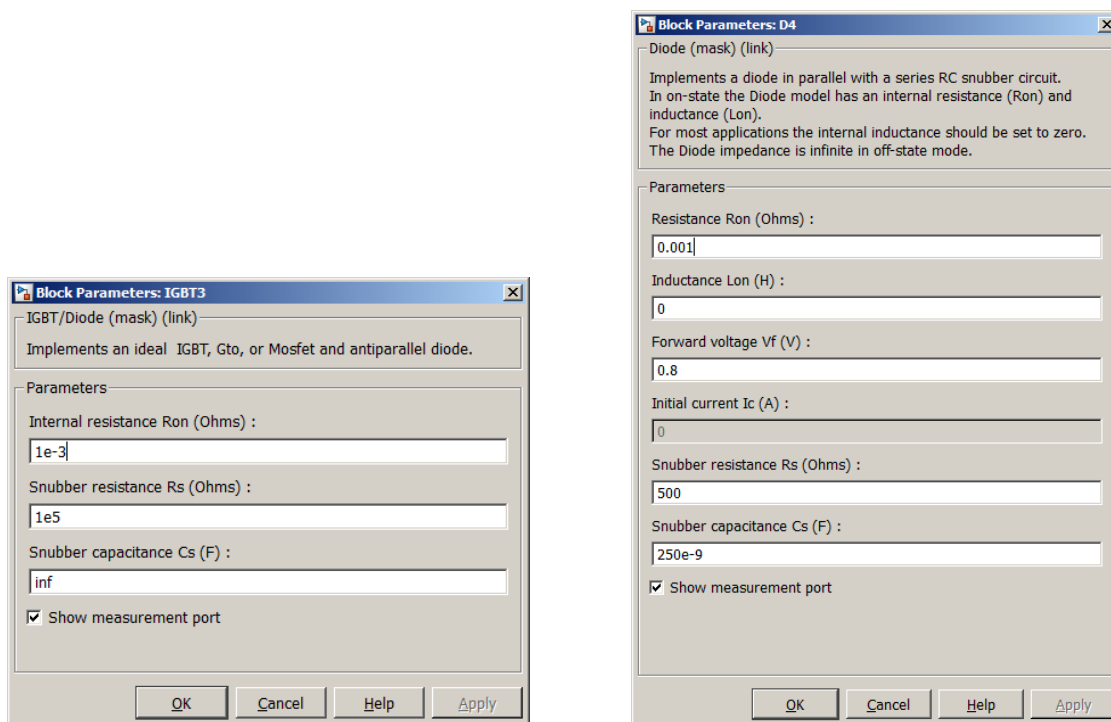


Рисунок 130 – Структура блока **Power Converter**

Здесь из стандартных элементов **IGBT**, **Diode** и **RLC** собрана электрическая схема классического полумостового преобразователя. Настройки **IGBT** и **Diode** (рисунок 131) позволяют указать необходимые параметры элементов. Кроме того данные элементы имеют встроенный измерительный порт, который позволяет снимать значение тока через элемент и значение напряжения на нем.

Для изучения вопросов связанных с определением потерь [181] в данных элементах, необходимо разработать дополнительный блок, определяющий потери, как в IGBT модуле, так и в обратном диоде [182]. Для этих задач разработан блок **Loss\_power converter** (рисунок 132), состоящий из двух однотипных блоков **Sub1** и **Sub2** (рисунок 133), позволяющих вычислять потери в IGBT и диоде каждого плеча полумоста.





a)

б)

Рисунок 131 – Настройки IGBT и Diode

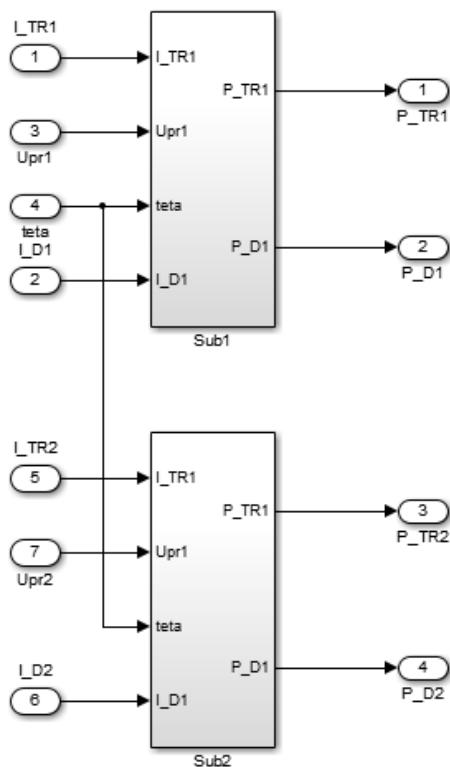


Рисунок 132 – Структура блока Loss\_power converter

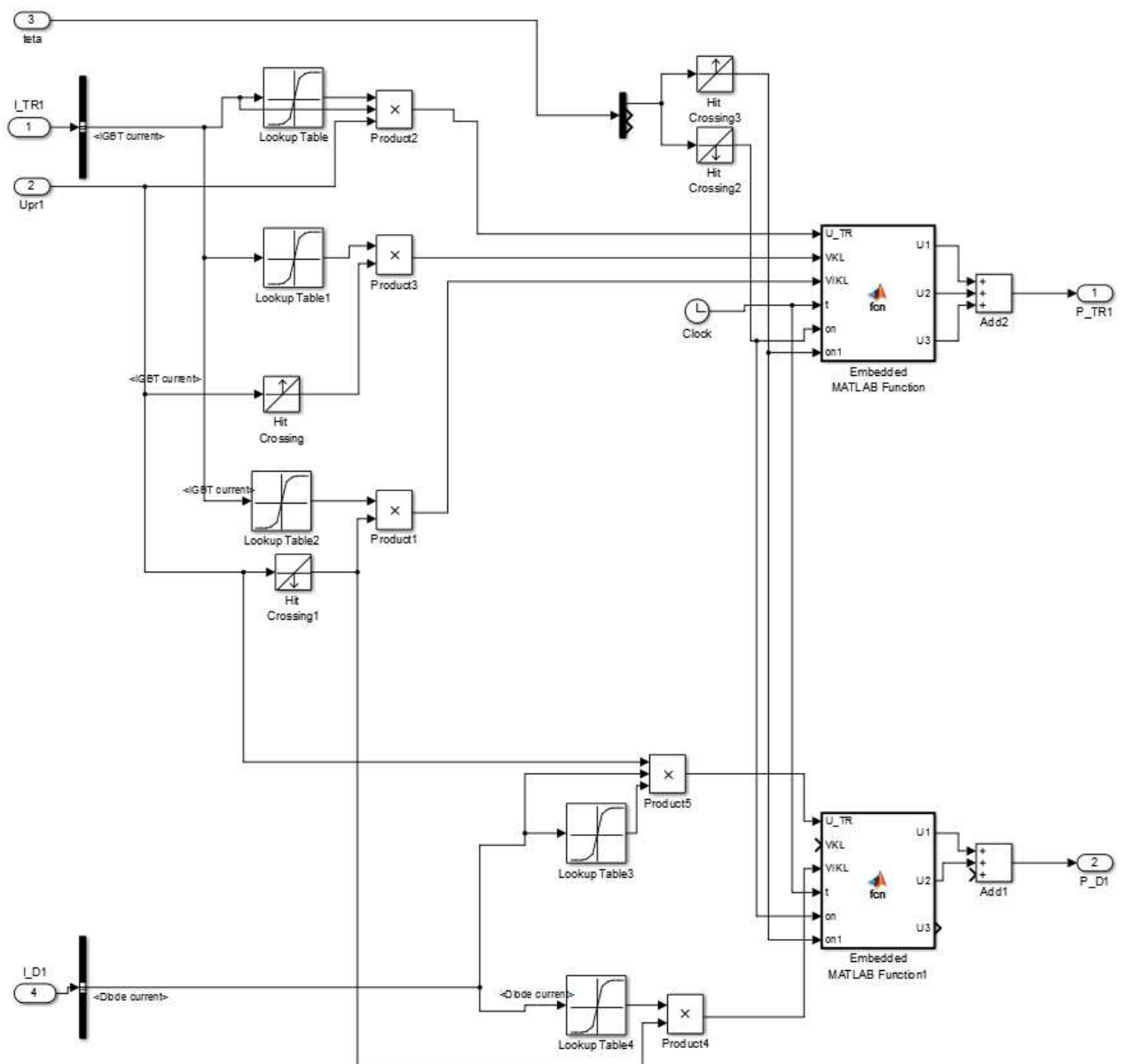


Рисунок 133 – Структура блока Sub1

В блоке Sub1, по заданным характеристикам IGBT и обратного диода (Lookup Table, Lookup Table1, Lookup Table2, Lookup Table3, Lookup Table4), происходит вычисление потерь на проводимость элемента и на коммутацию. Расчет потерь выполняется для конкретного типа IGBT-модулей. Вольтамперные характеристики транзисторов и диодов модуля, зависимости энергии включения/выключения транзисторов и энергии восстановления запирающих свойств диода при расчете потерь представлены в виде файлов данных, полученных оцифровкой графических зависимостей рассматриваемых модулей (рисунки 134 – 137).

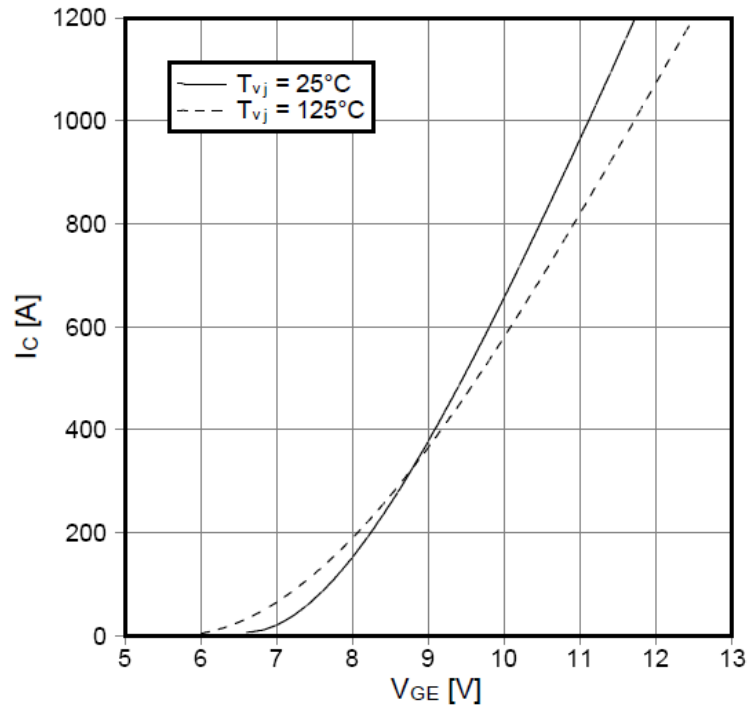


Рисунок 134 – Вольтамперная характеристика IGBT модуля

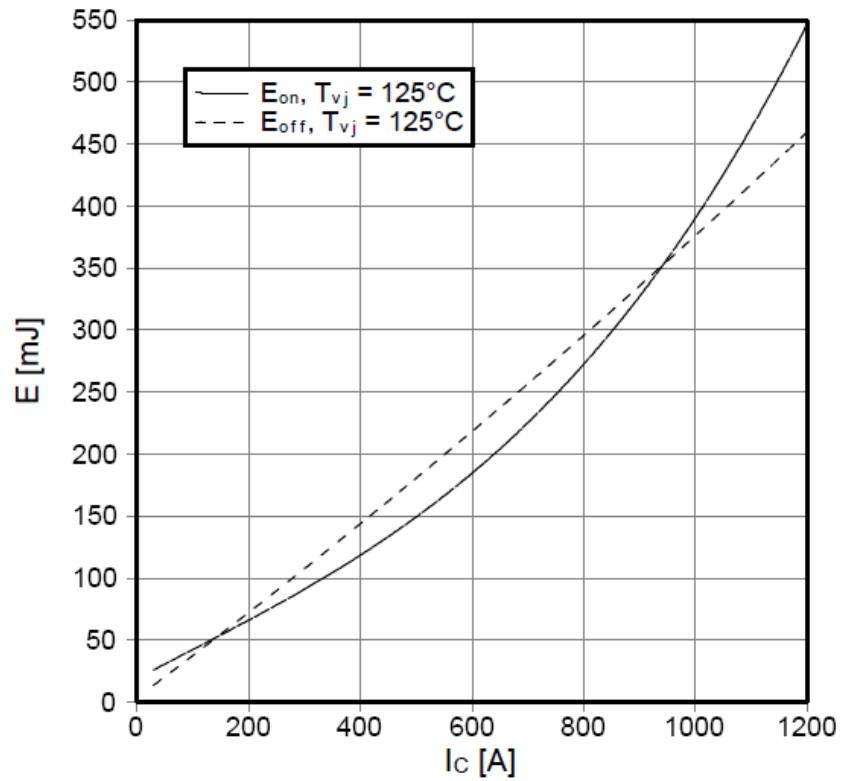


Рисунок 135 – Зависимости энергии включения/выключения IGBT модуля

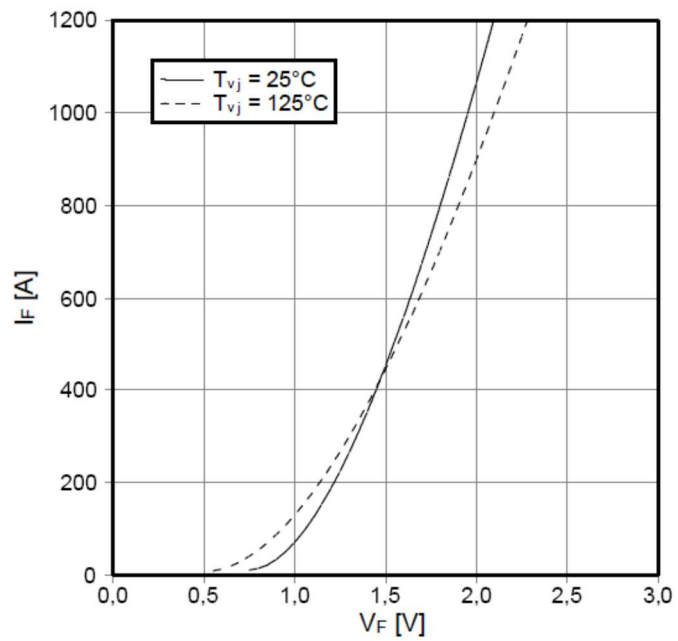


Рисунок 136 – Вольтамперная характеристика диода модуля

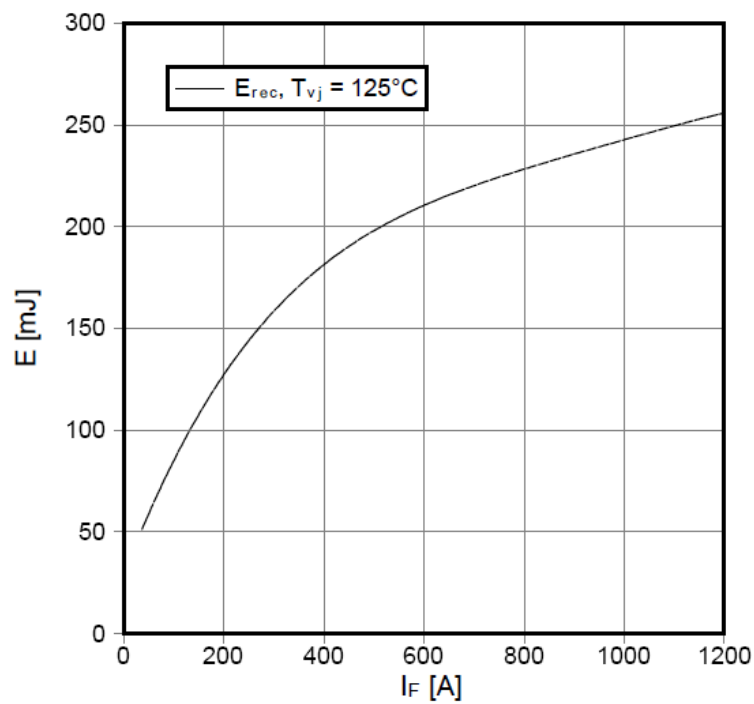


Рисунок 137 – Энергии восстановления запирающих свойств диода модуля

Потери на проводимость транзисторов вычисляются по формуле [182]

$$P_{\text{ПТ}} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{n=1}^N I_n \cdot U_{ce_n} \cdot T_n, \quad (201)$$

где  $\Delta t$  – интервал времени между замерами;  
 $T$  – длительность периода фазного тока;  
 $N$  – количество замеров в периоде;  
 $I_n$  – фазный ток в момент  $n$ ;  
 $U_{сеп}$  – падение напряжения на переходе транзистора при токе  $I_n$ ;  
 $T_n$  – значение признака проводимости транзистора.  
 Коммутационные потери в транзисторах определяются по формуле [182]

$$P_{КТ} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N E_{онn}(I_n) \cdot OnT_n + E_{offn}(I_n) \cdot OffT_n, \quad (202)$$

где  $E_{онn}$  – энергия потерь на включение транзистора при токе  $I_n$ ;  
 $OnT_n$  – значение признака включения транзистора;  
 $E_{offn}$  – энергия потерь на выключение транзистора при токе  $I_n$ ;  
 $OffT_n$  – значение признака выключения транзистора.  
 Потери на проводимость диодов вычисляются по формуле [182]

$$P_{ПД} = \frac{\Delta t}{T} \sum_{n=1}^N I_n \cdot U_{fn} \cdot D_n \quad (203)$$

где  $U_{fn}$  – падение напряжения на диоде при токе  $I_n$ ;  
 $D_n$  – значение признака проводимости диода.  
 Коммутационные потери в диодах определяются по формуле [182]

$$P_{КТ} = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N E_{recn}(I_n) \cdot OffD_n, \quad (204)$$

где  $E_{recn}$  – энергия потерь на восстановление запирающих свойств диода при токе  $I_n$ ;  
 $OffD_n$  – значение признака выключения диода.

Суммарные потери в модуле определяются как сумма потерь на проводимость и коммутационных потерь диода и транзистора модуля (блок Embedded MATLAB Function). Результаты расчета потерь в модуле выводятся на выход P\_TR1 и P\_D1, соответственно для IGBT и обратного диода. На выходе блока **Power Converter** (см. рисунок 133), потери на каждом элементе суммируются, умножаются на количество фаз преобразователя и подаются на выход P\_PC.

#### 4.4 Математическая и компьютерная модель автономного локомотива

Описание модели механической части может происходить в среде MATLAB/Simulink, это возможно для не сложных объектов. Для возможности проведения комплексных исследований движения локомотива с учетом перераспределения нагрузок по осям локомотива в режиме тяги или при прохождении кривых, поосного регулирования силы тяги и торможения, необходимо разрабатывать полноразмерную модель механической части локомотива. При этом становится возможным учет различных эксплуатационных факторов, таких как: геометрия колеса, рельса, нелинейные силовые взаимодействия между элементами экипажной части локомотива. Если рассматривать транспортные средства, такие как локомотив или автономный тяговый подвижной состав, то для построения математических моделей механической части лучше использовать специализированные программы, которые позволяют наиболее полно учитывать конструкцию объекта и условия его эксплуатации.

При рассмотрении экипажной части локомотивов распространенным подходом является представление ее в виде системы абсолютно твердых тел, связанных между собой упругими и демпфирующими элементами, обладающими определенными свойствами [171], а для эффективного вывода уравнений движения твердых тел, входящих в состав расчетной схемы экипажной части локомотива, широко используется формальный метод Ньютона-Эйлера [183, 171], применение которого позволяет использовать компьютерные программы, позволяющие автоматизировать процесс синтезирования и решения уравнений численными ме-

тодами, сокращая время расчетов и повышая точность получаемых результатов. Этот метод находит широкое применение в проектировании и оптимизации систем транспорта, а также в других областях инженерии, связанных с анализом движения механических систем.

Общий подход при разработке модели локомотива, как механической системы, состоит из нескольких основных этапов [171]:

- описание топологии расчетной схемы: этот этап заключается в создании модели системы твердых тел, входящих в состав механической системы локомотива, с помощью графовой теории [184];

- запись уравнений кинематики для каждого тела: на этом этапе записываются уравнения, описывающие кинематику каждого твердого тела в расчетной схеме. Для этого используются уравнения связей, полученные на предыдущем этапе, а также уравнения движения, которые описывают движение тела в пространстве;

- вывод уравнений связей для разрезанных кинематических цепей: на этом этапе находятся уравнения связей для разрезанных кинематических цепей, т.е. тех цепей, которые образовались после разбиения исходной расчетной схемы на части. Эти уравнения описывают связи между телами, находящимися в этих цепях, и позволяют связать кинематические параметры разных тел;

- определение массо-инерционных характеристик тел: этот этап заключается в определении масс и инерционных характеристик каждого твердого тела в расчетной схеме. Эти характеристики важны для решения уравнений движения тел;

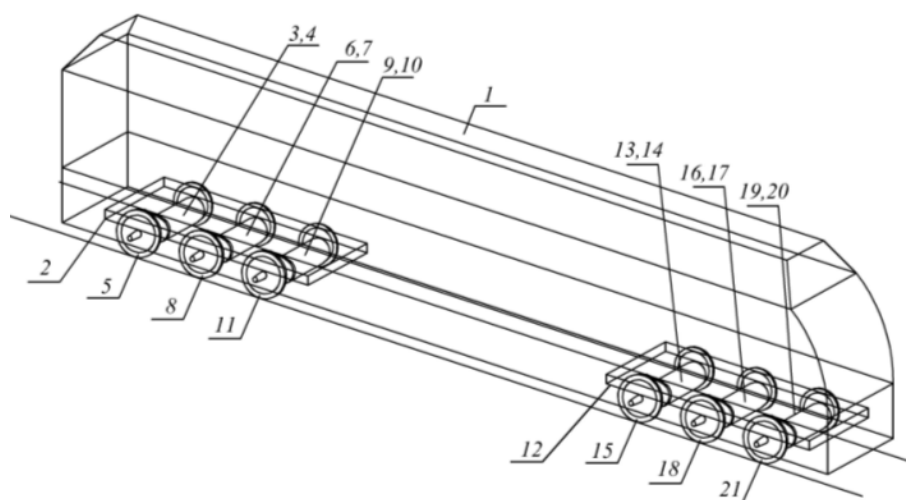
- нахождение активных силовых взаимодействий между телами: на этом этапе находятся активные силовые взаимодействия между твердыми телами в расчетной схеме. Эти взаимодействия могут быть вызваны, например, механизмами, соединяющими твердые тела, или внешними силами, действующими на систему;

- окончательный синтез уравнений движения локомотива: этот этап заключается в формировании окончательных уравнений движения локомотива на осно-

ве полученных ранее уравнений. В процессе синтеза учитываются все силы и моменты, действующие на систему твердых тел. Результатом этого этапа являются уравнения движения, которые могут быть использованы для расчетов и моделирования движения экипажной части локомотива.

Для описания модели механической части локомотива [149] (рисунок 138), как системы твердых тел, нашла применение теория графов [184] – раздел математики, который изучает объекты, называемые графами, и свойства, которые можно выявить с помощью этих объектов. Граф – это абстрактный математический объект, представляющий собой набор вершин (узлов) и ребер (соединяющих их линий).

Расчетная схема модели тепловоза представляет собой граф, в котором вершины соответствуют твердым телам [185], а ребра – кинематическим или силовым связям между ними. Твердым телам присваиваются номера от 1 до N, где N – полное число тел [171].



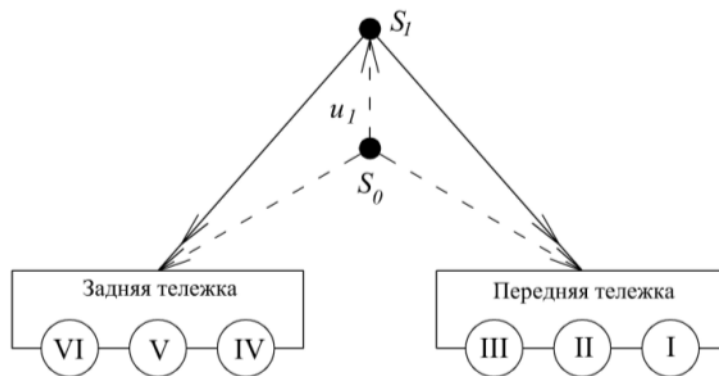
1 – кузов; 2, 12 – рамы тележек 3, 6, 9, 13, 16, 19 – корпуса тяговых двигателей;  
4, 7, 10, 14, 17, 20 – якоря тяговых двигателей; 5, 8, 11, 15, 18, 21 – колесные пары

Рисунок 138 – Схема механической части тепловоза

В модели тепловоза с осевой формулой  $3_0 - 3_0$  имеется 21 твердое тело [149]. Эти тела составляют три группы: кузов и две тележки (рисунок 139). Каждая из двух трехосных тележек состоит из рамы и трех колесных пар. На магистральных грузовых локомотивах преимущественно применяется тяговый привод



I класса (опорно-осевое подвешивание ТЭД и опорно-осевое подвешивание тягового редуктора) [171].



$S_0$  — абсолютный базис;  $S_1$  — кузов

Рисунок 139 – Модель тепловоза 3<sub>0</sub>-3<sub>0</sub> в представлении графов

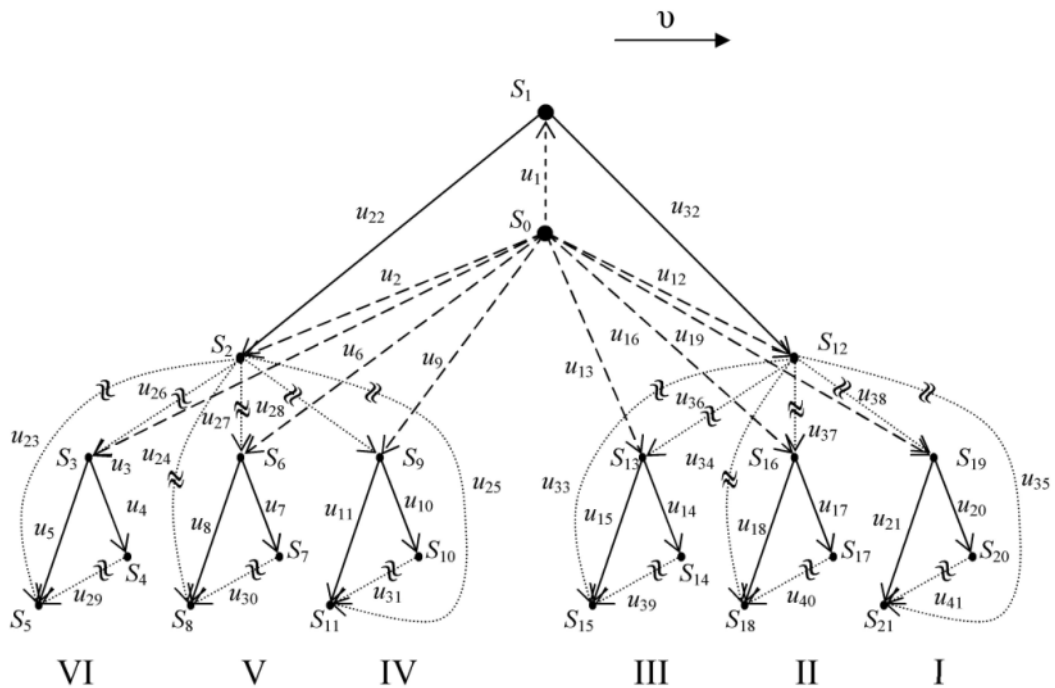
Ребра, соответствующие кинематическим связям, обозначены сплошными линиями, ребра, соответствующие силовым связям, обозначены пунктирными линиями, а ребра, соответствующие фиктивным связям, обозначены штриховыми линиями. Свободное движение одного тела расчетной схемы модели тепловоза относительно другого, описывается с помощью фиктивных связей.

Расчетная схема модели трехосной тележки тепловоза с осевой формулой 3<sub>0</sub>-3<sub>0</sub> и с опорно-осевым подвешиванием ТЭД включает в себя 10 тел:

- рама тележки;
- три корпуса тяговых двигателей;
- три якоря тяговых двигателей;
- три колесные пары.

Структура расчетной схемы механической части тепловоза получается путем дополнения укрупненного ориентированного графа грузового тепловоза (рисунок 139) двумя ориентированными графами трехосных тележек с опорно-осевым подвешиванием ТЭД [149].

Каждый ориентированный граф тележки состоит из 10 узлов. Тележки соединены посредством кузова, что соответствует еще одному узлу, в результате граф расчетной схемы тепловоза (рисунок 140) состоит из 21 узла [149]. Узлы соединены 41 кинематической связью. Для получения приведенного графа со структурой дерева разрезаны 18 соединений тел [171].



$S_0$  – абсолютный базис;  $S_1$  – кузов секции тепловоза;  $S_2, S_{12}$  – рама тележки;  $S_3, S_6, S_9, S_{13}, S_{16}, S_{19}$  – корпус тягового двигателя;  $S_4, S_7, S_{10}, S_{14}, S_{17}, S_{20}$  – ротор ТЭД;  $S_5, S_8, S_{11}, S_{15}, S_{18}, S_{21}$  – колесные пары;  $u_1, \dots, u_{41}$  – кинематические связи  
Рисунок 140 – Граф со структурой дерева механической части локомотива

Локомотив, с точки зрения рассмотрения механической системы, является сложным устройством с повторяющимися элементами или объектами, например передняя и задняя тележка полностью одинаковы, тоже относится и к колесным парам локомотива (см. рисунок 138), что позволяет существенно сократить объем ввода первоначальной информации и вывода уравнений, используя метод подсистем [171].

Метод подсистем – это метод моделирования механических систем, который заключается в разбиении системы на отдельные части – подсистемы, путем разрезания части кинематических связей или силовых элементов. Это делается

для того, чтобы упростить математическую модель системы и ускорить процесс ее анализа.

Для того чтобы использовать метод подсистем, подсистемы должны быть кинематически тождественными [184]. Две подсистемы считаются кинематически тождественными, если возможно их пространственное совмещение вне зависимости от конфигурации расчетной схемы. Для кинематически тождественных подсистем уравнения движения будут идентичны в символьной форме записи после разрезания связей между ними.

В механической части локомотива метод подсистем используется для разделения тележек и других подсистем, таких как кузов и КМБ, для упрощения математической модели и ускорения процесса анализа. В расчетной схеме механической части тепловоза, например, имеется две подсистемы «Тележка», каждая из которых имеет четыре координаты. Шесть подсистем «КМБ», каждая из которых имеет восемь координат. Число степеней свободы локомотива, расчетная схема механической части которого представлена рисунке 140, составляет 62.

Уравнения движения, выведенные на основе формального метода Ньютона – Эйлера для системы твердых тел, со структурой дерева, записанные в матричной форме [184]:

$$\underline{M}(\underline{q})\ddot{\underline{q}} + \underline{k}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}) = \underline{Q}(\underline{q}, \dot{\underline{q}}), \quad (205)$$

где  $\underline{q}$  – матрица-столбец обобщенных (Лагранжевых) координат;

$\underline{M}$  – матрица масс;

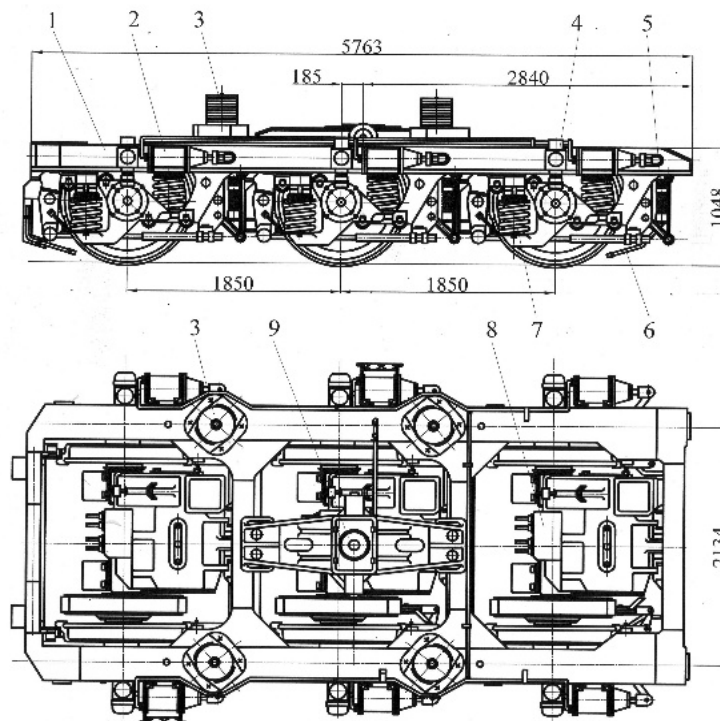
$\underline{k}$ ,  $\underline{Q}$  – матрицы-столбцы инерционных и активных сил.

Выражение (205) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно обобщенных координат  $\underline{q}(t)$ . Размерность определяется числом степеней свободы механической системы  $n$ .

Компьютерная модель локомотива разработана в программе Универсальный механизм (УМ) разработки Брянского государственного технического уни-

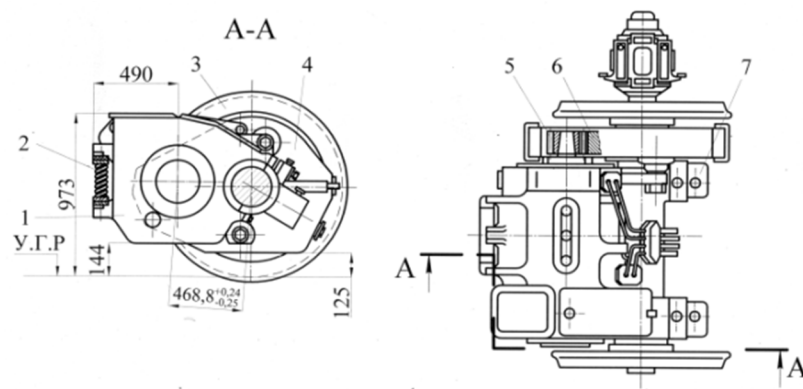
верситета [www.umlub.ru](http://www.umlub.ru). Программа УМ позволяет создавать компьютерные модели механических систем различной сложности, включая системы с большим числом тел. С помощью УМ решаются прямые и обратные задачи кинематики, динамики и управления. Это позволяет использовать программу для моделирования механических систем как плоских, так и пространственных, без ограничений на количество тел в системе, но которые являются абсолютно твердыми или упругими и связаны посредством кинематических и силовых элементов.

Программный комплекс УМ также может использоваться для анализа сложных механических систем с большим числом тел, таких как локомотив, для которых проблемой является не только анализ уравнений, но и их вывод и описание структуры объекта. Реализованный автоматизированный процесс вывода уравнений, анализа и описания структуры объекта, значительно упрощает разработку компьютерных моделей механических систем. Рассмотрим процесс построения компьютерной модели грузового тепловоза с трехосной тележкой (рисунок 141), с опорно-осевым подвешиванием ТЭД (рисунок 142) [149].



1 – рама тележки; 2 – тормозной цилиндр; 3 – опорно-возвращающие устройства; 4 – гаситель колебаний; 5 – траверса; 6 – песочная труба; 7 – рессорное подвешивание; 8 – тяговый двигатель; 9 – шкворневое устройство

Рисунок 141 – Тележка локомотива



- 1 – тяговый электродвигатель; 2 – траверса;  
 3 – колесная пара; 4 – кожух зубчатой передачи; 5 – шестерня; 6 – зубчатое колесо; 7 –  
 букса моторно-осевого подшипника

Рисунок 142 – Колесно-моторный блок тепловоза

Описание объекта происходит в три этапа [184], при этом используется метод подсистем, реализованный в программном комплексе УМ [149]:

Этап 1. Создается первая подсистема: колесно-моторный блок (КМБ), который включает корпус тягового двигателя, ротор и колесную пару (стандартная подсистема УМ), буксовые узлы и рессорное подвешивание (рисунок 143).

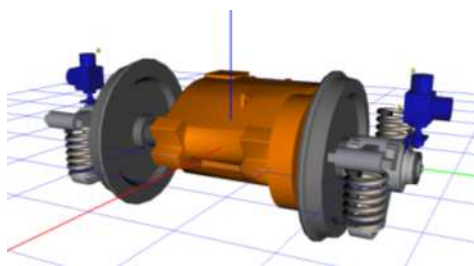


Рисунок 143 – Создание модели подсистемы колесно-моторного блока в УМ

Этап 2. Создается подсистема: тележка, состоящая из рамы и трех подсистем колесно-моторных блоков (рисунок 144).

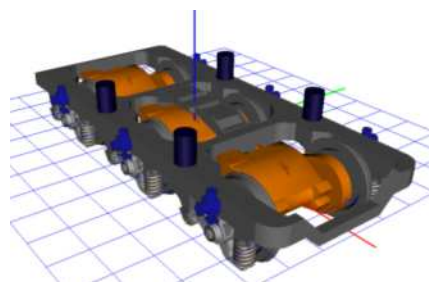


Рисунок 144 – Создание модели подсистемы трехосной тележки в УМ

Этап 3. Создается модель подсистемы секция тепловоза, в которую включены кузов и две подсистемы трехосной тележки (рисунок 145) [149].

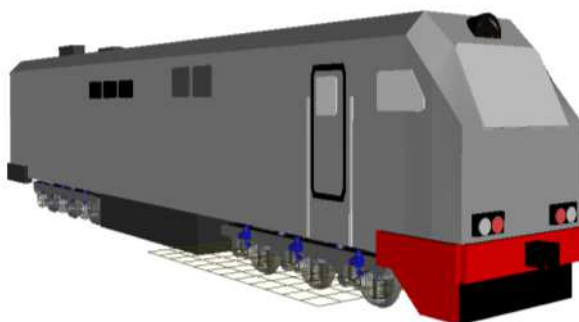


Рисунок 145 – Создание модели секции грузового тепловоза в УМ

Каждая из включенных подсистем доступна для редактирования, что позволяет учесть ее особенности. Например, поперечные силовые связи средних осей тележек с рамой отличаются от связей крайних колесных пар. Соответствующие изменения легко вводятся путем редактирования соответствующей подсистемы КМБ [186]. Тем самым значительно сокращается время создания весьма сложных моделей, а при создании развитой базы данных типовых подсистем-предков процесс создания моделей рельсовых экипажей становится весьма простым.

В качестве примера, работоспособности модели механической части, был воспроизведен следующий режим. На ротор ТД первого КМБ подан постоянный момент 1500 Нм (в дальнейшем он заменяется на управляемый электромагнитный момент ТД). На рисунке 146 показано пятно контакта «колесо – рельс» первой тележки. На первой колесной паре видно наличие силы тяги. На рисунке 147 представлено прохождение криволинейного участка секцией тепловоза [149].

С помощью инструмента UM CoSimulation модель механической части экспортируется из Универсального механизма и включается в модель Matlab/Simulink [187].

Модель механической системы UM, подключаемая в модель Matlab/Simulink, рассматривается как черный ящик, который по некоторому закону преобразует входные величины в выходные [188]. При экспорте механической

системы из UM в модель Matlab/Simulink на выходы механической системы назначаются переменные, которые создаются при помощи Мастера переменных [188]. Входные величины и параметры S-функции связываются с параметрами UM-модели [188].

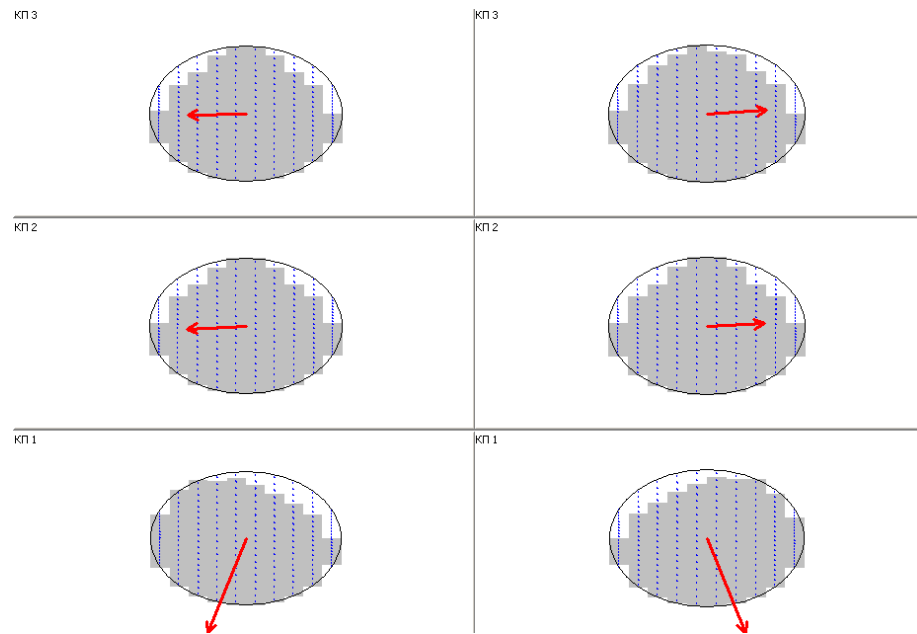


Рисунок 146 – Пятно контакта «колесо – рельс» тележки тепловоза

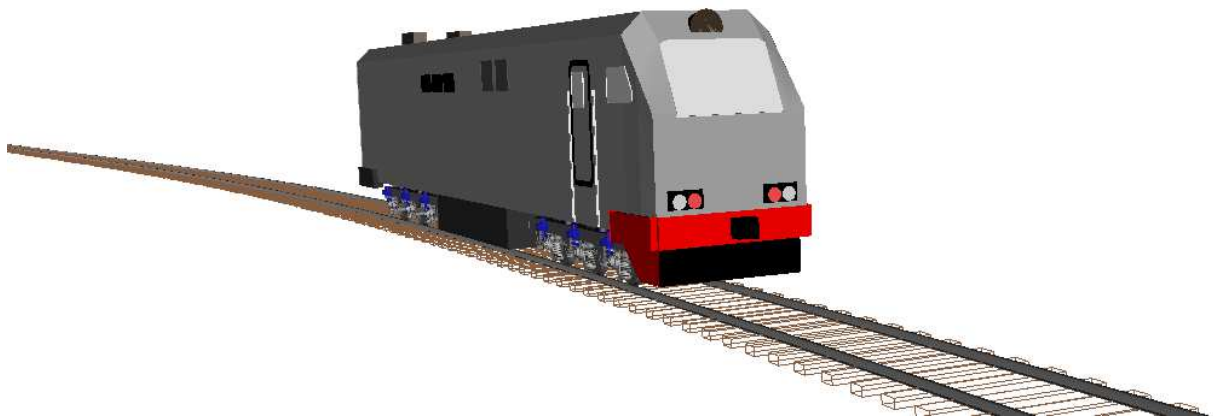


Рисунок 147 – Модель механической части тепловоза в UM

Таким образом, модель RM (рисунок 148) рассматривается как блок, в котором входным параметром является момент тягового двигателя, а выходным параметром является угловая скорость тягового двигателя. При этом уравнение меха-

ники тягового двигателя выносятся на сторону модели механической части локомотива.

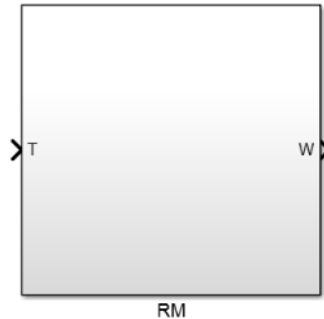


Рисунок 148 – Модель механической части локомотива в Matlab/Simulink

В блоке RM расположена модель механической части локомотива, разработанная в программе Универсальный механизм (рисунок 147) или в других программных пакетах.

#### 4.5 Компьютерная модель тягового модуля передачи мощности

После разработки отдельных блоков, входящих в силовой модуль передачи мощности, происходит их объединение в комплексную компьютерную модель тягового канала электромеханической трансмиссии.

На рисунке 149 представлена основная структура математической модели тягового канала, в соответствии с изначальной функциональной схемой. Удобство программы MATLAB/Simulink заключается в том, что данная модель может быть легко адаптирована к любому автономному тяговому подвижному составу [189]. Возможно подключение неограниченного количества электрических машин к звену постоянного тока, или накопителя энергии. Также возможно выведение любых параметров (ток, напряжение, момент, мощность и т.д.) в качестве графиков.



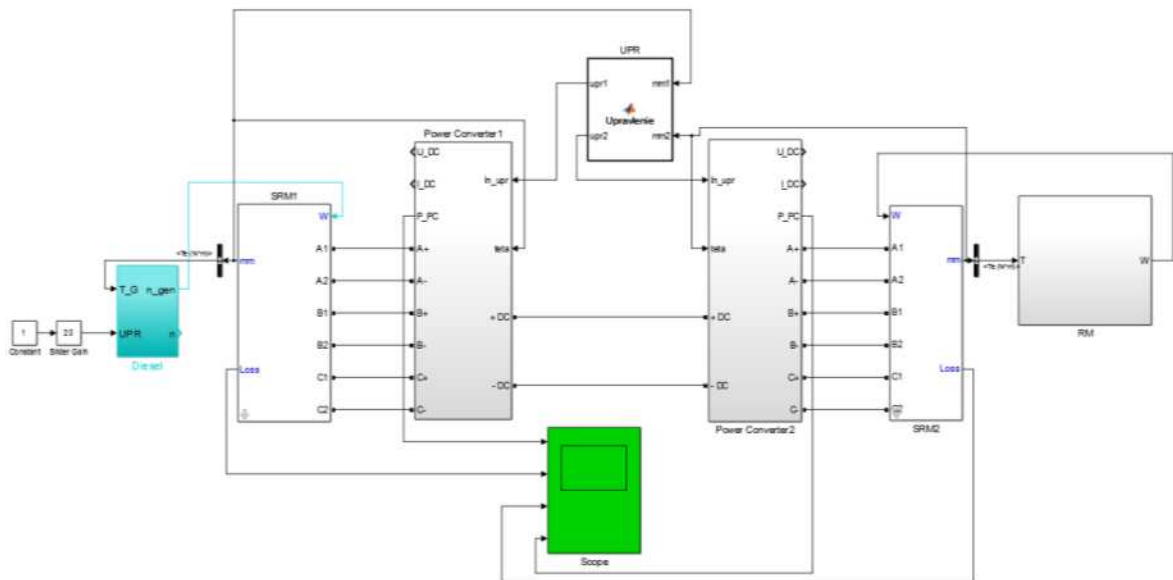


Рисунок 149 – Компьютерная модель тягового модуля передачи мощности автономного локомотива

#### 4.6 Теоретические исследования режимов работы макетов тяговых электрических машин

Определение параметров управления тяговыми реактивными индукторными машинами, обеспечивающих реализацию требуемых характеристик, на этапе проектирования является актуальной задачей. Определение способов управления преобразователями и зависимостей параметров управления в различных режимах работы позволяет:

- определить условия эффективности процессов электрохимического преобразования энергии;
- существенно сократить сроки разработки и отладки программного обеспечения.

В результате работы получены зависимости параметров управления от частоты вращения тягового реактивного индукторного генератора и двигателя. Параметры управления (углы опережения, углы проводимости, заданное значение фазного тока) определены с использованием программных методов моделирования режимов работы тягового канала электрической передачи мощности.

#### 4.6.1 Определение условий эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в генераторе

Ротор тягового генератора приводится во вращение от двигателя внутреннего сгорания. Основной задачей генератора является обеспечение поддержания напряжения на промежуточном контуре звена постоянного тока в заданных пределах для питания преобразователя двигателя и вспомогательных устройств.

Для макета системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами принято фиксированное напряжение звена постоянного тока 550 В.

Основными параметрами управления генератора является изменение угла опережения ( $\alpha$ ) и угла проводимости ( $\beta$ ). При этом необходимо отметить, оптимальный угол  $\alpha$  зависит от частоты вращения и мощности генератора.

Для определения углов опережения и проводимости проведены теоретические исследования для всего диапазона работы реактивного индукторного генератора (600 – 1900 об/мин).

Результаты моделирования (электрическая мощность вырабатываемая генератором, потери в РИГ, действующее значение фазного тока РИГ, КПД РИГ) представлены на рисунке 150. Результаты моделирования для различных частот вращения приведены в [190].

Рассчитанные зависимости дают наглядное представление о том, как меняются основные параметры реактивного индукторного генератора в зависимости от углов управления и частоты вращения. По результатам обработки результатов теоретических исследований формируются алгоритмы управления РИГ с целью реализации выходных параметров при управлении по одному или нескольким критериям (максимум КПД, максимум мощности и т.д).

В качестве примера приведем анализ результатов для частоты вращения 1500 об/мин. Например выходную мощность равной 40 кВт можно получить при разных значениях углов управления, рисунок 151.

В результате получаем существенное изменение значения действующего тока при одной и той же выходной мощности, рисунок 152.

Из рисунка 152 видно, что при одной и той же выходной мощности генератора действующее значение тока может изменяться от 95 до 65 А.

Тоже касается и амплитудного значения тока, рисунок 153. Из рисунка 153 видно, что при одной и той же выходной мощности генератора амплитудное значение тока может изменяться от 215 до 125 А.

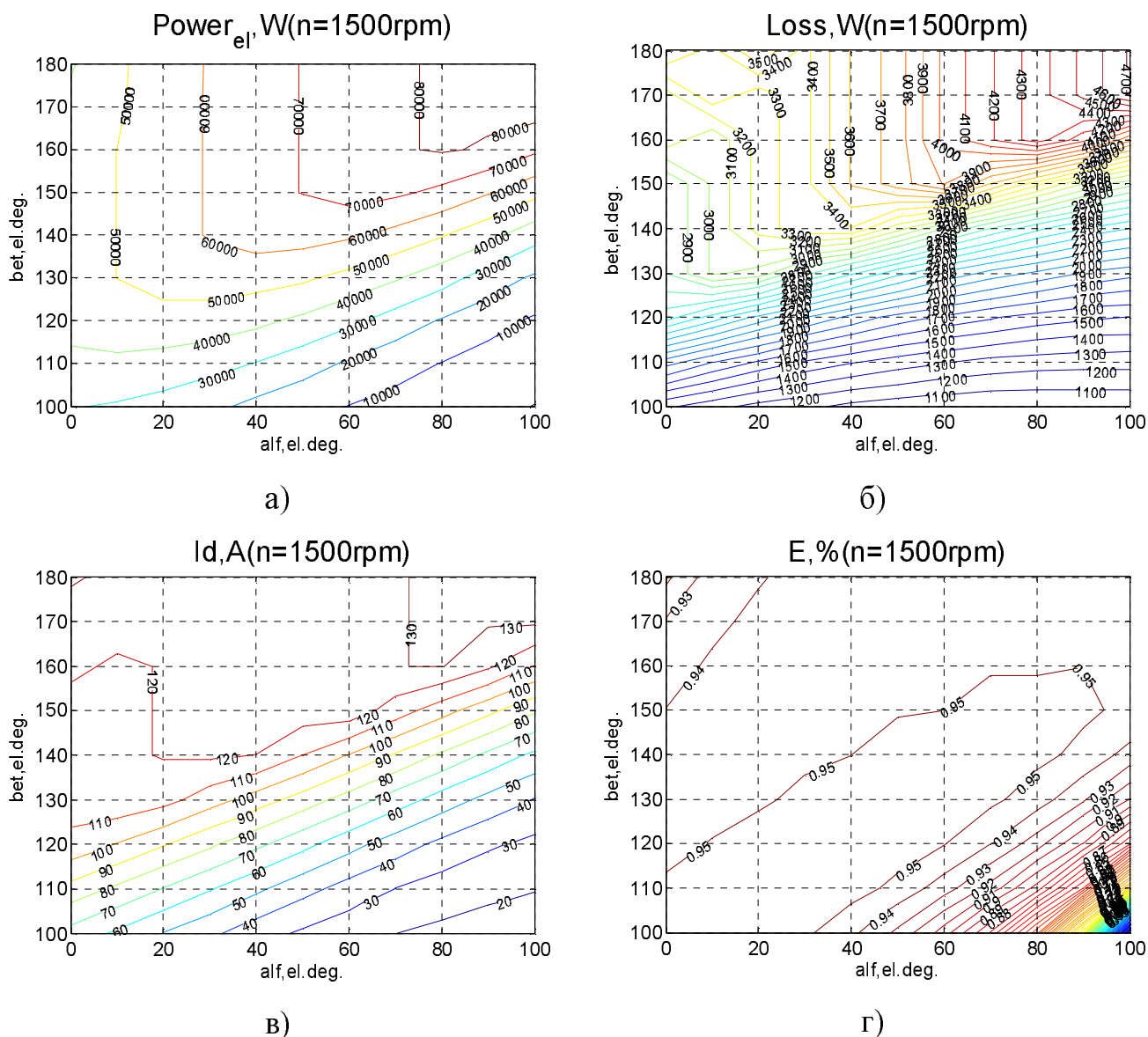


Рисунок 150 – Электрическая мощность а), потери б), действующее значение тока в) и коэффициент полезного действия г) генератора в функции  $\alpha$  и  $\beta$ , для частоты вращения 1500 об/мин

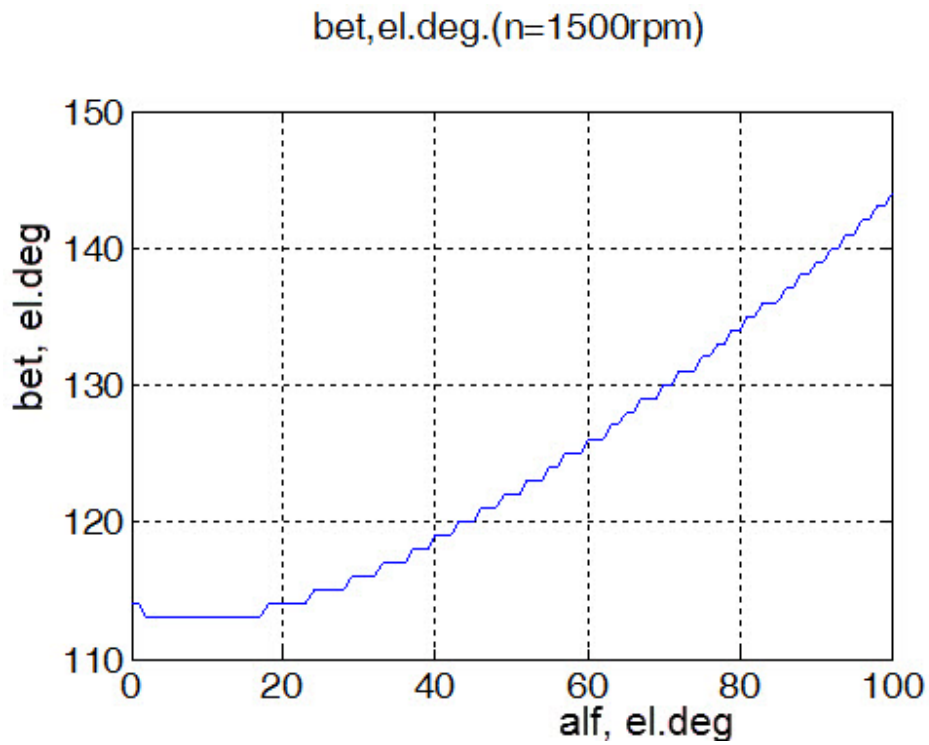


Рисунок 151 – Зависимость угла проводимости  $\beta$  от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт

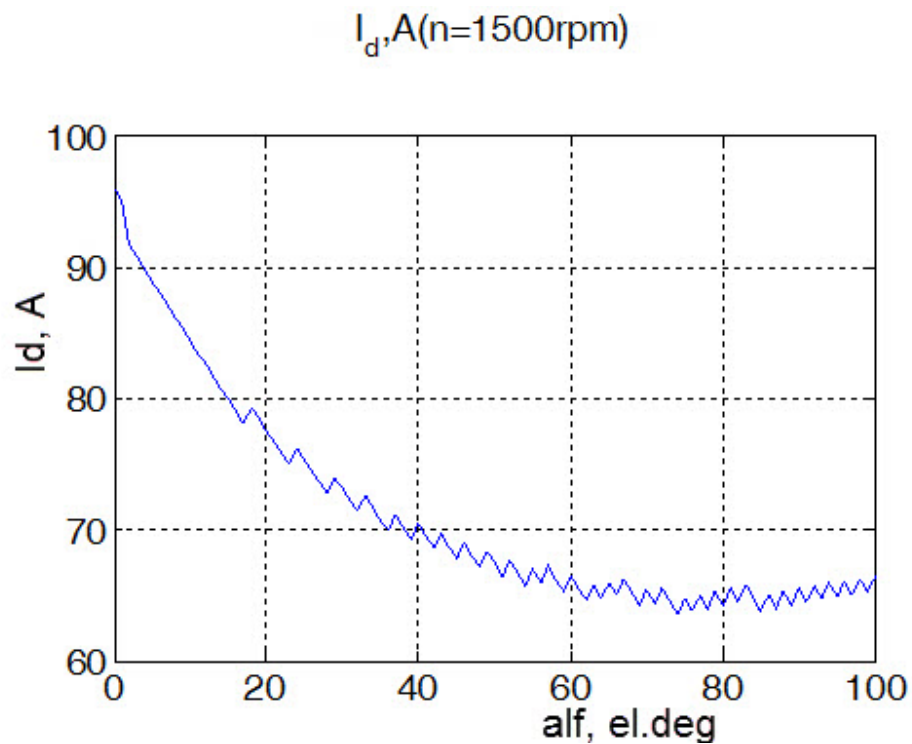


Рисунок 152 – Зависимость действующего значения тока от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт

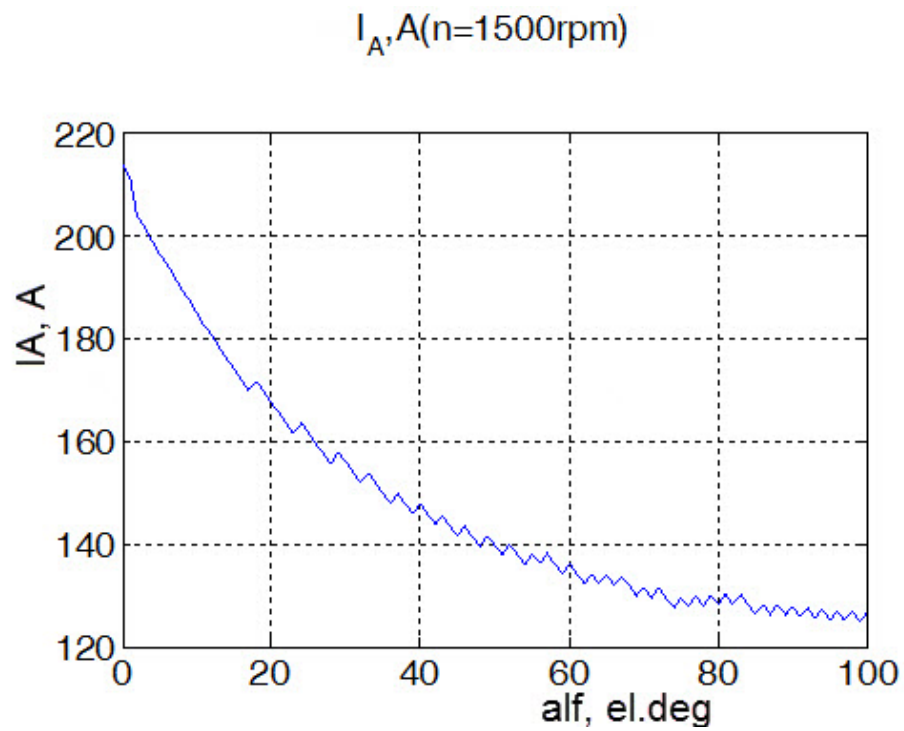


Рисунок 153 – Зависимость действующего значения тока от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт

Зависимость КПД генератора представлена рисунке 154.

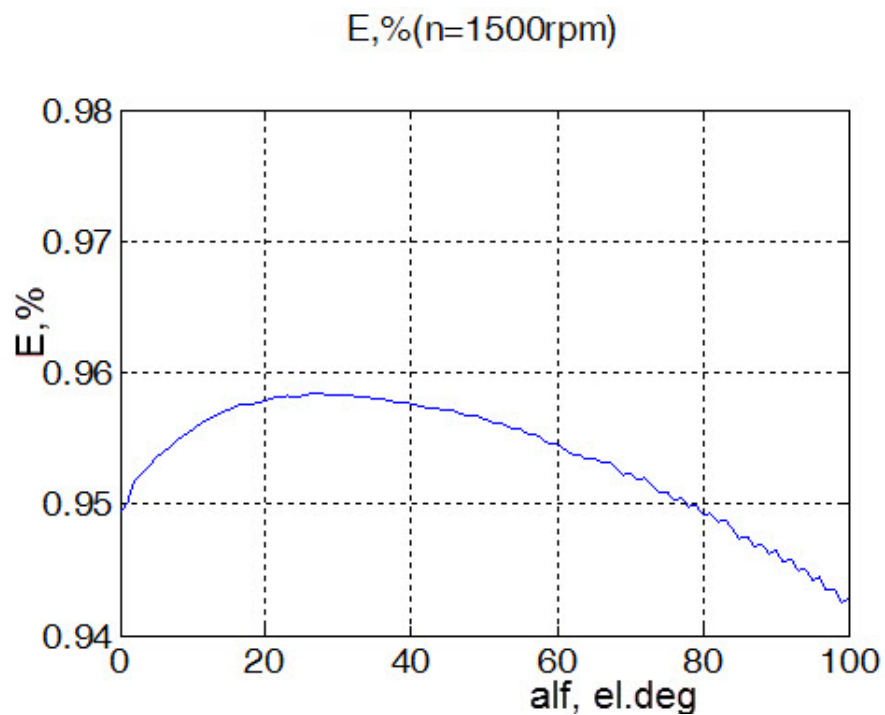


Рисунок 154 – Зависимость КПД от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт

Аналогичный анализ проводился для разных частот вращения и выходной мощности. Таким образом, в результате проведенных расчетов получены необходимые данные для системы управления генератором, что позволит обеспечить реализацию энергоэффективных заданных характеристик.

#### **4.6.2 Определение условий эффективности процессов электромеханического преобразования энергии в двигателе**

Тяговый двигатель обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую, и приводит во вращение колесную пару (исполнительный механизм) автономного локомотива. Питание преобразователя двигателя осуществляется от звена постоянного тока.

Для реализации номинальной мощности двигателя в широком диапазоне скоростей необходимо проводить исследования для определения оптимальных параметров управления. В околостоповых режимах РИД работает в токовом коридоре, по мере увеличения частоты вращения РИД переходит в одноимпульсный режим. Управление производится изменением углов опережения и проводимости. Таким образом, необходимо провести исследования на модели и построить графики.

Для определения углов опережения и проводимости проведены теоретические исследования для всего диапазона работы реактивного индукторного двигателя (100 – 1600 об/мин).

Результаты моделирования (мощность на валу двигателя, потери в РИД, действующее значение фазного тока РИД, КПД РИД) для частоты вращения 1000 об/мин, представлены на рисунке 155. Результаты моделирования для различных частот вращения приведены в [190].

Рассчитанные зависимости дают наглядное представление о том, как меняются основные параметры реактивного индукторного двигателя в зависимости от углов управления и частоты управления. На основе анализа полученных данных можно сформировать алгоритмы управления РИД для получения заданных пара-

метров, например управление по максимуму КПД, или управление по максимуму мощности и т.д. Из рисунков видно, что в зависимости от частоты вращения и выходной мощности необходимо изменять углы управления  $\alpha$  и  $\beta$  совместно, изменение только одного параметра приведет к потере энергоэффективности РИД. Данный метод управления, конечно сложнее, но при этом будут обеспечены высокие энергетические показатели электрической передачи мощности.

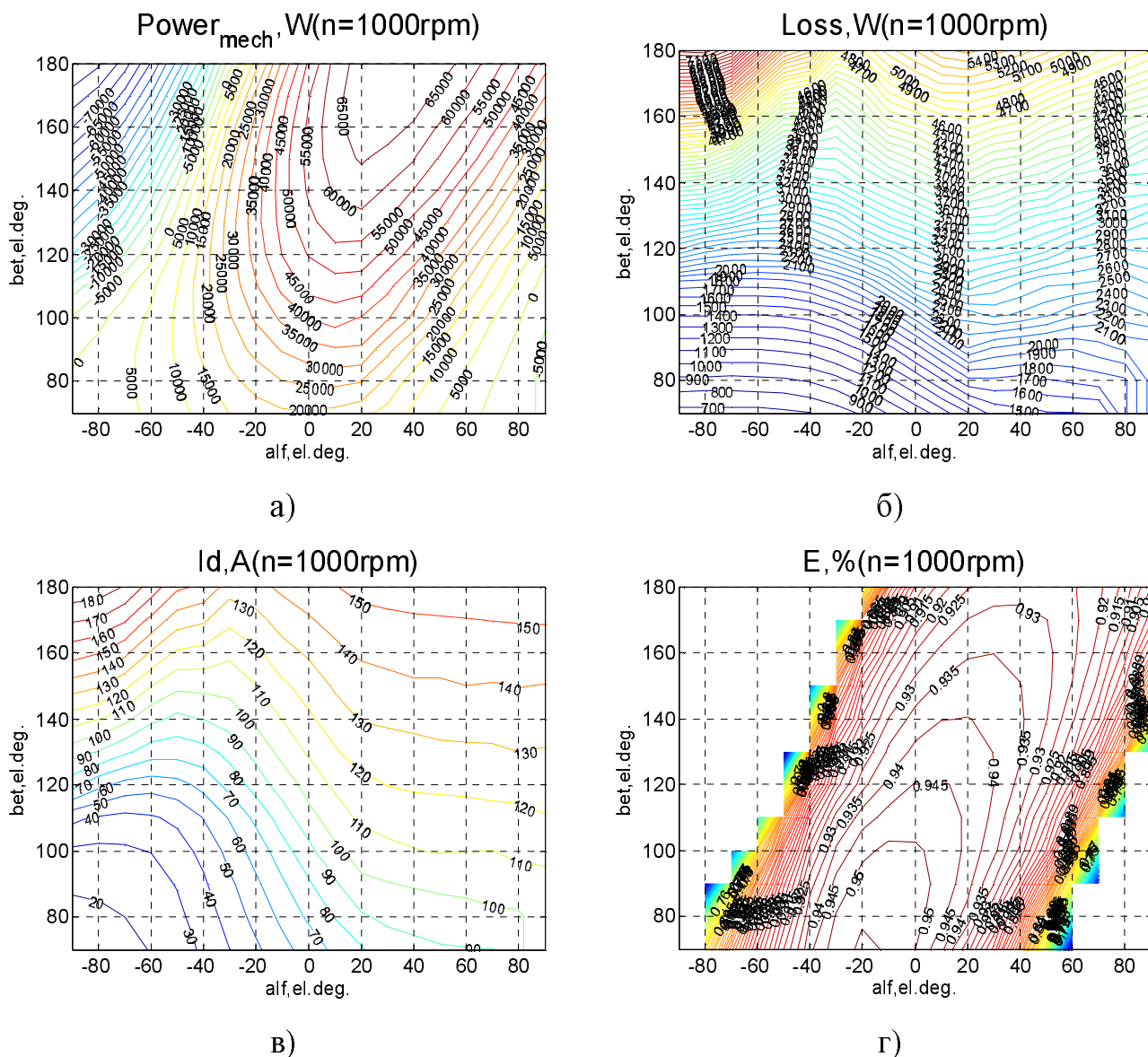


Рисунок 155 – а) Механическая мощность, б) потери, в) действующее значение тока и г) коэффициент полезного действия двигателя в функции  $\alpha$  и  $\beta$ , для частоты вращения 1000 об/мин

В качестве примера приведем анализ результатов для частоты вращения 1000 об/мин. Например выходную мощность равной 40 кВт можно получить при разных значениях углов управления, рисунок 156.

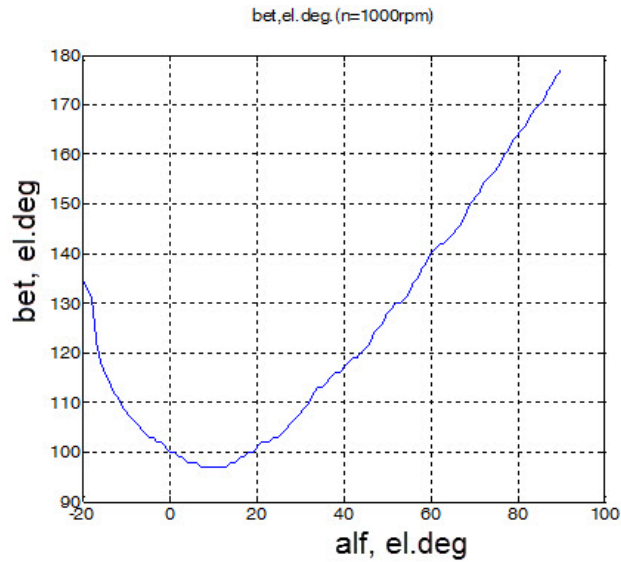


Рисунок 156 – Зависимость угла проводимости  $\beta$  от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт

Соответственно, одна и та же выходная мощность может быть реализована при разных значениях действующего тока, рисунок 157.

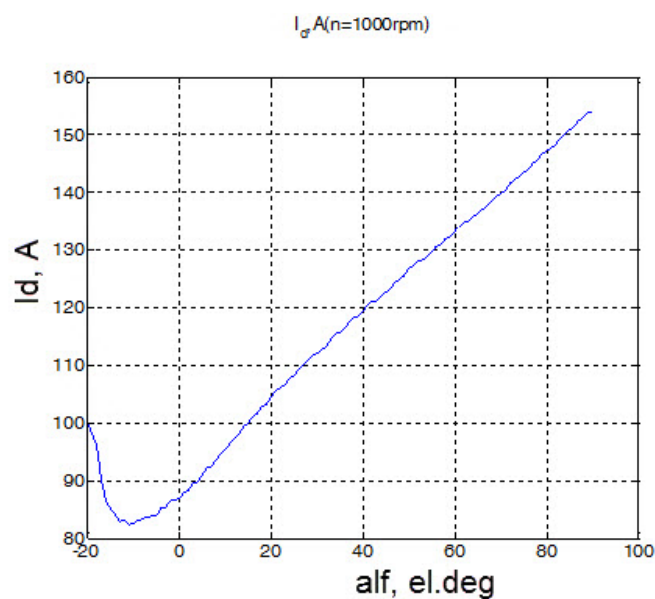


Рисунок 157 – Зависимость действующего значения тока от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт



Из рисунка 157 видно, что при одной и той же выходной мощности двигателя, действующее значение тока может изменяться от 82 до 155 А.

Зависимость КПД РИД представлена рисунке 158.

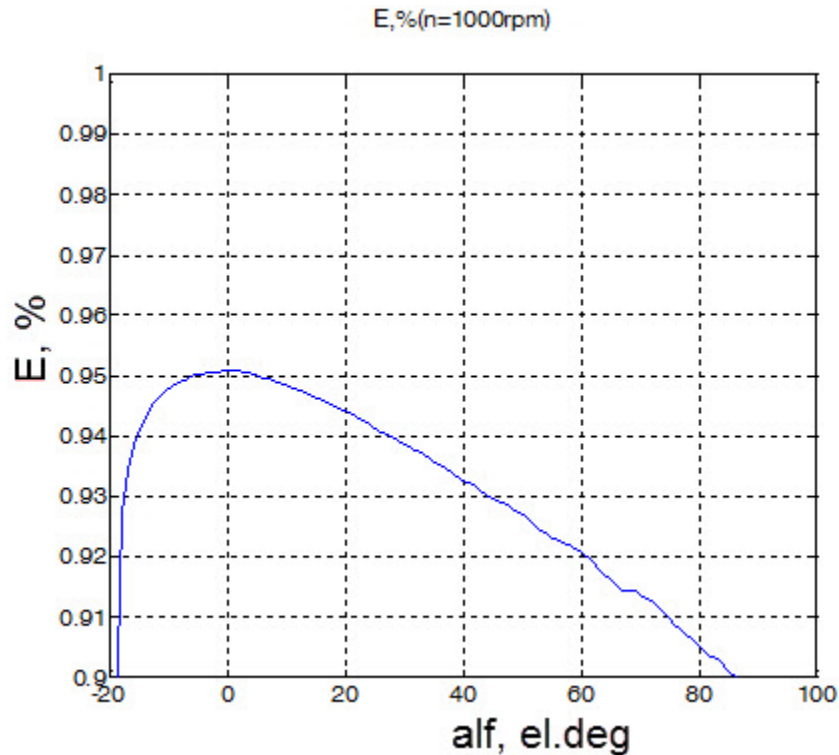


Рисунок 158 – Зависимость КПД от угла опережения  $\alpha$  при выходной мощности 40 кВт

Аналогичный анализ проводился для разных частот вращения и выходной мощности. Таким образом, в результате проведенных расчетов получены необходимые данные для системы управления двигателем, что позволит обеспечить энергоэффективную реализацию заданных характеристик.

#### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Разработанная компьютерная модель тягового модуля передачи мощности автономного локомотива позволяет исследовать электромеханические и энергетические процессы, в процессе эксплуатации. Модель может быть легко адаптирована для любого типа локомотива с электрической передачей мощности. Мо-

дель учитывает потери энергии в элементах тягового модуля, что позволяет определять энергоэффективность преобразования энергии на каждом этапе ее преобразования.

2. Разработана структурно-энергетическая математическая модель процесса преобразования энергии в электрических машинах. Использование представленной модели позволило проработать основные технические решения по разработке геометрии активных частей тягового двигателя и генератора для электрической передачи мощности с бесколлекторным тяговым приводом.

3. В результате проведенных теоретических исследований электромагнитных процессов на математической модели, определены параметры управления бесколлекторного тягового привода, обеспечивающие условия эффективности процессов электромеханического преобразования энергии.

4. Показано, что бесколлекторные электрические машины являются высокоэффективными преобразователями энергии, у которых высокий КПД (до 95-96 %) в широком диапазоне скоростей и мощностей. Полученные результаты можно использовать при разработке программного обеспечения блоков управления преобразователем генератора и двигателя.

## 5 Экспериментальные исследования макета тягового модуля электрической передачи мощности

Для проведения испытаний разработан и изготовлен стенд в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по соглашению о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г. № 14.576.21.0036 «Разработка научно-технических решений для создания энерго-сберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами» АО «Научно-техническим центром «ПРИВОД-Н», в здании Лабораторно-экспериментального корпуса г. Новочеркасск.

### 5.1 Макет тягового модуля электрической передачи мощности

Макет предназначен для проведения испытаний тягового модуля электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами [191]. В общем случае ЭПМ с реактивными индукторными электрическими машинами состоит из следующих основных элементов: реактивный индукторный генератор, преобразователь генератора, звено постоянного тока, преобразователь двигателя, реактивный индукторный двигатель (рисунок 159).

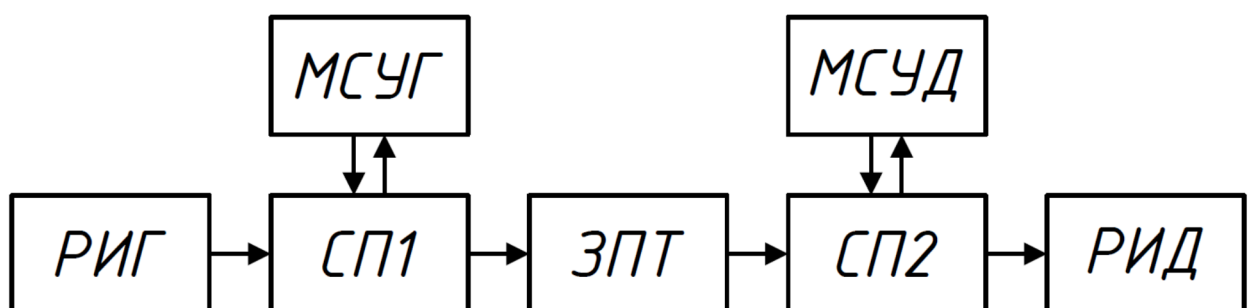


Рисунок 159 – Функциональная схема макета электрической передачи мощности

Реактивный индукторный генератор РИГ приводится во вращение от ДВС или его имитатора. Преобразователь генератора СП1 обеспечивает возбуждение и преобразование трёхфазного выходного напряжения РИГ в постоянное напряжение звена постоянного тока, регулируемое в диапазоне от  $U_{\min}$  до  $U_{\max}$  в зависимости от реализуемой мощности. Питание реактивного индукторного двигателя РИД осуществляется от преобразователя двигателя СП2, подключенного к звену постоянного тока ЗПТ. Преобразование электрической энергии в электропередаче осуществляется посредством статических преобразователей, выполненных на основе использования IGBT-транзисторов.

Управление ЭПМ осуществляется при помощи микропроцессорной системы управления, как для генератора МСУГ, так и для двигателя МСУД. Система управления анализирует входные сигналы с датчиков положения, токов и напряжения и формирует необходимые интервалы коммутации IGBT-транзисторов. Преобразователи двигателя и генератора могут быть выполнены отдельно или объединены в один, тоже касается и системы управления.

Макет статического преобразователя включает в себя два основных узла: преобразователь генератора и тяговый преобразователь. Общий вид макета преобразователя показан на рисунке 160.

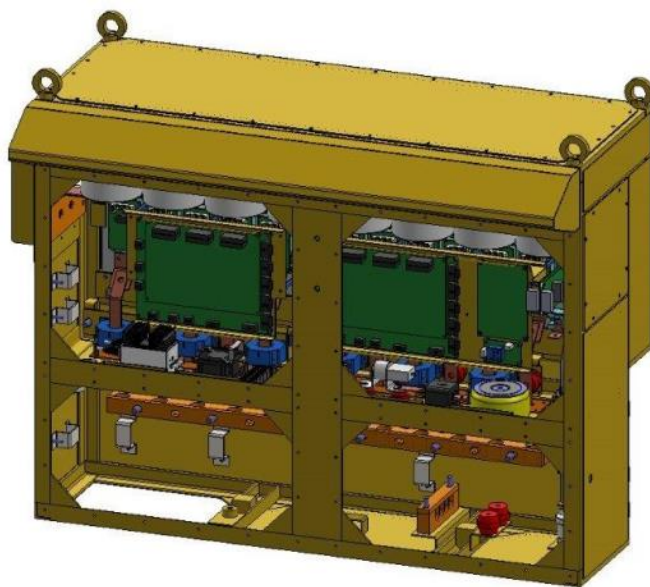


Рисунок 160 – 3D модель макета статического преобразователя

Основными частями статического преобразователя являются: корпус, радиатор с элементами, Панель конденсаторов, панель датчиков, микропроцессорная система управления. Способ охлаждения макета статического преобразователя – принудительная вентиляция. Восемь вентиляторов расположены на плите охлаждения (радиаторе). Охлаждающий воздух поступает в каналы плиты охлаждения через заборное устройство с сетчатым фильтром. Воздух выходит из плиты охлаждения в окружающую среду. Кроме этого для охлаждения элементов расположенных внутри корпуса преобразователя установлено два вентилятора для перемешивания воздуха внутри преобразователя, при этом охлаждение происходит за счет теплообмена воздуха с корпусом макета преобразователя.

Управление макетом преобразователя осуществляют две микропроцессорных системы управления: одна управляет работой макета генератора, другая – для управления макетом двигателя. Между системами управления идет обмен информацией по CAN шине.

Макет статического преобразователя электрической энергии, состоит из двух каналов: канала тягового преобразователя двигателя и канала тягового преобразователя генератора.

Канал тягового преобразователя двигателя выполнен по классической схеме с использованием полумостов на IGBT-модулях. Входы канала тягового преобразователя ( $+U_{s1}$ ,  $-U_{s1}$ ) оборудованы контакторами, предназначенными для оперативного отключения цепей канала тягового преобразователя от цепей канала преобразователя генератора в случае необходимости. Для защиты силовых цепей преобразователя от короткого замыкания на входе канала тягового преобразователя установлен предохранитель. В контуре постоянного тока расположен силовой фильтр, состоящий из конденсаторов, которые размещены на общей панели конденсаторов [191]. Фазные обмотки макета тягового реактивного индукторного двигателя подключаются к соответствующим выходам канала тягового преобразователя [191]. Управление током в фазных обмотках макета тягового реактивного индукторного двигателя осуществляется по сигналам, получаемых с датчиков токов, которые установлены в каждой фазе и датчику напряжения, который уста-

новлен в звене постоянного напряжения. Датчики тока размещаются на общей панели датчиков. С целью минимизации искажений сигналов в измерительной цепи используются датчики с токовым выходом [191].

Канал тягового преобразователя генератора предназначен для подачи импульсов возбуждения на фазные обмотки генератора и преобразования получаемого трехфазного напряжения обмоток макета тягового реактивного индукторного генератора в постоянное напряжение для питания канала тягового преобразователя [191]. Выходы канала преобразователя генератора ( $+U_{s2}$ ,  $-U_{s2}$ ) соединены со звеном постоянного напряжения. Фазные обмотки макета тягового реактивного индукторного генератора подключаются к соответствующим входам канала тягового преобразователя. К звену постоянного напряжения подключается силовой конденсаторный фильтр, что позволяет обеспечить импульсы возбуждения генератора и сгладить пульсации при выбросе реактивной энергии при окончании коммутации фаз макета тягового двигателя [191].

Кинематическая схема макета системы электрической передачи мощности [191] с реактивными индукторными электрическими машинами приведена на рисунке 161.

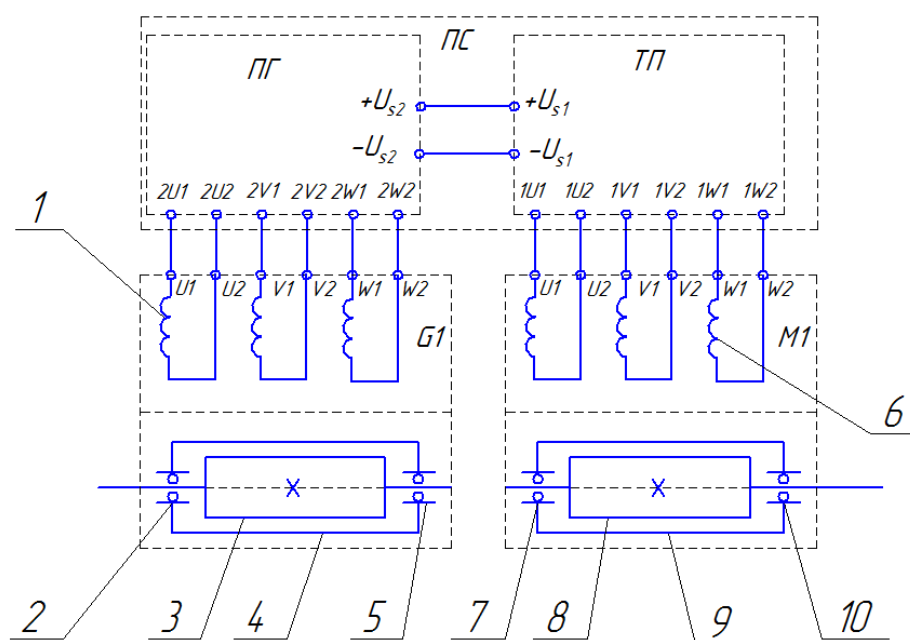


Рисунок 161 – Схема соединений и подключений макета системы передачи мощности

Механическая энергия от приводного двигателя передается на вал ротора 3 макета тягового реактивного индукторного генератора G1, который используется для создания электрической энергии. Для этого, ЭДС, наведенная в обмотках 1 тягового генератора, проходит через преобразователь генератора ПГ макета статического преобразователя ПС, который преобразует ее в постоянное напряжение. Это напряжение затем поступает на вход тягового преобразователя ТП, который преобразует его в трехфазное напряжение для питания обмоток 6 макета тягового реактивного индукторного двигателя M1.

Макет тягового двигателя преобразует электрическую энергию в механическую энергию вращения, которая передается на тяговой редуктор автономного локомотива. Это обеспечивает плавную передачу мощности во всем диапазоне частот вращения макетов тягового генератора и двигателя.

## **5.2 Стенд для испытания макета тягового модуля электрической передачи мощности**

Для исследования режимов работы компонентов макета системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными машинами разработан стенд, позволяющий имитировать различные режимы работы системы электрической передачи мощности и измерять основные параметры работы электрооборудования. Структурная схема стенда представлена на рисунке 162.

Имитатор приводного двигателя питается от тягового преобразователя, подключенного к выпрямительной установке. Напряжение на входе выпрямителя регулируется при помощи трехфазного автотрансформатора питаемого от сети 3-х фазного напряжения 380 В [191]. Тяговый преобразователь имитатора приводного двигателя регулируется микропроцессорной системой управления, что позволяет задавать различные режимы работы имитатора двигателя [191].

Макет тягового реактивного индукторного генератора приводится во вращение от имитатора двигателя, валы которых, соединены при помощи компенсационных муфт через датчик момента. В макете тягового реактивного индукторно-

го генератора происходит преобразование механической энергии вращения ротора в электрическую, при помощи управляемого преобразователя генератора. Полученная электрическая энергия передается на тяговый преобразователь для питания макета тягового реактивного индукторного двигателя. Тем самым реализуется электрическая передача мощности от вала имитатора приводного двигателя на выходной вал макета тягового реактивного индукторного двигателя [191].

Для имитации нагрузки автономного локомотива в различных эксплуатационных условиях, в систему добавлен имитатор нагрузки, который представляет собой регулируемую электрическую машину, нагруженную на нагрузочный резистор. Для соединения валов макета тягового реактивного индукторного двигателя и имитатора нагрузки, используются компенсационные муфты, которые позволяют компенсировать несоосность валов [191].

Для измерения момента на валах макета тягового реактивного индукторного генератора и двигателя применяются датчики момента. Также в системе имеется тормоз, который используется для проведения исследований в пусковых режимах. Оценка энергоэффективности производится с помощью двух датчиков момента, которые позволяют оценить эффективность передачи механической энергии от тягового реактивного индукторного генератора к имитатору нагрузки.

Стенд содержит следующие основные элементы:

- имитатор приводного двигателя;
- испытываемый макет системы электрической передачи мощности, состоящий из: - макета тягового генератора; - макета тягового двигателя; - макета статического преобразователя, содержащего каналы преобразователя генератора и тягового преобразователя;
- имитатор нагрузки;
- система питания имитатора приводного двигателя;
- система питания имитатора нагрузки;
- система измерения.



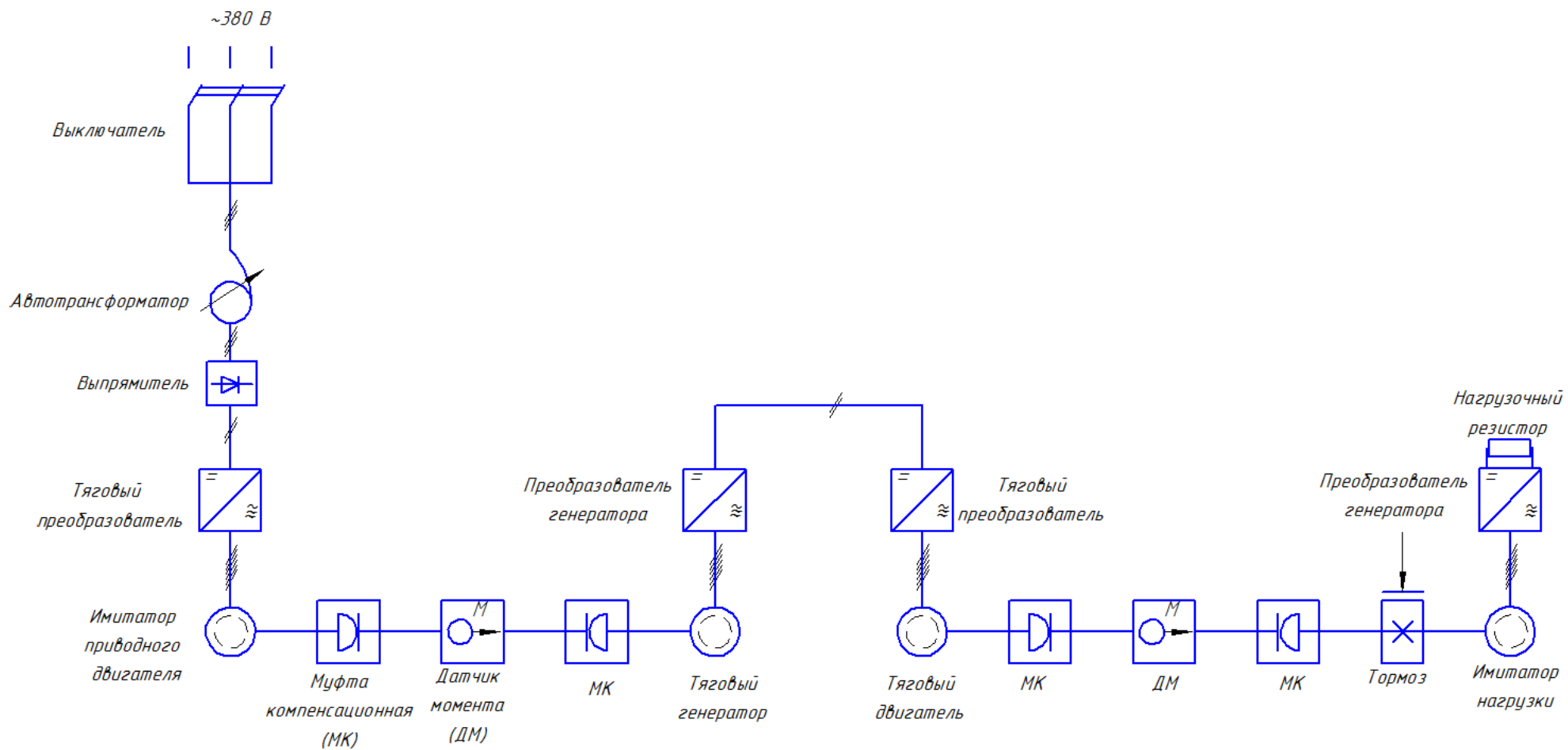


Рисунок 162 – Структурная схема стенда

Имитатор приводного двигателя представляет собой реактивный индукторный двигатель, питание которого осуществляется от тягового преобразователя.

Необходимое для функционирования преобразователя постоянное напряжение, поступает на его вход с выхода трехфазного выпрямителя (рисунок 163), который через лабораторный автотрансформатор подключен к трехфазной сети 380 В промышленной частоты [191].

На входе преобразователя подключен двухполюсный быстродействующий выключатель и фильтр радиопомех. Быстродействующий выключатель обеспечивает снятие напряжения со схемы стенда в случае возникновения аварийных ситуаций. Фильтр радиопомех предназначен для предотвращения попадания помех, генерируемых электрооборудованием стенда, в промышленную сеть [191].

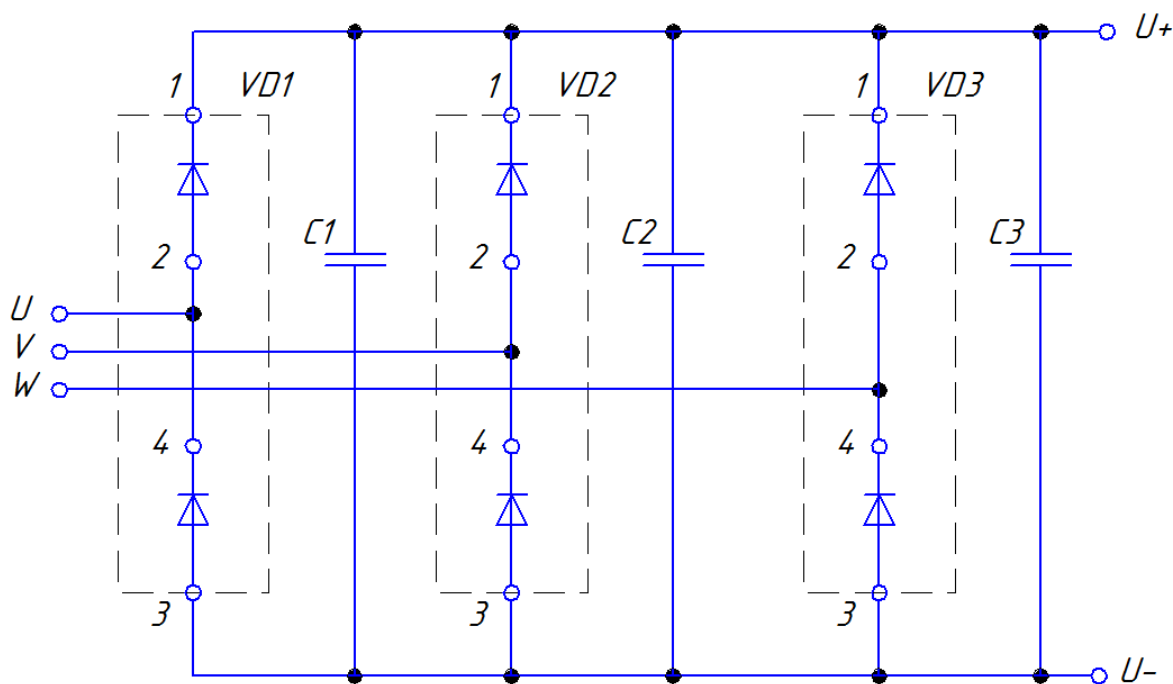


Рисунок 163 – Схема трехфазного выпрямителя

Преобразователь работает в режиме регулятора скорости имитатора приводного двигателя [191]. Заданное значение скорости вращения имитатора приводного двигателя поступает в систему управления преобразователя от компью-

тера через адаптер интерфейса в соответствии с заданным режимом работы системы электрической передачи мощности.

Вал имитатора приводного двигателя через датчик крутящего момента соединен с валом макета тягового реактивного индукторного генератора. В цепи фазных обмоток макета индукторного генератора и макета тягового двигателя включены датчики тока и напряжения измерительной схемы. Измерительные датчики тока и напряжения установлены также в цепи промежуточного контура постоянного тока. Преобразователь генератора работает в режиме регулятора напряжения, поддерживая постоянный уровень напряжения в промежуточном контуре. Тяговый преобразователь работает в режиме регулятора скорости. Заданное значение скорости вращения макета тягового двигателя поступает в систему управления тягового преобразователя от компьютера через адаптер интерфейса в соответствии с заданным режимом работы системы электрической передачи мощности. Вал макета тягового реактивного индукторного двигателя через датчик крутящего момента соединен с валом имитатора нагрузки. Имитатор нагрузки представляет собой тяговую реактивную индукторную машину, работающую в режиме генератора. К звену постоянного тока имитатора нагрузки присоединен блок тормозных резисторов, что позволяет рассеивать энергию генерируемую имитатором нагрузки.

Система измерения на стенде представляет собой комплексное устройство, предназначенное для сбора и анализа данных о работе макета системы электрической передачи мощности. Эта система позволяет регистрировать и измерять как электрические параметры, так и механические параметры, что обеспечивает полную оценку электромеханического и механикоэлектрического преобразования энергии [191].

Система измерения включает в себя различные датчики, способные фиксировать различные параметры. В частности, используются датчики крутящего момента, датчики тока и напряжения. Датчики крутящего момента позволяют измерять момент, возникающий на валах макета тягового реактивного индукторного

генератора и двигателя. Датчики тока и напряжения служат для измерения электрических характеристик в системе.

Сигналы от датчиков передаются на персональный компьютер системы измерения через декодеры, которые обеспечивают правильное преобразование и передачу данных. Далее сигналы обрабатываются специальным программным обеспечением, разработанным для данной системы измерения. Программа, например, под названием «Датчик», обеспечивает обработку и анализ полученных данных.

Для обеспечения питания датчиков и системы управления используются источники питания постоянного тока. Это обеспечивает стабильное и надежное питание всей системы измерения [191].

Итоговые данные, полученные после обработки и анализа, включают в себя информацию об электрической мощности, тяговых характеристиках и коэффициенте полезного действия (КПД) компонентов системы электрической передачи мощности.

Такая система измерения позволяет проводить экспериментальные исследования на высоком уровне, обеспечивая надежный сбор данных и оценку работы системы электрической передачи мощности в режиме реального времени [191].

Кинематическая схема стенда приведена на рисунке 164. Механическая энергия от вала имитатора приводного двигателя М2 через компенсационные муфты 7, 8 и датчик крутящего момента 6 передается на вал ротора макета тягового реактивного индукторного генератора G1. ЭДС, наведенная в обмотках макета тягового генератора 10, в преобразователе генератора ПГ макета статического преобразователя ПС преобразуется в постоянное напряжение, которое поступает на вход тягового преобразователя ТП [191].

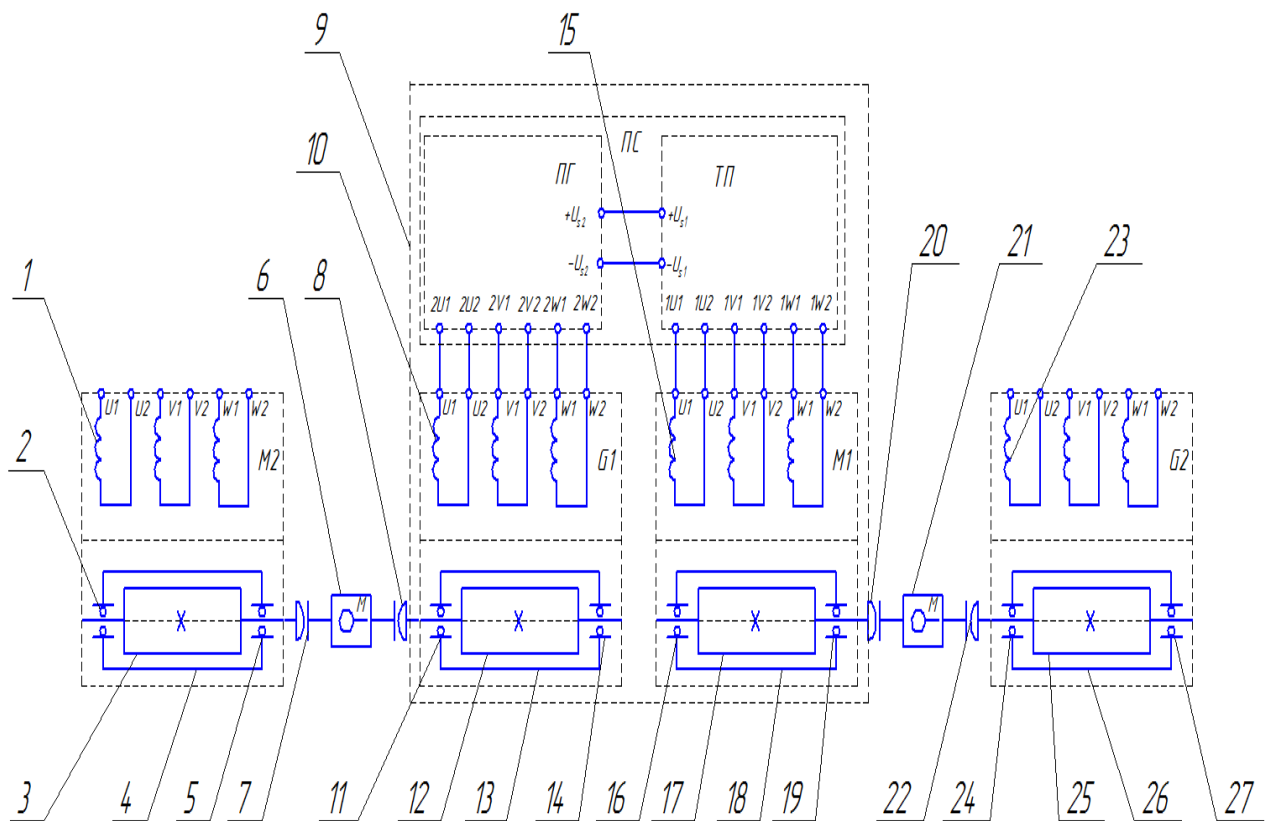


Рисунок 164 – Кинематическая схема стенда

Тяговый преобразователь обеспечивает преобразование постоянного напряжения в трехфазное напряжение питания обмоток 15 макета тягового реактивного индукторного двигателя М1. В макете тягового двигателя осуществляется обратное преобразование электрической энергии в механическую энергию вращения ротора, которая с выхода вала ротора через компенсационные муфты 20, 22 и датчик крутящего момента 21 передается на вал имитатора нагрузки G2 [191].

После установки всех электрических машин, установлены предохранительные муфты и произведена центровка машин для исключения биения. Установлены датчики момента и произведен электрический монтаж силовых и измерительных цепей. Фото изготовленного стенда с установленным объектом испытаний и вычислительно-измерительным комплексом показано на рисунке 165 [191].

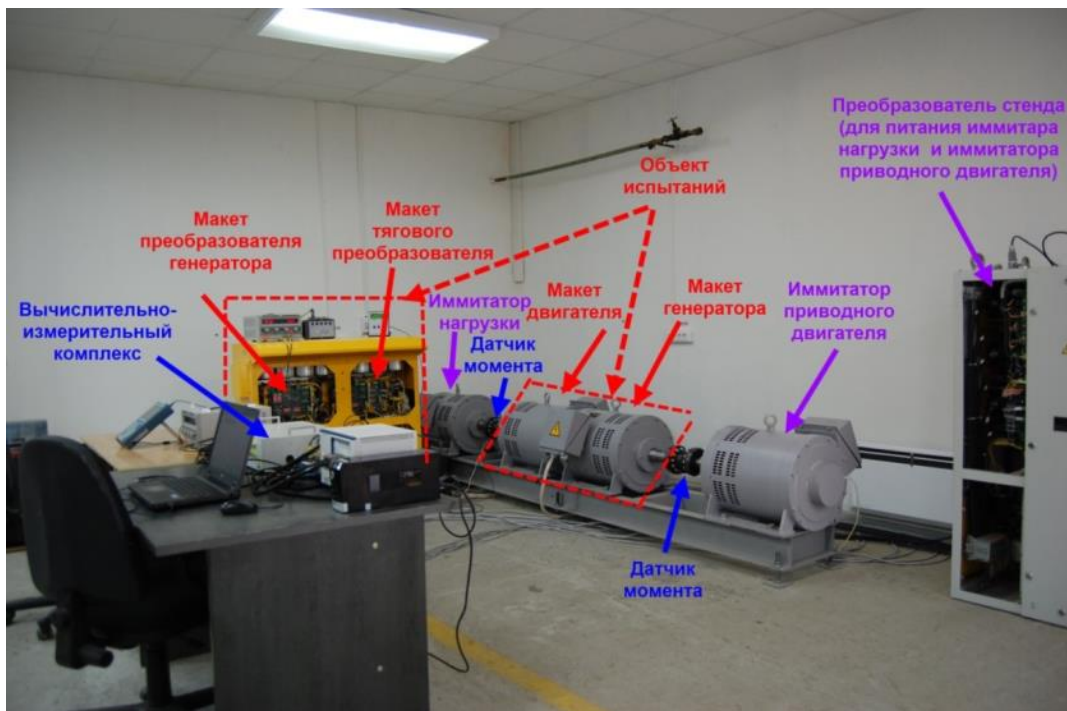


Рисунок 165 – Стенд для испытаний, с установленным объектом испытаний

Имитатор приводного двигателя питается от тягового преобразователя, подключенного к выпрямительной установке. Напряжение на входе выпрямителя регулируется при помощи трехфазного автотрансформатора питаемого от сети 3-фазного напряжения 380 В.

Макет тягового реактивного индукторного генератора приводится во вращение от имитатора двигателя, валы которых, соединены при помощи компенсационных муфт через датчик момента. В макете тягового реактивного индукторного генератора происходит преобразование механической энергии вращения ротора в электрическую, при помощи управляемого преобразователя генератора. Полученная электрическая энергия передается на тяговый преобразователь для питания макета тягового реактивного индукторного двигателя. Тем самым реализуется электрическая передача мощности от вала имитатора приводного двигателя на выходной вал макета тягового реактивного индукторного двигателя. Для имитации нагрузки автономного локомотива применяется имитатор нагрузки, представляющий собой управляемую электрическую машину, нагруженную на нагрузочный резистор. Здесь же имеется тормоз для проведения исследований в пусковых режимах. Наличие двух датчиков момента позволяет оценить энергоэффек-

тивность. Использование регулируемых электрических машин в качестве имитатора приводного двигателя и имитатора нагрузки позволяет проводить исследования в различных режимах имитации движения автономных локомотивов [191].

Стенд оснащен измерительно-вычислительным комплексом, позволяющим определять значения измеряемых величин с приведенной погрешностью

- сигналов, пропорциональных току - 0.5%;
- сигналов, пропорциональных напряжению - 0.5%;
- сигналов, пропорциональных частоте вращения – 0.5%;

Фото работы с измерительно-вычислительным комплексом показано на рисунке 166.

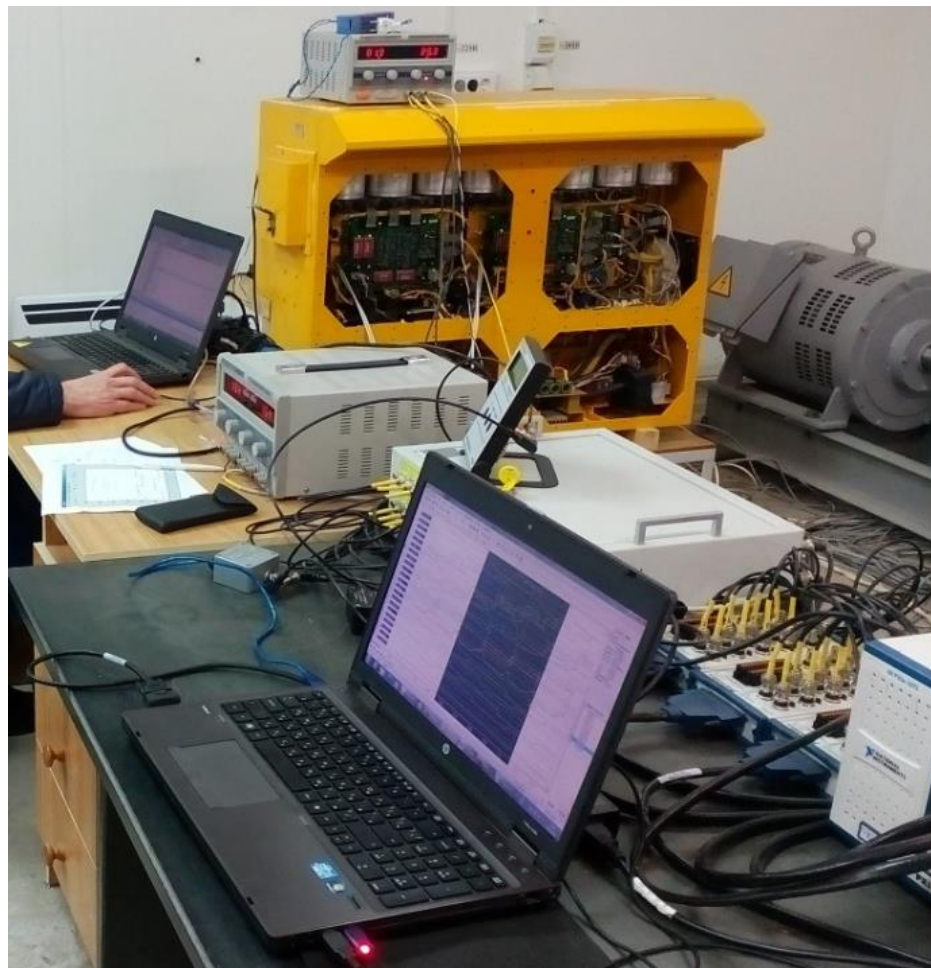


Рисунок 166 – Работа с измерительно-вычислительным комплексом

В основе измерительно-вычислительного комплекса лежит аналого-цифровой преобразователь National Instruments PXIe-1073 (рисунок 167), количество измерительных каналов 32, диапазон преобразования  $\pm 10$  В.



Рисунок 167 – National Instruments PXIe-1073

Для измерения силы тока в фазах машин и в звене постоянного тока датчики тока LTC 600-SF/SP3-U2 (рисунок 168), диапазон измерения  $\pm 1200$  А, точность преобразования  $\pm 0,4$  %.



Рисунок 168 – Датчик тока LTC 600-SF/SP3-U2



Для измерения напряжения на фазах машин и в звене постоянного тока датчики напряжения CV 3-2000 (рисунок 169), диапазон преобразования  $\pm 2000$  В, точность преобразования  $\pm 0,2$  %.



Рисунок 169 – Датчик напряжения CV 3-2000

Для измерения напряжения крутящего момента на валах электрических машин применялись датчики момента М20С-2к (рисунок 170), диапазон измерения момента  $\pm 2$  кНм, погрешность измерения  $\pm 0,2$  %.



Рисунок 170 – Датчик крутящего момента М20С-2к

Для выполнения измерительно-вычислительного комплекса потребовалось 7 датчиков тока LTC 600-SF/SP3-U2, 7 датчиков напряжения CV 3-2000, два датчика момента M20C-2к. Все сигналы с датчиков, через блок нагрузочных резисторов, поступают на аналого-цифровой преобразователь National Instruments PXIe-1073, который передает в режиме реального времени результаты измерений в программу PowerGraph Professional, установленную на ноутбуке.

Технические требования к макету системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами на основе результатов проведенных теоретических исследований являются основным документом, определяющим основные требования и порядок создания макета, в соответствии с которым проводится разработка макета и его приемка при вводе в действие. Технические требования разрабатывают на макет в целом, предназначенный для работы самостоятельно или в составе стенда. Дополнительно могут быть разработаны требования на части макета.

Макетный образец системы электрической передачи мощности обеспечивает проведение исследование электромеханических процессов при следующих условиях:

- в диапазоне частот вращения теплового двигателя (или его имитатора) 600 – 1800 об/мин;
- в диапазоне частот вращения приводного двигателя 0 – 1500 об/мин;
- в диапазоне мощностей 5 – 40 кВт;
- при напряжении питания 300 – 550 В.

### **5.3 Программа и методика испытаний тягового модуля электрической передачи мощности**

Программа и методика испытаний являются организационно-методическими документами, предназначенными для описания видов, последовательности и порядка проведения испытаний объекта исследований [194].

Объектом испытаний является макет системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами.

Для достижения высоких энергетических показателей, поставлена цель испытаний: Исследование технических характеристик объекта испытаний и путей достижения значений, установленных техническими требованиями соглашения о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г. № 14.576.21.0036. Макетный образец системы электрической передачи мощности должен обеспечить КПД в номинальном режиме не менее 0.88. Макетный образец системы электрической передачи мощности должен обеспечить исследование электромеханических процессов при следующих условиях:

- в диапазоне частот вращения теплового двигателя (или его имитатора) 600 – 1800 об/мин;
- в диапазоне частот вращения приводного двигателя 0 – 1500 об/мин;
- в диапазоне мощностей 5 – 40 кВт;
- при напряжении питания 300 – 550 В.

Стенд должен быть оснащен измерительно-вычислительным комплексом, позволяющим определять значения измеряемых величин с приведенной погрешностью

- сигналов, пропорциональных току - 0.5%;
- сигналов, пропорциональных напряжению - 0.5%;
- сигналов, пропорциональных частоте вращения – 0.5%;
- температуры – 0.5%.

Таким образом, для обеспечения точности измерений и выполнения требований соглашения выбраны следующие средства измерений, входящие в реестр средств измерения, данные представлены в таблице 32. Средства измерений, указанные в таблице 32, могут быть заменены другими, обеспечивающими требуемую точность измерений.

Фрагмент программы испытаний приведен в таблице 33.

Таблица 32 – Перечень средств измерений и испытательного оборудования, необходимых для проведения испытаний

Наименование, тип и марка	Кол-во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
Датчик тока	7	LTC 600-SF/SP3-U2	диапазон измерения $\pm 1200$ А, точность преобразования $\pm 0,4$ %.
Датчик напряжения	7	CV 3-2000	диапазон преобразования $\pm 2000$ В, точность преобразования $\pm 0,2$ %.
Датчик крутящего момента	2	M20C-2к	диапазон измерения момента $\pm 2$ кНм, погрешность измерения $\pm 0,2$ %.
Аналого-цифровой преобразователь	1	National Instruments PXIe-1073	количество каналов 32, диапазон преобразования $\pm 10$ В,

Таблица 33 – Фрагмент программы испытаний

Пункт программы испытаний	Вид испытаний (проверок)	Пункт требований ТЗ	Ед. изм.	Номинальное значение
5	<p>Определение характеристик макета тягового реактивного индукторного генератора:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- момент на валу</li> <li>- фазный ток</li> <li>- напряжение звена постоянного тока</li> <li>- входная мощность</li> <li>- выходная мощность</li> <li>- КПД</li> <li>- КПД ЭПМ</li> </ul>		<p>Н·м А В кВт кВт о.е о.е.</p>	
6	<p>Определение характеристик макета тягового реактивного индукторного двигателя:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- момент на валу</li> <li>- фазный ток</li> <li>- напряжение звена постоянного тока</li> <li>- входная мощность</li> <li>- выходная мощность</li> <li>- КПД</li> <li>- КПД ЭПМ</li> </ul>		<p>Н·м А В кВт кВт о.е. о.е.</p>	

### 5.3.1 Определение электромеханических и энергетических характеристик генератора

Реактивные индукторные машины могут работать только от управляемого преобразователя, при этом подача импульсов напряжения в фазные обмотки РИМ должна производиться в строго заданный момент времени, зависящий от положения ротора относительно статора. При не своевременной подаче напряжения (раньше или позже) происходит снижение энергетической эффективности машины, увеличивается шум и вибрация. Поэтому важным этапом разработки энерго-сберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами является проведение испытаний с целью определения рациональных параметров управления реактивным индукторным генератором и реактивным индукторным двигателем в составе электрической передачи мощности.

Основными параметрами управления для РИМ является угол опережения  $\alpha$  и угол проводимости  $\beta$ . На рисунке 171 приведено графическое представление параметров управления для реактивного индукторного генератора.

Угол проводимости  $\beta$ , показывает продолжительность (в электрических градусах) приложенного прямого напряжения к фазе. Изменяя данные параметры можно изменять мощность и КПД РИМ от номинального значения до нуля.

Из рисунка 171 видно, что угол опережения  $\alpha$  показывает (в электрических градусах) насколько раньше подано фазное напряжение до согласованного положения. Для исследования энергоэффективности макета тягового реактивного индукторного генератора необходимо провести данные исследования при следующих частотах вращения: 600 об/мин, 1000 об/мин, 1500 об/мин, 1800 об/мин.

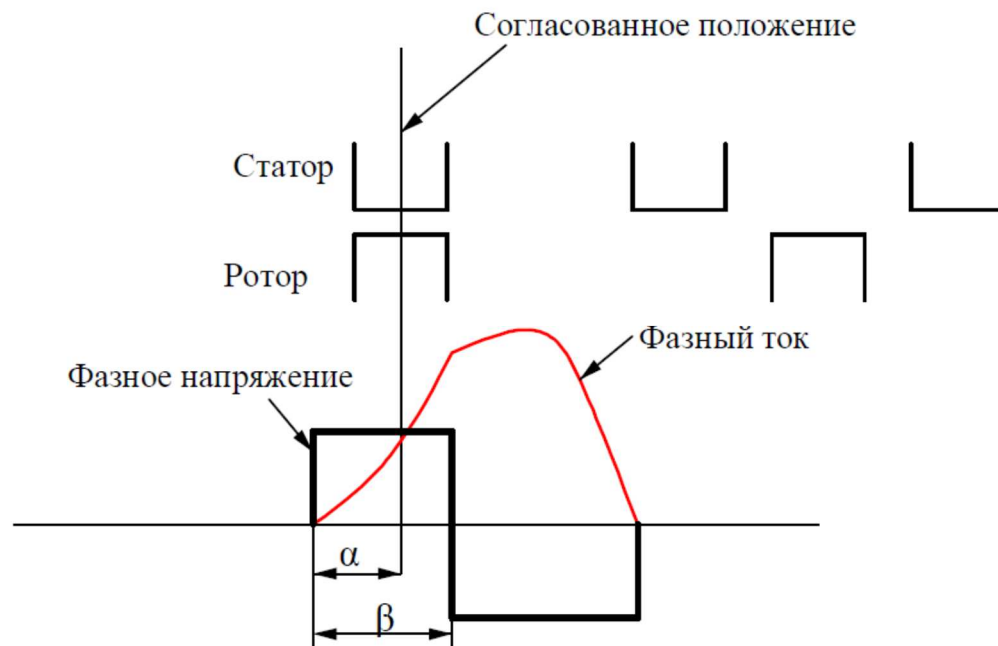


Рисунок 171 – Параметры управления реактивного индукторного генератора

На каждой исследуемой частоте вращения происходит варьирование параметров управления РИГ в следующем диапазоне  $\alpha - 10 \dots 90$  эл. градусов,  $\beta - 100 \dots 180$  эл. градусов, шаг изменения параметров управления принимаем равный 10 эл. градусов. При установке новых параметров управления РИГ производится регистрация сигналов фазных напряжений, фазных токов, момента и частоты вращения валов макета генератора и макета двигателя, тока и напряжения в звене постоянного тока. Результаты обрабатываются и сводятся в таблицу.

По результатам опытов строятся графики зависимости мощности и параметров управления генератора при максимальном коэффициенте полезного действия от частоты вращения.

Испытания проводятся в следующей последовательности:

- произвести запуск теплового двигателя (или его имитатора), установить частоту вращения, равную 600 об/мин., задать режим автоматического поддержания частоты вращения;
- произвести запуск системы электрической передачи мощности. Производить плавное увеличение тормозного момента имитатора нагрузки до достижения ограничения по току макетов реактивных индукторных машин равного 180 А или до достижения номинальной мощности реактивной индукторной машины;

- задать следующие значения параметров управления;
- произвести обработку результатов.

### 5.3.2 Определение электромеханических и энергетических характеристик двигателя

Аналогично на рисунке 172 приведено графическое представление параметров управления для реактивного индукторного двигателя. Здесь углы опережения отсчитывается от рассогласованного положения зубцов статора и ротора, а угол проводимости имеет тоже значение.

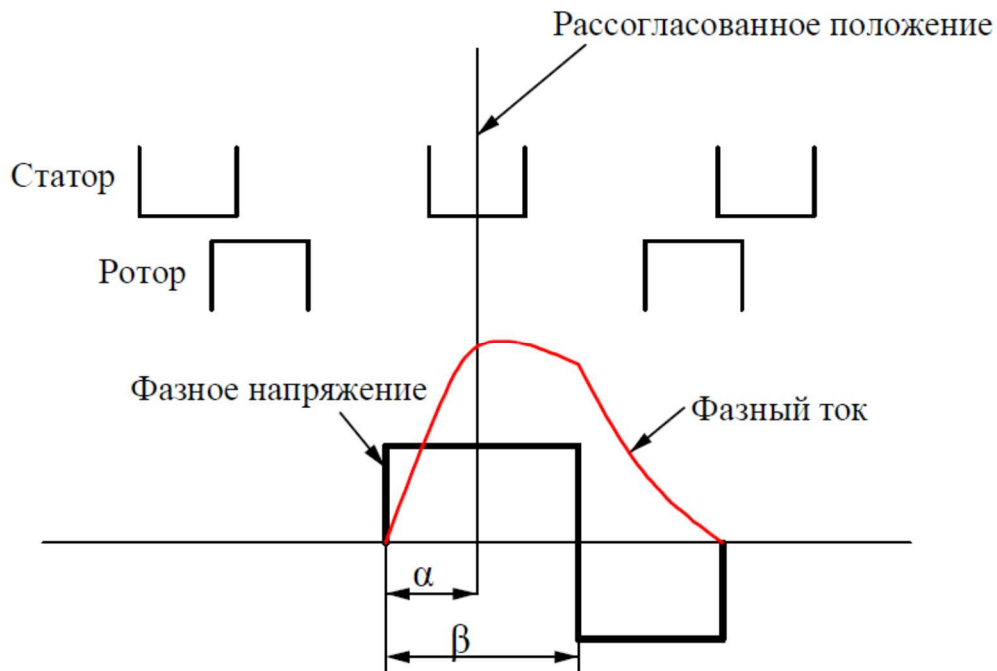


Рисунок 172 – Параметры управления реактивного индукторного двигателя

Для исследования энергоэффективности макета тягового реактивного индукторного двигателя необходимо провести данные исследования при следующих частотах вращения: 100 об/мин, 500 об/мин, 1000 об/мин, 1500 об/мин.

На каждой исследуемой частоте вращения происходит варьирование параметров управления РИГ в следующем диапазоне  $\alpha$  – 10...90 эл. градусов,  $\beta$  – 100...180 эл. градусов, шаг изменения параметров управления принимаем равный

10 эл. градусов. При установке новых параметров управления РИД производится регистрация сигналов фазных напряжений, фазных токов, момента и частоты вращения валов макета генератора и макета двигателя, тока и напряжения в звене постоянного тока. Результаты обрабатываются и сводятся в таблицу.

По результатам опытов строятся графики зависимости мощности и параметров управления генератора при максимальном коэффициенте полезного действия от частоты вращения.

Испытания проводятся в следующей последовательности:

- произвести запуск теплового двигателя (или его имитатора), установить частоту вращения, равную 1800 об/мин., задать режим автоматического поддержания частоты вращения;
- произвести запуск системы электрической передачи мощности. Производить плавное увеличение тормозного момента имитатора нагрузки до достижения ограничения по току макетов реактивных индукторных машин равного 180 А или до достижения номинальной мощности реактивной индукторной машины;
- задать следующие значения параметров управления;
- произвести обработку результатов.

### 5.3.3 Обработка результатов измерений

Сигналы с датчиков тока и напряжений, включенных в цепи обмоток каждой из фаз двигателя, генератора и звена постоянного тока преобразователя, подаются на входы каналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Аналого-цифровое преобразование выполняется автоматически. Результат измерений запоминается, преобразуется в файл формата ASC II.

Производятся следующие операции с массивами данных:

- файловые данные преобразуются в матрицу размером  $m \times n$ , где  $m$ -число столбцов (соответствует числу каналов измерений),  $n$ -число строк (соответствует числу отсчетов);



- измеряемая величина представляется вектором, путем выделения одного из столбцов исходной матрицы;
- выделение временного интервала кратного периоду измеряемого сигнала;
- обработка данных в числовой форме по следующим формулам:  
действующее значение токов

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} i_i^2}{n_2 - n_1}}, \quad (206)$$

где  $I$  – действующее значение тока;

$i_i$  – значение фазного тока в точке дискретного отсчета (индекс  $i$ );

$n_2$  – номер дискретного отсчета соответствующего концу измерительного интервала;

$n_1$  – номер дискретного отсчета соответствующего началу измерительного интервала;

индекс  $i$  – номер текущего отсчета.

Активная электрическая мощность фазы реактивно индукторной машины

$$P = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{i=n_1}^{n_2} P_i \quad (207)$$

где  $P_i$  – мгновенное значение мощности  $P_i = i_i * u_i$ ;

$u_i$  – значение фазного напряжения в точке дискретного отсчета;

Значение токов и мощностей определяется для каждой фазы в отдельности.

По полученным данным находится среднее значение фазного тока по формуле

$$I = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}, \quad (208)$$

где  $I_a, I_b, I_c$  – действующие значения токов в фазах реактивно индукторной машины;

Активная мощность реактивно индукторной машины

$$P = P_a + P_b + P_c, \quad (209)$$

где  $P_a, P_b, P_c$  – значения активных мощностей фаз реактивно индукторной машины.

### Определение КПД

КПД реактивно индукторной машины определяется:

- в генераторном режиме – как отношение активной мощности, получаемой от фаз генератора  $P$  к мощности подводимой к валу генератора, определяемой по данным датчика крутящего момента по формуле

$$P_1 = \frac{M_1 \cdot n_1 \cdot 2 \cdot 3,14}{1000 \cdot 60}, \quad (210)$$

где  $M_1$  – вращающий момент на валу генератора по показаниям датчика крутящего момента, Н·м;

$n_1$  – частота вращения генератора, мин<sup>-1</sup>.

$$\eta_1 = \frac{P}{P_1} 100 \%. \quad (211)$$

- в двигательном режиме – как отношение мощности на валу двигателя, определяемой по данным датчика крутящего момента по формуле

$$P_2 = \frac{M_2 \cdot n_2 \cdot 2 \cdot 3,14}{1000 \cdot 60}, \quad (212)$$

где  $M_2$  – вращающий момент на валу двигателя по показаниям датчика крутящего момента, Н·м;

$n_2$  – частота вращения двигателя, мин<sup>-1</sup>.

к активной мощности, подводимой к фазам двигателя  $P$ .

$$\eta_2 = \frac{P_2}{P} 100 \%. \quad (213)$$

Коэффициент полезного действия макета тягового модуля электрической передачи мощности определяется отношением мощности на валу двигателя  $P_2$  к мощности, подводимой к валу генератора  $P_1$

$$\eta_{\text{ЭП}} = \frac{P_2}{P_1} 100\%. \quad (214)$$

#### **5.4 Проведение испытаний макета системы электрической передачи мощности на стенде**

Испытания макета системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами проводились на стенде в период с 29 апреля 2016 г, по 30 мая 2016 г по программе и методике ПН-85-2016 ПМ в г. Новочеркасск.

Разработанная программа и методика ПН-85-2016 ПМ предусматривает проведение большого объема испытаний макетов реактивного индукторного генератора и двигателя на различных частотах вращения и параметрах управления.

В качестве основных для макета генератора выбраны следующие частоты вращения: 600, 1000, 1500 и 1800 об/мин. На каждой из них предусмотрено поэтапное варьирование параметров управления – угол опережения  $\alpha$  от 10 до 90 электрических градусов и угол проводимости  $\beta$  от 100 до 180 электрических градусов. Таким образом, испытания макета РИГ состоят из 324 опытов.

В качестве основных для макета двигателя выбраны следующие частоты вращения: 100, 600, 1000 и 1500 об/мин. На каждой из них, так же предусмотрено поэтапное варьирование параметров управления – угол опережения  $\alpha$  от 10 до 90 электрических градусов и угол проводимости  $\beta$  от 100 до 180 электрических градусов. Таким образом, испытания макета РИД также состоят из 324 опытов.

Полученные осциллограммы обрабатываются, результаты обработки приведены в таблицах для макета тягового генератора и макета тягового двигателя соответственно. Все результаты испытаний, представлены в [192, 193].

По результатам испытаний проведен анализ полученных данных и построены графики зависимостей КПД от частоты вращения [191]. На рисунке 173 приведена зависимость максимального коэффициента полезного действия макета тягового генератора  $\eta_{\text{ген}}$  и преобразователя генератора  $\eta_{\text{шт}}$  от частоты вращения [191].

На рисунке 174 и рисунке 175, приведены зависимости электрической мощности генератора  $P_{\text{ген}}$  и параметров управления генератора ( $\alpha$  – угол опережения,  $\beta$  – угол проводимости) при максимальном коэффициенте полезного действия от частоты вращения [191].

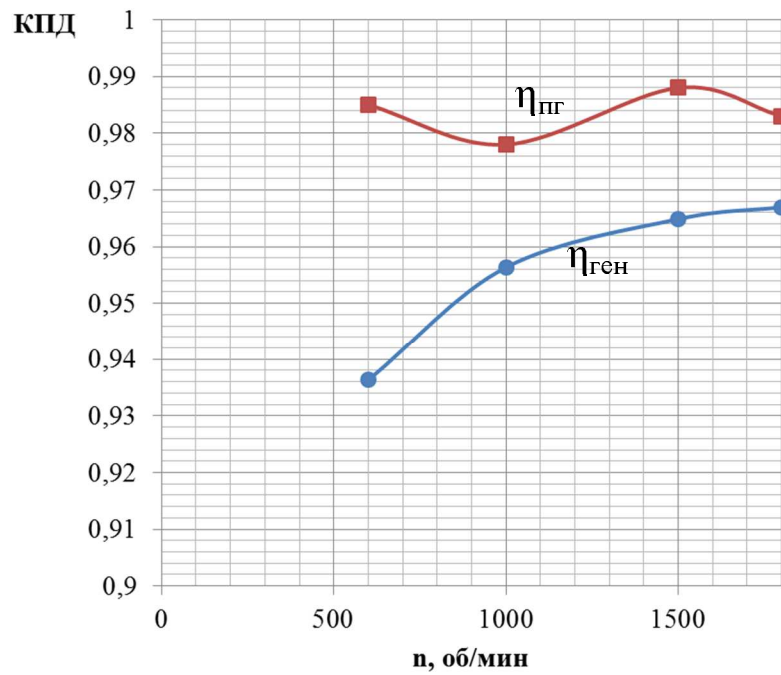


Рисунок 173 – Зависимость максимального КПД макета генератора и преобразователя генератора от частоты вращения ротора

Из рисунка 173 видно, что максимальный КПД генератора при частоте 1800 об/мин, а КПД преобразователя генератора находится в диапазоне 0,978...0,988.

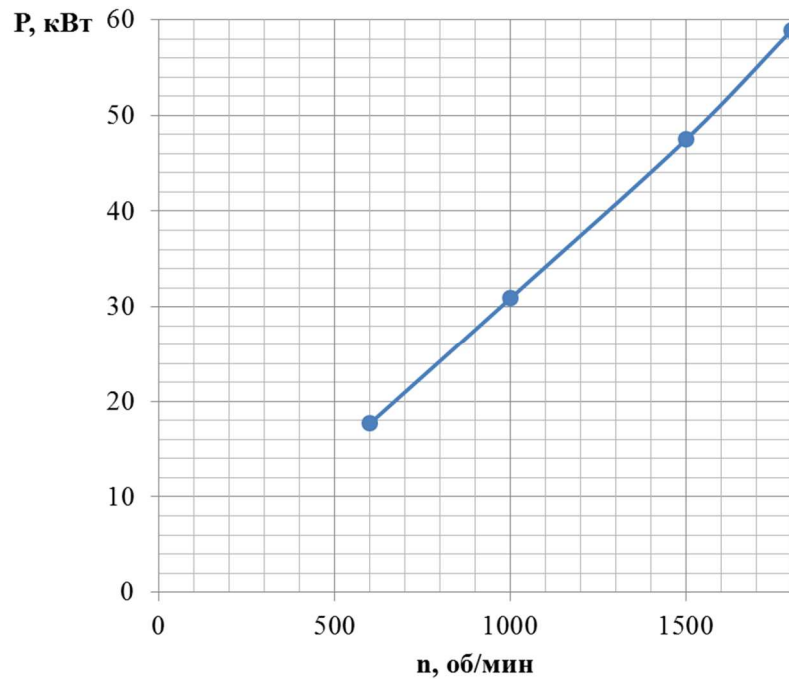


Рисунок 174 – Зависимость электрической мощности генератора от частоты вращения ротора

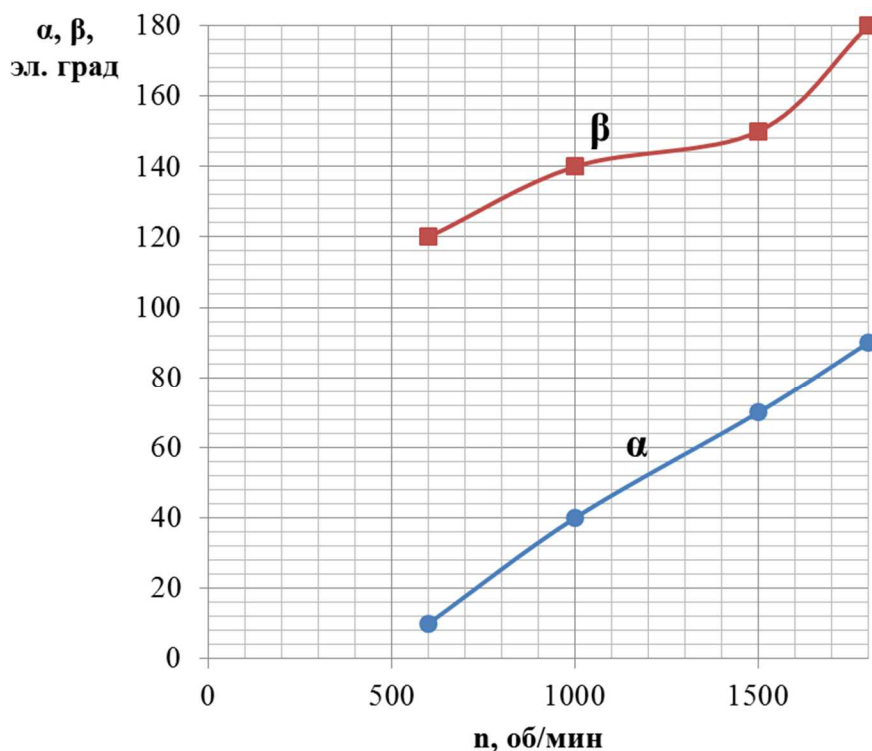


Рисунок 175 – Зависимость параметров управления генератора ( $\alpha$  – угол опережения,  $\beta$  – угол проводимости) от частоты вращения ротора

Из рисунков 174 – 175 видно, что в номинальной точке при частоте вращения 1800 об/мин мощность макета реактивного индукторного генератора составила 58,9 кВт при КПД равным 0,967. Параметры управления имеют практически линейную зависимость от частоты вращения.

Дальнейшие испытания макета реактивного индукторного двигателя в составе электрической передачи мощности проводились при фиксированной частоте вращения макета генератора равной 1800 об/мин, т.к. на данной частоте вращения КПД генератора является максимальным. По результатам испытаний проведен анализ полученных данных и построены графики зависимостей КПД от частоты вращения. На рисунке 176 приведена зависимость максимального коэффициента полезного действия макета системы электрической передачи мощности с реактивными индукторными электрическими машинами  $\eta_{ЭПМ}$ , макета тягового двигателя  $\eta_d$  и тягового преобразователя  $\eta_{ТП}$  от частоты вращения [191].

На рисунке 177 и рисунке 178, приведены зависимости механической мощности двигателя  $P_{мех}$  и параметров управления генератора ( $\alpha$  – угол опережения,

$\beta$  – угол проводимости) при максимальном коэффициенте полезного действия от частоты вращения, соответственно.

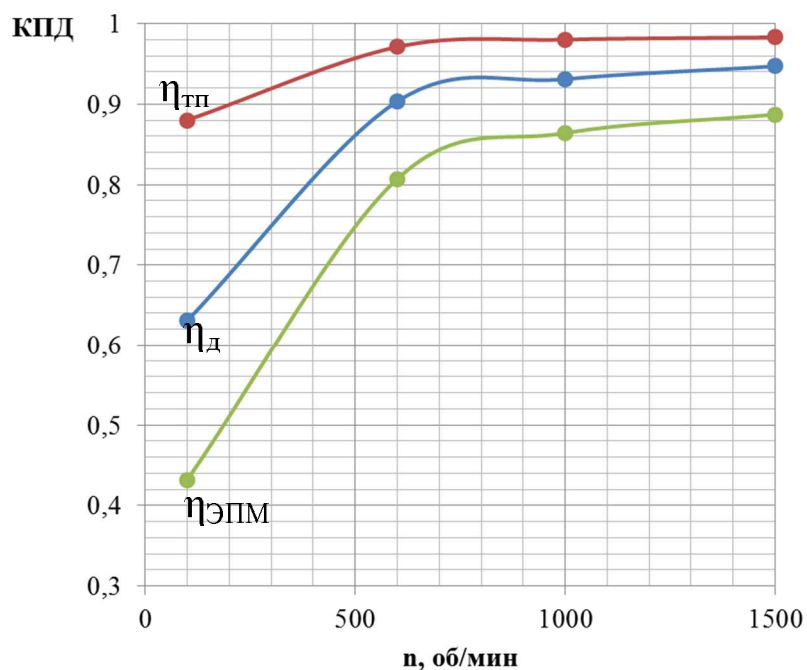


Рисунок 176 – Зависимость максимального коэффициента полезного действия макета системы электрической передачи мощности, макета тягового двигателя и тягового преобразователя от частоты вращения макета двигателя

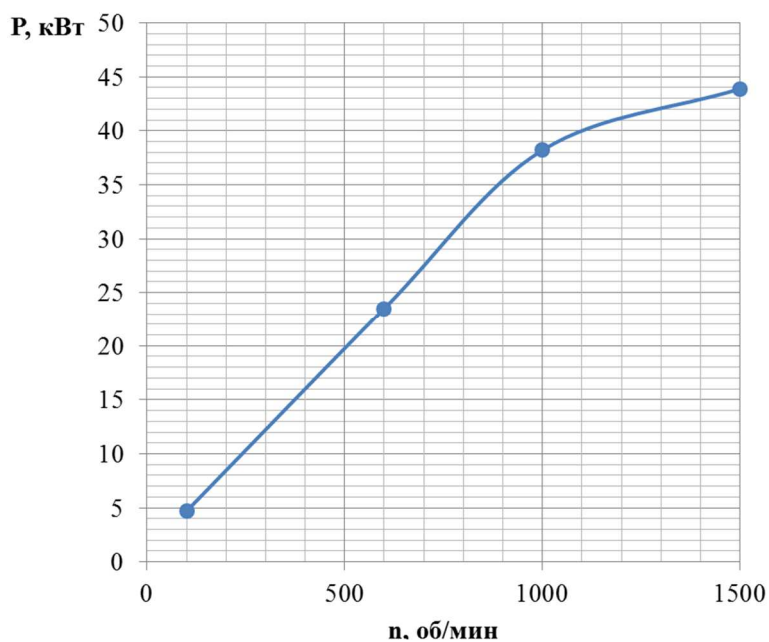


Рисунок 177 – Зависимость механической мощности двигателя от частоты вращения макета двигателя

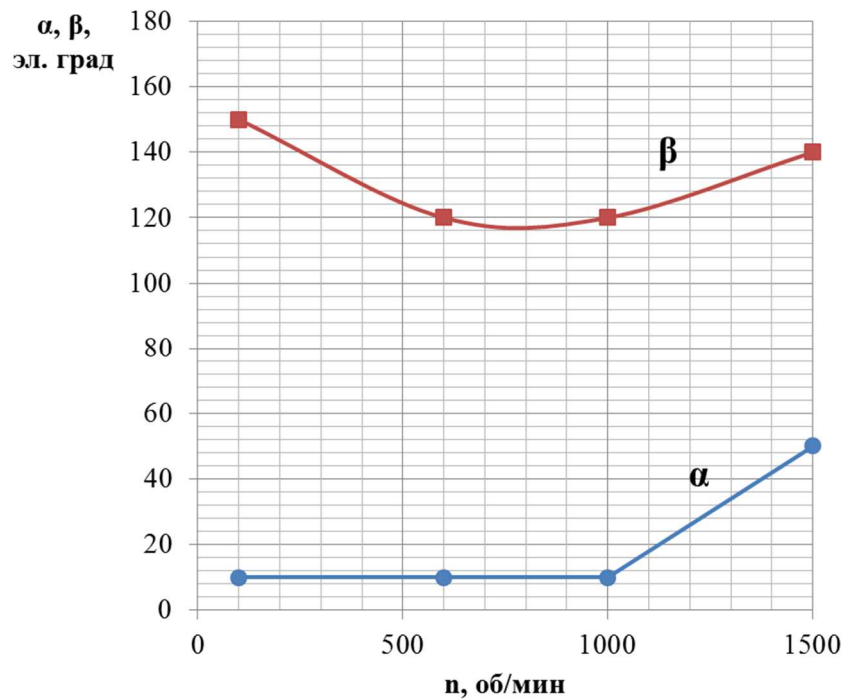


Рисунок 178 – Зависимость параметров управления двигателя ( $\alpha$  – угол опережения,  $\beta$  – угол проводимости) от частоты вращения макета двигателя

На рисунке 179 представлены зависимости механической мощности на валу макета генератора  $P_{\text{мех}}^{\Gamma}$ , электрической мощности макета генератора  $P_{\text{эл}}^{\Gamma}$ , электрической мощности звена постоянного тока  $P_{\text{эл}}^{\text{DC}}$ , электрической мощности макета двигателя  $P_{\text{эл}}^{\text{Д}}$  и механической мощности на валу макета двигателя  $P_{\text{мех}}^{\text{Д}}$  от частоты вращения макета двигателя. На рисунке 179 виден весь процесс преобразования мощности и ее потери на каждом из таких преобразований.

Таким образом, в ходе проведенных исследований показана возможность достижения КПД электрической передачи мощности равного 0,887. Механическая мощность на валу макета генератора составила 49,5 кВт, а выходная механическая мощность на валу макета двигателя составила 43,9 кВт [191].

Полученные параметры управления введены в систему управления электрической передачи мощности и на испытательном стенде воспроизведен режим разгона.



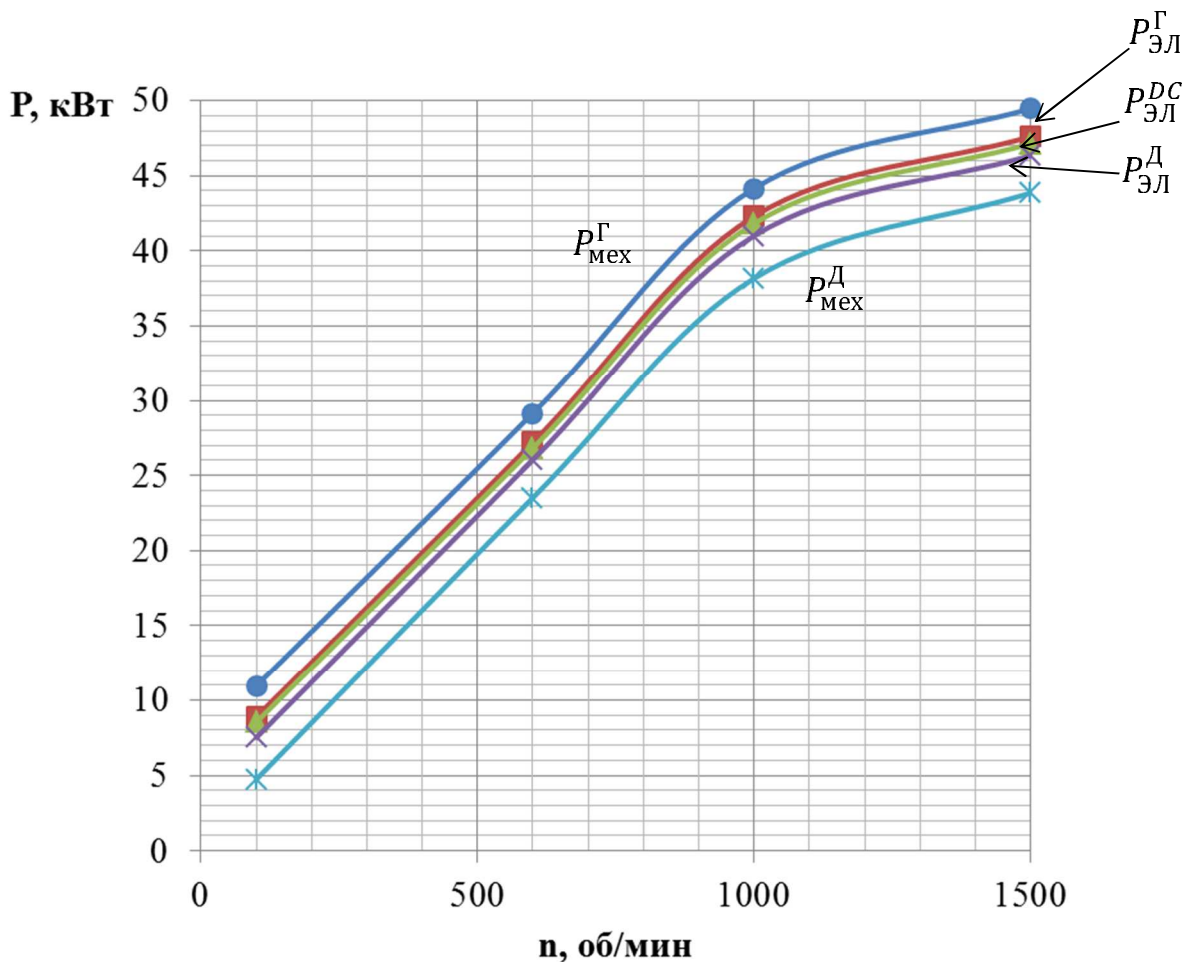


Рисунок 179 – Зависимости мощностей от частоты вращения макета двигателя

Имитатор работы теплового двигателя работает на частоте 1800 об/мин, макет генератора работает только на поддержание напряжения в звене постоянного тока, макет двигателя не вращается. После этого в систему управления поступает сигнал о начале движения. Начинает работать макет двигателя, нагруженный на имитатор нагрузки. Осциллограмма процесса разгона показана на рисунке 180.

На рисунке 181 представлен увеличенный фрагмент начала процесса разгона. Из осциллограммы видно, что в момент времени 0,05 с начинает работать макет двигателя, при этом начинает «просаживаться» напряжение в звене постоянного напряжения. Спустя 0,02 с в работу включается макет генератора и начинает поддерживать заданное напряжение.

На рисунке 182 показан увеличенный фрагмент осциллограммы при работе макета двигателя на частоте 1500 об/мин.



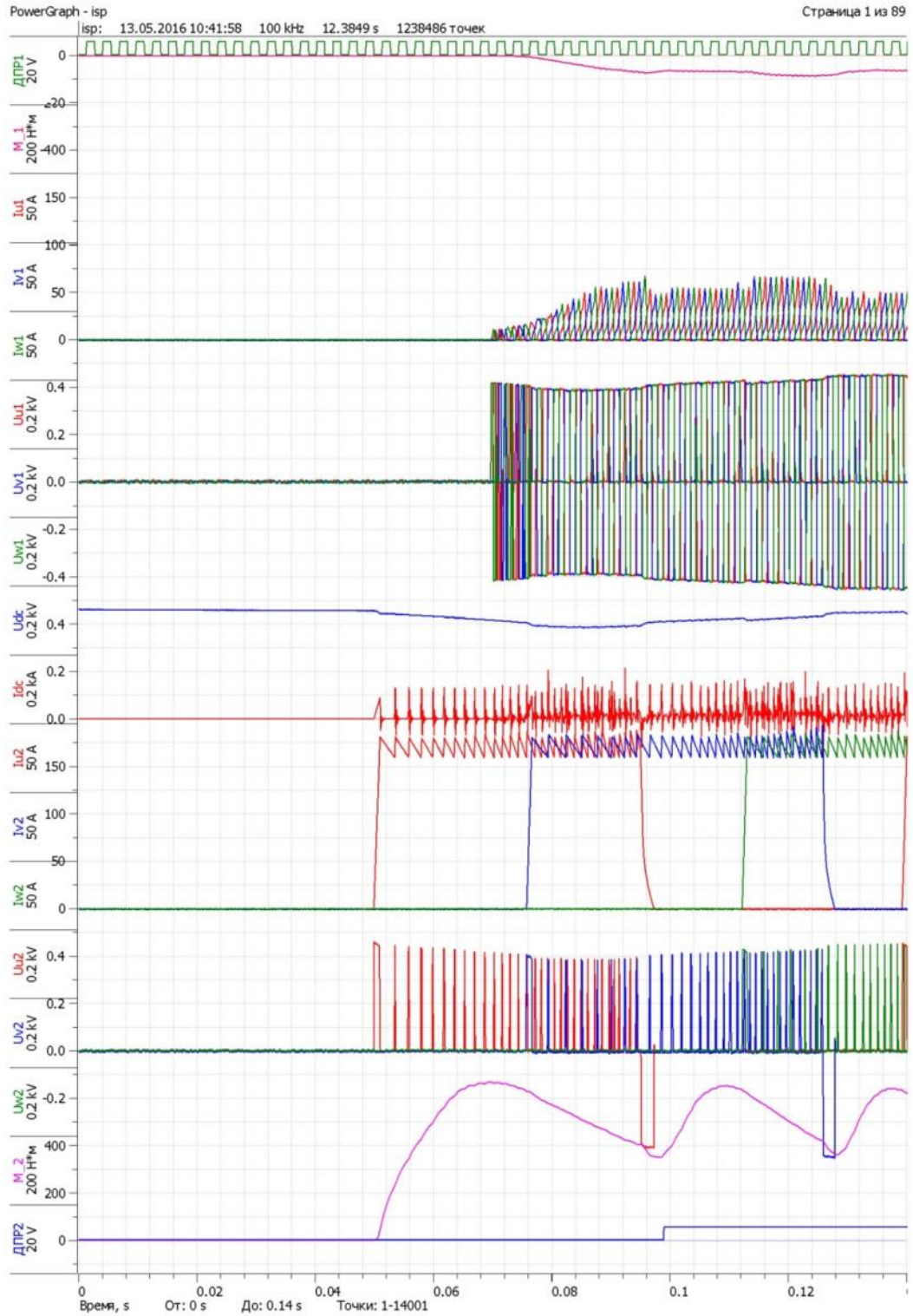


Рисунок 181 – Увеличенный фрагмент начала процесса разгона



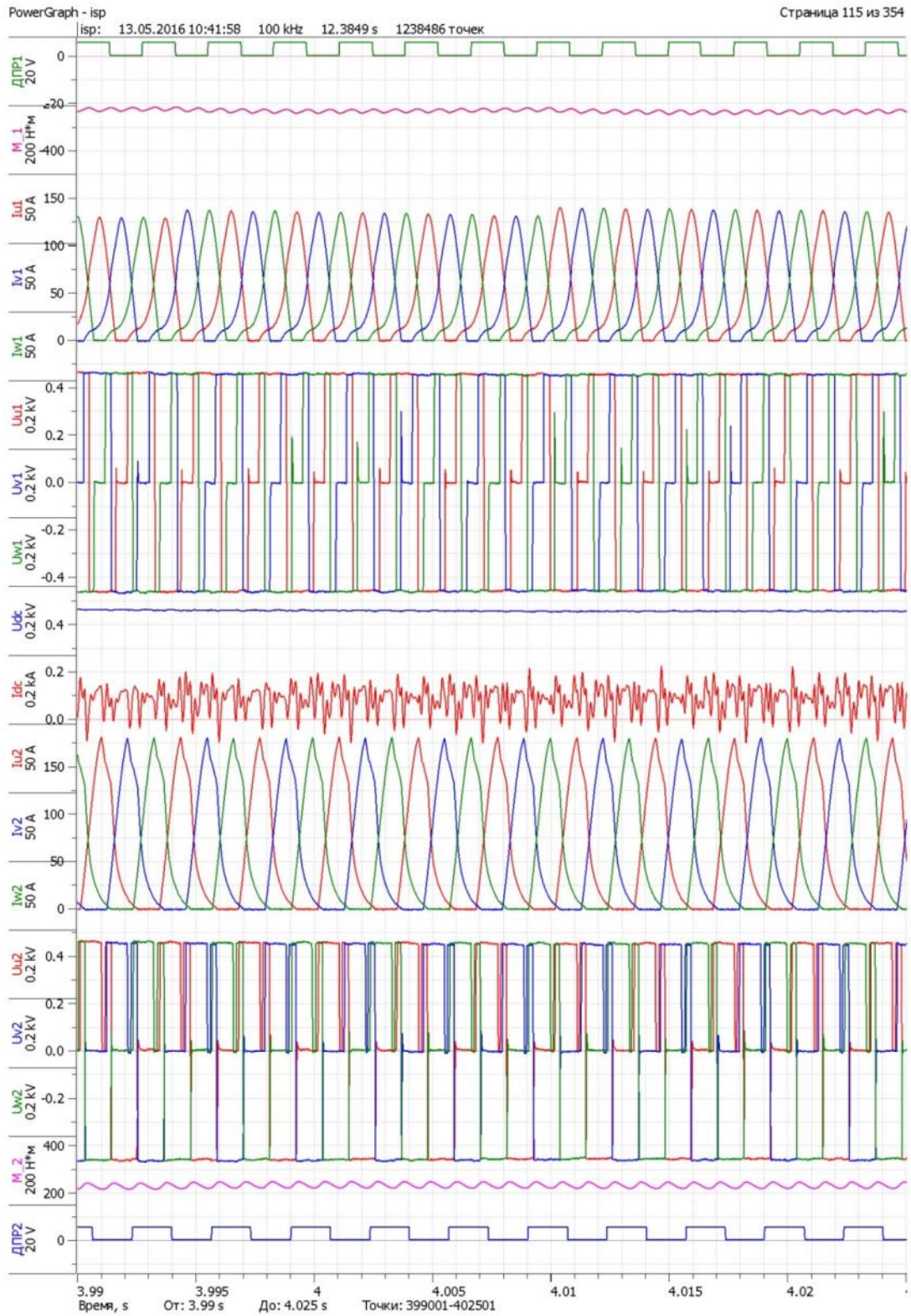


Рисунок 182 – Увеличенный фрагмент работы электрической передачи мощности при работе макета тягового двигателя на частоте 1500 об/мин

## 5.5 Анализ и сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований

Для подтверждения адекватности математической модели необходимо провести анализ и сопоставление результаты испытаний с результатами теоретических исследований.

Проведем сопоставление расчетного КПД с результатами испытаний для макета реактивного индукторного генератора и двигателя.

### 5.5.1 Результаты испытаний макета генератора

Выберем данные для тех частот вращения, на которых проводились испытания. Для макета генератора сопоставление расчетной зависимости КПД от параметров управления и испытаний показаны на рисунках 183 – 186. В качестве основы были взяты расчетные контурные графики КПД и на них нанесены данные, полученные входе испытаний. Зеленой ячейкой обозначен максимальный КПД полученный в ходе испытаний на данной частоте вращения.

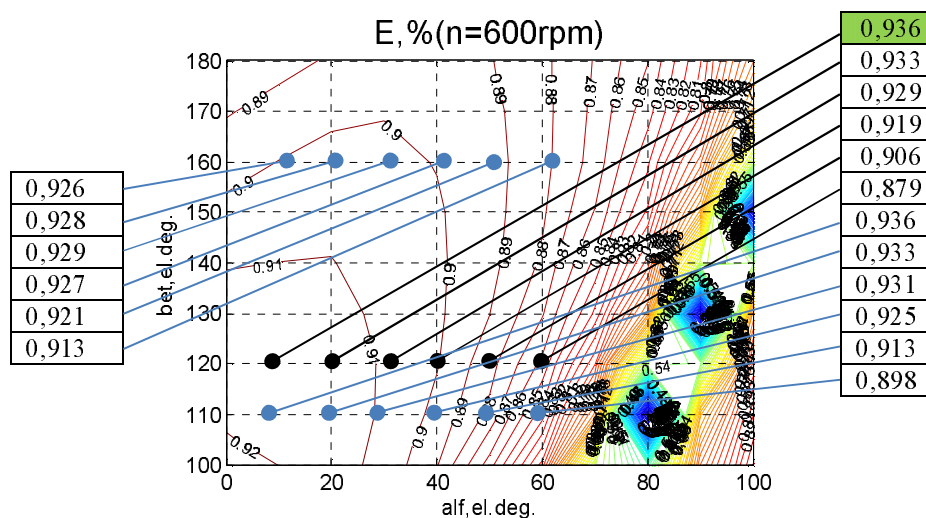


Рисунок 183 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного генератора 600 об/мин

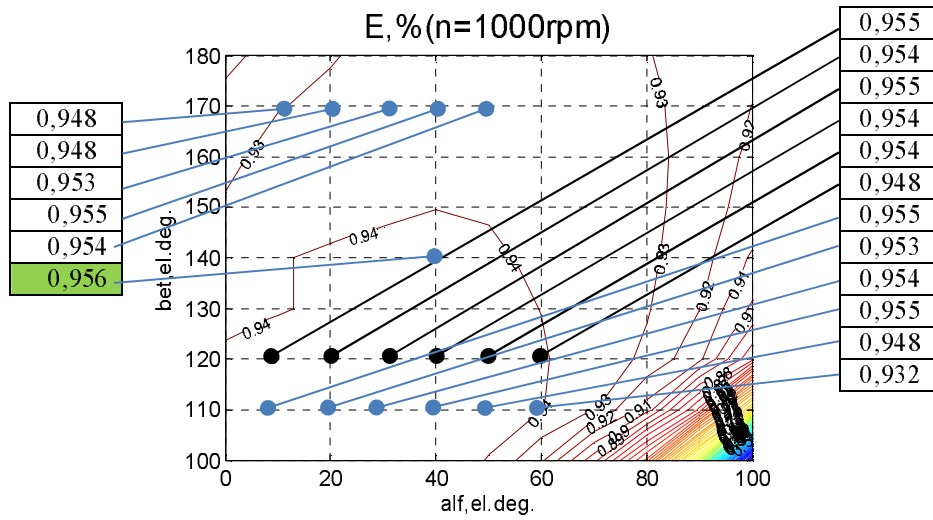


Рисунок 184 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного генератора 1000 об/мин

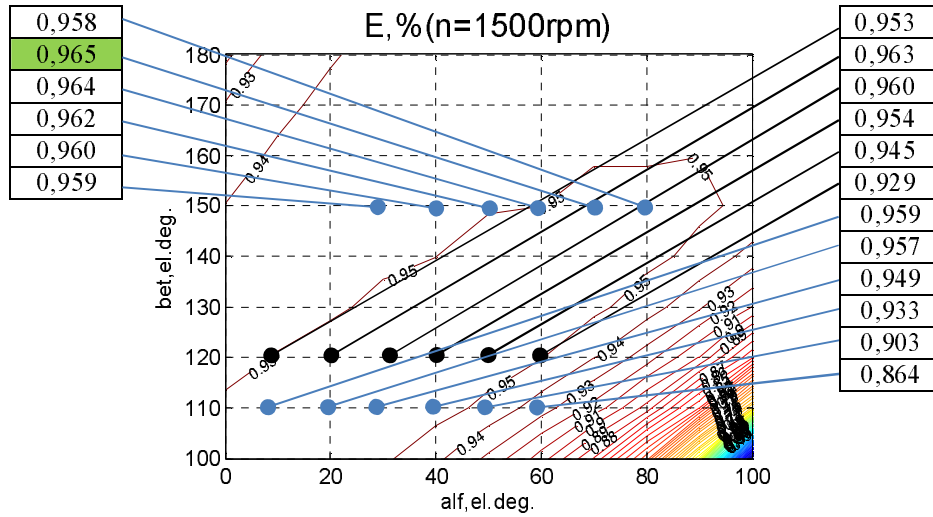


Рисунок 185 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного генератора 1500 об/мин

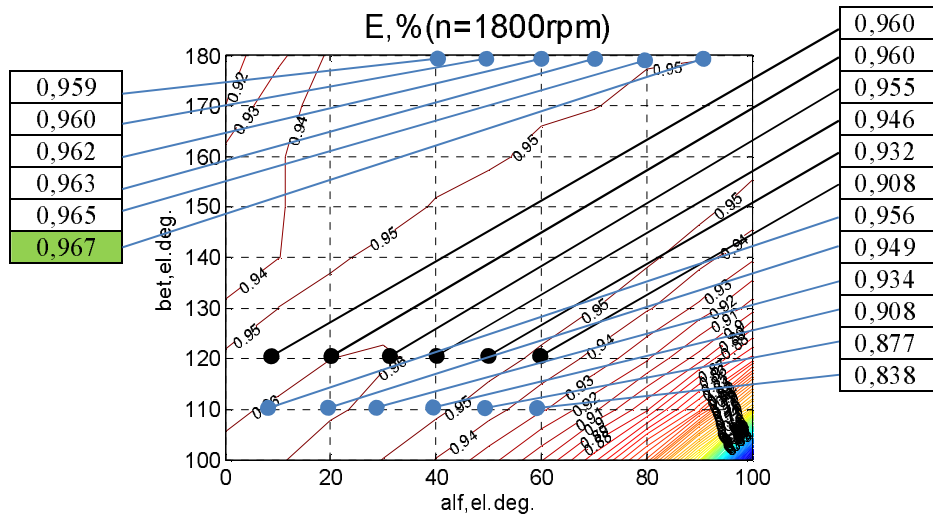


Рисунок 186 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного генератора 1800 об/мин

Из представленных рисунков видно, что зависимости КПД полученных в результате испытаний имеют те же тенденции что и расчетные, но КПД в результате оказался выше на 1-1,5% чем расчетный. Таким образом, средняя погрешность определения КПД составила около 2%, что является допустимым для проведения инженерных расчетов.

### 5.5.2 Результаты испытаний макета двигателя

Проведем сопоставление теоретических результатов для макета реактивно-индукторного двигателя для частот вращения, на которых проводились испытания. Для макета двигателя сопоставление расчетной зависимости КПД от параметров управления и испытаний представлена на рисунках 187 – 190. В качестве основы были взяты расчетные контурные графики КПД и на них нанесены данные, полученные в ходе испытаний. Зеленой ячейкой обозначен максимальный КПД, полученный в ходе испытаний на данной частоте вращения.

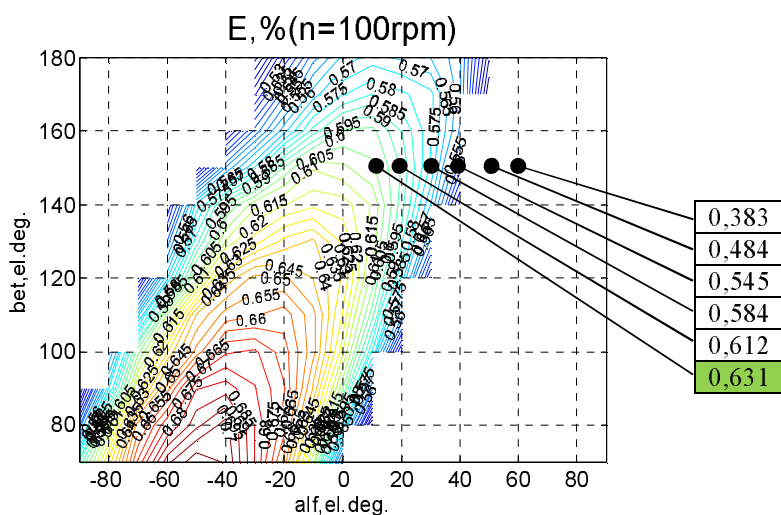


Рисунок 187 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного двигателя 100 об/мин

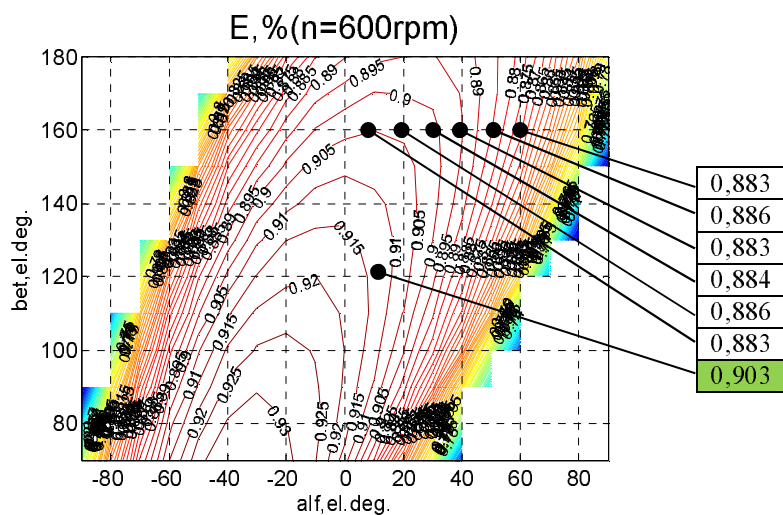


Рисунок 188 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного двигателя 600 об/мин

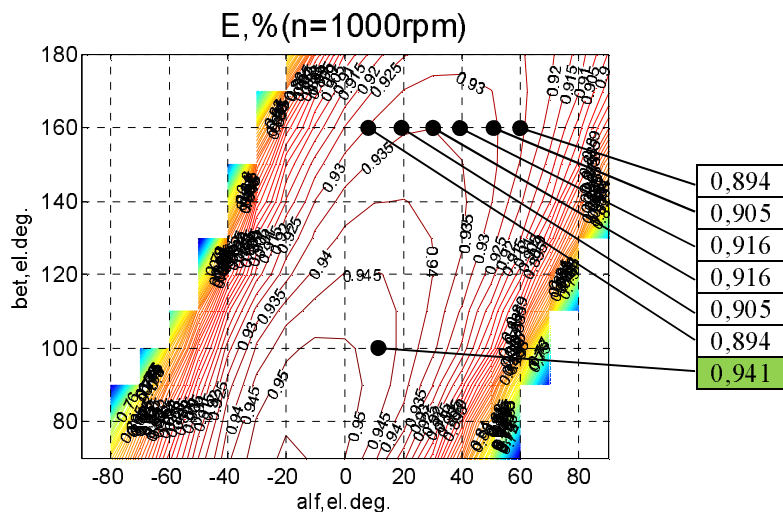


Рисунок 189 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного двигателя 1000 об/мин

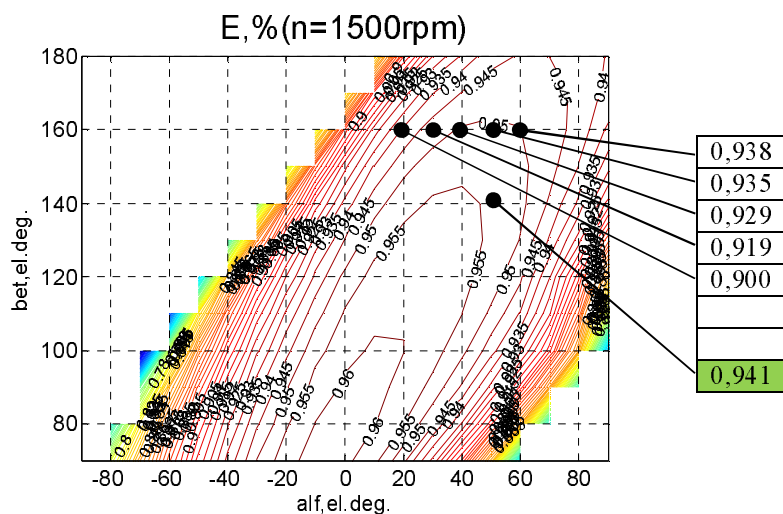


Рисунок 190 – Сопоставление КПД результатов расчета и испытаний макета реактивного индукторного двигателя 1500 об/мин



В ходе проведения испытаний, из-за особенностей построения системы управления, оказалось невозможным исследовать характеристики двигателя при отрицательном угле опережения, поэтому данные испытаний в этой области отсутствуют, также некоторые расхождения объясняются в погрешности определения относительного положения ротора относительно статора.

Из представленных рисунков видно, что зависимости КПД полученных в результате испытаний имеют тот же характер что и расчетные, но КПД в результате оказался ниже примерно на 1 % чем расчетный. Таким образом, средняя погрешность определения КПД составила около 1%, что является допустимым для проведения инженерных расчетов.

## **5.6 Сопоставление полученных результатов с мировыми тенденциями**

В 2008 году, Международная электротехническая комиссия (МЭК) опубликовала новый мировой стандарт эффективности для двигателей работающих на частоте 50 и 60 Гц, высший уровень эффективности – "Супер Премиум". Этот уровень был создан для развития рынка и разработки еще более эффективных двигателей. В это же время, было отмечено, что для достижения класса «Супер премиум» производителям двигателей, возможно, придется выйти за пределы технологий асинхронных двигателей переменного тока.

Стандарт МЭК, а также ГОСТ Р 54413-2011 [195] предусматривает деление асинхронных двигателей на четыре класса:

Нормальный (IE1);

Повешенный (IE2);

Премиум (IE3);

Супер-премиум (IE4).

Ниже приведена таблица 34 с нормативными значениями КПД для 2 полюсного асинхронного двигателя работающего от сети переменного тока частотой 50 Гц.

Отметим то, что данные нормативные значения КПД приведены для одно-скоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с питанием от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением до 1000 В (допустимы два и более уровня номинального напряжения и частоты), мощностью от 0,75 до 355 кВт, имеющие 2 полюса, рассчитанные на продолжительный S1 или повторно-кратковременный S3 режим работы с продолжительностью включения (ПВ) 80 % и выше, допускающие прямое включение и работающие в условиях согласно МЭК 60034-1.

Таблица 34 – Нормативные значения КПД

P <sub>н</sub> , кВт	Класс энергоэффективности			
	IE1	IE2	IE3	IE4
0,75	72,1	77,4	80,7	84,9
1,1	75	79,6	82,7	86,7
1,5	77,2	81,3	84,2	87,5
2,2	79,7	83,2	85,9	89,1
3	81,5	84,6	87,1	89,7
4	83,1	85,8	88,1	90,3
5,5	84,7	87	89,2	91,5
7,5	86	88,1	90,1	92,1
11	87,6	89,4	91,2	93
15	88,7	90,3	91,9	93,4
18,5	89,3	90,9	92,4	93,8
22	89,9	91,3	92,7	94,2
30	90,7	92	93,3	94,5
37	91,2	92,5	93,7	94,8
45	91,7	92,9	94	95,1
55	92,1	93,2	94,3	95,4
75	92,7	93,8	94,7	95,6
90	93	94,1	95	95,8
110	93,3	94,3	95,2	96
132	93,5	94,6	95,4	96
160	93,8	94,8	95,6	96,2
200	94	95	95,8	96,3
250	94	95	95,8	96,4
315	94	95	95,8	96,5
355	94	95	95,8	96,6

Проводя анализ полученных данных и данных из ГОСТ Р 54413-2011 видно, что макет реактивного индукторного двигателя, работая в условиях электромеханической трансмиссии при частоте вращения 1500 об/мин при номинальной мощности 43,9 кВт имеет КПД 94,1 %, что соответствует классу энергоэффективности «Премиум» (IE3). Для генераторов стандарта эффективности пока еще не вводилось, но если рассматривать КПД, как показатель эффективности преобразования одного вида энергии в другую, то в первом приближении можно, ориентируясь на ГОСТ Р 54413-2011 сказать, что макет реактивного индукторного генератора, работая в условиях электромеханической трансмиссии при частоте вращения 1800 об/мин имеет КПД 96,7 %, что соответствует классу энергоэффективности «Супер-премиум» (IE4).

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5**

1. Теоретические исследования автора были реализованы при разработке макета тягового модуля энергоэффективной передачи мощности в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» по соглашению о предоставлении субсидии от 27 июня 2014 г. № 14.576.21.0036 «Разработка научно-технических решений для создания энерго-сберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами» АО «Научно-техническим центром «ПРИВОД-Н».

2. Анализ и сопоставление результатов расчета на компьютерной модели и результатов экспериментальных исследований показало правильность принятых научных положений при моделировании, что подтверждается полученными результатами с погрешностью не превышающей 2 %.

3. Экспериментальные исследования подтвердили целесообразность использования реактивных индукторных машин в энергоэффективных электрических передачах мощности. Экспериментально подтверждены зависимости пара-

метров энергоэффективного управления для различных частот вращения. Достигнут КПД тягового модуля электрической передачи в номинальном режиме равный 0,887 при мощности на валу 43,9 кВт.

4. Экспериментальные исследования подтвердили соответствие предлагаемых решений мировым тенденциям. Макеты тягового реактивного индукторного генератора и двигателя соответствует классам энергоэффективности «Супер-премиум» (IE4) и «Премиум» (IE3), соответственно.

## **6 Экспериментальные исследования энергоэффективной электрической передачи мощности тепловоза с бесколлекторными электрическими машинами**

На сегодняшний день в эксплуатации на сети железных дорог ОАО «РЖД» применяются маневровые тепловозы с гидравлической и с электрической передачей мощности. Как уже было отмечено в первой главе, преимущественно применяются маневровые тепловозы с передачей мощности постоянного тока, т.е. с коллекторными тяговыми электрическими двигателями и генераторами. Опытные разработки электрической передачи мощности с асинхронным тяговым приводом тепловозов (ТЭМ21, ТЭМ9Н, ТЭМ35, ТЭМ33) так и не дошли до серийного производства. В настоящее время ведутся испытания нового двухдизельного тепловоза ТЭМ23 (рисунок 191) с асинхронным тяговым приводом, разработанного на Брянском машиностроительном заводе. Этот тепловоз является первым представителем новой линейки локомотивов АО «Трансмашхолдинг», кузов которого выполнен в новом дизайне «ДНК» [24]. По состоянию на начало 2023 года, построено два экземпляра, которые проходят испытания.



Рисунок 191 – Двухдизельный тепловоз ТЭМ23 с асинхронным тяговым приводом

С другой стороны, последние годы активно исследуется возможность применения реактивных индукторных двигателей (РИД) в транспортной отрасли [121, 196, 197], в частности, для бесколлекторного тягового привода [198] маневровых тепловозов. Конструкция РИД имеет ряд преимуществ перед другими типами тяговых двигателей [159], в том числе отсутствие обмоток на роторе, сосредоточенные катушки фаз и расположение их на статоре, что позволяет сохранить работоспособность двигателя в случае выхода из строя одной или двух фаз.

Статический преобразователь для питания РИД представляет собой «полумостовой» инвертор [199, 200], который обеспечивает высокий коэффициент полезного действия до 95-97%. Кроме того, применение РИД позволяет повысить энергоэффективность [201] и надежность тягового электропривода тепловоза в целом благодаря высоким значениям пускового момента и низкой номинальной частоте вращения РИД, соответствующим техническим требованиям к характеристикам маневровых тепловозов.

Применение РИД в качестве тяговых двигателей позволяет улучшить энергосбережение и надежность электрического привода транспортных средств. Однако исследования в данной области еще находятся в поисках определения наилучших методов применения РИД и дальнейшего совершенствования их конструкции и алгоритмов управления.

Возможность применения бесколлекторного тягового привода на маневровых тепловозах позволит снизить эксплуатационные расходы и затраты на ремонт тягового привода тепловозов и является перспективным направлением исследований.

В настоящей главе рассматривается опыт коллектива АО «НТЦ ПРИВОД-Н», при непосредственном участии автора настоящей диссертационной работы, в разработке, проектировании, исследовании и испытаниях бесколлекторного тягового привода с реактивными индукторными машинами в составе комплекта тягового электрооборудования, предназначенного для модернизации тепловозов находящихся в эксплуатации [202, 203, 204].

## **6.1 Разработка и исследование энергоэффективной электрической передачи мощности тепловоза для модернизации маневровых тепловозов с электрической передачей мощности**

К преимуществам разрабатываемой электрической передачи маневрового тепловоза с реактивными индукторными тяговыми двигателями можно отнести:

- индукторный тяговый электропривод, позволяющий существенно повысить энергетическую эффективность и тяговые свойства электрической передачи мощности;
- электрическая схема позволяет осуществлять питание всех тяговых двигателей от каждого дизеля в отдельности, а также осуществлять суммирование мощностей дизелей в оптимальных пропорциях;
- возможна реализация максимальной силы тяги тепловоза при работе только от одного дизеля;
- поосное регулирование момента тяговых электродвигателей с адаптацией по сцеплению колесо-рельс;
- минимальное количество коммутационной аппаратуры, обуславливающее повышение надежности электрической передачи мощности и сокращение затрат на обслуживание (коммутационные аппараты установлены только в целях защиты и резервирования элементов схемы);
- отсутствие специального устройства для запуска дизеля (запуск обеспечивается переводом индукторного генератора в двигательный режим при питании от аккумуляторной батареи);
- высокий коэффициент использования мощности дизеля на тягу.

### **6.1.1 Структурная схема энергоэффективной электрической передачи**

Структурная схема энергоэффективной электрической передачи мощности тепловоза с реактивными индукторными машинами [122] приведена на рисунке 192.

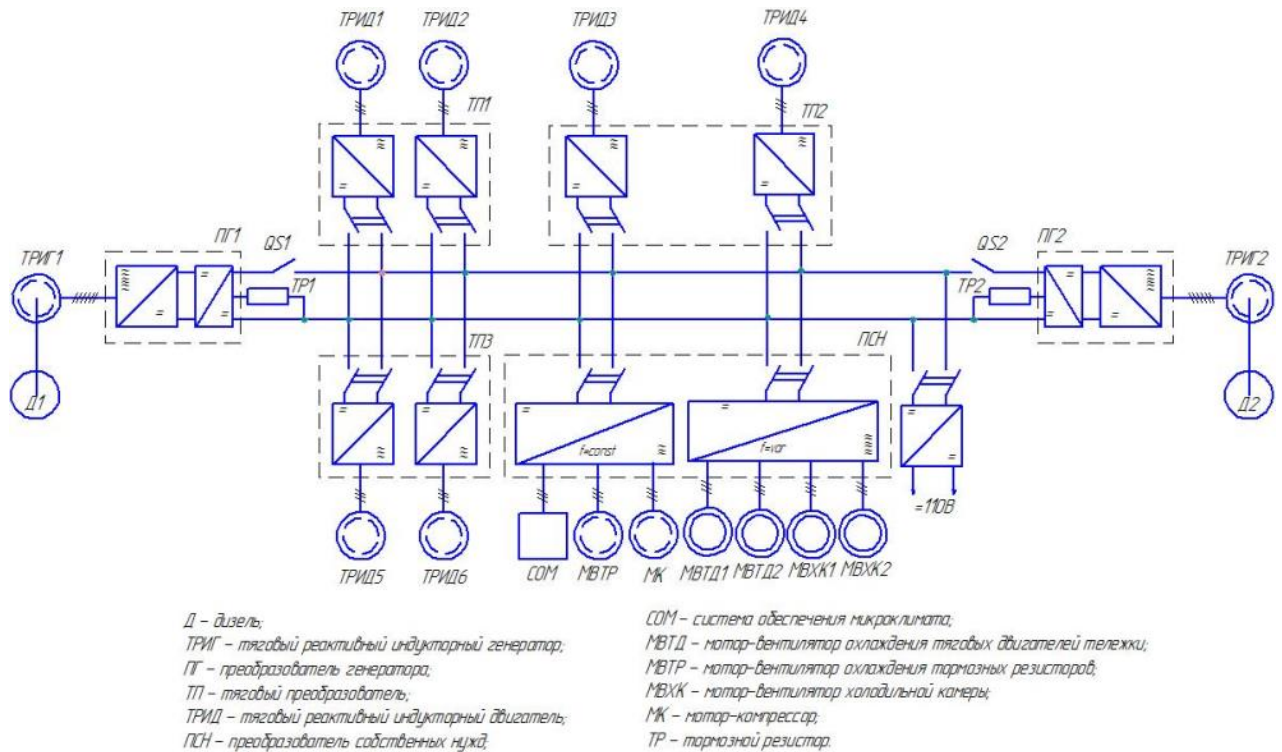


Рисунок 192 – Структурная схема электрической передачи мощности маневрового тепловоза с реактивными индукторными двигателями

Электрическая передача мощности тепловоза содержит два тяговых реактивно-индукторных генератора ТРИГ1 и ТРИГ2, два преобразователя генератора ПГ1 и ПГ2, выполненных по схеме автономного инвертора напряжения АИН с тормозным регулятором ТР1 и ТР2; шесть тяговых реактивно-индукторных двигателя ТРИД1... ТРИД6; три тяговых преобразователя ТП1-ТП3, каждый из которых содержит два идентичных канала автономного инвертора напряжения АИН1-АИН2, АИН3-АИН4 и АИН5-АИН6; трехканальный преобразователь собственных нужд ПСН [125].

Преобразователь генератора в режиме тяги обеспечивает преобразование трёхфазного выходного напряжения ТРИГ в постоянное напряжение промежуточного контура, регулируемое в диапазоне от 600 до 900 В в зависимости от требуемых условий работы тяговой передачи мощности. В режиме электрического торможения ПГ обеспечивает сброс энергии промежуточного контура на тормоз-



ной резистор с поддержанием напряжения промежуточного контура, достаточного для работы системы вспомогательного привода [125].

В схеме электрической передачи мощности не предусматривается специального устройства для запуска дизеля. При обоих неработающих дизелях запуск одного дизеля осуществляется от ПГ путем перевода последнего в тяговый режим при питании от аккумуляторной батареи. При одном работающем двигателе запуск второго осуществляется без использования аккумуляторной батареи. Энергия для раскрутки вала дизеля генератором поступает из звена постоянного тока электрической передачи мощности. После запуска дизеля ПГ плавно переводится в генераторный режим с поддержанием заданного напряжения на промежуточном контуре. Контактors QS1 и QS2 служат для отключения дизель-генераторной установки в случае неисправности. При этом тепловоз может функционировать в продолжительном режиме на одном дизеле с соответствующим уменьшением максимальной мощности на валах тяговых двигателей.

В режиме тяги питание тяговых двигателей осуществляется от автономных инверторов напряжения тяговых преобразователей, подключенных к промежуточному контуру постоянного напряжения. Управление инверторами индивидуальное с поосным регулированием момента тяговых двигателей. Задание частоты вращения дизеля, тягового/тормозного усилия, направления движения и режимов работы электрической передачи мощности (тяга, торможение, холостой ход) формируется микропроцессорной системой управления по сигналам от контроллера машиниста.

Защита от боксования/юзa основана на сравнении частот вращения двигателей, определяемых по сигналам датчиков положения ротора. При обнаружении боксования/юзa осуществляется переход на алгоритм управления стабилизации частоты вращения путем изменения заданного значения момента тягового двигателя соответствующей оси тепловоза до восстановления сцепления.

В режиме электрического торможения тяговые преобразователи ТП1-ТП3 переводятся в генераторный режим. Сброс энергии осуществляется тормозным регулятором преобразователя генератора на тормозные резисторы ТР1 и ТР2. Пи-

тание мотор-вентилятора охлаждения тормозных резисторов МВТР осуществляется от одного из каналов ПСН.

Для поддержания заданного теплового режима работы дизеля и тяговых двигателей применено плавное регулирование производительности мотор-вентилятора охлаждения холодильной камеры МВХК и мотор-вентиляторов охлаждения тяговых двигателей МВТД, подключенных к выходу первого канала ПСН. Каждый из МВТД обеспечивает охлаждение двух тяговых двигателей одной тележки тепловоза. Регулирование частоты выходного напряжения первого канала ПСН в диапазоне 10-50 Гц осуществляется по максимальному из заданий для МВХК и МВТД. Второй канал ПСН обеспечивает плавный пуск и работу на частоте 50 Гц мотор-компрессора МК, мотор-вентилятора охлаждения тормозных резисторов и системы микроклимата СОМ. Третий канал ПСН обеспечивает формирование напряжения питания бортовой сети 110 В постоянного тока. Предусматривается резервирование первого и второго каналов ПСН которое осуществляется соответствующей программной перестройкой частоты выходного напряжения оставшегося в работе канала ПСН. На выходе третьего канала включена аккумуляторная батарея, работающая в буферном режиме.

Комплект тягового оборудования электрической передачи мощности для шестиосного маневрового тепловоза разработан и изготовлен ОА «НТЦ «ПРИВОД-Н» и состоит из следующих основных элементов:

- тяговый генератор ТРИГ-680У2                    2 шт;
- преобразователь генератора БПС-680        2 шт;
- тяговый двигатель ТРИД-125У1                6 шт;
- тяговый преобразователь БПС-400            3 шт;
- преобразователь собственных нужд        1 шт;
- блок тормозных резисторов                    1 шт.

### 6.1.2 Бесколлекторный тяговый генератор

Генератор представляет собой трёх фазную индукторную машину. Степень защиты IP00 по ГОСТ 14254-96.

Тяговый генератор состоит из следующих основных частей:

- статора, состоящего из корпуса с запрессованным в него сердечником статора, на зубьях которого закреплены катушки статора;
- ротора, состоящего из вала с напрессованными на него сердечником ротора, кольцом измерительным и вентилятором;
- щитов подшипниковых.

Корпус генератора – сварная конструкция сложной формы, является одновременно магнитопроводом и корпусом. С торцов корпус имеет горловины с привалочными поверхностями для установки щитов подшипниковых с роликовыми подшипниками, в которых вращается ротор. На корпусе имеются два входных и два выходных вентиляционных патрубка. Конструкцией корпуса предусмотрены уши для транспортировки и кантования генератора. Сердечники статора и ротора имеют явнополюсную структуру и изготовлены из листов электротехнической стали 2412.

Обмотка статора – сосредоточенная катушечная. В лобовых частях катушек, со стороны выхода воздуха из генератора, установлены датчики температуры типа Pt100, контакты которых выведены на разъем. Крепление катушек статора на зубцах выполняется клиньями из профильного стеклотекстолита. Для повышения эффективности охлаждения катушек клинья выполнены не сплошными на всю длину сердечника статора, а чередующимися с воздушными промежутками. Катушки фазы статора соединены в электрическом отношении параллельно, а в магнитном – встречно. Выводные концы фаз статора, через отверстия в щите подшипниковом, зафиксированные стеклотекстолитовыми клицами, выведены на изоляторы.

Ротор выполнен без обмотки. Кольцо измерительное совместно с блоком датчиков являются звеном обратной связи, отслеживающим положение ротора.



Таблица 35 – Основные технические характеристики тягового генератора ТРИГ-680

Наименование параметра	Значение
Число фаз	3
Мощность на зажимах, кВт	680
Номинальное напряжение, В	900
Частота вращения (номинальная), мин <sup>-1</sup>	1500
Частота вращения (наибольшая рабочая), мин <sup>-1</sup>	2100
Частота вращения (предельно-допустимая в аварийных режимах), мин <sup>-1</sup>	2450
Расход охлаждающего воздуха, м <sup>3</sup> /мин	81
Номинальный ток, А	595
КПД, не менее, %	95
Тип охлаждения	самовентиляция
Подшипники	Роликовые, необслуживаемые
Расчетная долговечность подшипников, ч	80000

### 6.1.3 Преобразователь генератора БПС-680

Преобразователь генератора предназначен для преобразования трёхфазного выходного напряжения индукторного генератора в постоянное напряжение промежуточного контура для питания инверторов напряжения тяговых преобразователей и блока питания вспомогательных цепей.

Конструктивно блок преобразователь выполнен в виде шкафа, состоящий из двух секций. В одной секции размещены плита охладителя с силовыми приборами и панели конденсаторов силового фильтра, а в другой – панели с входным и выходным элементами схемы и съемный воздухопровод. Минимизация распределенных индуктивностей монтажа обеспечивается применением многослойных шин, представляющих собой пакеты изолированных медных пластин. Изолирующие слои разделяют шины питания. Соединение силовых модулей с панелями конденсаторов также производится с помощью многослойных шин.

Несущим элементом конструкции БПС является сварной каркас, состоящий из стального профильного уголка со съемными щитами. По всей высоте каркаса

расположен воздухопровод, в котором расположен охладитель модулей автономных трехфазных инверторов напряжения.

Основные технические характеристики преобразователя генератора БПС-680 приведены в таблице 36.

Таблица 36 – Технические характеристики преобразователя генератора БПС-680

<b>Наименование параметра</b>	<b>Значение</b>
Номинальное напряжение в звене постоянного тока, В	900, постоянное
Диапазон изменения напряжения звена постоянного тока, В	600÷1100
Тип генератора	Реактивный индукторный генератор
Номинальная мощность на выходе преобразователя, кВт	680
Номинальная мощность на выходе тормозного прерывателя, кВт	500
Коэффициент полезного действия не менее, о.е.	0,99
Тип системы охлаждения	Воздушная, принудительная от встроенных вентиляторов
Мощность потребляемая по цепям 24В не более, Вт	550

Панели конденсаторов силового фильтра, расположены в непосредственной близости к модулям АИН и подключены к IGBT-транзисторам модулей с помощью многослойных шин. В верхней части блока питания по обеим сторонам от АИН расположены панели выходных датчики фазных токов двигателя. В нижней части блока размещены панели с входными и выходными элементами. Модули управления приводом расположены на торце охладителя модулей АИН. Воздухопровод размещен в нижней части блока и представляет собой съемные стальные щиты. Для погрузки и транспортирования БПС имеются четыре рым-болта. Для встроенной системы принудительного воздушного охлаждения модулей АИН применены три диаметральных вентилятора, расположенные в нижней части плиты

На рисунке 194 представлен внешний вид преобразователя генератора БПС-680.

Проектирование ↔ Моделирование → Изготовление

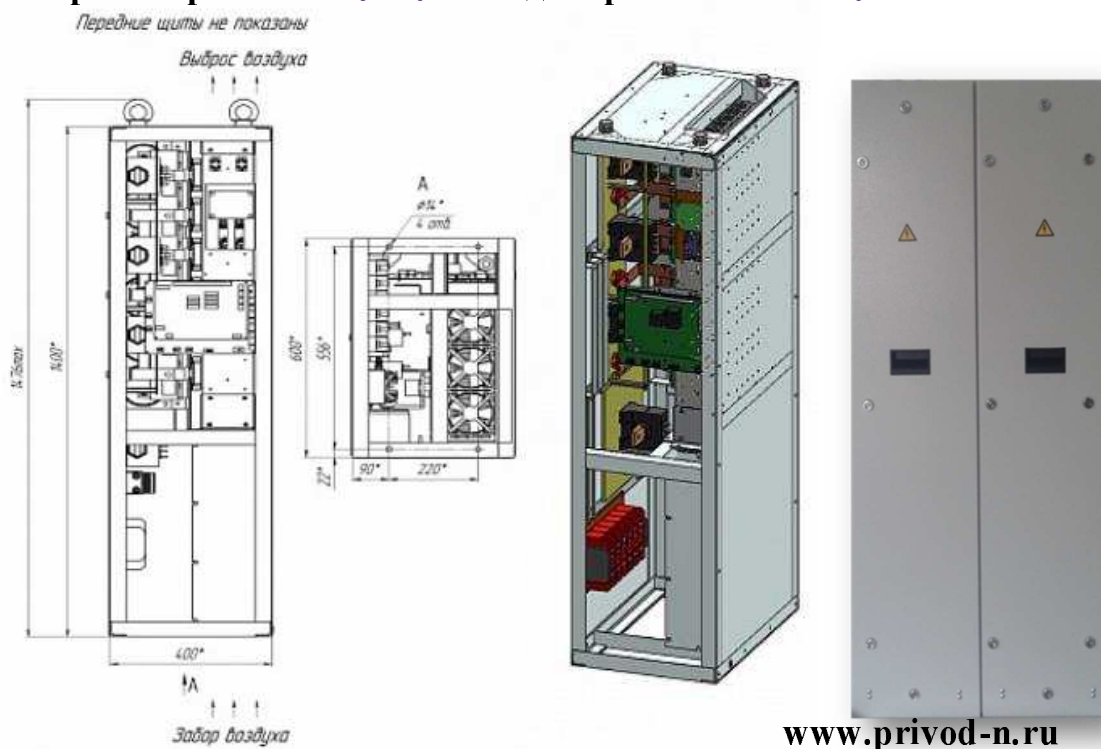


Рисунок 194 – Преобразователя генератора БПС-680

#### 6.1.4 Бесколлекторный тяговый двигатель ТРИД-125

На каждой тележке тепловоза устанавливаются по три тяговых реактивных индукторных двигателя мощностью 200 кВт с опорно-осевым подвешиванием и подшипниками качения. Конструкция тяговых двигателей аналогична тяговому генератору. Основные технические характеристики тягового двигателя приведены в таблице 37. На рисунке 195 представлены основные этапы разработки и внешний вид тягового реактивного индукторного двигателя ТРИД-125У1.

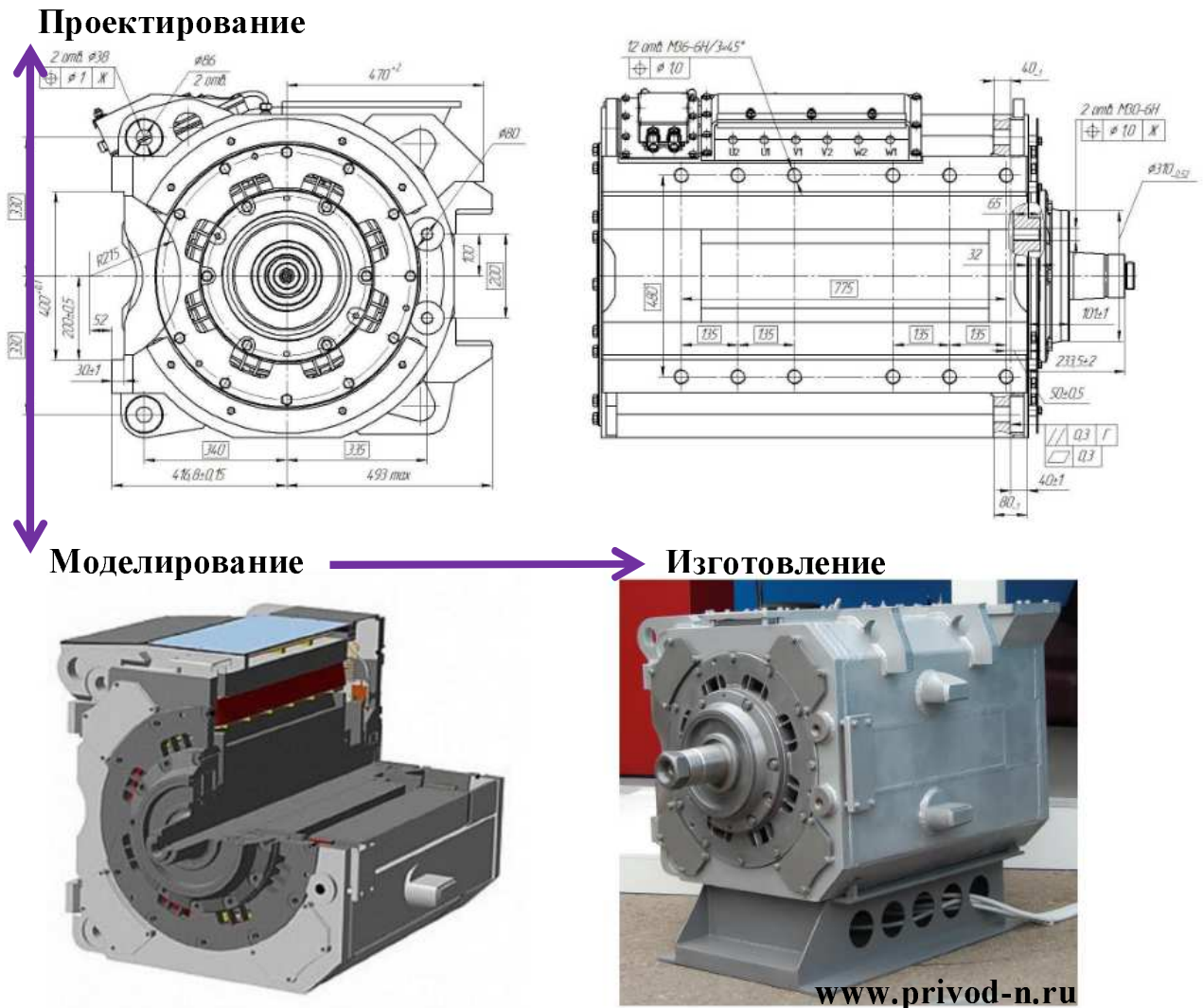


Рисунок 195 – Тяговый реактивный индукторный двигатель ТРИД-125У1

Таблица 37 – Основные технические характеристики реактивного индукторного двигателя ТРИД-125 У1

Наименование параметра	Значение
Число фаз	3
Мощность длительного/часового режима, кВт	125/200
Номинальное напряжение звена постоянного тока, В	900
Номинальная частота вращения длительного режима, мин <sup>-1</sup>	173
Момент номинальный длительного режима, Н*м	6910/7600
Расход охл. воздуха, м <sup>3</sup> /мин	28,3
КПД длительного режима, %	92/93
Номинальный ток длительного режима, А	182
Момент пусковой, Н*м	10300
Роторные подшипники	Роликовые, необслуживаемые
Тип моторноосевых подшипников	качения



Охлаждение тягового двигателя независимое воздушное. В состав двигателя конструктивно входит датчик положения ротора, формирующий трёхфазную последовательность импульсных сигналов. Тяговый двигатель через редуктор передает вращение на ось колесной пары.

### 6.1.5 Статический преобразователь БПС-400

Статический преобразователь предназначен для преобразования напряжения промежуточного контура в трёхфазные напряжения питания двух реактивных индукторных тяговых двигателей. На рисунке 196 представлен основные этапы разработки и внешний вид статического преобразователя БПС-400.

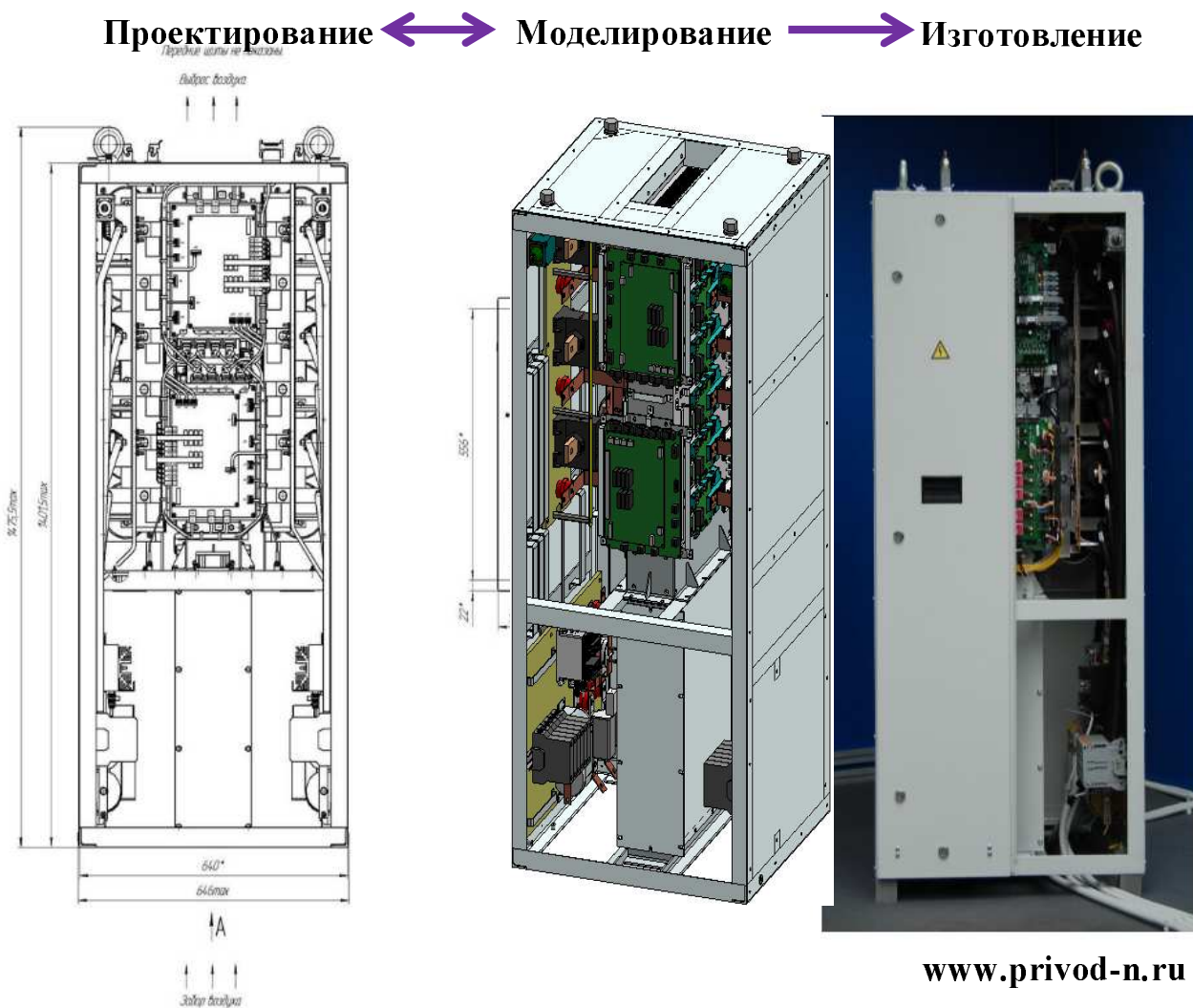


Рисунок 196 – Внешний вид статического преобразователя БПС-400

Основные технические характеристики статического преобразователя приведены в таблице 38.

Таблица 38 – Технические характеристики преобразователя БПС-400

Наименование параметра	Значение
Номинальное входное напряжение, В	900
Диапазон изменения входного напряжения, В	600-1100
Тип нагрузки	Два реактивных индукторных двигателя
Номинальная мощность на валу тяговых двигателей, кВт	2х200
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,985
Тип системы охлаждения	Воздушная, принудительная от встроенных вентиляторов
Номинальное напряжение питания системы управления и вентиляторов, В	24
Мощность, потребляемая по цепям 24В не более, Вт	400

Конструктивно блок преобразователь выполнен в виде шкафа, состоящий из двух секций. В одной секции размещены плита охладителя с силовыми приборами и панели конденсаторов силового фильтра, а в другой – панели с входным и выходным элементами схемы и съемный воздуховод. Минимизация распределенных индуктивностей монтажа обеспечивается применением многослойных шин, представляющих собой пакеты изолированных медных пластин. Изолирующие слои разделяют шины питания. Соединение силовых модулей с панелями конденсаторов также производится с помощью многослойных шин.

Несущим элементом конструкции БПС является сварной каркас, состоящий из стального профильного уголка со съемными щитами. По всей высоте каркаса расположен воздуховод, в котором расположен охладитель модулей автономных трехфазных инверторов напряжения. Панели конденсаторов силового фильтра, расположены в непосредственной близости к модулям АИН и подключены к IGBT-транзисторам модулей с помощью многослойных шин. В верхней части блока питания по обеим сторонам от АИН расположены панели выходных датчики фазных токов двигателя. В нижней части блока размещены панели с входными и выходными элементами. Модули управления приводом расположены на торце

охлаждателя модулей АИН. Воздуховод размещен в нижней части блока и представляет собой съемные стальные щиты.

Для погрузки и транспортирования БПС имеются четыре рым-болта. Для встроенной системы принудительного воздушного охлаждения модулей АИН применены три диаметральных вентилятора, расположенные в нижней части плиты.

Разработанный комплект энергоэффективной электрической передачи мощности, состоящий из тяговых реактивных индукторных машин и статических тяговых преобразователей с микропроцессорной системой управления и диагностики локомотива был представлен АО «НТЦ «ПРИВОД-Н» на IV Международном железнодорожном салоне техники и технологии EXPO 1520 в г. Щербинка на территории Экспериментального кольца ОАО «ВНИИЖТ» (рисунок 197).



Рисунок 197 – Комплект энергоэффективной электрической передачи мощности на выставке EXPO 1520

## **6.2 Разработка и исследование энергоэффективного бесколлекторного тягового привода для модернизации тепловоза ТГМ6А**

В данном разделе рассмотрим проект модернизации тепловозов ТГМ6А, принадлежащих компании АО «ЕВРАЗ НТМК» [205], который предусматривает замену гидравлической передачи мощности на электрическую. В проекте модернизации тепловоза принимают участие следующие компании: АО «ЕВРАЗ НТМК», ООО «Русэлпром» [206], ООО «ПромЭлКом» [207] и АО «НТЦ «ПРИВОД-Н» [208]. В рамках проекта предусмотрено замена всего энергетического и тягового оборудования на электрическую передачу мощности (рисунок 198) с двумя силовыми дизель-генераторными установками, двумя тяговыми асинхронными генераторами, двумя блоками силовой электроники и двумя тяговыми реактивными индукторными двигателями ТРИД-320 с преобразователем БПС-640 для питания двух двигателей [209].

Для замены гидравлической передачи мощности разработаны тяговые двигатели, способные заменить штатные гидромеханические редукторы. Данные двигатели передают вращающий момент через карданные валы на две колесные пары через штатные осевые редукторы, что представляет первый групповой привод тепловоза в России с электрическим тяговым двигателем. Использование реактивных индукторных двигателей (РИД) позволило реализовать пусковой момент на валу 22,8 кН·м, что соответствует силе тяги при трогании с места тепловоза равной 352,8 кН, а момент номинального режима работы РИД составил 15 кН·м [209].

Модернизация тепловоза предполагает существенно увеличить эффективность и производительность маневрового тепловоза, а также значительно снизить эксплуатационные расходы благодаря использованию более эффективной и экологически чистой технологии передачи мощности.

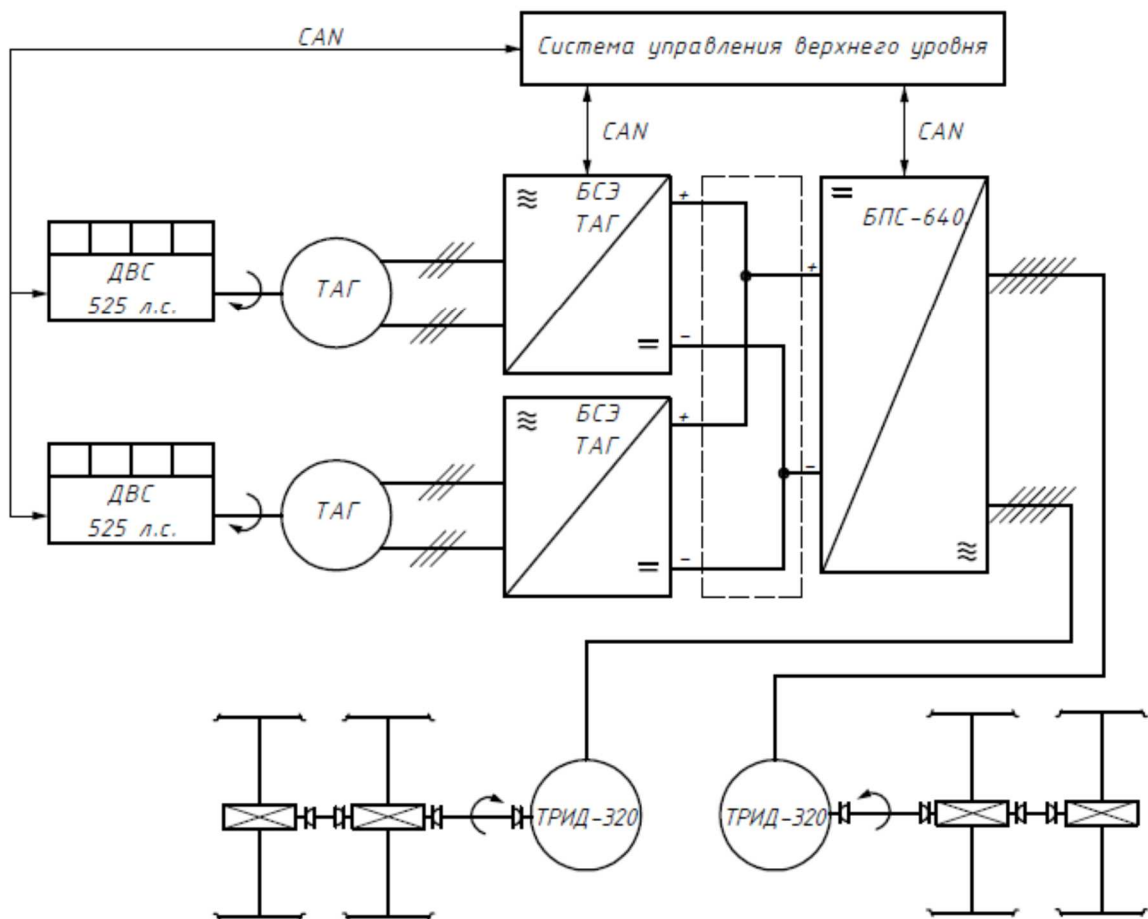


Рисунок 198 – Функциональная схема комплекта тягового электрооборудования

### Разработка тягового привода с реактивным индукторным двигателем

Тяговой электропривод является важной составляющей маневрового теплового локомотива, который обеспечивает необходимый момент и мощность для перемещения поезда. Проектирование и разработка такого привода начинается с теоретических расчетов, которые проводятся с использованием компьютерной модели, разработанной в четвертой главе настоящей диссертации, что позволило оценить моментные, мощностные, энергетические и тепловые характеристики привода. Одним из ключевых этапов является многовариантное теоретическое исследование параметров управления (рисунок 199), которое выполнено с использованием компьютерной модели привода локомотива [209].

На основе этого исследования формируется область рациональных параметров управления для различных режимов работы тягового привода. Она позво-

ляет добиться максимального значения коэффициента полезного действия (КПД) в диапазоне нагрузок от 0 до 100%.

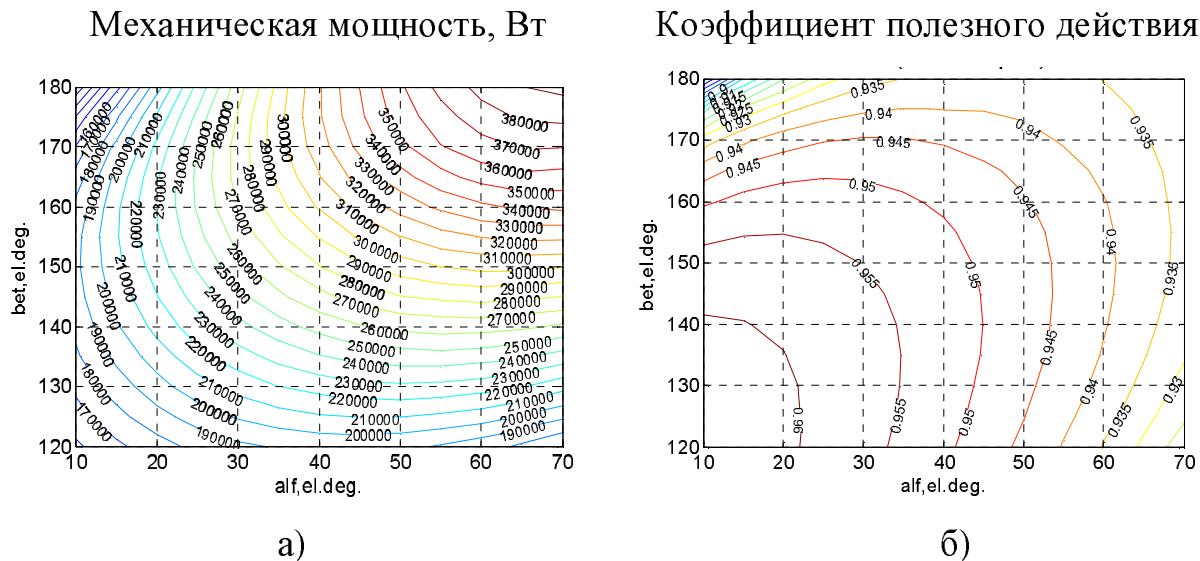


Рисунок 199 – Изолинии механической мощности а) и КПД б) тягового двигателя ТРИД-320 в зависимости от углов управления

Для маневрового тепловоза разработан закон управления ТРИД-320, который обеспечивает максимальный КПД при заданной мощности на валу ТРИД 320. После формирования параметров управления для номинального и частичных режимов работы ТРИД-320 были определены значения коэффициента полезного действия в зависимости от коэффициента задания момента  $k_m$  на валу ТРИД-320 и частоты вращения ротора [209].

В результате проведенных исследований получена карта эффективности тягового двигателя ТРИД-320 для маневрового тепловоза, которая изображена на рисунке 200. Эта карта является важным инструментом при выборе оптимальных параметров работы тягового привода для маневровых тепловозов [209].

В процессе проектирования и разработки тягового электропривода необходимо провести тепловой расчет, чтобы определить максимальную температуру фазной обмотки тягового двигателя и распределение теплового поля по элементам ротора и статора. Для проведения этого расчета использована программа, основанная на методе конечных элементов, FEMM.

Исходными данными для теплового расчета являются геометрия магнитной системы и катушек ТРИД-320, тепловыделение в магнитной системе и проводниках обмоток, граничные условия, описывающие температуру окружающей среды, температуру и скорость движения охлаждающего воздуха при применении принудительной вентиляции [209].

Для номинального режима работы ТРИД-320 был проведен тепловой расчет на основании действующего значения фазного тока и потерь в магнитопроводе магнитной системы. В результате расчетов определена максимальная температура фазной обмотки, и распределение теплового поля по магнитной системе тягового двигателя. Максимальная температура фазной обмотки составила 406 °К (133 °С), что соответствует выбранному классу изоляции и свидетельствует о хорошей теплоотдаче и правильной выбранной системе вентиляции. По результатам моделирования построено распределение теплового поля по фрагменту магнитной системы, что представлено на рисунке 201 [209].

Карта эффективности ТРИД-320

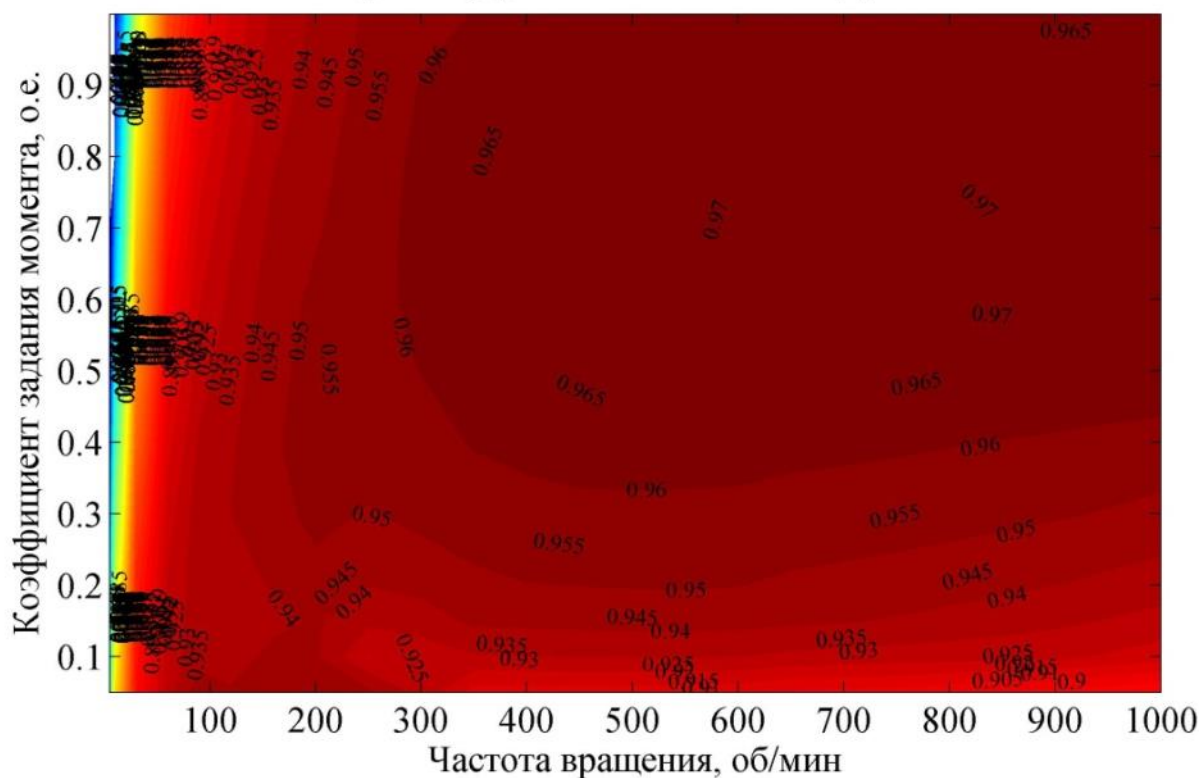


Рисунок 200 – Карта эффективности ТРИД-320



На основе проведенных теоретических исследований подтверждены высокие эксплуатационные характеристики реактивного индукторного двигателя при его применении в качестве тягового двигателя для маневрового тепловоза. Проведенные теоретические исследования подтвердили возможность использования реактивного индукторного двигателя ТРИД-320 на маневровом тепловозе и позволили получить основные технические характеристики двигателя ТРИД-320, которые представлены в таблице 39 [209].

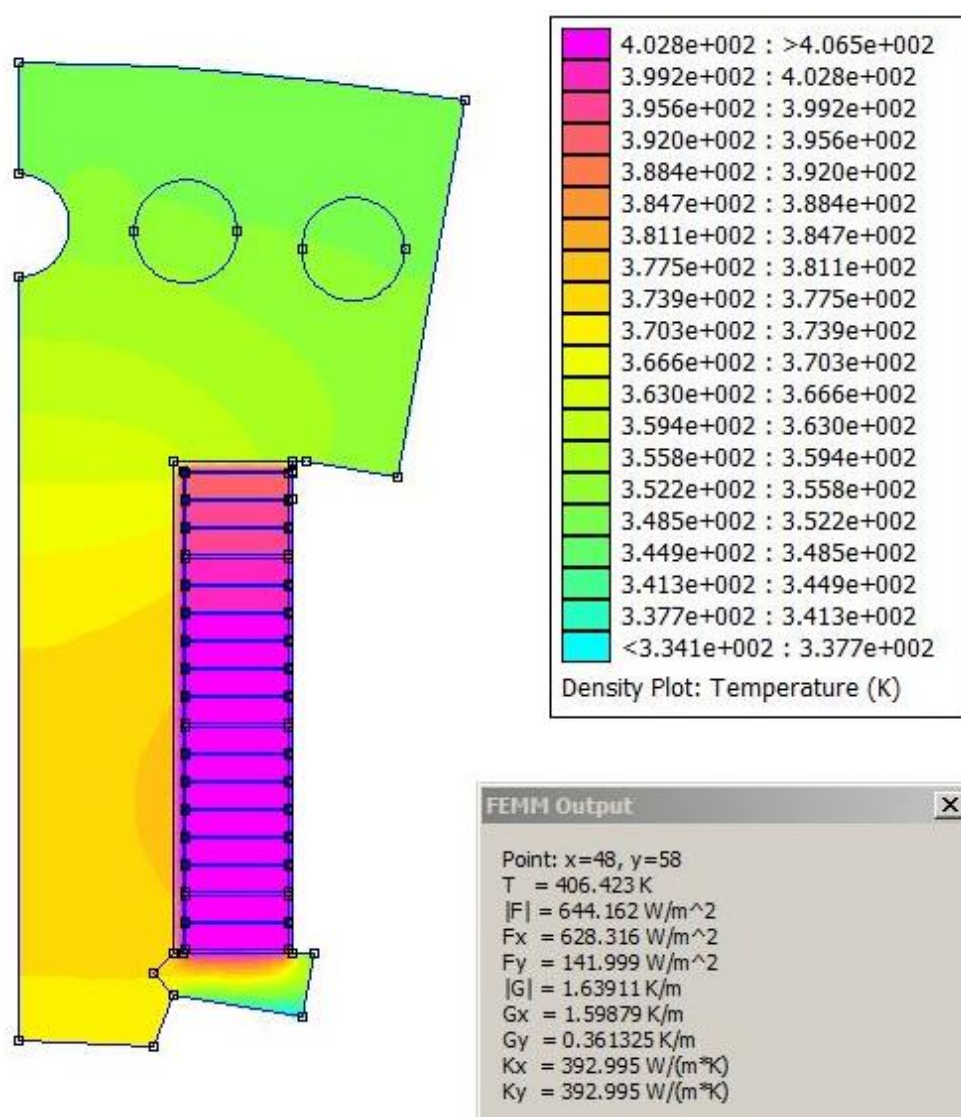


Рисунок 201 – Картина теплового поля фрагмента магнитной системы двигателя



Таблица 39 – Технические характеристики тягового двигателя ТРИД-320

№	Наименование параметра	Значение
1	Тип двигателя	бесколлекторный, реактивный индукторный
2	Число зубцов статора/ротора	18/12
3	Число фаз	3
4	Механическая мощность на валу, кВт	320
5	Напряжение звена постоянного тока, В	700...750
6	Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	204
7	Номинальная частота питания (204 мин <sup>-1</sup> ), Гц	40,8
8	Номинальный момент (204 мин <sup>-1</sup> ), кН*м	15
9	Номинальный фазный ток (эффективное значение), А	370
10	Пусковой момент, кН*м	22,8
11	Пусковой ток (эффективное значение), А	590
12	Коэффициент полезного действия (150 <sup>0</sup> С, 204 мин <sup>-1</sup> ), о.е.	0,945
13	Тип охлаждения	Воздушное, принудительная вентиляция
14	Расход охл. воздуха, м <sup>3</sup> /мин	78
15	Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	1285×1100×1285
16	Масса, кг	4520

### 6.2.1 Изготовление и испытания бесколлекторных тяговых двигателей

Тяговые РИД мощностью 320 кВт (ТРИД-320), изготовлены ООО «ПромЭлКом» на производственной площадке в Китае. Для управления тяговыми двигателями использовался двухканальный статический преобразователь (БПС-640), изготовленный АО «НТЦ «ПРИВОД-Н» в России, в г. Новочеркасск. Испытания были запланированы на 2020 год, но в связи с начавшейся пандемией проведены в дистанционном формате, управление микропроцессорной системой статического преобразователя БПС-640 осуществлялось дистанционно из г. Новочеркасск [209].

Проведенные испытания ТРИД-320 в Китае подтвердили основные характеристики Технического задания на проектирования тягового двигателя ТРИД-320. Пусковой момент составил 23608 Н·м, а коэффициент полезного действия в номинальном режиме при частоте вращения 206 об/мин составил 94,6 % [209]. Данные результаты подтверждены на основе измерений, которые были осуществлены с помощью соответствующего сертифицированного оборудования (рисунок 202).



Рисунок 202 – Входные электрические а) и выходные б) механические характеристики ТРИД-320

### 6.2.2 Комплексные испытания комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности тепловоза

Проведение комплексных испытаний комплекта тягового электрооборудования (КТЭО) электрической передачи мощности тепловоза на Сафоновском Электромашиностроительном заводе (рисунок 203), является следующим этапом в процессе проверки работоспособности данного оборудования [209]. КТЭО включает в себя два асинхронных тяговых генератора (ТАГ) в качестве первичного источника электрической энергии, а также тяговой привод, состоящий из двух реактивных индукторных двигателей ТРИД-320, двухканального статического преобразователя БПС-640 с микропроцессорной системой управления и системы принудительного охлаждения тяговых двигателей. Для обеспечения необходимого момента сопротивления на валах ТРИД-320 в широком диапазоне рабочих частот вращения используются нагрузочные машины, а приводные двигатели ими-

тируют работу дизельных двигателей. Проведение этих испытаний позволило комплексно оценить работоспособность КТЭО в режимах, близких к эксплуатационным.

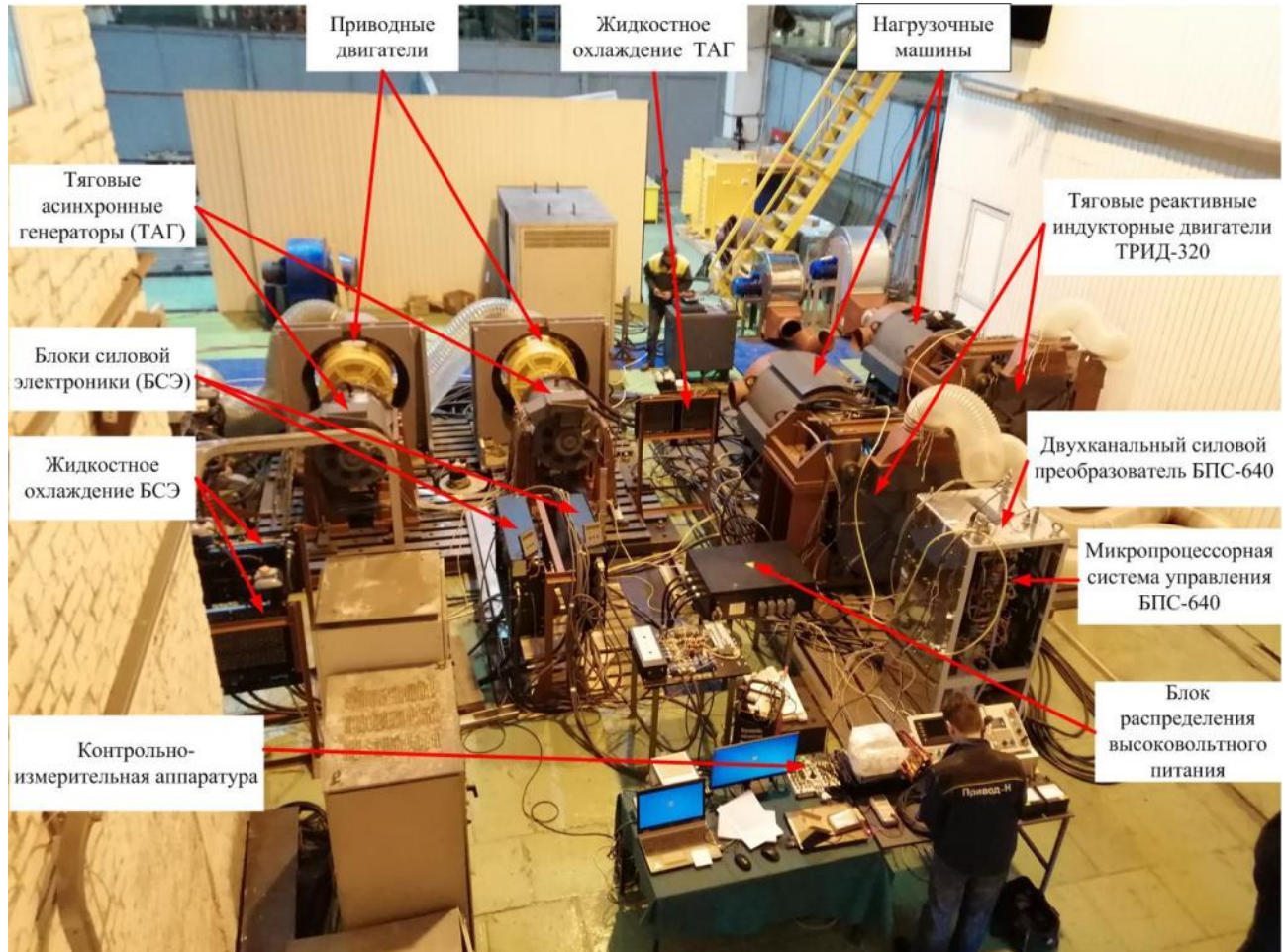


Рисунок 203 – Испытания комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности тепловоза на Сафоновском Электромашиностроительном заводе

**Тепловые испытания** тяговых двигателей ТРИД-320 проводились при следующих условиях: напряжение в звене постоянного тока 725 В, механическая мощность на валу ТРИД-320 составляла 329 кВт, частота вращения 373 об/мин, температура окружающего воздуха 17°C. Установившиеся значения температур обмоток тяговых двигателей, приведенных к температуре окружающей среды 50°C, составило для первого ТРИД-320 135°C, а для второго 137 °C [209]. Сопо-

ставляя результаты эксперимента с расчетными данными, представленными на рисунке 201 видно, что погрешность расчета составила 3 % [209].

**Определение моментных и мощностных характеристик.** Испытания проводились с целью построения характеристик ТРИД-320 в зависимости от частоты вращения при условии постоянства мощности на разных частотах. На рисунке 204 приведены результаты теоретических и экспериментальных данных для четырех значений задания выходной мощности тягового двигателя (320 кВт –  $k_M=1$ ; 260 кВт –  $k_M=0,813$ ; 215 кВт –  $k_M=0,672$ ; 150 кВт –  $k_M=0,468$ ). По графикам видно, что в ходе испытаний были подтверждены расчетные зависимости [209].

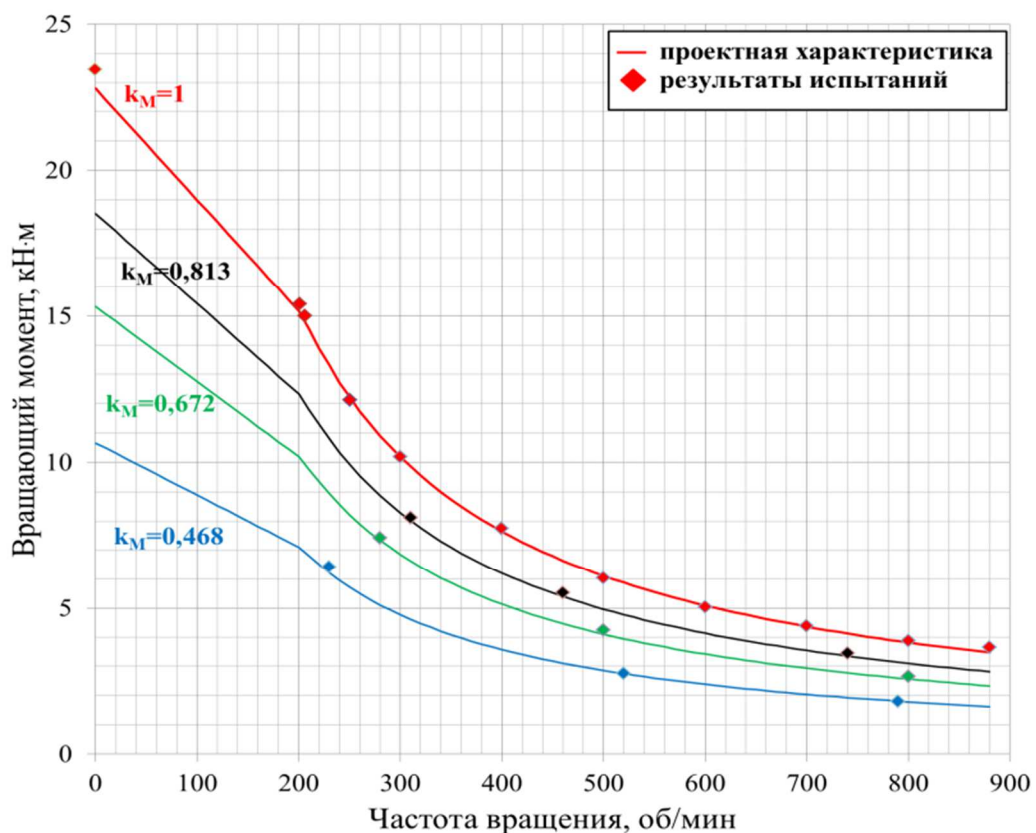


Рисунок 204 – Семейство моментных характеристик тягового двигателя ТРИД-320

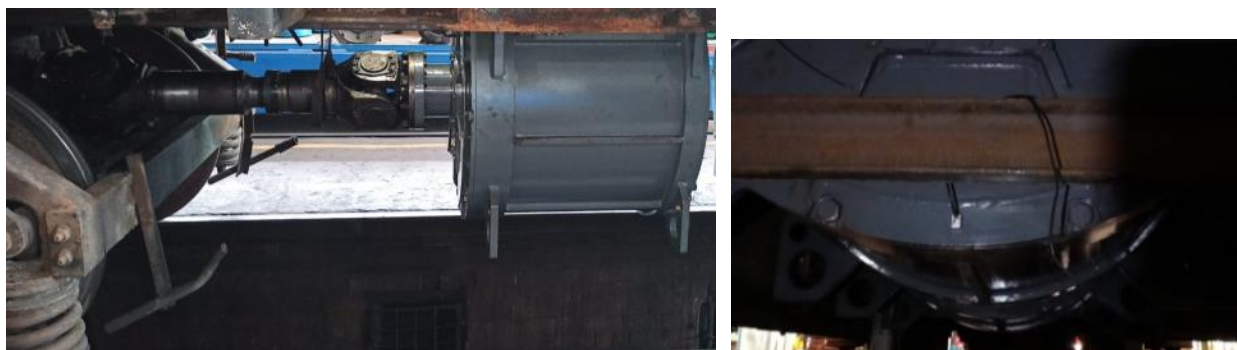
Коэффициент полезного действия комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности тепловоза определялся как отношения мощностей на валах двух ТРИД-320 к сумме мощностей на валах двух тяговых асинхронных генераторов в режиме реализации номинальной мощности по истечении 1 часа прогрева. При этом к звену постоянного тока был подключена штатная си-

стема охлаждения тяговых электродвигателей. По результатам испытаний [209], коэффициент полезного действия комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности тепловоза составил:

$$\eta = \frac{P_{\text{ТРИД1}} + P_{\text{ТРИД2}}}{P_{\text{ТАГ1}} + P_{\text{ТАГ2}}} \cdot 100 \% = \frac{329 + 329}{382,8 + 387,7} \cdot 100 \% = 85,4 \%$$

### 6.2.3 Испытания комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности на тепловозе

В ходе модернизации тепловоза ТЭМП-1тт выполнены необходимые работы и успешно проведены поездные испытания с проверкой работы оборудования в реальных условиях [210]. В частности, на раму тепловоза установлены два ТРИД-320, а для регистрации поперечных и вертикальных ускорений корпуса ТРИД-320 установлен акселерометр, расположенный в нижней части двигателя (рисунок 205). Такой подход позволил обеспечить регистрацию поперечных составляющих колебаний в процессе движения, что особенно важно для данного типа машин. Результаты испытаний подтвердили работоспособность модернизированного тепловоза и соответствие его характеристик требованиям эксплуатации.



а)

б)

Рисунок 205 – Фото а) установленного тягового двигателя ТРИД-320 на раме тепловоза и б) акселерометра



Во время испытаний, поперечных и крутильных колебаний в околостоповых режимах не выявлено, при переходе в одноимпульсный режим имеются незначительные колебания (с частотой от 130 Гц), соответствующие утроенной частоте фазного тока [210].

Проведенные испытания с гружеными и порожними поездами на испытательном участке железнодорожного пути «тяжелого профиля» показали, что эксплуатационные характеристики модернизированного тепловоза ТЭМП-1тт (рисунок 206) превосходят характеристики тепловоза ТГМ6А, что позволяет осуществлять маневровую работу с поездами повышенной массы и составности. Большую часть времени тепловоз работает с одной дизель-генераторной установкой, а вторая автоматически запускается при необходимости использования мощности тепловоза более 50 %.



Рисунок 206 – Фото тепловоза ТЭМП-1тт

Впервые в мире применен реактивный индукторный двигатель, в качестве тягового, на маневровом тепловозе. Современные подходы при проектировании и разработке алгоритмов управления тяговым приводом позволяют реализовать постоянный момент на валу реактивного индукторного двигателя, практически без пульсаций с высоким коэффициентом полезного действия. Модернизации маневровых тепловозов с установкой предлагаемого комплекта тягового оборудования показала возможность существенного повышения эффективности преобразования энергии в передачах мощности тепловозов, что позволило улучшить тяговые характеристики тепловоза, при снижении затрат на топливо. Приемочные и квалификационные тяговые испытания тепловоза ТЭМП-1тт подтвердили экономию дизельного топлива до 30 % [211, 212], а производительность тепловоза возросла на 25 % [211, 212]. По итогам 2022 года комплект тягового оборудования для модернизированного маневрового тепловоза ТГМ6 стал финалистом национальной премии в области промышленных и цифровых передовых технологий «Приоритет-2022» в номинации «Машиностроение» [211].

## **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6**

1. Теоретические исследования автора реализованы в АО «Научно-техническим центром «ПРИВОД-Н» при разработке новых энергоэффективных комплектов тягового оборудования локомотивов, предназначенных для модернизации маневровых локомотивов.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований подтвердили разработку энергоэффективного тягового привода маневрового тепловоза с рациональным алгоритмом управления КПД в широком диапазоне нагрузок и частоты вращения ротора. При скоростях движения свыше 5 км/ч и при задании силы тяги более 10 % коэффициент полезного действия тягового двигателя составил более 90 %, что позволит повысить энергоэффективность маневровой работы.

3. Применения бесколлекторных двигателей в тяговом приводе маневровых тепловозов позволило обеспечить необходимые тяговые характеристики с высо-

кими значениями коэффициента полезного действия, как тягового двигателя 94,6 %, так и всей электрической передачи мощности в целом 85,4 %. Для сравнения, коэффициент полезного действия коллекторного ТЭД ЭД-133У1 тепловоза ТЭМ103 при расчетной скорости движения составляет 84,5 %, а для ТЭД ЭД-118А/ЭДУ-133П тепловоза ТЭМ18ДМ – 85,3 %, коэффициент полезного действия асинхронного двигателя ДАТ-305 составляет 91 %.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа представляет собой научно-квалификационную работу, направленную на разработку новых научно обоснованных технических решений повышения энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов, за счет приведения количества работающего тягового оборудования в соответствие текущим эксплуатационным условиям работы локомотива, в том числе и применения модульной структуры тягового оборудования локомотива, а для определения рациональной траектории движения поезда предлагается использовать тяговые расчеты на основе метода конечных элементов.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основании выполненного анализа современного состояния проблемы эффективности эксплуатации автономных локомотивов установлено, что энергоэффективность локомотивов нормируется только для полной мощности дизель-генераторной установки, а эффективность эксплуатации оценивается по удельному расходу топлива на единицу перевозочной работы, и чем ниже нагрузка на ось вагона, тем больше удельный расход дизельного топлива, а значит, повышение энергоэффективности, не может быть достигнуто только лишь за счет создания новых мощных локомотивов, и особое внимание стоит уделять режимам работы тягового оборудования локомотивов, что позволит привести в соответствие мощностные характеристики к условиям эксплуатации.

2. Аналитическим путем установлены закономерности, позволяющие определить коэффициент полезного действия тягового электрического оборудования локомотивов, в зависимости от тока и выходной/входной мощности. Доказано, что регулирование по напряжению, приводит к существенному снижению энергоэффективности тяговых электрических и электромеханических преобразователей энергии на автономных локомотивах с электрической передачей мощности.

3. Путем применения энергетического подхода разработана и теоретически обоснована методология оценки энергетической эффективности эксплуатации ав-

тономных локомотивов с электрической передачей мощности на основании паспортных данных тягового оборудования и параметров, получаемых с регистраторов локомотивов.

4. На основании проведенного анализа эксплуатационных данных установлено, что дизель-генераторная установка грузовых, пассажирских и маневровых локомотивов продолжительное время работает с нагрузками менее 50 %, это обуславливает необходимость применения многодизельных энергетических установок для локомотивов всех видов движения. Определены условия работы элементов тяговой передачи мощности и выявлено недоиспользование энергоэффективности преобразования энергии в электрических передачах мощности, особенно в передачах постоянного и переменного тока, за счет низкого коэффициента использования мощности дизель-генераторной установки и электрической передачи мощности в целом.

5. На основе проведенных теоретических исследований определена качественная закономерность увеличения энергетической эффективности тягового оборудования автономного локомотива, которая наблюдается при увеличении коэффициента эффективного использования оборудования, что позволяет для локомотивов, оснащенных многодвигательным тяговым приводом, применить алгоритм, обеспечивающий стабилизацию мгновенного значения КПД при частичной нагрузке локомотива на уровне, близком к значению КПД номинального режима.

6. Путем применения разработанной методологии оценки энергетической эффективности эксплуатации автономных локомотивов и анализа полученных результатов, разработана, обоснована и сформулирована концепция повышения энергетической эффективности, в основе которой лежит принцип масштабируемости используемого тягового оборудования автономного локомотива в зависимости от условий эксплуатации.

7. Теоретически обосновано применение метода конечных элементов для проведения тяговых расчетов, позволяющего расширить существующие методики проведения тяговых расчетов с целью построения оптимальных траекторий дви-

жения поезда с учетом режимов работы тягового оборудования автономных локомотивов.

8. Экспериментально доказана достоверность и адекватность принятых научных положений при разработке комплексной компьютерной модели автономного локомотива с модульной структурой электрической передачи мощности сопоставлением теоретических результатов расчета на компьютерной модели и результатов экспериментальных исследований макета тягового модуля электрической передачи мощности.

9. Теоретические и экспериментальные результаты диссертационного исследования нашли практическое применение при разработке комплекта тягового электрооборудования электрической передачи мощности автономного локомотива. Применение предлагаемой концепции модульной структуры тягового оборудования совместно с бесколлекторными тяговыми электрическими машинами позволило обеспечить необходимые тяговые характеристики с высокими значениями коэффициента полезного действия, как тягового двигателя до 94,6 %, так и всей электрической передачи мощности в целом 85,4 %, что подтверждено на экспериментальном образце маневрового локомотива.

10. Результаты использованы при модернизации тягового привода маневрового тепловоза серии ТГМ6А, что позволило получить высокие тягово-энергетические характеристики модернизированного тепловоза ТЭМП-1тт. Приемочные и квалификационные тяговые испытания тепловоза ТЭМП-1тт подтвердили экономию дизельного топлива до 30 % и повышение производительности на 25 %.

### **Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации**

Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке требований к перспективным электрическим передачам мощности локомотивов с бесколлекторным тяговым приводом с микропроцессорными системами управления. Для обеспечения максимальной энергоэффективности использования автономных локомотивов с электрической передачей мощности важна разработка

методов энергоэффективного управления многодизельным и многодвигательным тяговым подвижным составом для условий реальной эксплуатации. Применение метода конечных элементов для проведения тяговых расчетов открывает перспективу разработки систем автоматического оптимального управления локомотивов, с системой дискретно-адаптивного управления энергоэффективностью и многодизельными энергетическими установками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики : официальный сайт. – Москва. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455> (дата обращения: 22.01.2022).
2. **Российская Федерация. Законы.** Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) (с изм. и доп., вступ. в силу с 26.07.2019).
3. Энергетическая стратегия холдинга «РЖД» на период до 2015 года и на период до 2030 года. – Москва : ОАО «РЖД». – 2011. – 97 с.
4. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга). – Москва : ОАО «РЖД». – 2015. – 128 с.
5. The rolling stock with hybrid generator set based on high speed gas-electric microturbine / N. V. Grebennikov, P. G. Kolpakhchyan, T. Z. Talakhadze [et al.] // Transport Problems : conference proceedings, Katowice, 27–29 июня 2018 года. – Katowice: Silesian University of Technology, 2018. – P. 237-245.
6. **Kireev, A. V.** Energy-regenerative Shock Absorber Mathematical Model / A. V. Kireev, N. M. Kozhemyaka, N. V. Grebennikov // Procedia Engineering : International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 May 2017 year. – Saint-Petersburg: Elsevier Ltd, 2017. – P. 1741-1746. – DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.707.
7. Эксплуатация и техническое обслуживание подвижного состава / В. А. Гапанович, В. Е. Андреев, Ю. В. Митрохин [и др.]. – Москва : ИРИС ГРУПП, 2012. – 576 с. – ISBN 978-5-452-04863-3.
8. Оптимизация энергопотребления поездов с электрической тягой в динамических режимах на базе комплексной системы управления движением и энергоснабжением / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян [и др.] // Интеллектуальные системы на транспорте : Сборник материалов Третьей международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 03–05 апреля

2013 года / Редактор: Корниенко А.А.. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2013. – С. 27-32.

9. Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive / A. Zarifyan, N. Grebennikov, T. Talakhadze [et al.] // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019 - Proceedings : 26, Moscow, 30.01.2019 year. – Moscow, 2019. – P. 1-6. – DOI 10.1109/IWED.2019.8664283.

10. Оценка энергоэффективности электрической тяги методами компьютерного моделирования / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, В. В. Зак [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2013. – № 1(65). – С. 24-37.

11. **Кобзев, С. А.** Пути повышения энергоэффективности тягового подвижного состава / С.А. Кобзев // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 8. – С. 41-44.

12. **Коссов, Е. Е.** Состояние и перспективы обновления подвижного состава / Е.Е. Коссов // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 8-12.

13. **Коссов, В. С.** Оздоровление эксплуатационного парка магистральных тепловозов / В.С. Коссов // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 11. – С. 23-27.

14. **Бабел, М.** Модернизация маневрового тепловоза SM42 / М. Бабел, А. Тулэцки // Наука и Техника Транспорта. – 2014. – № 1. – С. 79-87.

15. **Сычѳв, В.А.** Экономический анализ видов локомотивной тяги. Анализ и недостатки исследований эффективности локомотивной тяги / В.А. Сычѳв. – 2011. – URL: [http://railway-publish.com/upload/site1/files/sychev\\_analiz\\_effectivity.pdf](http://railway-publish.com/upload/site1/files/sychev_analiz_effectivity.pdf) (дата обращения: 02.02.2022).

16. **Коссов, В.С.** Модернизация тепловозов типа 2М62 и 2ТЭ10В (М. У) / В.С. Коссов, Э.И. Нестеров // Локомотив. – 1999. – № 5. – С. 11-14.

17. **Рыжов, В.А.** Об эффективности модернизации тепловозов 2ТЭ10/ В.А. Рыжов, Э.П. Вольский // Локомотив. – 2005. – № 3. – С. 33-34.
18. Модернизация тепловозов // Железные дороги мира. – 2005. – № 12. – С. 53-57.
19. **Бабел, М.** Повышение эффективности работы дизелей тепловозов серии SM31 / М. Бабел, Е.Е. Коссов // Вестник Транспорта Поволжья. – 2012. – № 6(36). – С. 14-17.
20. **Незевак, В.Л.** Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока / В.Л. Незевак, В.Т. Черемисин // Бюллетень результатов научных исследований. – СПб: ПГУПС Императора Александра I, 2015. – № 1 (14). – С. 76-83.
21. **Евстафьев, А. М.** Повышение энергетической эффективности электрического подвижного состава : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Евстафьев Андрей Михайлович ; ПГУПС. – СПб., 2018. – 396 с.
22. **Кузнецова, И. А.** Оценка технико-энергетической эффективности работы маневровых тепловозов путем моделирования рабочих процессов оборудования в режимах эксплуатации : специальность 05.22.07 « Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецова Ирина Алексеевна ; Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. – Москва, 2018. – 162 с.
23. **Фалендыш, А.П.** Использование гибридных передач на маневровых тепловозах / А.П. Фалендыш, Н.В. Володарец // Локомотив-информ. – 2010. – № 12. – С. 4-6.
24. ТМХ представит на железнодорожном салоне в Щербинке девять образцов железнодорожной техники : сайт. – Москва. – URL: <https://www.tmholding.ru/media/events/11542.html> (дата обращения: 22.01.2022).
25. **Тарасов, А. Н.** Знакомьтесь: тепловоз ТЭМ14 / А. Н. Тарасов // Локомотив. – 2011. – № 10(658). – С. 36-37.

26. Знакомьтесь: гибридный маневровый тепловоз ТЭМ35 // Локомотив. – 2013. – № 11(683). – С. 36-37.
27. Согласовано техническое задание на разработку гибридного тепловоза ТЭМ9Н «SinaraHybrid» // Локомотив. – 2011. – № 11(659). – С. 42.
28. **Ким, С. И.** Опыт эксплуатации тепловоза ЧМЭЗ с двухдизельной силовой установкой / С. И. Ким, С. Н. Журавлев, А. Б. Федотов // Локомотив. – 2012. – № 11(671). – С. 30-33.
29. **Тишаев, А. С.** Трехдизельный локомотив ЧМЭЗ ЭКО: С заботой о будущем / А. С. Тишаев, А. Ю. Зайцев // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2011. – № 4(16). – С. 43-45.
30. Мировой рынок железнодорожного машиностроения 2019/2020. Аналитический обзор / Ю.З. Саакян, В.Б. Савчук, А.А. Поликарпов [и др.]. – Москва : ИПЕМ, 2021. – 144 с.
31. Энергоэффективность тяги грузовых поездов тепловозами 2ТЭ25К «Пересвет» / Е. С. Васюков, Ю. В. Бабков, В. А. Перминов, Е. Е. Белова // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2011. – № 1(13). – С. 70-78.
32. Энергоэффективность тяги грузовых поездов тепловозами нового поколения 2ТЭ25А «Витязь» / Е. С. Васюков, Ю. В. Бабков, В. А. Перминов, Е. Е. Белова // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2013. – № 3(23). – С. 34-40.
33. **Кулинич, Ю.М.** Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями / Ю.М. Кулинич, А.Н. Савоськин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2005. – № 1. – С. 163-170.
34. **Мазнев, А.С.** Пути повышения эффективности электроподвижного состава / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев // Транспорт Урала. – 2005. – № 4 – С. 28-31.
35. **Мазнев, А.С.** Улучшение энергетики электровозов переменного тока / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2009. – №5-6. – С. 19-21.



36. **Мельниченко, О.В.** Повышение энергетических показателей электровозов / О.В. Мельниченко, Ю.В. Газизов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 3. – С. 50-51.

37. **Пыров, А.Е.** Современные системы управления электровозами / А.Е. Пыров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 2. – С. 64-66.

38. **Бакланов, А. А.** Анализ тягово-энергетической эффективности новых электровозов / А. А. Бакланов, Н. В. Есин, А. П. Шиляков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 70-80.

39. Письмо. В.А. Гапанович. № исх-16989 ЦЗ-С от 19.09.2016.

40. **Зарифьян, А. А.** Показатели энергетической эффективности грузовых магистральных электровозов в различных условиях эксплуатации / А. А. Зарифьян // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2019. – № 2(46). – С. 28-35. – EDN NIPMTH.

41. **Зарифьян, А. А.** Повышение энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зарифьян Александр Александрович ; РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2016. – 124 с.

42. **Зарифьян, А.А. (мл.)** Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровоза при работе с неполной нагрузкой / А.А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1. – С. 49-59.

43. **Патент № 2617857 С Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В61С 15/00, В60К 31/00.** Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой : № 2015139252 : заявл. 15.09.2015 : опубликовано 28.04.2017 / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, Ю. А. Орлов, К. П. Солтус ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ТРТранс» (ООО «ТРТранс»). – 2 с.

44. **Зарифьян, А.А. (мл.)** Алгоритм повышения энергетической эффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А.А. Зарифьян (мл.) // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 1. – С. 50-61

45. **Zarifyan, A.** Electric Locomotives Energy Saving by the Discrete-Adaptive Traction Drive Control: Experimental Confirmation / A. Zarifyan, M. Obukhov // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2021. – P. 25-30. – DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559475.

46. **Зарифьян, А. А.** О возможности повышения энергетической эффективности локомотивов при работе с частичной нагрузкой / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе // Транспорт: наука, образование, производство : труды международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 12–15 апреля 2016 года ; Ростовский государственный университет путей сообщения ; Председатель организационного комитета конференции А.Н. Гуда. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2016. – С. 74-76.

47. **Гребенников, Н. В.** Пути повышения энергетической эффективности автономного тягового подвижного состава / Н. В. Гребенников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(57). – С. 19-23.

48. **Федотов, М.В.** Оперативное определение показателя энергоэффективности магистральных тепловозов в эксплуатации по данным МСУ / М.В. Федотов, В.А. Перминов, В.В. Грачёв // Труды второй международной научно-практической конференции «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов». – Москва : ООО «Локомотивные технологии», 2015. – С. 236-242.

49. **Носков, В. О.** Применение методики обобщенных технико-экономических показателей работы тепловозов в эксплуатации / В. О. Носков, А. К. Белоглазов, Н. А. Белоглазова // Известия Транссиба. – 2020. – № 1(41). – С. 91-97.

50. **Корнеев, П. С.** Совершенствование системы нормирования расхода топлива на маневровое и хозяйственное движение тепловозов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Корнеев Павел Сергеевич ; ОмГУПС. – Омск, 2012. – 141 с.

51. Распоряжение ОАО «РЖД» от 17 сентября 2007 года N 1808р. О планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД». // Экономика железных дорог. – 2007. – № 12. – С. 170-182.

52. **Бабков, Ю. В.** Прямой и косвенный способы определения уровня энергетической эффективности тепловозов / Ю. В. Бабков, Ю. И. Клименко, В. А. Перминов // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 55-60.

53. **ГОСТ 31187-2011.** «Тепловозы магистральные. Общие технические требования» : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 января 2012 г. № 1-ст : введен взамен ГОСТ 31187-2003 : дата введения 2012-06-01 / разработан ОАО «ВНИКТИ». – Москва : Стандартинформ, 2012. – 54 с.

54. Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе, В. В. Сироткин. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1(69). – С. 40-49.

55. **ГОСТ 31428-2011.** Тепловозы маневровые с электрической передачей. Общие технические требования : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 июля 2011 г. № 187-ст : введен взамен ГОСТ 25463-2001 в части маневровых тепловозов: дата введения 2012-01-01 / разработан ОАО «ВНИКТИ». – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с.

56. **ГОСТ 34514-2019.** Тепловозы магистральные и маневровые. Метод определения энергоэффективности : национальный стандарт Российской Федера-

ции : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 марта 2019 г. № 84-ст : введен впервые : дата введения 2019-10-01 / разработан АО «ВНИКТИ». – Москва : Стандартинформ, 2019. – 19 с.

57. **Гребенников, Н. В.** Анализ эксплуатационного потребления топлива грузовыми тепловозами / Н. В. Гребенников, Ю. В. Сердюков, А. Н. Шульгин // Транспорт: наука, образование, производство : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 18–21 апреля 2017 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 115-118.

58. **Гребенников, Н. В.** Определение эксплуатационного расхода топлива грузового тепловоза по кривой скорости / Н. В. Гребенников // Сборник научных трудов «транспорт: наука, образование, производство» : Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 17–20 апреля 2018 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 74-77.

59. **Осипов, С. И.** Основы тяги поездов : Учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / С. И. Осипов – Москва : УМК МПС России, 2000. – 592 с.

60. **ГОСТ 34626-2019.** Локомотивы и самоходный специальный железнодорожный подвижной состав. Методы определения коэффициента полезного действия и коэффициента полезного использования мощности : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 декабря 2019 г. № 1470-ст : введен впервые : дата введения 2020-09-01 / разработан АО «ВНИКТИ». – Москва : Стандартинформ, 2020. – 14 с.

61. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» приказом № 867р от 12.05.2016 г. – ОАО «Российские железные дороги», 2016. – 513 с.

62. **Грачев, В. В.** О достоверности прямых способов оперативного контроля энергоэффективности тепловозов в эксплуатации / В. В. Грачев, А. В. Грищенко, Ф. Ю. Базилевский // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2018. – № 2(42). – С. 40-48.

63. **Володин, А.И.** Локомотивные двигатели внутреннего сгорания / А.И. Володин. – Москва : Транспорт, 1990. – 256 с.

64. **Мугинштейн, Л. А.** Совершенствование системы учета и контроля расхода топлива маневровых тепловозов / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, К. М. Попов. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 1. – С. 8-18.

65. **Поляков, В.Н.** Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов (концепция, задачи оптимизации, математические модели и алгоритмы управления) : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Поляков Владимир Николаевич. – Екатеринбург, 2009. – 510 с.

66. **Ильинский, Н.Ф.** Основы электропривода : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. ; перераб. и доп. – Москва : МЭИ, 2003. – 224 с. – ISBN 5-7046-0874-4.

67. **Ильинский, Н.Ф.** Общий курс электропривода : учебник для вузов / Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.

68. **Пугачев, А.А.** Энергетические показатели качества электропривода вспомогательных систем тягового подвижного состава / А.А. Пугачев, В.И. Воробьев, Г.С. Михальченко, А.С. Космодамианский, А.В. Самотканов // Мир транспорта и технологических машин. – 2015. – № 1(48) – С. 58-66.

69. **Пугачев, А. А.** Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 3(64). – С. 32-37.

70. Электрические передачи локомотивов : В 2 частях / А. А. Андрющенко, Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2015. – 98 с.

71. **Гребенников, Н. В.** Определение коэффициента полезного действия выпрямительной установки локомотива / Н. В. Гребенников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 541-543.

72. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, А.Л. Курочка и др.; Под ред. В.И. Бочарова и В.П. Янова. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

73. Двигатель тяговый постоянного тока ДТК-417. Руководство по эксплуатации 6ТЛ.155.001РЭ.

74. **ГОСТ 34673.1-2020.** Тяговый подвижной состав железнодорожный. Часть 1. Методы контроля электротехнических параметров : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2020 г. № 871-ст : введен впервые : дата введения 2021-03-01 / разработан АО «ВНИИЖТ». – Москва : Стандартинформ, 2020. – 41 с.

75. **Владыкин, А. В.** Поиск оптимального состояния привода с точки зрения энергоэффективности подвижной единицы / А. В. Владыкин, Н. О. Фролов // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3(21). – С. 36-38.

76. **Гребенников, Н. В.** Определение коэффициента полезного действия тяговых электрических машин локомотивов в условиях эксплуатации / Н. В. Гребенников // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 31-38.

77. **Мазнев, А.С.** Энергосберегающий тяговый привод постоянного тока / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 2. – С. 25-35.

78. **ГОСТ 25941-83.** Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 14.10.83 № 4975 : введен взамен ГОСТ 11828-75 : дата введения 1984-01-01 / разработан Министерством электротехнической промышленности СССР. – Москва : ИПК издательство стандартов, 2003. – 30 с.

79. **Мощинский, Ю.А.** Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали / Ю.А. Мощинский, Аунг Вин Тут // *Электричество*. – 2007. – № 11. – С. 60-66.

80. **Пугачев, А.А.** Минимизация мощности потерь электропривода с асинхронным двигателем / А. А. Пугачев, А. С. Космодамианский, Д. А. Бондаренко // *Энерго- и ресурсосбережение - XXI век : сборник материалов XI международной научно-практической интернет-конференции*, Орел, 01-30 марта 2013 года / Под редакцией В.А. Голенкова, А.Н. Качанова, Ю.С. Степанова. – Орел : ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2013. – С. 89-92.

81. **Зарифьян, А. А.** Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 3(71). – С. 46-53.

82. **Гребенников, Н. В.** Анализ энергетической эффективности эксплуатации пассажирского тепловоза ТЭП70БС / Н. В. Гребенников // *Вестник транспорта Поволжья*. – 2022. – № 5(95). – С. 17-22.

83. Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Техническое описание 2ТЭ25КМ РЭ: Руководство по эксплуатации / О. В. Чикиркин, Е.С.Васюков, С.Н.Гапеев [и др.]. – Москва, 2015. – 153 с.

84. **Мельников, В. А.** Диагностирование тепловозов по данным бортовых микропроцессорных систем / В. А. Мельников // *Мир транспорта*. – 2014. – Т. 12. – № 3(52). – С. 56-62.

85. **Matlab.** Language of Technical Computing. Version 6. The MathWorks. – Natick, 2002. – 116 с.

86. **Лакин, И. К.** Применение статистических методов при диагностировании тепловозов / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников // *Известия Транссиба*. – 2015. – № 1(21). – С. 20-29.

87. **Валиев, М. Ш.** Повышение эффективности работы тепловозов средствами бортовых систем диагностирования : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соиска-

ние ученой степени кандидата технических наук / Валиев Мухаммад Шералиевич. – Санкт-Петербург, 2011. – 161 с.

88. **Хромов, И.Ю.** Обоснование влияния нарушений режимов эксплуатации на ухудшение технического состояния локомотивов / И. Ю. Хромов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 2(66). – С. 62-68. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.2(66).62-68.

89. **Хромов, И.Ю.** Влияние нарушений режимов эксплуатации локомотивов на их надёжность / И.Ю. Хромов // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век : материалы VI Международной научно-технической конференции. – ПГУПС, Санкт-Петербург, 2018. – С. 176-179.

90. Тепловоз ТЭП70БС. Руководство по эксплуатации. ТЭП70А.00РЭ. АО ХК «Коломенский завод». – Коломна, 2004. – 182 с.

91. Бортовая система диагностики тепловозов ТЭП70БС / С. Т. Калиева, В. В. Иванов, В. Н. Панченко, К. О. Малыгина // Наука и образование транспорту. – 2018. – № 1. – С. 36-39.

92. **Осин, Г. Г.** Устройство и эксплуатация тепловозов серии ТЭП70БС (ТЭП70У) / Г. Г. Осин. – Москва : ОАО «Российские железные дороги», 2015. – 266 с.

93. **Нотик, З.Х.** ЧМЭЗ, ЧМЭЗт, Пособие машиниста / З.Х. Нотик. – Москва : Транспорт, 1990. – 381 с.

94. Автоматизированная система учета, контроля и анализа расхода топлива маневровыми тепловозами / А. И. Молчанов, И. Л. Поварков, Л. А. Мугинштейн, К. М. Попов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2004. – № 2. – С. 25-29.

95. Автоматизированное рабочее место обработки данных регистратора параметров работы тепловоза (АРМ РПРТ). / Л. А. Мугинштейн, А. И. Молчанов, И. Л. Поварков. – Москва, 2006. – Электронная программа.

96. **Зарифьян, А. А.** Пути повышения энергетической эффективности перспективных локомотивов / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе, В. В. Черников // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век



: Сборник материалов V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России, Санкт-Петербург, 14–16 ноября 2017 года ; Федеральное агентство железнодорожного транспорта ; (ФГБОУ ВО ПГУПС). – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2017. – С. 351-356.

97. **Крыгин, А.Н.** Способы повышения эксплуатационной энергетической эффективности магистральных электровозов переменного тока : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Крыгин Анатолий Николаевич ; ОмГУПС. – Омск, 1998. – 22 с.

98. **Кручек, В. А.** Возможности, перспективы и особенности модульной конструкции грузового электровоза в современных эксплуатационных условиях / В. А. Кручек, О. Р. Хамидов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – № 1. – С. 96-107. – DOI 10.20295/1815-588X-2020-1-96-107.

99. **Grebennikov, N.,** Determination of Energy Consumption for Train Traction / N. Grebennikov, A. Shapshal // In: Guda, A. (eds) Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 509. Springer, Cham., 2022. – P. 127-135. – [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_13)

100. **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 6. – С. 3-13.

101. **Ябко, И. А.** Метод расчета энергооптимальных траекторий движения поезда : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ябко Израиль Аврумович ; ФГУП ВНИИЖТ. – Москва, 2007. – 131 с.

102. **Малахов, С. В.** Реализация динамического программирования с учетом эффективного пересчета в бортовой системе / С. В. Малахов, М. Ю. Капустин. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 2. – С. 74-80.

103. **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л. А. Мугинштейн С. А. Виноградов, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. 2010. № 2. С. 24–29.

104. **Мугинштейн, Л. А.** Энергооптимальные методы управления движением поездов / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов ОАО «ВНИИЖТ». 2012. С. 79.

105. **Юренко, К. И.** Математическое моделирование энергооптимальных режимов ведения поезда с учетом возмущений / К. И. Юренко, А. Н. Савоськин, Е. И. Фандеев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: технические науки. – 2015. – № 3 (184). – С. 34-44.

106. **Юренко, К. И.** Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава / К. И. Юренко, Е. И. Фандеев. – Текст : непосредственный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 8 (181). – С. 88-102.

107. **Юренко, К. И.** Исследование энергоэффективных режимов ведения поезда с помощью имитационно-оптимизационной модели / К. И. Юренко, П. А. Харченко, Е. И. Фандеев // Инженерный Вестник Дона. – 2018. – № 4 (51). – С. 68-85.

108. **Сорокин, С.В.** Повышение экономичности многосекционных электропоездов переменного тока при вождении грузовых поездов : специальность 05.09.03, 05.09.01 «Электротехнические комплексы и системы», «Электромеханика и электрические аппараты» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сорокин Сергей Викторович ; МИИТ. – Москва, 1991. – 24 с.

109. **Мурзин, Д.В.** Пути и средства расширения функциональных возможностей и повышения эффективности эксплуатируемых магистральных электропоездов

зов : специальность 05.22.07 « Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мурзин Дмитрий Владимирович ; ОмГУПС. – Омск, 2000. – 21 с.

110. **Фадеев, С.В.** Повышение экономичности электровозов переменного тока за счет применения новых электронных систем управления : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фадеев Сергей Владимирович ; МИИТ. – Москва, 2003. – 23 с.

111. **Заручейский, А.В.** Анализ научных подходов к повышению эффективности использования грузовых электровозов / А.В. Заручейский, Р.В. Мурзин, В.А. Кучумов, Н.Б. Никифорова // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – №1 – С. 37-41.

112. **Зарифьян, А. А.** Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9. – № 6. – С. 107.

113. Компьютерная модель реостатных испытаний / Н.В. Гребенников, А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе, В. В. Черников // Локомотивы. XXI век : материалы III Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения доктора технических наук профессора В.В. Стрекопытова, Санкт-Петербург, 17–19 ноября 2015 года. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. – С. 33-38.

114. Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : Труды третьей международной научно-практической конференции, Москва, 11–12 октября 2018 года. – Москва: ООО «ЛокоТех», 2018. – 448 с. – ISBN 978-5-9905057-5-9.

115. **Гребенников, Н. В.** Метод снижения потерь электроэнергии в тяговых двигателях автономного локомотива за счет применения дискретно-адаптивного

управления / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 1(89). – С. 234-240.

116. **Пугачев, А. А.** Энергоэффективные электроприводы с асинхронными двигателями для магистральных локомотивов : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пугачев Александр Анатольевич ; Российский университет транспорта. – Москва, 2020. – 251 с.

117. Оптимизация тягового асинхронного электропривода с учетом потерь и насыщения стали / А.Б. Виноградов [и др.] // Электроприводы переменного тока: труды международной пятнадцатой научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2012. – С. 285-288.

118. **Коломейцев, Л.Ф.** Применение реактивных индукторных машин на транспорте / В.И.Бибиков, С.А.Пахомин, Г.В.Коломейцев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2008. – №1. – С. 69-72

119. **Птах, Г. К.** Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 3. – С. 23-33.

120. **Петрушин, А. Д.** Выбор типа электродвигателя безредукторного исполнения для электропоезда / А. Д. Петрушин, Н. В. Гребенников, А. П. Пиотровский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4(40). – С. 49-53.

121. **Петрушин, А. Д.** Электропривод для транспортных систем / А. Д. Петрушин, В. Ю. Смачный, М. М. Туляганов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4. – С. 91-95.

122. **Киреев, А.В.** Перспективы использования реактивных индукторных электрических машин на подвижном составе железных дорог / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников, Н. М. Кожемяка // Достижения и перспективы технических наук : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа,

13 августа 2014 года / НАУЧНЫЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА». – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2014. – С. 8-11.

123. **Гребенников, Н. В.** Динамика и энергоэффективность пассажирского вагона, оснащенного вентильно-индукторным генератором / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 4(48). – С. 15-21.

124. **Гребенников, Н. В.** Исследование реактивных индукторных машин нового класса / Н. В. Гребенников // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2019) : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 29-32.

125. **Киреев, А.В.** Электрическая передача мощности с реактивными индукторными машинами / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников, Н. М. Кожемяка // Актуальные проблемы технических наук : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Уфа, 10 апреля 2015 года / Ответственный редактор: Сукиасян Асатур Альбертович. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2015. – С. 88-91.

126. **Гребенников, Н. В.** Влияние изменения числа фаз подвагонного вентильно-индукторного генератора на его эксплуатационные характеристики при неизменной конфигурации статора / Н. В. Гребенников // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 2. – С. 17-21.

127. **Мамедов, З. А.** Повышение эффективности работы подвижного состава с асинхронными тяговыми электроприводами в переходных режимах : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мамедов Зия Арзуман оглы. – Ростов-на-Дону, 2010. – 18 с.

128. Асинхронный тяговый привод локомотивов : учебное пособие / А. А. Андрющенко, Ю. В. Бабков, А. А. Зарифьян [и др.] ; редактор: А.А. Зарифьян. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 413 с. – ISBN 978-5-89035-631-4.

129. **Орленко, А.И.** Энергосбережение в цепях вспомогательных машин электровозов переменного тока на основе ступенчатого управления производительностью вентиляторов : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Орленко Алексей Иванович. – Иркутск, 2004. – 196 с.

130. Модульная силовая энергетическая установка современного тепловоза / А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе, Н. В. Гребенников, Н. В. Романченко. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : Сборник научных трудов, Ростов на Дону, 01–02 марта 2018 года. – Ростов на Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2018. – С. 191-195.

131. **Талахадзе, Т.З.** Повышение энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Талахадзе Темур Зурабович ; РГУПС . – Ростов-на-Дону, 2019. – 164 с.

132. **Москалев, Ю.В.** Определение оптимальной энергоемкости и мощности накопителя энергии для управления графиками нагрузок железнодорожных потребителей / Ю.В. Москалев // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 75-81.

133. **Цыкунов, Ю. Ю.** Повышение экономичности вспомогательных электро-приводов с асинхронными двигателями на локомотивах поезда : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация кандидата технических наук / Цыкунов Юрий Юрьевич ; МИИТ. – Москва, 2004. – 203 с.

134. **Каменев, С. В.** Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебное пособие / С. В. Каменев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 110 с.

135. **Тимофеев, В. Ю.** Моделирование генерации термо-ЭДС в нестационарном тепловом поле в условиях трения и упругопластической деформации : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тимофеев Василий Юрьевич. – Елец, 2011. – 108 с.

136. **Пудовиков, О. Е.** Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения : специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Пудовиков Олег Евгеньевич. – Москва, 2011. – 291 с.

137. **Кузьмич, В. Д.** Теория локомотивной тяги : Учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. Д. Кузьмич, В. С. Руднев, С. Я. Френкель. – Москва : Издательство Маршрут, 2005. – 448 с. – ISBN 5-89035-265-2.

138. **Даутов, Р.З.** Введение в теорию метода конечных элементов / Р.З. Даутов, М.М. Карчевский. – Казань : Изд-во КГУ, 2011. – 237 с.

139. **Макарьянц, Г.М.** Основы метода конечных элементов: учеб. пособие / Г.М. Макарьянц. – Самара : Издательство Самарского университета, 2017. – 104 с.

140. **Даутов, Р.З.** Программная реализация метода конечных элементов в MATLAB. – Казань : Изд-во КГУ, 2014. – 106 с.

141. **Гребенников, Н. В.** Карта энергетического состояния поезда / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(83). – С. 64-72. – DOI 10.46973/020727X\_2021\_3\_64.

142. **Simulink.** Model-Based and System-Based Design. Version 5. The MathWorks. 2002. – Natick, 2002. – 104 с.

143. **Хвостов, В. А.** Применение MatLab для исследования электроприводов с асинхронными двигателями / В.А. Хвостов, А.А. Пугачев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 3-4. – С. 241-247.

144. **Гребенников, Н. В.** Разработка компьютерной модели тягового электропривода пассажирского электровоза ЭП1М / Н. В. Гребенников, П. А. Харченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4(53). – С. 35-40.

145. **Гребенников, Н. В.** Компьютерная модель электрической передачи мощности с реактивными индукторными машинами / Н. В. Гребенников, А. В. Киреев // Транспорт-2015 : труды международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 21–24 апреля 2015 года ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 182-184.

146. **Grebennikov, N.** Development of a computer model of a passenger train using data from devices for train operation parameters registration / N. Grebennikov, P. Kharchenko // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 908-913. – DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446415.

147. **Зарифьян, А. А.** Полноразмерная компьютерная модель поезда / А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчян, Н. В. Гребенников // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2013», Ростов-на-Дону, 24–26 апреля 2013 года ; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2013. – С. 158.

148. Голубев, А.Н. Математическая модель дизель-электрической передачи на базе асинхронных машин с автономным инвертором напряжения / А.Н. Голубев, А.В. Быков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 4. – С. 73-77.

149. **Гребенников, Н.В.** Компьютерная модель экипажной части грузового тепловоза статья / Н.В. Гребенников, А.В. Козубенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 4 (40). – С. 35-41.

150. **Фурман, В. В.** Совершенствование законов регулирования силовых установок тепловозов с целью повышения их технико-экономических характери-



стик : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фурман Виктор Владимирович. – Самара, 2011. – 148 с.

151. **Говоров, В. С.** Руководство по эксплуатации. Тепловоз 2ТЭ25А / В. С. Говоров. – Брянск : ЗАО «УК БМЗ», 2009. – 199 с.

152. **Ощепков, А.Ю.** Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB / А. Ю. Ощепков. – 2-е, Исправленное, Дополненное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2013. – 208 с. – ISBN 978-5-8114-1471-0.

153. **Худорожко, М. В.** Повышение эффективности использования электроваза с микропроцессорной системой управления за счет оперативного уточнения тепловых параметров тягового электродвигателя и сопротивления движению поезда : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация кандидата технических наук / Худорожко Максим Викторович ; ОАО «ВНИИЖТ». – Москва, 2009. – 127 с.

154. **Кузнецов, В.А.** Вентильно-индукторные двигатели / В.А. Кузнецов, В.А. Кузьмичев. – Москва : МЭИ, 2003. – 68 с.

155. **Grebennikov, N. V.** Mathematical model of linear switched reluctance motor with mutual inductance consideration / N. V. Grebennikov, A. V. Kireev, N. M. Kozhemyaka // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2015. – Vol. 6. – № 2. – P. 225-232. – DOI 10.11591/ijpeds.v6.i2.pp225-232.

156. **Иванов–Смоленский, А.В.** Электрические машины / А.В. Иванов–Смоленский. – Москва : Энергия, 1980. – 927 с.

157. **Кузьмичев, В. А.** Вентильно-индукторный двигатель для привода механизмов собственных нужд электростанций : специальность 05.09.01 «Электро-механика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузьмичев Владимир Александрович ; Московский энергетический институт (Технического университета). – Москва, 2004. – 169 с.

158. **Miller, T.J.E.** Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives / T.J.E. Miller : Oxford Science Press, 1989. – 226 p. – ISBN: 0198593694.

159. **Miller, T.J.E.** Switched Reluctance Motors and Their Control / T.J.E. Miller : Hillsboro, OH : Magna Physics and Clarendon Oxford Press, 1993. – 216 p. – ISBN: 9780198593874.

160. Подвагонный вентильно-индукторный генератор / О. А. Ворон, Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян, А. Д. Петрушин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2009. – № 1. – С. 132-143.

161. **Гребенников, Н. В.** Обзор способов управления вентильно-индукторным генератором / Н. В. Гребенников // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 20-23.

162. **Гребенников, Н. В.** Переходные электромеханические процессы при работе подвагонного вентильно-индукторного генератора / Н. В. Гребенников, А. А. Зарифьян // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. – 2011. – № 2. – С. 93-103.

163. **Гребенников, Н. В.** Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в реактивных индукторных машинах с сильным взаимным влиянием фаз / Н. В. Гребенников // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 315-321. – DOI 10.20295/1815-588X-2019-2-315-321.

164. **Tchavychalov, M. V.** SRM simulation with reduced amount of initial information / M. V. Tchavychalov, N. V. Grebennikov, D. V. Trinz // Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – P. 1-6. – DOI 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112075.

165. **Ворон, О.А.** Подвагонный вентильно-индукторный генератор / О.А. Ворон, Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, А.Д. Петрушин // Вестник ВЭЛНИИ: науч. изд. – ОАО «ВЭЛНИИ». – № 1 (57). – Новочеркасск, 2009. – С. 132-143.

166. Патент № 2450410 С1 Российская Федерация, МПК H02K 19/10, H02K 19/24. Реактивная коммутируемая электрическая машина с поворотной

симметрией : № 2011107631/07 : заявл. 28.02.2011 : опубликовано 10.05.2012 / А. Д. Петрушин, Н. В. Гребенников – 8 с.

167. **Киреев, А.В.** Разработка алгоритмов эффективного управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом электропоезда : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Киреев Александр Владимирович ; НПИ. – Новочеркасск, 2004. – 187 с.

168. **Гребенников Н.В.** Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гребенников Николай Вячеславович ; РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2012. – 148 с.

169. **Чавычалов, М. В.** Оптимизация магнитопровода линейного вентильно-индукторного генератора / М. В. Чавычалов, Н. В. Гребенников, М. Н. Жулькин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 6. – С. 32-36.

170. **Колесников, Э.В.** Моделирование магнитного гистерезиса / Э.В. Колесников, А. Дардасави // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 1993. – №5. – С. 23-29.

171. **Колпахчьян, П. Г.** Методология комплексного моделирования и способы управления асинхронным тяговым приводом магистральных электропоездов : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Колпахчьян Павел Григорьевич. – Новочеркасск, 2006. – 402 с.

172. **Gyorgy, E. M.** Rotational Model of Flux Reversal in Square Loop Ferrites / Gyorgy, E. M. // Journal of Applied Physics. – 1957. – Vol. 28. – № 11. – P. 1011-1017. – DOI 10.1063/1.1722897.

173. **Grebennikov, N. V.** Analytic model of electromagnetic processes in switched reluctance machines 18/15 configuration / N. Grebennikov, A. Kireev // Jour-

nal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10. – № 2. – P. 28-32. – DOI 10.3923/jeasci.2015.28.32.

174. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов. / Л. Сегерлинд. – Москва : Мир, 1979. – 392 с.

175. **Гребенников, Н. В.** Методы компьютерного моделирования электропривода с реактивной индукторной машиной / Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 4(68). – С. 178-184.

176. **Grebennikov, N. V.** Computer model for analyzing electromagnetic processes in switched reluctance machines with strong mutual inter-phase electromagnetic influence / N. Grebennikov, M. Tchavychalov, T. Talakhadze // Proceedings - 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019, Sochi, 08–14 сентября 2019 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. – P. 8867802. – DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867802.

177. **Grebennikov, N. V.** Calculation of core losses in switched reluctance motor with strong mutually coupling between phases / N. Grebennikov // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2019, Sochi, 25–29 March 2019. – Sochi, 2019. – P. 1-6. – DOI 10.1109/ICIEAM.2019.8743038.

178. **Grebennikov, N. V.** Equivalent magnetic circuit for switched reluctance motor with strong mutual coupling between phases / N. Grebennikov, T. Talakhadze, A. Kashuba // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019 - Proceedings : 26, Moscow, 30 января – 02 2019 года. – Moscow, 2019. – P. 1-6. – DOI 10.1109/IWED.2019.8664226.

179. **Grebennikov, N. V.** Development of switched reluctance machines model in MATLAB/Simulink / N. Grebennikov, A. Lebedev // Journal of Engineering and Applied Science. – 2016. – Vol. 11. – № 6. – С. 1434-1438. – DOI 10.36478/jeasci.2016.1434.1438

180. **Grebennikov, N. V.** Control system designed for electromagnetic suspension of high-speed vacuum transportation / N. Grebennikov, A. Kireev, A. Lebedev /

International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12. – № 16. – С. 5485-5487.

181. **Шрейнер, Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УРО РАН, 2000. – 654 с.

182. **Гребенников, Н. В.** Определение потерь в силовой электронике преобразователя вентильно-индукторной машины / Н. В. Гребенников, М. В. Чавычалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2(70). – С. 16-21.

183. Компьютерная модель перспективного маневрового тепловоза с модульной энергетической установкой / А. А. Зарифьян, Н. В. Гребенников, Т. З. Талахадзе [и др.] // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ : Сборник тезисов, Брянск, 03–04 апреля 2018 года. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 2018. – С. 33-36.

184. **Погорелов, Д. Ю.** Введение в моделирование динамики систем тел / Д. Ю. Погорелов. – Брянск : Брянский государственный технический университет, 1997. – 153 с.

185. **Черноус, Д. А.** Динамика твердых тел и их систем : Учебно-методическое пособие / Д. А. Черноус, О. С. Чаганова, И. Е. Кракова ; Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель : Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», 2015. – 115 с. – ISBN 978-985-554-388-7.

186. **Погорелов, Д. Ю.** Моделирование динамики монорельсовых экипажей с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» / Д. Ю. Погорелов, Г. В. Михеев, А. Н. Родиков // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : Сборник трудов. В 4-х томах, Уфа, 19–24 августа 2019 года. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. – С. 490-492.

187. Программный комплекс «Универсальный механизм» : официальный сайт. – Брянск. – URL: <http://www.umlub.ru> (дата обращения: 02.03.2022 г.).

188. **Харченко, П. А.** Разработка компьютерной модели пассажирского поезда на основе данных современных средств регистрации параметров движения / П. А. Харченко, Н. В. Гребенников // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2(62). – С. 38-46.

189. **Гребенников, Н. В.** Электрическая передача мощности с вентильно-индукторными машинами / Н. В. Гребенников // Труды международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» : В 3 частях – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 171-172.

190. Разработка структурно-энергетической модели и проведение исследований процессов преобразования энергии : отчет о НИР (промежуточ.) / ЗАО «НТЦ «ПРИВОД-Н» ; рук. Киреев А.В. ; исполн.: Лебедев А. В. [и др.]. – Новочеркасск, 2015. – 103 с.

191. **Киреев, А.В.** Испытания макета электромеханической трансмиссии с реактивными индукторными электрическими машинами / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников // Новые задачи технических наук и пути их решения : сборник статей международной научно-практической конференции, Пермь, 10 ноября 2016 года. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью «Аэтерна», 2016. – С. 77-80.

192. Протокол испытания по пункту № 4.5 Программы и методики испытаний ПМ-85-2016 ПМ : отчет о НИР (промежуточ.) / ЗАО «НТЦ «ПРИВОД-Н» ; рук. Киреев А.В. ; исполн.: Лебедев А. В. [и др.]. – Новочеркасск, 2016. – 179 с.

193. Протокол испытания по пункту № 4.6 Программы и методики испытаний ПМ-85-2016 ПМ : отчет о НИР (промежуточ.) / ЗАО «НТЦ «ПРИВОД-Н» ; рук. Киреев А.В. ; исполн.: Лебедев А. В. [и др.]. – Новочеркасск, 2016. – 179 с.

194. **Гребенников, Н. В.** Методология проектирования перспективного подвижного состава / Н. В. Гребенников, А. А. Андрющенко ; Ростовский государ-

ственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет путей сообщения, 2019. – 135 с. – ISBN 9785888148495.

195. **ГОСТ Р 54413-2011.** Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE) : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 сентября 2011 г. № 331-ст : введен впервые : дата введения 2012-06-01 / разработан ГОУВПО «МЭИ (ТУ)». – Москва : Стандартинформ, 2012. – 20 с.

196. The rotor initial position determination of the hi-speed switch-reluctance electrical generator for the steam-microturbine / P. G. Kolpakhchyan, V. I. Parshukov, V. V. Kopitza [et al.] // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 554. – P. 628-638. – DOI 10.1007/978-3-030-14907-9\_61.

197. **Grebennikov, N.** Reactive inductor machines on transport / N. Grebennikov, A. Kireev // *Journal of Physics Conference Series*. – 2021. – Vol. 2021. – № 2131. – P. 1-8. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/2/022043.

198. **Grebennikov, N. V.** Version of switched reluctance generator rotor at a fixed configuration of stator / N. Grebennikov, A. Kireev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 9. – № 10. – P. 396-399. – DOI 10.3923/jeasci.2014.396.399.

199. **Grebennikov, N. V.** Versions of switched reluctance generator design at a constant stator configuration / N. V. Grebennikov, A. V. Kireev // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. – 2015. – Vol. 6. – № 1. – P. 65-69. – DOI 10.11591/ijpeds.v6.i1.pp65-69.

200. **Grebennikov, N. V.** Loss detection in converter power electronics of a switched reluctance machine / N. Grebennikov, A. Lebedev // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13. – № 21. – P. 8935-8938. – DOI 10.3923/jeasci.2018.8935.8938.

201. Сравнение энергетических характеристик вентиляно-индукторного и асинхронного электроприводов мощностью 15 кВт / С. А. Пахомин, Д. В. Крайнов, Ф. А. Реднов [и др.] // Электричество. – 2017. – № 1. – С. 44-47.

202. Патент № 2529306 С1 Российская Федерация, МПК В60L 11/08. Электромеханическая трансмиссия : № 2013105359/11 : заявл. 07.02.2013 : опубликовано 27.09.2014 / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников, Г. Н. Кононов [и др.] – 8 с.

203. Патент на полезную модель № 133059 U1 Российская Федерация, МПК В60L 11/08. Схема электрической передачи мощности (варианты) : № 2013115778/11 : заявл. 08.04.2013 : опубликовано 10.10.2013 / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников, Г. Н. Кононов [и др.] – 14 с.

204. Патент на полезную модель № 161668 U1 Российская Федерация, МПК В60L 11/08, В60L 11/12. Устройство для передачи электрической энергии к электромеханической трансмиссии транспортного средства : № 2015115031/02 : заявл. 21.04.2015 : опубликовано 27.04.2016 / А. В. Киреев, Н. В. Гребенников, Г. Н. Кононов, Н. М. Кожемяка – 7 с.

205. Флоренцев, С.Н. Модернизация маневровых тепловозов с заменой гидропередачи на электромеханическую трансмиссию / С.Н. Флоренцев // IX Международная конференция «Элмаш-2018. Электроэнергетика и электротехника. Проблемы и перспективы», 2018. – С. 1-6.

206. ООО «Русэлпром» : официальный сайт. – Москва. – URL: <https://www.ruselprom.ru> (дата обращения: 02.03.2022).

207. ООО «ПромЭлКом» : официальный сайт. – Химки. – URL: <http://promelcom.com> (дата обращения: 02.03.2022).

208. ПРИВОД-Н : официальный сайт. – Новочеркасск. – URL: <http://privod-n.ru> (дата обращения: 02.03.2022).

209. Киреев, А. В. Создание бесколлекторного тягового индукторного привода маневрового тепловоза / А. В. Киреев, Н. М. Кожемяка, Н. В. Гребенников // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2021. – № 4(56). – С. 38-44.



210. **Киреев, А. В.** Модернизация маневровых тепловозов ТГМ6А: повышение топливной экономичности / А. В. Киреев, Н. М. Кожемяка, Н. В. Гребенников // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 4(60). – С. 56-60.

211. ТЭМП 1тт – первый маневровый тепловоз для предприятий промышленного железнодорожного транспорта // РЖД-Партнер. – 2022. – № 24(484).

212. Разработки «Русэлпром» успешно прошли ходовые испытания в составе тепловоза ТЭМП. – Москва. – URL: <https://www.elec.ru/news/2022/10/14/elektromekhanicheskaja-transmissija-sovmestnoj-raz.html?ysclid=lfq87d8za894475734> (дата обращения: 10.03.2023).

**Приложение А.**  
**Акты внедрения**  
**результатов диссертационного исследования**  
**(справочное)**

УТВЕРЖДАЮ  
 проректор по научной работе  
 ФГБОУ ВО РГУПС  
 д.т.н., профессор

 А.Н. Гуда  
 «16»  2022 г.



### АКТ

внедрения результатов диссертационной работы  
 на соискание ученой степени доктора технических наук  
 Гребенникова Николая Вячеславовича

Комиссия в составе декана Электромеханического факультета д.т.н., профессора И.А. Яицкова, директора научно-исследовательской части РГУПС к.т.н., доцента В.Н. Носкова, заведующего кафедрой «Тяговый подвижной состав» к.т.н., доцента А.Е. Богославского, заведующего кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» к.т.н., доцента О.А. Ворона, составила настоящий акт в том, что методы оценки энергетической эффективности процессов преобразования энергии и комплексная компьютерная модель автономного локомотива, разработанные Гребенниковым Н.В. в диссертационной работе, использовались:

- в научно-исследовательской деятельности при выполнении проектов по грантам РФФИ № 16-38-00566 от «26» января 2016 г. и РФФИ № 18-79-00130/360 от «03» августа 2018 г;

- в образовательном процессе для подготовки обучающихся по специальности 23.05.03 - «Подвижной состав железных дорог» (всех специализаций) и магистрантов направления 15.04.01 «Машиностроение» (Моделирование и проектирование подвижного состава железных дорог), а также для аспирантов и научных работников, что способствует качественной подготовке выпускников с учетом современных достижений в науке и технике.

Председатель комиссии  
 Декан Электромеханического факультета  
 д.т.н., профессор



И.А. Яицков

Члены комиссии  
 Директор НИЧ РГУПС  
 к.т.н., доцент



В.Н. Носков

Заведующий кафедрой  
 «Тяговый подвижной состав»  
 к.т.н., доцент



А.Е. Богославский

Заведующий кафедрой  
 «Вагоны и вагонное хозяйство»  
 к.т.н., доцент



О.А. Ворон



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ


Басманный тупик, 6а, строение 4, г.Москва, 105064,  
Тел.: (499) 262-50-09, факс: (499) 262-13-56, E-mail: info-ct@center.rzd.ru, www.rzd.ru

29.04.2022 г.

№ 986

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального  
директора ОАО «РЖД»-  
начальник дирекции тяги

 О.С. Валинский

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
Гребенникова Николая Вячеславовича  
на тему «Научные основы повышения энергетической эффективности автономных локомотивов с электрической передачей мощности»

Комиссия в составе:

председатель – О.С. Валинский – заместитель генерального директора ОАО «РЖД»-  
начальник Дирекции тяги,

члены комиссии – О.В. Чикиркин – главный инженер Дирекции тяги; Д.Н. Хомченко  
начальник технической службы Дирекции тяги; А.М. Лубягов – заместитель начальника дирекции (по планированию и контролю ремонта локомотивов),

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Гребенникова Николая Вячеславовича на тему: «Научные основы повышения энергетической эффективности автономных локомотивов с электрической передачей мощности», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в производственной деятельности ОАО «РЖД» при формировании концепции перспективного тягового подвижного состава в виде технических требований на разработку тепловозов с двух-дизельной силовой установкой. Использование результатов, полученных автором в диссертационной работе, позволило конкретизировать технические требования к перспективным локомотивам в части оценки уровня эффективности эксплуатации.

Главный инженер Дирекции тяги ОАО «РЖД»



О.В. Чикиркин

Начальник технической службы Дирекции тяги



Д.Н. Хомченко

Заместитель начальника дирекции  
(по планированию и контролю  
ремонта локомотивов)



А.М. Лубягов





# НТЦ «ПРИВОД-Н»

Акционерное общество «Научно-технический центр «ПРИВОД-Н» (АО «НТЦ «ПРИВОД-Н»)  
Кривошлыкова ул., д. 4а, г. Новочеркасск, Ростовская область, 346428, телефон/факс: +7-(8635)-22-29-17,  
e-mail: privod-n@privod-n.ru, ОКПО 38413012, ОГРН 1126183001427, ИНН/КПП 6150069362/615001001



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «НТЦ «ПРИВОД-Н»,  
к.т.н., доцент

 А. В. Киреев  
« 03 » сентября 2022 г.

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
Гребенникова Николая Вячеславовича

Настоящий акт составлен в том, что разработанные в докторской диссертационной работе Н.В. Гребенникова методология оценки энергетической эффективности эксплуатации локомотивов и комплексная компьютерная модель локомотива, внедрены в АО «НТЦ «ПРИВОД-Н» являющимся членом НП «Объединение производителей железнодорожной техники» и представляют большой научный и практический интерес, поскольку постоянно ведутся работы по совершенствованию методов проектирования и исследования тягового и вспомогательного электроприводов на основе бесколлекторных двигателей и генераторов, современных энергосберегающих компонентов, технологий для подвижного состава железных дорог с использованием компьютерных моделей с включением их в общую систему автоматического проектирования.

Автор принимал личное участие в НИР и НИОКР по разработке новых энергоэффективных комплектов тягового и вспомогательного оборудования, предназначенного для модернизации маневровых локомотивов, а также при выполнении научных исследований в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.576.21.0036 «Разработка научно-технических решений для создания энергосберегающей электрической передачи мощности транспортных средств с реактивными индукторными электрическими машинами» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным

направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Использование предложенных методов анализа энергетической эффективности тягового оборудования совместно с компьютерной моделью позволило уменьшить затраты на НИОКР и сроки создания энергоэффективных комплектов тягового электрооборудования передач мощности за счет исключения необходимости изготовления макетов и опытных образцов и сокращения объема физических экспериментов.

Директор НИР и ЭР –  
технический директор  
АО «НТЦ «ПРИВОД-Н»,  
к.т.н.

Н.М. Кожемяка

Ученый секретарь  
научно-технического совета  
АО «НТЦ «ПРИВОД-Н»,  
к.т.н.

А.С. Бурдюгов

УТВЕРЖДАЮ:

Главный специалист

ЕВРАЗ НТМК по транспорту

В.С. Полюхович

2022 г.



**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы  
на соискание ученой степени доктора технических наук  
Гребенникова Николая Вячеславовича

Результаты диссертационной работы Гребенникова Николая Вячеславовича «Научные основы повышения энергетической эффективности автономных локомотивов с электрической передачей мощности» были использованы при разработке электрооборудования для комплекта тягового привода на базе ТРИД-320, предназначенного для варианта модернизации тягового привода маневрового тепловоза серии ТГМ6А в виде:

- методов повышения и оценки энергетической эффективности режимов работы тягового привода локомотива, применение которых позволило реализовать высокие тягово-энергетические характеристики модернизированного тепловоза ТЭМП-1тг;

- комплексной компьютерной модели автономного локомотива с модульной структурой электрической передачи мощности, позволяющей проводить исследования режимов работы электрического оборудования тягового привода локомотива и практически произвести отладку алгоритмов управления тяговым приводом модернизированного тепловоза ТЭМП-1тг в процессе его рабочих испытаний.

Технический директор  
АО «НТЦ «ПРИВОД-Н»,  
к.т.н.

Н.М. Кожемяка