

РОСЖЕЛДОР

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

*На правах рукописи*

**ТАЛАХАДЗЕ Темур Зурабович**

**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

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Зарифьян Александр Александрович

Ростов-на-Дону – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1. Состояние вопроса и постановка задачи исследования</b> ....	14
1.1 Введение .....	14
1.2 Основные направления повышения энергетической эффективности, функциональности и улучшению тягово-энергетических характеристик автономного ТПС .....	15
1.2.1 Силовая энергетическая установка .....	16
1.2.2 Тяговый электропривод (электрическая передача мощности) ....	20
1.2.3 Специальное оборудование и системы управления .....	22
1.3 Участки обращения автономного тягового подвижного состава на Южном полигоне ОАО «РЖД» .....	23
1.4 Общая характеристика тягового подвижного состава на Южном полигоне .....	27
1.5 Современные методы получения объективных данных для оценки энергетической эффективности локомотивов в эксплуатации .	31
1.6 Постановка цели и задач исследования .....	32
1.7 Заключение. Выводы по главе 1 .....	34
<b>Глава 2. Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых магистральных тепловозов</b> .....	36
2.1 Введение .....	36
2.2 Грузовой магистральный тепловоз 2ТЭ25КМ .....	36
2.3 Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов путем обработки записей МПСУ-ТП .....	38
2.4 Параметры поездок на участках эксплуатации грузовых магистральных тепловозов 2ТЭ25КМ в условиях Южного полигона ..	42
2.4.1 Показатели энергетической эффективности на участке «Минеральные Воды – Прохладная» .....	46
2.4.2 Показатели энергетической эффективности на участке «Астрахань-2 – Артезиан» .....	55
2.4.3 Показатели энергетической эффективности на участке «Разъезд 9 км – Железный Рог» .....	69
2.5 Заключение. Выводы по главе 2 .....	78

<b>Глава 3. Нахождение полезной работы, совершенной локомотивом с поосным регулированием силы тяги при ведении поезда . . . . .</b>	<b>80</b>
3.1 Введение . . . . .	80
3.2 Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги . .	80
3.3 Соотношения теории локомотивной тяги . . . . .	81
3.4 Дифференциальное уравнение движения поезда . . . . .	83
3.5 Баланс сил в режиме тяги . . . . .	86
3.6 Баланс мощностей в режиме тяги . . . . .	88
3.7 Энергетический баланс в режиме тяги . . . . .	89
3.8 Пример расчета с помощью предложенного метода . . . . .	90
3.9 Заключение. Выводы по главе 3 . . . . .	94
<b>Глава 4. Повышение энергетической эффективности автономной тяги путем перехода к модульным силовым энергетическим установкам . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1 Введение . . . . .	95
4.2 Основные элементы тяговой системы грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ и показатели ее энергетической эффективности . . . . .	96
4.3 Повышение показателей энергоэффективности тепловоза путем перехода к модульной силовой установке . . . . .	102
4.3.1 Принципиальная схема силовой установки, имеющей модульную структуру . . . . .	102
4.3.2 Тяговый электропривод (электрическая передача мощности) . . . .	104
4.3.3 Прототип дизеля для модульной СЭУ . . . . .	105
4.3.4 Прототип генератора для модульной СЭУ . . . . .	107
4.4 Сравнительный анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности и результатов компьютерного моделирования . . . . .	110
4.5 Сопоставление показателей моторесурса . . . . .	114
4.6 Заключение и выводы по главе 4 . . . . .	117
<b>Глава 5. Перспективная силовая установка локомотива на основе высокооборотных газовых микротурбин . . . . .</b>	<b>119</b>
5.1 Введение . . . . .	119
5.2 Конструкция газотурбовозов . . . . .	120
5.3 Предложения по использованию газовых микротурбин в качестве источника энергии для автономного ТПС . . . . .	122

5.4	Предлагаемые технические решения по применению микрогазотурбинных установок .....	124
5.4.1	Выбор типа ВЭГ .....	126
5.4.2	Прототип высокооборотного электрогенератора .....	128
5.4.3	Система управления и формирования выходного напряжения ВЭГ .....	132
5.4.4	Анализ электромагнитных процессов в высокооборотном электрогенераторе .....	136
5.5	Заключение и выводы по главе 5 .....	140
	<b>Заключение. Основные выводы</b> .....	142
	<b>Список литературы</b> .....	144
	<b>Приложение</b> .....	157

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Приоритетным направлением стратегических программ по развитию железнодорожного транспорта является проектирование и внедрение в эксплуатацию нового подвижного состава, отличающегося высокими показателями энергетической эффективности, а также модернизация существующего эксплуатируемого парка. Кроме того, важным направлением в деятельности компании ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») является постоянное повышение эффективности перевозочного процесса в целом, что выражается как в снижении расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), так и в экономии средств на их приобретение.

Это обуславливается стратегией развития компании ОАО «РЖД», а также Федеральным законом № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности ...», который устанавливает, что «энергетическая эффективность – это характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта». Данный ФЗ распространяется на деятельность, связанную с использованием ТЭР, а железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей ТЭР в Российской Федерации, расходуя около 5% электроэнергии и почти 11% дизельного топлива, причем основная доля расхода ТЭР компанией ОАО «РЖД» приходится на тягу поездов.

В статье 14, ч. 4 Федерального закона указывается, что значения целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности должны отражать, в том числе, увеличение количества транспортных средств, высокоэкономичных в части использования моторного топлива и электрической энергии.

Таким образом, чтобы успешно и эффективно осуществлять перевозки по железным дорогам России, необходимо не только повышать массу поездов и пропорционально увеличивать число движущих осей и мощность локомотивов, но и решить

ряд научно-технических задач, направленных на улучшение их показателей энергетической эффективности.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблемами повышения энергетической эффективности и улучшения тягово-энергетических показателей тягового подвижного состава (ТПС) занимались многие ученые, отметим здесь работы В.Н. Балабина, А.Ю. Балакина, Д.И. Петракова, А.М. Евстафьева, А.В. Грищенко, А.С. Космодамианского, Е.Е. Коссова, В.С. Коссова, Ю.В. Бабкова, К.С. Перфильева, Г.Ф. Кашникова, В.А. Соломина, С.Я. Френкеля, В.А. Кручека, В.В. Кручека, Д.И. Курилкина, С.М. Овчаренко, С.Г. Шантаренко, П.В. Шепелина, Д.Я. Носырева, Я.А. Новачука, А.А. Зарифьяна (мл), А.А. Андрющенко, П.Г. Колпахчьяна, Н.В. Гребенникова, К.К. Кима, И.К. Лакина, В.В. Грачева, В.В. Фурмана, А.И. Володина, В.А. Гапановича, Я.Ю. Магнитского, Д.А. Бычкова, В.В. Асабина, В.Н. Игина и др.

**Целью работы** является повышение энергетической эффективности автономных грузовых магистральных локомотивов (АГМЛ) с электрической передачей мощности и улучшение их тягово-энергетических показателей путем исследования, разработки и последующего применения модульных силовых энергетических установок (СЭУ), основанных на принципе приведения генерируемой мощности в соответствие с мощностью, требуемой на тягу поезда.

**Для достижения цели необходимо поставить и решить следующие задачи:**

– Рассмотреть участки обращения локомотивов в условиях Северо-Кавказской железной дороги, входящей в состав Южного полигона ОАО «РЖД». Дать общую характеристику локомотивов, эксплуатируемых на Южном полигоне. Провести анализ основных направлений повышения энергетической эффективности и функциональности локомотивов.

– Получить характеристики энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения.

– Определить качественные и количественные результаты обработки массивов записей бортовых регистраторов, которые позволили выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – коэффициент использования мощности (КИМ) и коэффициент полезного действия (КПД) тепловоза.

– Получить зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребляемой энергии от КИМ в различных режимах движения.

– Разработать расчетный метод, позволяющий находить полезную работу, совершаемую АГМЛ с электрической передачей мощности и поосным регулированием силы тяги в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги. Этот метод положен в основу компьютерной модели.

– Предложить способ повышения энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствие с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда, путем отключения/подключения избыточных модулей.

– Обосновать модульную структуру силовой энергетической установки АГМЛ, позволяющую реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности. Разработана компьютерная модель.

– Получить и обосновать количественные оценки экономии дизельного топлива в результате применения модульной структуры СЭУ.

– Выполнить сравнительный анализ моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, показать, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается.

– Сформулировать направления дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по внедрению СЭУ нового типа (энергетического кластера на основе газовых микротурбин) на автономном ТПС.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе используются методы: статистической обработки больших массивов экспериментальных данных (записи МПСУ-ТП); теории локомотивной тяги (составление энергетического баланса и метода нахождения полезной работы, совершенной локомотивом с поосным регулированием силы тяги при ведении поезда); структурного анализа (рассмотрение возможных схем исполнения модульных СЭУ) и имитационного компьютерного моделирования (нахождение полезной работы на тягу поезда).

**Достоверность полученных результатов** обеспечена корректностью формулировок математических задач и моделей, адекватностью примененных методов и специализированных программных комплексов, и подтверждается сопоставлением результатов, полученных путем моделирования, с данными записей МПСУ-ТП. Различие расчетных результатов и экспериментальных данных находится в пределах нескольких процентов, что свидетельствует о достоверности результатов моделирования и позволяет использовать их для оценки энергоэффективности локомотивной тяги.

**Основные научные результаты и положения,** выносимые автором на защиту:

1. Характеристики энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения.

2. Качественные и количественные результаты обработки массивов записей бортовых регистраторов, которые позволили выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности –КИМ и КПД тепловоза.

3. Зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребляемой энергии от КИМ в различных режимах движения.



4. Расчетный метод, позволяющий находить полезную работу, совершаемую АГМЛ с электрической передачей мощности и поосным регулированием силы тяги в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги.

5. Способ повышения энергетической эффективности за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствие с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда, путем отключения/подключения избыточных модулей.

6. Модульная структура силовой энергетической установки АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности.

7. Количественные оценки экономии дизельного топлива (до 20 %) в результате применения модульной структуры СЭУ.

8. Результаты сравнительного анализа моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, где показано, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается (увеличивается до 25 %).

9. Направления дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по внедрению СЭУ нового типа (энергетического кластера на основе газовых микротурбин) на автономном ТПС.

**Научная новизна диссертации** заключается в разработке и совершенствовании теоретических и практических рекомендаций по повышению энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам.

В диссертации:

1. Получены характеристики энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения.

2. Получены качественные и количественные результаты обработки массивов записей бортовых регистраторов, которые позволили выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – КИМ и КПД тепловоза.

3. Получены зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребляемой энергии от КИМ в различных режимах движения.

4. Разработан расчетный метод, позволяющий находить полезную работу, совершаемую АГМЛ с электрической передачей мощности и поосным регулированием силы тяги в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги. Этот метод положен в основу компьютерной модели.

5. Предложен способ повышения энергетической эффективности за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствие с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда, путем отключения/подключения избыточных модулей.

6. Обоснована модульная структура силовой энергетической установки АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности. Разработана компьютерная модель.

7. Получены и обоснованы количественные оценки экономии дизельного топлива (до 20 %) в результате применения модульной структуры СЭУ.

8. Выполнен сравнительный анализ моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, показано, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается (увеличивается до 25 %).

9. Сформулированы направления дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по внедрению СЭУ нового типа (энергетического кластера на основе газовых микротурбин) на автономном ТПС.

**Теоретическая значимость** работы состоит, главным образом, в установлении зависимостей, показывающих распределение потребляемой энергии от коэффициента использования мощности магистрального грузового тепловоза в различных условиях движения на Южном полигоне и в разработанном расчетном методе, позволяющим определить полезную работу, совершаемую тепловозом на тягу поезда в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности тепловозной тяги. Получении и обосновании количественных оценок экономии дизельного топлива в результате применения модульной структуры СЭУ и моторесурсу. Выполнении сравнительного анализа моторесурса моноблочной и модульной СЭУ подтверждающего, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается.

**Практическая ценность** заключается в получении значительного экономического эффекта за счет снижения расхода топлива на тягу поезда. Экономия обеспечивается за счет стабилизации мгновенных значений КПД тепловоза при работе с неполной нагрузкой на уровне его номинального значения, имеющего место при полной нагрузке.

Научно-технические предложения по повышению энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, изложенные в диссертационной работе, приняты рядом отечественных предприятий как материал для совершенствования конструкций перспективного автономного ТПС.

Результаты исследования нашли применение в разработках ООО «ТМХ Инжиниринг»; проведении исследований в рамках: гранта Российского научного фонда (РНФ) №18-79-00130 и соглашения № 14.604.21.0174 о субсидировании от 26.09.2017, тема: «Разработка научно-технических решений для создания эффективного высокоскоростного генераторного оборудования для газовой микротурбины» по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации, Федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки в соответствии с приори-

тетными направлениями развития российской науки и техники на 2014 – 2020 годы», уникальный идентификационный код прикладных исследований (проект) – RFMEFI60417X0174; а также в нормативных документах Северо-Кавказской Дирекции тяги. Получены акты внедрения. Также результаты диссертационного исследования были использованы при разработке учебно-методических комплексов для студентов специальностей 23.05.03 Подвижной состав железных дорог, 23.05.05 Эксплуатация железных дорог и 15.04.01 Машиностроение и научно-исследовательской деятельности ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, национальных и отраслевых симпозиумах и конференциях: «Современное развитие науки и техники («Наука-2014, 2015, 2017»)» (г. Ростов н/Д); «Транспорт-2015, 2016, 2017, 2018» (г. Ростов н/Д); «Локомотивы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения» (г. Ростов н/Д, 2016, 2018 г.); «11th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER2016)» (Monte-Carlo (Monaco), 2016 г.); «Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2018»)» (г. Ростов н/Д, 2018 г.); «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ» (г. Брянск, 2018 г.); «X International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS 2018» (Katowice (Poland), г. 2018); «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (г. Москва, 2018 г.); «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век» г. Санкт-Петербург, 2018 г.); «IWED 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives» (Moscow (Russia), 2019 г.); На заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО РГУПС (г. Ростов н/Д); кафедры «Локомотивы и локо-

мотивное хозяйство» ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I (г. Санкт-Петербург).

Материалы диссертационной работы участвовали в конкурсах:

– Всероссийский конкурс научных работ среди студентов и аспирантов по транспортной проблематике, проведен ОУС ОАО «РЖД» в 2016 г. (получен диплом за первое место);

– конкурс Министерства транспорта Российской Федерации «Молодые ученые транспортной отрасли», 2017 г. (получены удостоверение победителя конкурса и медаль).

Работа полностью доложена и обсуждена 16 апреля 2019 г. на заседании кафедры «Тяговый Подвижной Состав» с приглашением сотрудников других кафедр ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

**Публикации.** Основное содержание диссертации и результаты исследования опубликованы в 25 научных работах общим объемом 13,94 п.л., в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 публикации в изданиях, включенных в базу данных Web of Science и Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 107 наименований. Общий объем работы 164 страницы, включая 87 иллюстраций и 11 таблиц.

## Глава 1

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 1.1 Введение

Проблема повышения энергетической эффективности локомотивной тяги, наряду с достижением высоких скоростей в пассажирском движении и увеличением веса грузовых поездов, является одним из основных катализаторов научно-технического прогресса в локомотивостроении.

Понятие «энергетической эффективности» (*energy conversion efficiency*) является синонимом термина «коэффициент полезного действия».

**Коэффициент полезного действия локомотива** – отношение полезной работы, совершаемой локомотивом, к количеству энергии (по топливному эквиваленту), потребленной первичным двигателем автономного ТПС, имеющего собственную СЭУ, или к энергии, полученной из контактной сети в случае неавтономного ТПС. Коэффициент полезного действия локомотива зависит от КПД всех звеньев, участвующих в превращении подводимой энергии в механическую работу в контакте колесо-рельс, а также от расхода энергии на служебные и вспомогательные нужды. Различают КПД локомотива как силовой установки и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива на различных режимах при движении поезда и от расхода ТЭР на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок [1.1].

Проблема повышения энергетической эффективности локомотивной тяги постоянно находится в поле зрения руководства компании ОАО «РЖД», что обусловлено все возрастающей стоимостью ТЭР. Так железнодорожный транспорт является одним из крупнейших потребителей ТЭР в Российской Федерации, расходуя около 5 % электроэнергии производимой в стране и почти 11 % от общего расхода дизельного топлива, причем основная доля расхода ТЭР в компании ОАО «РЖД» приходится на тягу поездов [1.2]. Реализуемые компанией мероприятия в

рамках таких программ как «Энергетическая стратегия компании на период до 2020 года» позволили снизить удельный расход энергоресурсов на тягу поездов на 3,1 %, однако этого недостаточно и уже в рамках «Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года» [1.3] предполагается снизить удельный расход электроэнергии на 2,9 %, а дизельного топлива на 11,1 % и это на фоне увеличения объемов перевозок на 41 %. В связи с этим, проблема повышения энергетической эффективности перевозочного процесса в целом и ТПС в частности является очень актуальной.

## **1.2 Основные направления повышения энергетической эффективности, функциональности и улучшению тягово-энергетических характеристик автономного ТПС**

Проблемами повышения энергетической эффективности и улучшения тягово-энергетических показателей тягового подвижного состава занимались многие ученые, отметим здесь работы В.Н. Балабина, А.Ю. Балакина, Д.И. Петракова, А.М. Евстафьева, А.В. Грищенко, А.С. Космодамианского, Е.Е. Коссова, В.С. Коссова, Ю.В. Бабкова, К.С. Перфильева, Г.Ф. Кашникова, В.А. Соломина, С.Я. Френкеля, В.А. Кручека, В.В. Кручека, Д.И. Курилкина, С.М. Овчаренко, С.Г. Шантаренко, П.В. Шепелина, Д.Я. Носырева, Я.А. Новачука, А.А. Зарифьяна (мл), А.А. Андрющенко, П.Г. Колпахчяна, Н.В. Гребенникова, К.К. Кима, И.К. Лакина, В.В. Грачева, В.В. Фурмана, А.И. Володина, В.А. Гапановича, Я.Ю. Магнитского, Д.А. Бычкова, В.В. Асабина, В.Н. Игина и др.

На основе анализа литературных источников сформулируем основные направления по повышению энергетической эффективности, функциональности и улучшению тягово-энергетических характеристик автономного ТПС. Как было сказано ранее, автономный ТПС имеет два уровня преобразования энергии и, в соответствии с этим, направления повышения энергетической эффективности автономного ТПС будут так же разделены, по принципу оказания влияния на верхний и нижний уровни соответственно.

### *1.2.1 Силовая энергетическая установка*

Самой распространенной СЭУ автономного локомотива является классическая моноблочная ДГУ, имеющая в составе дизельный двигатель разработки 50-х...60-х годов прошлого века, что характерно как для магистральных тепловозов, так и для маневровых. Неравномерность нагрузки, обусловленная спецификой работы тепловоза, приводит к работе ДГУ на переходных – неустановившихся режимах. В связи с этим КПД ДГУ крайне невысок и задача его повышения, в основном, связана с применением различных методов, которые требуют, главным образом, повышения эффективности процессов, протекающих в дизельном двигателе при его работе – рабочего процесса дизеля и направлены на обеспечение дизельного двигателя необходимым составом, количеством и качеством топливо-воздушной смеси во всех режимах эксплуатации. Эти методы направлены на совершенствование систем топливоподачи, воздухообмена и газообмена.

Применение микропроцессорных технологий в системах управления и топливоподачи, уже сейчас, дают возможность приблизить эффективность их применения к максимально возможным значениям и в перспективе не может привести к существенному улучшению показателей работы дизеля [1.4 – 1.6].

Повышение эффективности воздухообмена и газообмена связано с возможностью регулирования систем газораспределения [1.7, 1.8]. В перспективе данное решение не только даст возможность существенного улучшения показателей работы дизеля в широком диапазоне режимов работы, но и позволит отключать часть работающих цилиндров [1.9]. Реализации способа связана с разработкой новых видов привода механизмов газораспределения, таких как: гидравлический, электромагнитный и электрогидравлический. На данном этапе функция отключения части работающих цилиндров частично реализована. Так на современных дизельных двигателях на холостом ходу выводится из работы часть цилиндров. Отключение цилиндров под нагрузкой – в режимах, когда совершается полезная работа, имеет ряд трудностей, связанных с балансом



дизельного двигателя и вопросами надежности, а также требует новых технических решений в приводах механизмов газораспределения.

Вопросы повышения КПД дизельного двигателя за счет улучшения показателей рабочего процесса являются крайне важными, но, в основном, они никак не могут повлиять на низкий КИМ дизель-генераторной установки в процессе эксплуатации тепловоза (за исключением случая с выводом части цилиндров из работы), об этом будет подробно сказано в главе 2. Первые попытки регулирования величины доступной мощности с целью увеличения КИМ предпринимались еще на тепловозах 2ТЭ116, когда в процессе движения осуществлялось асинхронное нагружение секций [1.10, 1.11].

Также добиться повышения КИМ силовой энергетической установки тепловоза возможно за счет замены моноблочной СЭУ, состоящей из одного мощного дизельного двигателя, силовой установкой, включающей несколько двигателей меньшей мощности, совокупно реализующими эквивалентную мощность. Это возможно за счет применения в составе СЭУ современных высокооборотных дизельных двигателей с частотой вращения 1500 – 1800 об/мин [1.12]. Такой опыт уже имеется, так на маневровых тепловозах серии ТЭМ33 [1.13], устанавливаются две ДГУ, а на модернизированных тепловозах серии ЧМЭЗ три дизель-генератора. Несколько ДГУ устанавливаются для регулирования величины доступной мощности – отключение/подключение в работу ДГУ происходит по мере необходимости в соответствующем уровне мощности [1.14, 1.15].

На магистральных тепловозах опыт применения СЭУ, состоящих из нескольких ДГУ, также имеется – магистральный многодизельный тепловоз Traxx DE ME компании Bombardier, который имеет четыре ДГУ с дизельными двигателями Caterpillar C18 мощностью 560 кВт каждый, и общей мощностью 2252 кВт [1.16]. Японский магистральный тепловоз DF200 компании JR Freight имеет два высокооборотных дизельных двигателя (1800 об/мин) [1.17].

Из сказанного видно, что в настоящее время, возможность применения многодизельных СЭУ обусловлена использованием в их конструкции современных

высокооборотных дизельных двигателей мощностью до 1000 кВт. Как известно с повышением частоты вращения относительная масса и габариты дизеля существенно уменьшаются (рисунок 1.1) [1.18].

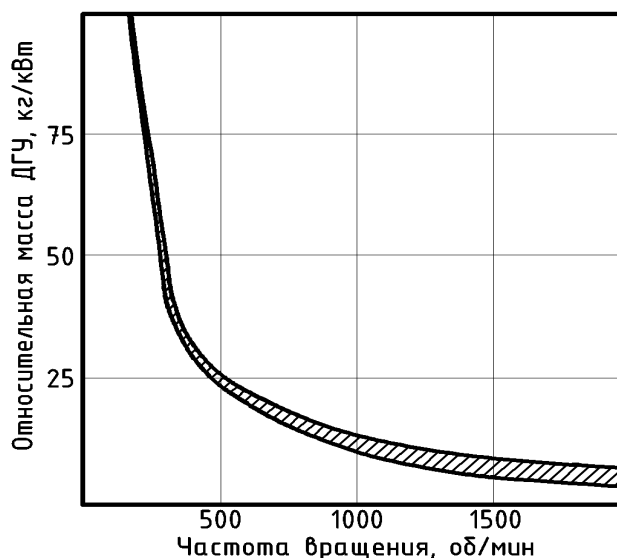


Рисунок 1.1 – Зависимость относительной массы дизеля от частоты вращения

Каждая ДГУ является самостоятельным агрегатом, а система управления позволяет отключать/подключать ДГУ в зависимости от требуемой мощности, а также выравнивать моторесурс.

Отметим, что данная тенденция вполне аналогична той, которая применяется в алгоритме дискретно-адаптивного управления энергетической эффективностью электровоза [1.19, 1.20].

Еще одним перспективным способом повышения КПД силовой энергетической установки является применение гибридной СЭУ, благодаря чему обеспечивается снижение потребления топлива и снижение вредных выбросов в атмосферу [1.21]. Термин "гибридная" обозначает СЭУ, которая имеет более одного источника первичной энергии.

Для автономного ТПС (рисунок 1.2) гибридная СЭУ представляет собой систему, состоящую из генерирующей части (модуль I) и накопителя энергии (модуль II) [1.22].

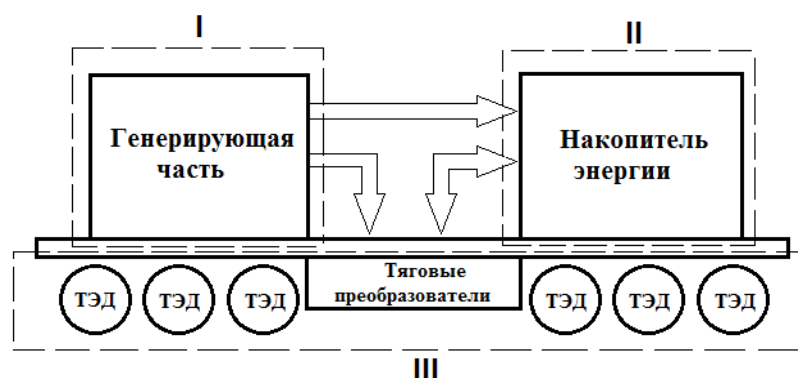


Рисунок 1.2 – Модульная структурная схема гибридного локомотива

Генерирующая часть имеет несколько вариантов исполнения:

- дизельная (газодизельная) установка с генератором;
- многодизельная установка с одним либо с несколькими генераторами;
- газотурбинная установка с генератором (в том числе на основе микро-турбин).

В качестве накопителя энергии применяются:

- электрохимические аккумуляторные батареи;
- супер-конденсаторы;
- их сочетания, так называемые гибридные накопители энергии.

Кроме того, имеется вариант применения сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии (криогенной катушки) [1.23].

Многодвигательный тяговый электропривод (модуль III) включает тяговые преобразователи и электродвигатели т.е. по своему устройству аналогичен тяговому электроприводу электровоза.

При работе такого локомотива энергия от генерирующей части передается тяговым электродвигателям и накопителю энергии, а при торможении происходит процесс рекуперации энергии, которая передается и хранится в накопителе. Но, в настоящее время, развитие гибридных локомотивов сдерживает элементная база, а именно технологии накопления энергии, не позволяющие реализовать весь потенциал данного способа повышения энергетической эффективности [1.24]. Так, в процессе опытной эксплуатации маневровых локомотивов выяснилось, что накопители энергии, которые занимают большой объем и имеют высокую стоимость,

не вполне подтвердили заложенных проектных характеристик. Что касается магистрального движения, то применение гибридного тягового привода представляется весьма проблематичным так как, по предварительным расчетам, размещение накопителей энергии необходимой мощности потребовало бы нескольких вагонов.

Так же рассматривается возможность использования альтернативных видов топлива вместо дизельного топлива. В этой связи актуальным является применение природного газа в качестве моторного топлива локомотивов [1.25]. Так как газ имеет преимущества по сравнению с дизельным топливом в плане стоимости, а также уровне содержания загрязняющих веществ в продуктах сгорания. В данной области имеется два направления – перевод дизельных двигателей на газодизельный цикл работы [1.26], а также применение на автономном ТПС газовых турбин в качестве первичного двигателя в составе СЭУ [1.27]. Перевод дизельных двигателей на работу на природном газе не новый, достаточно хорошо изучен и имеет целый ряд сложностей.

В течение длительного времени, рассматривается вопрос применения газовых турбин на автономном ТПС. В РФ построены и эксплуатируются газотурбовозы. Имеющийся опыт эксплуатации показывает, что в процессе работы у газотурбовоза имеются проблемы, аналогичные тем, которые возникают у магистральных тепловозов с моноблочной структурой СЭУ. Они связаны с низким КПД СЭУ при работе с частичной нагрузкой, которые вызваны спецификой работы газовой турбины/

### ***1.2.2 Тяговый электропривод (электрическая передача мощности)***

В докладе «Локомотивная тяга: настоящее, перспективы, задачи» (2017 год), заместитель генерального директора – начальник Дирекции тяги О.С. Валинский сформулировал основные технические требования к современным и перспективным локомотивам (тепловозам и электровозам), среди которых:

**– поосное регулирование силы тяги и**

– адаптивное отключение ТЭД в зависимости от нагрузки [1.28].

Наряду с этим, необходимым условием к ТПС нового поколения, является более высокое значение КПД в номинальном режиме, для чего освоен выпуск локомотивов с асинхронным тяговым приводом (АТП) [1.29].

Для нижнего уровня, по сути, представляющего собой тяговый электропривод электровоза, наибольшего улучшения энергоэффективности удастся добиться за счет применения алгоритма дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым электроприводом (поосное энергооптимальное регулирование силы тяги) [1.30], который состоит в том, чтобы в каждый момент времени иметь столько работающих тяговых электродвигателей, сколько нужно для обеспечения мощности, необходимой для ведения поезда, а избыточные ТЭД временно выводить из режима тяги. Применение данного алгоритма возможно только при поосном регулировании силы тяги и позволяет существенно сократить расход энергоресурсов на тягу поезда.

Необходимо отметить, что данное техническое решение реализовано на новом грузовом электровозе переменного тока 2ЭС5С, который был представлен в рамках заседания Совета по взаимодействию ОАО «РЖД» с предприятиями транспортного машиностроения, прошедшего на Брянском машиностроительном заводе 26 июня 2018 г. [1.31], а в настоящее время проходит испытания.

Также необходимо подчеркнуть возможность применения данного алгоритма не только на локомотивах с бесколлекторными ТЭД, но и с тяговыми двигателями постоянного тока. Здесь можно сослаться на практический опыт по отключению части ТЭД на грузовых электровозах 1,5ВЛ80<sup>С</sup> при вождении неполновесных или порожних грузовых поездов, во время опытной эксплуатации на Северо-Кавказской ж.д. Вождение таких поездов осуществлялось на шести ТЭД из двенадцати. А также на опыт эксплуатации электровозов 2ЭС5К, 3ЭС5К и 4ЭС5К «Ермак» на Восточном полигоне с поосным и потележечным выводом ТЭД из тяги, который подтвердил возможность и целесообразность применения алгоритма дискретно-адаптивного управления многодвигательным коллекторным тяговым электроприводом [132, 1.33].

Поскольку на современных тепловозах, таких как 2ТЭ25А и 2ТЭ25КМ, тяговый привод является многодвигательным и имеется возможность поосного регулирования силы тяги, вопрос оперативного отключения / подключения одного или нескольких ТЭД может быть решен системой управления в автоматическом режиме с применением описанного алгоритма.

### ***1.2.3 Специальное оборудование и системы управления***

Реализация предлагаемых способов повышения энергетической эффективности как верхнего, так и нижнего уровней требует, с одной стороны, наличия соответствующего силового оборудования, позволяющего реализовать данные подходы, а с другой стороны, разработки алгоритмов управления и программного обеспечения для надлежащего функционирования тяговой системы локомотива.

Интегрирование данных энергооптимальных алгоритмов управления локомотивом в его штатную систему управления не должно вызвать больших трудностей так как все современные локомотивы оборудованы микропроцессорными системами управления, а их влияние на организацию эксплуатации все возрастает. Это в первую очередь вызвано реализацией программы «Цифровая железная дорога» и концепцией «Умный локомотив» [1.34, 1.35].

В заключение, сформулируем основные направления повышения энергетической эффективности автономного ТПС.

– **По силовой энергетической установке.**

– Модернизация и улучшение характеристик классических СЭУ – дизель-генераторных установок, применяемых на тепловозах: увеличение частоты вращения, переход на систему электронного управления топливоподачей, улучшение рабочего процесса, отключение цилиндров дизельного двигателя.

– Применение на автономных локомотивах СЭУ отличных от «классической»: газовые турбины, газодизели, электрохимические генераторы – топливные ячейки.

- Использование гибридных СЭУ, состоящих из генерирующей части и накопителя энергии.
- Применение на автономном ТПС многодвигательных СЭУ.
- **По тяговому электроприводу.**
- Переход к бесколлекторным ТЭД.
- Поосное регулирование силы тяги.
- Применение дискретно-адаптивного управления тяговым электроприводом.
- **По специальному оборудованию и системам управления.**
- Совершенствование систем управления ТПС – концепция «Умный локомотив».

### **1.3 Участки обращения автономного тягового подвижного состава на Южном полигоне ОАО «РЖД»**

Северо-Кавказская железная дорога располагается на юге Российской Федерации и наряду с четырьмя другими дорогами (Приволжской, Юго-Восточной, Куйбышевской и Южно-Уральской) входит в состав Южного полигона, причем именно на ней расположен центр управления тяговыми ресурсами (ЦУТР). Она характеризуется наличием профилей I–IV типа [1.36].

Грузовое движение как в настоящее время, так и в перспективе ориентировано на экспортные порты Азовского, Черного и Каспийского морей (Азово-Черноморского бассейна). За последние 10 лет выгрузка на припортовых станциях СКЖД выросла более чем на 40 % и превысила в 2017 году 89 млн тонн. В 2018 году положительная динамика также сохраняется. По данным Института экономики и развития транспорта, экспортный поток в направлении портов юга России будет только возрастать [1.37] и к 2025 году увеличится на 50 %, что обуславливается планируемым развитием портов юга РФ. Действует инвестиционный проект РЖД «Развитие и обновление железнодорожной инфраструктуры на подходах к портам Азово-Черноморского бассейна», в первую очередь морского

торгового порта Тамань, а также проект развития транспортных связей с Крымом, чему будет способствовать начало железнодорожного сообщения по мосту через Керченский пролив. В ежегодном послании президента РФ Владимира Владимировича Путина Федеральному собранию России, сделанном в марте 2018 года, говорится о необходимости увеличения пропускной способности железнодорожных подходов к южным экспортным портам более чем в полтора раза – до 131,1 млн тонн, а в перспективе до 2030 года до 143,1 млн тонн, т.е. еще на 9,2 % [1.38].

Все сказанное выше свидетельствует о необходимости повышения массы поездов и пропорционально связанного с этим увеличения числа движущих осей и мощности локомотива. В тоже время, особенностью грузового движения, ориентированного на экспортные порты, является неравномерность нагрузки, связанной с массой составов, идущих в порты и обратно, что наиболее сильно влияет на эффективность перевозочного процесса и ведет к необходимости решения ряда технических задач, направленных на улучшение показателей энергетической эффективности локомотивов.

На территории Северо-Кавказской железной дороги имеются электрифицированные участки, как на переменном, так и на постоянном токе (рисунок 1.3), а также участки тепловозной тяги. Дадим их краткий анализ.

Наиболее загруженные участки электрифицированы на переменном токе – они направлены из центра и востока страны на подходы к Черноморским портам: Лихая – Батайск – Тимашевская – Новороссийск и Волгоград – Сальск – Краснодар – Горячий Ключ, а также Батайск – Тихорецкая – Минеральные Воды – Прохладная – Владикавказ, Кизил Юрт – Махачкала – Дербент.

На таких участках эксплуатируются грузовые электровозы ВЛ80 в/и, начали поступать современные электровозы 2ЭС5 «Скиф».

Имеются участки, электрифицированные на постоянном токе: Белореченская (Горячий Ключ) – Туапсе – Адлер, с последующим выходом на Сухум, а также участок за Дербентом (Дербент – Ялама, на Азербайджанскую железную дорогу). На этих участках эксплуатируются грузовые электровозы 2ЭС4К «Дончак».



Имеются также участки обращения на тепловозной тяге, такие как: Лихая – Морозовская – Максим Горький, Крымская (Разъезд 9 км) – Порт Кавказ (Железный Рог) и далее на Крым по новому железнодорожному мосту, Минеральные Воды – Прохладная – Гудермес – Кизил Юрт – Кизляр – Артезиан – Астрахань-2 (стык с Приволжской железной дорогой).

Имеется ряд малодейственных участков на тепловозной тяге: Кавказская – Светлоград – Буденновск – Георгиевск, Староминская – Ейск, Сальск Батайск и Кавказская – Краснодар.

Основными тепловозами, которые эксплуатируются на участках СКЖД являются 2ТЭ25КМ, 2ТЭ116 в/и и 2ТЭ10 в/и.

Как видно из рисунка 1.1, на станциях Горячий Ключ, Белореченская и Дербент происходит смена рода тока, что требует замены электровоза переменного тока на электровоз постоянного тока или использования двух-системных электровозов типа пассажирского ЭП20 «Олимп» или грузового 2ЭВ120 «Князь Владимир».

На стыках родов тяги (электрическая тяга/тепловозная тяга) находятся станции Лихая, Максим Горький, Сальск, Кавказская, Краснодар, Минеральные Воды, Прохладная, Крымская (Разъезд 9 км), Кизил Юрт.

Отсюда следует, что локомотивы, которые эксплуатируются на участках, имеющих стыки родов тяги, должны иметь эквивалентные тягово-энергетические характеристики. Это позволит не производить переформирование составов, обеспечить равную производительность и пропускную способность.

Добиться этого можно не только за счет лучшей организации движения на участках обращения локомотивов, но также за счет выравнивания тягово-энергетических характеристик подвижного состава, применяемого на стыках, электровозов с одной стороны и тепловозов с другой.



## 1.4 Общая характеристика тягового подвижного состава на Южном полигоне

В предыдущем параграфе было отмечено, что на Южном полигоне эксплуатируется как неавтономный ТПС (электрическая тяга), так и автономный (дизельная тяга).

**Неавтономный ТПС (собственный источник энергии отсутствует).** Питание производится от контактной сети – электровозы. Электровозы имеют в своем составе систему преобразования энергии, в которой электрическая мощность, потребляемая из контактной сети, посредством тягового электропривода (ТЭП), состоящего из тяговых преобразователей (ТП), тяговых электродвигателей (ТЭД) и тяговых редукторов (ТР), преобразуется в механическую мощность в контактах «колесо – рельс» колесных пар.

Характерной особенностью ТЭП является наличие нескольких (от 6-и до 12-ти тяговых электродвигателей), т.е. реализация мощности на тягу осуществляется многодвигательным ТЭП, в составе которого могут быть как коллекторные, так и бесколлекторные ТЭД. В настоящее время на СКЖД эксплуатируются электровозы как с коллекторными ТЭД (ЭП1М, 2ЭС4К «Дончак», ВЛ80 в/и), так и с бесколлекторными (ЭП20 «Олимп», 2ЭС5 «Скиф»).

По роду тока различают электровозы постоянного (2ЭС4К «Дончак») и переменного тока (2ЭС5К «Ермак» и др.), но имеются и двухсистемные электровозы, способные питаться от обоих родов тока (ЭП20 «Олимп»).

*Energy conversion efficiency* – мгновенный коэффициент полезного действия (КПД) электровоза  $\eta_{эл}$  равен отношению мощности электровоза на тягу (его касательной мощности)  $P_T$  к мощности, потребляемой электровозом из контактной сети  $P_{потр}$ :

$$\eta_{эл} = P_T / P_{потр}. \quad (1.1)$$

Формула (1.1) иллюстрируется рисунком 1.4. Здесь не показаны мощность на вспомогательные нужды.

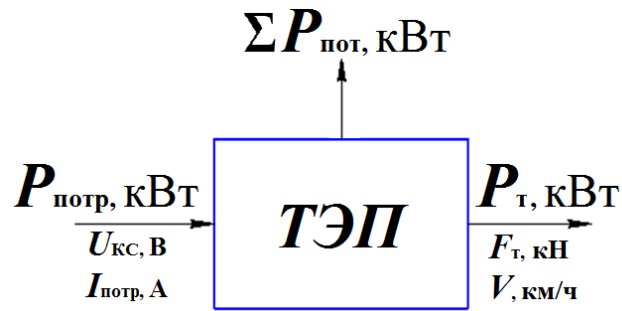


Рисунок 1.4 – Схема преобразования электрической энергии, потребляемой из контактной сети, в полезную работу на тягу:

$P_{\text{потр}}$  – потребляемая мощность,  $P_{\text{т}}$  – мощность на тягу,  $\Sigma P_{\text{пот}}$  – мощность потерь.

КПД тягового электропривода электровоза равен произведению КПД его составляющих: КПД тяговых преобразователей  $\eta_{\text{ТП}}$ , КПД тяговых электродвигателей  $\eta_{\text{ТЭД}}$  и КПД тяговых редукторов  $\eta_{\text{ТР}}$ .

Так как потребленная энергия на стоянках у электровоза незначительна, то КПД тягового электропривода будет в основном определять КПД электровоза. По данным, полученным из бортового регистратора параметров движения электровоза, была построена зависимость его КПД от развиваемой мощности в процессе движения [1.30]. Из этого можно сделать вывод о том, что ТЭП электровоза работает с наивысшим КПД, когда развиваемая им мощность на тягу близка к номинальным значениям и, соответственно, работает с низкой энергетической эффективностью при неполных нагрузках.

**Автономный ТПС (наличие собственной силовой энергетической установки).**

В настоящее время в качестве силовой энергетической установки (СЭУ) автономного ТПС – тепловозов применяется дизель-генераторная установка (ДГУ), затем применяется, как правило, электрическая передача мощности (ЭПМ) для передачи вращающего момента на колесные пары.

Отметим, что по роду выполняемой работы, автономные локомотивы подразделяется на:

а) магистральные, основную часть рабочего времени находящиеся в движении – грузовые и пассажирские локомотивы;

б) маневровые, хозяйственные и промышленные локомотивы, значительную часть времени, совершающие работу на малых нагрузках или вообще простаивающие в ее ожидании.

Остановимся подробнее на конструкции СЭУ современных магистральных тепловозов. Так, например, тепловозы 2ТЭ25А и 2(3)ТЭ25КМ имеют моноблочную ДГУ [1.40, 1.41]. Масса дизеля более 20000 кг, его мощность около 2500 кВт, в то время как, масса синхронного тягового генератора 6000 кг и более. Таким образом, удельная масса ДГУ составляет около 10 кг/кВт. На тепловозе 2ТЭ25А применена ЭПМ переменного тока с асинхронными ТЭД, тогда как на тепловозах 2(3)ТЭ25КМ – ЭПМ постоянного тока с коллекторными ТЭД. На обоих тепловозах предусмотрено поосное регулирование силы тяги.

В РФ построено два опытных газотурбовоза: ГТ1-001 и ГТ1h-002 [1.42, 1.43]. СЭУ обоих состоит из газотурбинного двигателя массой около 12000 кг и мощностью 8300 кВт, а также тягового генератора массой около 13000 кг. На обоих газотурбовозах применяется ЭПМ постоянного тока с коллекторными ТЭД. Удельная масса СЭУ газотурбовоза составляет около 3 кг/кВт.

Помимо основной СЭУ, предназначенной для поездной работы, на ГТ1-001 применяется вспомогательная дизельная установка небольшой мощности, которая используется при малых перемещениях в пределах станции. На ГТ1h-002 вместо вспомогательной ДГУ применяется блок аккумуляторных батарей, который используется для тех же целей.

Мгновенное значение КПД автономного ТПС  $\eta_{\text{авт}}$  равен отношению мощности локомотива на тягу (его касательной мощности)  $P_{\text{т}}$  к мощности, потребляемой локомотивом  $P_{\text{потр}}$ :

$$\eta_{\text{авт}} = P_{\text{т}} / P_{\text{потр}} \quad (1.2)$$

Этот КПД  $\eta_{\text{авт}}$  также можно представить, как произведение КПД силовой энергетической установки  $\eta_{\text{СЭУ}}$ , КПД электрической передачи мощности  $\eta_{\text{ЭПМ}}$  и КПД механического тягового привода  $\eta_{\text{мех}}$ :

$$\eta_{\text{авт}} = \eta_{\text{СЭУ}} \cdot \eta_{\text{ЭПМ}} \cdot \eta_{\text{мех}}, \quad (1.3)$$

Формула (1.3) иллюстрируется рисунком 1.5 [1.43].

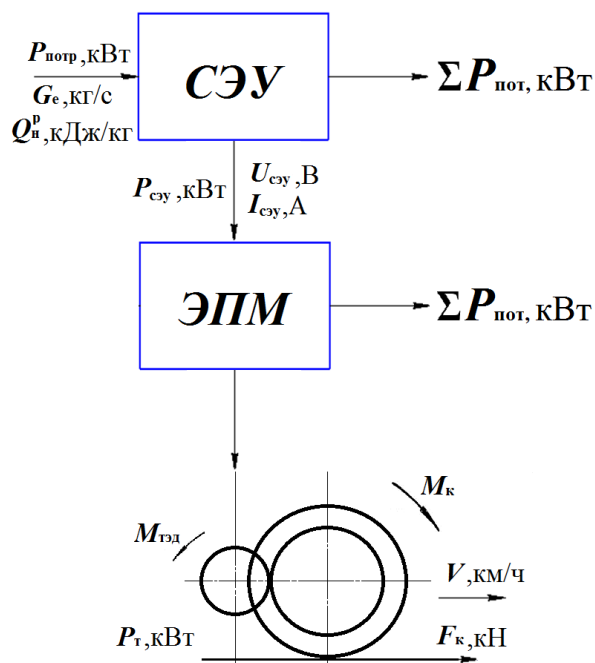


Рисунок 1.5 – Схема процесса преобразования энергии на автономном ТПС

Таким образом, процесс преобразования энергии на автономном ТПС имеет два уровня: верхний уровень – силовая энергетическая установка и нижний уровень – электрическая передача мощности.

Отметим, что ЭПМ тепловоза по своей структуре идентична ТЭП электровоза, если рассматривать тяговый генератор в качестве составной части СЭУ и не относить его к ЭПМ. Исходя из этого, в дальнейшем, для нижнего уровня преобразования энергии, будем использовать понятие тягового электропривода. КПД электрической передачи мощности  $\eta_{ЭПМ}$ , в этом случае будет равен КПД тягового электропривода.

Что касается КПД силовой энергетической установки  $\eta_{СЭУ}$ , то поскольку в настоящее время, моноблочная ДГУ является основным (классическим) вариантом СЭУ, рассматривать КПД будем на ее примере. Согласно литературным источникам и данным, полученным экспериментальным путем [1.44–1.46], зависимость КПД моноблочной ДГУ от развиваемой мощности имеет вид, показанный на рисунке 1.6.

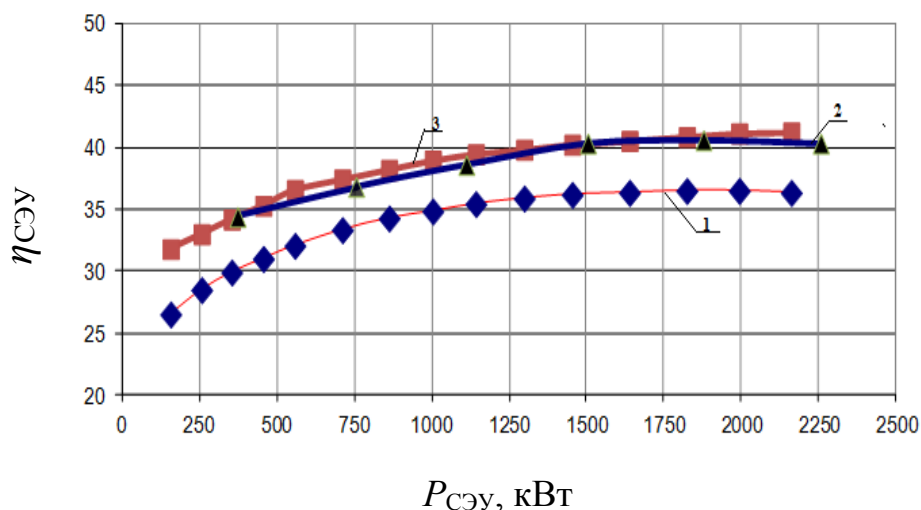


Рисунок 1.6 – Зависимость КПД силовой энергетической установки от развиваемой мощности: 1 – по данным реостатных испытаний [1.46]; 2 – по данным эксплуатации тепловозов [1.45]; 3 – по данным материалов диссертации [1.44];

### 1.5 Современные методы получения объективных данных для оценки энергетической эффективности локомотивов в эксплуатации

До появления бортовых систем регистрации и микропроцессорных систем управления и диагностирования получение объективных данных для оценки энергетической эффективности локомотивов в реальных условиях эксплуатации было возможно только посредством проведения тягово-энергетических испытаний с помощью вагон-лабораторий [1.47].

В настоящее время, применение микропроцессорной техники для управления системами локомотива и их диагностики, а также реализация программы «Умный локомотив» [1.34] позволяет получить информацию о результатах поездок, совершенных локомотивом в реальных условиях эксплуатации. На современном тяговом подвижном составе установлены сертифицированные бортовые приборы и системы, такие как «КЛУБ», РПРТ, РПДА, МСУД, МПСУ-ТП и других [1.48, 1.49], которые имеют функцию регистрации параметров движения. Такие регистраторы в совокупности с измерительными устройствами – датчиками, имеющимися на локомотиве, могут заменить тягово-энергетическую вагон-лабораторию и их данные могут быть использованы для анализа эксплуатацион-

ных показателей энергетической эффективности в реальных условиях эксплуатации.

Исследование показателей энергетической эффективности локомотива в эксплуатации основано на записях мгновенных значений основных параметров движения (скорости, управляющего воздействия, потребления ТЭР и других). Первоначальная обработка массивов данных, полученных из записей поездок осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения [1.50], подробно об этом будет сказано в главе 2.

Помимо экспериментального определения показателей энергетической эффективности локомотивов, основанного на анализе поездок, эти показатели можно получить при помощи теоретических исследований, основанных на методах теории локомотивной тяги [1.51, 1.52], о которых будет подробно сказано в главе 3.

## **1.6 Постановка цели и задач исследования**

С учетом вышесказанного сформулируем цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является повышение энергетической эффективности автономных грузовых магистральных локомотивов с электрической передачей мощности и улучшение их тягово-энергетических показателей путем исследования, разработки и применения модульных силовых энергетических установок, основанных на принципе приведения генерируемой мощности в соответствие с требуемой мощностью на тягу поезда.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие задачи:

– Рассмотреть участки обращения локомотивов в условиях Северо-Кавказской железной дороги, входящей в состав Южного полигона ОАО «РЖД». Дать общую характеристику локомотивов, эксплуатируемых на Южном полигоне. Провести анализ основных направлений повышения энергетической эффективности и функциональности локомотивов.



– Получить характеристики энергетической эффективности АГМЛ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения.

– Определить качественные и количественные результаты обработки массивов записей бортовых регистраторов, которые позволили выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – КИМ и КПД тепловоза.

– Получить зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребляемой энергии от КИМ в различных режимах движения.

– Разработать расчетный метод, позволяющий находить полезную работу, совершаемую АГМЛ с электрической передачей мощности и поосным регулированием силы тяги в реальных условиях движения и тем самым получать объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги. Этот метод положен в основу компьютерной модели.

– Предложить способ повышения энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствие с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда, путем отключения/подключения избыточных модулей.

– Обосновать модульная структура силовой энергетической установки АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности. Разработана компьютерная модель.

– Получить и обосновать количественные оценки экономии дизельного топлива в результате применения модульной структуры СЭУ.

– Выполнить сравнительный анализ моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, показать, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается.

– Сформулировать направления дальнейшего развития научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по внедрению СЭУ нового типа (энергетического кластера на основе газовых микротурбин) на автономном ТПС.

### **1.7 Заключение. Выводы по главе 1**

Перед нами стоит задача на участках автономной тяги повысить эффективность перевозочного процесса за счет улучшения тягово-энергетических характеристик локомотивов (улучшить тяговые свойства и повысить энергетическую эффективность). Сформулируем основные выводы:

1. Рассмотрены участки обращения локомотивов в условиях Северо-Кавказской железной дороги, входящей в состав Южного полигона. Выделены участки тепловозной тяги.

2. Дана общая характеристика локомотивов, работающих на Южном полигоне. В качестве объекта исследования выбран магистральный грузовой тепловоз серии 2ТЭ25КМ с электрической передачей мощности, обеспечивающей поосное регулирование силы тяги.

3. Проведен анализ основных направлений повышения энергетической эффективности и функциональности локомотивов. Из которого видно, что для современных локомотивов, как для электровозов, так и для тепловозов улучшение тягово-энергетических характеристик происходит посредством применения поосного регулирования силы тяги, а также, для электровозов разработан метод повышения энергетической эффективности за счет дискретно-адаптивного управления тяговым электроприводом. Данное суждение подтверждается докладом вице-президента ОАО «РЖД» О.С. Валинского, где отмечаются требования, предъявляемые к современному подвижному составу.

4. Тепловозы, за счет своей автономности, имеют в своем составе СЭУ и улучшение их тягово-энергетических характеристик представляет собой задачу двухуровневой оптимизации. Нижний уровень представляет собой тяговый элек-

троп привод, а верхний – силовую энергетическую установку. Стоит также отметить большую необходимость в их согласованной работе.

5. Для электровозов, тяговый привод которых представляет собой, по сути, нижний уровень, задача оптимизации решена – оба метода реализованы. Данные решения целесообразны и для тепловозов. Так поосное регулирование уже применяется на магистральных и маневровых тепловозах, а дискретно-адаптивное управление ТЭД может быть реализовано.

6. Для тепловозов наиболее остро стоит задача оптимизации верхнего уровня – СЭУ. В настоящее время нет единого подхода к решению данной проблемы.

7. Для тепловозов задача повышения энергетической эффективности является двухуровневой: после того, как число работающих ТЭД приведено в соответствие с нагрузкой, необходимой на тягу поезда (1-й уровень оптимизации), встает вопрос о том, что ДГУ должна обеспечить достаточное питание ТЭП при минимальном потреблении дизельного топлива (2-й уровень оптимизации).

8. Таким образом перед нами стоит задача – провести анализ эксплуатационных показателей грузовых магистральных тепловозов серии 2ТЭ25КМ на вышеупомянутых участках обращения и затем разработать соответствующие рекомендации по повышению показателей энергоэффективности. Анализ необходимо производить на двух уровнях, чтобы выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели

## Глава 2

# АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУЗОВЫХ ТЕПЛОВОЗОВ

### 2.1 Введение

В настоящей главе выполнен анализ показателей энергетической эффективности магистральных грузовых тепловозов 2ТЭ25КМ с ЭПМ переменного тока и поосным регулированием силы тяги в различных условиях эксплуатации, полученных при помощи бортового регистратора, входящего в состав МПСУ-ТП.

Получены графики скорости, силы тяги, управляющего воздействия оператора (набор позиций контроллера машиниста), мощности, а также гистограммы, показывающие распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности локомотива при работе на различных участках Южного полигона (Приволжская и Северо-Кавказская железные дороги).

В результате удалось выделить и оценить вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели – коэффициент использования мощности и коэффициент полезного действия тепловоза.

Материалы настоящей главы опубликованы в [1.24, 1.43, 2.2 – 2.4]

### 2.2 Грузовой магистральный тепловоз 2ТЭ25КМ

Рассмотрим показатели энергетической эффективности грузовых магистральных тепловозов 2ТЭ25КМ [2.1], которые работают на Южном полигоне. Это позволит получить объективную исходную информацию для разработки предложений по совершенствованию силовой энергетической установки и электрической передачи мощности тепловозов.

Осевая формула тепловоза  $2 \times (3o-3o)$ , его мощность по дизелю составляет  $2 \times 2650$  кВт ( $2 \times 3604$  л.с.). На каждой секции установлен дизель-генератор 18-9ДГ

в составе дизеля 16ЧН26/26 (Д49), который имеет номинальную частоту вращения 1000 об/мин, и тягового генератора ГС-501АУ2 (или ГСТ-2800-1000У2). Применена электрическая передача мощности переменного-постоянного тока. Управляемая шестиканальная тиристорная выпрямительная установка (преобразователь М-ТПП-3600М-1-У2) дает возможность реализовать поосное регулирование силы тяги. Номинальная мощность каждого из коллекторных ТЭД ЭДУ-133Ц (или ДТК-417Ц) составляет 366 кВт [1.40].

Отметим, что тепловоз 2ТЭ25КМ имеет такую же ДГУ, что и тепловоз 2ТЭ25А «Витязь», который отличается наличием ЭПМ переменного-переменного тока, аналогичную асинхронному тяговому приводу электровоза

Представлена характеристика процесса преобразования энергии (этапы и уровни) (рисунок 2.1) [1.43].

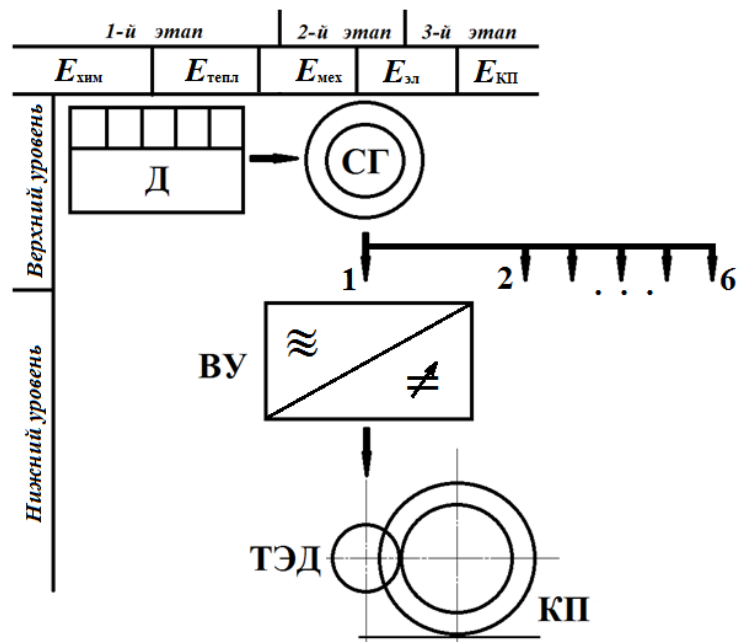


Рисунок 2.1 – Этапы и уровни преобразования энергии: Д – дизель, СГ – синхронный генератор, ВУ – шестиканальная выпрямительная установка, ТЭД – тяговые электродвигатели, КП – колесные пары

На верхнем уровне (первый этап) внутренняя химическая энергия дизельного топлива  $E_{хим}$  при его сгорании преобразуется в тепловую энергию  $E_{тепл}$ , а затем в механическую энергию коленчатого вала дизеля  $E_{мех}$ . На втором этапе  $E_{мех}$  преобразуется в электрическую энергию на клеммах тягового генератора  $E_{эл}$ .

На нижнем уровне в тяговом преобразователе (тиристорная ВУ) происходит процесс преобразования электрической энергии, выработанной тяговым генератором, а затем в ТЭД электроэнергия преобразуется в механическую энергию вращения колесных пар  $E_{КП}$  (третий этап).

Повышение энергетической эффективности любой силовой установки обусловлено приведением условий ее работы в соответствие с номинальными параметрами, которые ориентированы на максимальные значения КПД [2.4]. Это особенно актуально для тепловозов, так как номинальные значения КПД ДГУ находятся на уровне 36...38 %, а при частичной нагрузке имеют значения порядка 20...25 % [1.24, 2.2].

### 2.3 Анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов путем обработки записей МПСУ-ТП

Перейдем к анализу эксплуатационных показателей энергетической эффективности грузовых тепловозов 2ТЭ25КМ в реальных условиях работы на Южном полигоне. Для анализа показателей энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ использовалась штатная микропроцессорная система управления тепловозом (рисунок 2.2), которая имеет функцию регистрации параметров движения [1.40], в том числе предназначенной для записи и хранения информации, получаемой от аппаратов управления и диагностики тепловоза.



Рисунок 2.2 – Внешний вид дисплейного модуля МПСУ-ТП

МПСУ-ТП способен вести запись большого количества параметров тепловоза и дизель-генераторной установки, сохраняя их на жесткий диск (встроенную память).

Основные параметры и функции МПСУ-ТП:

**а) функции:**

- управление электрической схемой тепловоза во всех режимах работы: пуск и остановка СЭУ, тяга, выбег (холостой ход), электрическое торможение;
- диагностика параметров работы тепловоза;
- преобразование принятых по каждому каналу сигналов в цифровое значение за время преобразования в один период с основной погрешностью не более  $\pm 1\%$ ;
- запись информации на внешний накопитель, подключенный через USB порт дисплейного модуля.

**б) параметры:**

В системе МПСУ-ТП используется блок ВС 4101 фирмы GERSYS, представляющий собой бортовой компьютер, предназначенный для использования на железнодорожном транспорте.

- процессор Pentium MMX;
- ОЗУ ёмкостью 128 Мбайт;
- жесткий диск (встроенная память) объемом 20 Гбайт;
- встроенный источник бесперебойного питания.

Такая МПСУ-ТП, имеющая функции регистрации и диагностирования параметров тепловоза, по своим возможностям практически заменяет тягово-энергетическую вагон-лабораторию.

Исследование показателей энергетической эффективности тепловоза в эксплуатации основано на записях мгновенных значений следующих параметров:

- касательная сила тяги тепловоза  $F_k$ , кН;
- скорость тепловоза  $V$ , км/ч (либо м/с);
- изменение позиций контроллера машиниста  $N_{ПК}$ ;
- линейное напряжение на выходе генератора  $U_l$ , В;

– действующее значение фазного тока на выходе генератора  $I_{\phi}$ , А.

Отметим, что силу тяги возможно получить и расчетным путем, о чем будет сказано в главе 3.

Как уже отмечалось, процесс преобразования энергии протекает на двух уровнях, поэтому анализ показателей энергетической эффективности будем также вести на двух уровнях [1.43]. На верхнем уровне, в начале (на первом этапе) дизельный двигатель в составе ДГУ преобразует внутреннюю химическую энергию топлива в механическую энергию вращения коленчатого вала ДГУ. Запишем потребляемую мощность по топливу  $P_{\text{потр}}$ , кВт, как

$$P_{\text{потр}} = g_{ei} \cdot Q_p^h \quad (2.1)$$

где  $Q_p^h = 42500$  кДж/кг – удельная теплота сгорания топлива,

$g_{ei}$  – мгновенное значение расхода топлива, кг/с, которое определяется по набранной машинистом  $i$ -ой позиции контроллера.

Затем, на втором этапе, механическая энергия вращения коленчатого вала ДГУ преобразуется синхронным тяговым генератором в электрическую энергию, характеризующуюся действующими значениями тока  $I_{\text{ДГУ}}$  и напряжения  $U_{\text{ДГУ}}$ .

Свободной мощности дизеля соответствует активная составляющая мощности синхронного генератора с двумя параллельными трехфазными обмотками:

$$P_{\Gamma} = 2 \cdot 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \varphi, \quad (2.2)$$

где  $U_{\phi}$ ,  $I_{\phi}$  – действующие значения фазных напряжения и тока;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности: для номинального режима  $\cos \varphi = 0,9$ ; при максимальном напряжении  $\cos \varphi = 0,96$ ; при минимальном напряжении  $\cos \varphi = 0,79$ .

Отметим, что действующее значение фазного тока  $I_{\phi}$  снимается с датчиков и записывается в МПСУ-ТП.

Действующее значение фазного напряжения определяется по формуле:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}. \quad (2.3)$$

где  $U_{\text{л}}$  – действующее значение линейного напряжения.



Тогда электрическая мощность  $P_{\text{ДГУ}}$ , кВт, на выходе ДГУ будет равна:

$$P_{\text{ДГУ}} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi. \quad (2.4)$$

На нижнем уровне, электрическая передача мощности (ЭПМ) тепловоза преобразует электрическую энергию, выработанную дизель-генераторной установкой, в полезную механическую работу на тягу поезда. Полезная мощность тепловоза на тягу  $P_{\text{т}}$  равна

$$P_{\text{т}} = \frac{F_{\text{к}} \cdot V}{3,6}, \quad (2.5)$$

где  $V$  – скорость, км/ч;  $F_{\text{к}}$  – касательная сила тяги, кН.

Тогда мгновенное значение коэффициента полезного действия (КПД) тепловоза  $\eta$  будет равно произведению КПД дизель-генераторной установки  $\eta_{\text{ДГУ}}$ , КПД электрической передачи мощности  $\eta_{\text{ЭПМ}}$  и КПД механического тягового привода  $\eta_{\text{мех}}$ , учитывающего потери в подшипниках, зубчатом редукторе и т.п.:

$$\eta = \eta_{\text{ДГУ}} \cdot \eta_{\text{ЭПМ}} \cdot \eta_{\text{мех}}. \quad (2.6)$$

Здесь КПД дизель-генераторной установки

$$\eta_{\text{ДГУ}} = \frac{P_{\text{ДГУ}}}{P_{\text{потр}}}, \quad (2.7)$$

и КПД электрической передачи мощности

$$\eta_{\text{ЭПМ}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{ДГУ}}}. \quad (2.8)$$

Коэффициент использования мощности (КИМ) тепловоза  $\gamma$  представляет собой отношение реализуемой локомотивом мощности на тягу  $P_{\text{т}}$  к его номинальной мощности  $P_{\text{ном}}$  (она равна мощности ДГУ на 15-й позиции) [2.3, 2.4]:

$$\gamma = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{ном}}}. \quad (2.9)$$

Соответственно, КИМ дизель-генераторной установки  $\gamma_{\text{ДГУ}}$  будет равен

$$\gamma_{\text{ДГУ}} = \frac{P_{\text{ДГУ}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (2.10)$$

и КИМ электрической передачи мощности  $\gamma_{\text{ЭПМ}}$

$$\gamma_{\text{ЭПМ}} = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{ЭПМ ном}}}, \quad (2.11)$$

здесь  $P_{\text{ЭПМ ном}}$  – номинальная мощность ЭПМ, равная разности номинальной мощности ДГУ и мощности на собственные нужды.

Совершенная полезная работа  $A_{\text{пол}}$ , кВт·ч, направленная на тягу поезда, равна интегралу по времени от полезной мощности  $P_{\text{т}}$  (2.5):

$$A_{\text{пол}} = \int P_{\text{т}} dt. \quad (2.12)$$

а полная потребленная энергия  $E_{\text{потр}}$ , кВт·ч, равна интегралу по времени от потребленной мощности  $P_{\text{потр}}$

$$E_{\text{потр}} = \int P_{\text{потр}} dt. \quad (2.13)$$

Первоначальная обработка массивов данных, полученных из записей поездок осуществлялась с помощью специализированного программного обеспечения АРМ «ProViewer». Дальнейшая математическая обработка и получение результатов осуществлялось с помощью пакета прикладных программ Matlab Simulink [2.5].

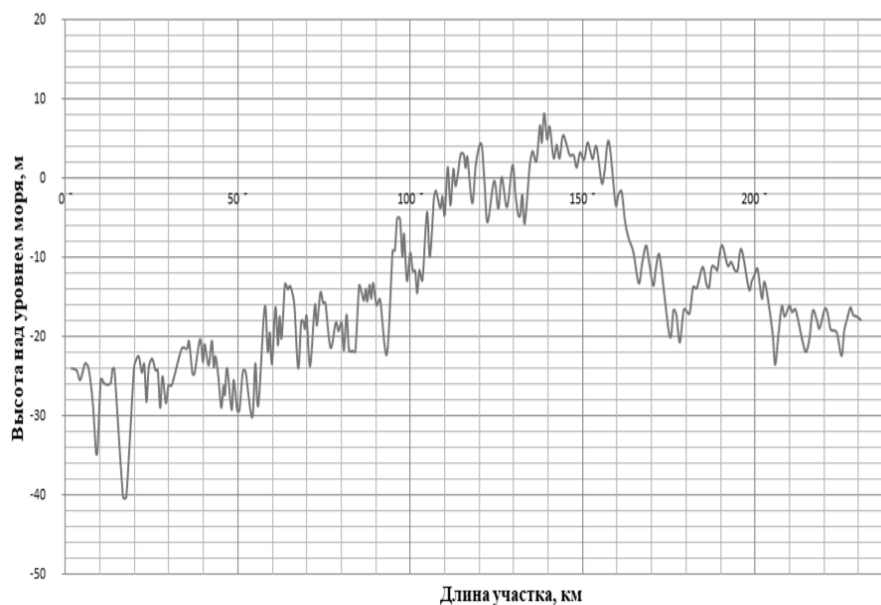
#### **2.4 Параметры поездок на участках эксплуатации грузовых магистральных тепловозов 2ТЭ25КМ в условиях Южного полигона**

Для определения показателей энергетической эффективности были выбраны три участка обращения тепловоза 2ТЭ25КМ на Южном полигоне, соответствующие условным участкам с обобщенным профилем следующих типов [1.36]:

- 1) «Астрахань-2 – Артезиан» (рисунок 2.3) – I-II тип, равнинный, с величиной расчетного подъема 6‰;
- 2) «Минеральные Воды – Прохладная» (рисунок 2.4) – III тип, холмистый, с величиной расчетного подъема 9‰;
- 3) «Разъезд 9 км – Железный Рог» (рисунок 2.5) – IV тип, горный, с величиной расчетного подъема 11‰.

В общей сложности проанализировано десять поездок в четном и нечетном направлении с поездами различной массы. Основные параметры поездок на этих участках приведены в таблицах 2.1 – 2.3, соответственно.

а)



б)

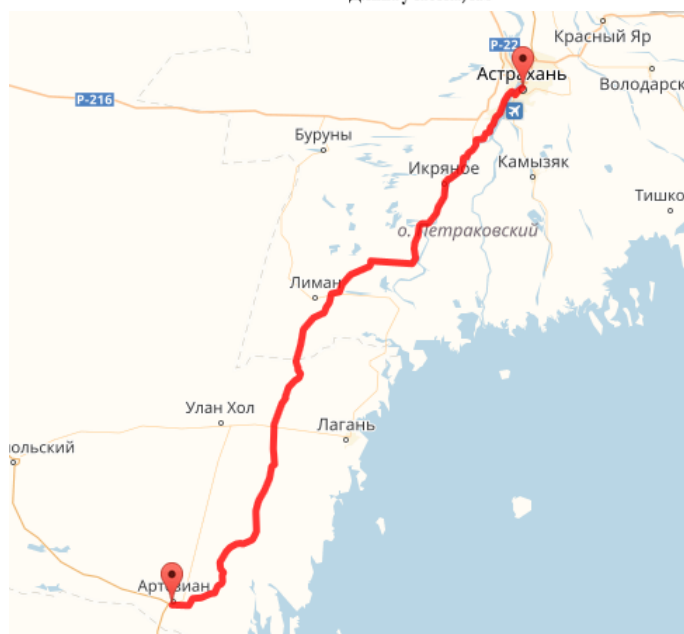


Рисунок 2.3 – План (а) и профиль (б) участка «Астрахань-2 – Артезиан»

Таблица 2.1 – Параметры поездок на участке «Астрахань-2 – Артезиан» с тепловозом №123.

Наименование параметра	Поезд № 2502 (с изменением числа секций в тяге)	Поезд № 2563 (с изменением числа секций в тяге)
Дата поездки	04.03.2018 г.	04.03.2018 г.
Направление	Астрахань-2 – Артезиан	Артезиан – Астрахань-2
Вес поезда, т	5062 (грузженный состав)	2085 (порожний состав)
Количество осей, шт.	224	344

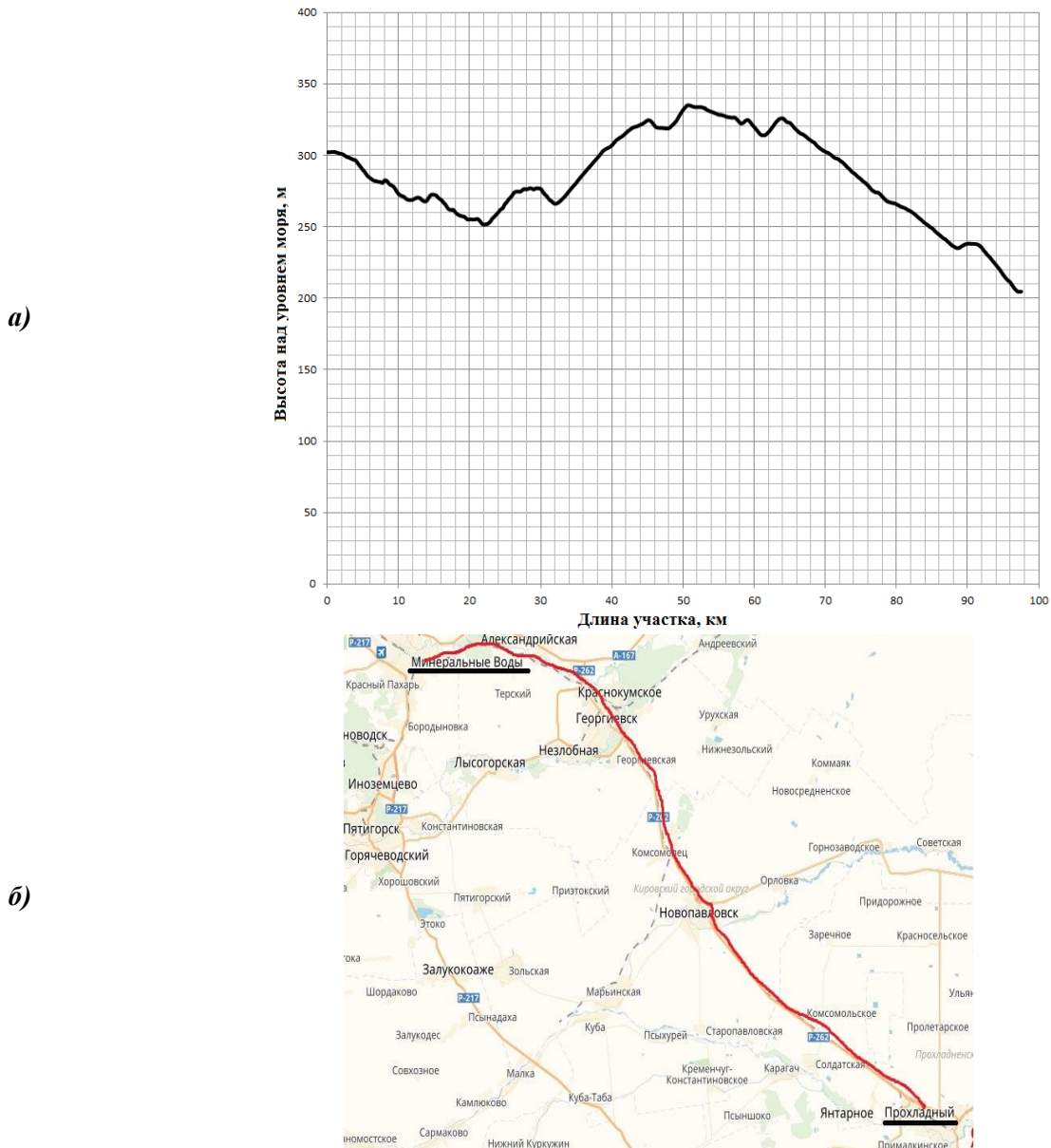
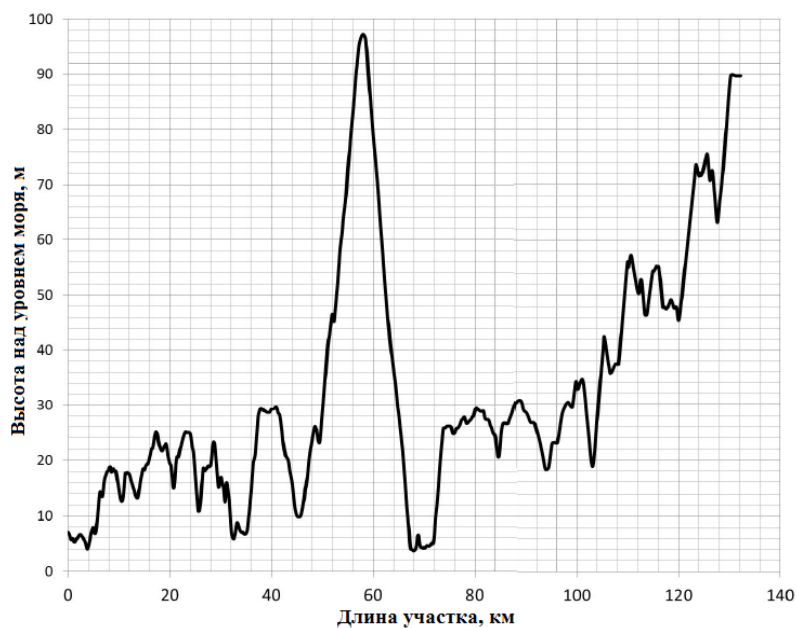


Рисунок 2.4 – План (*а*) и профиль (*б*) участка «Минеральные Воды – Прохладная»

Таблица 2.2 – Параметры поездок на участке «Минеральные Воды – Прохладная» с тепловозом №080.

Наименование параметра	Поезд № 3168 (две секции в тяге)	Поезд № 3026 (две секции в тяге)	Поезд № 2351 (две секции в тяге)	Поезд № 3057 (с изменением числа секций в тяге)
Дата поездки	01.03.2018 г.	02.03.2018 г.	02.03.2018 г.	02.03.2018 г.
Направление	Минеральные Воды – Прохладная		Прохладная – Минеральные Воды	
Вес поезда, т	2468 (порожный состав)	4972 (груженный состав)	5587 (груженный состав)	4168 (груженный состав)
Количество осей, шт.	364	224	252	184

а)



б)



Рисунок 2.5 – План (а) и профиль (б) участка «Разъезд 9 км – Железнодорожный Рог»

Таблица 2.3 – Параметры поездов на участке «Разъезд 9 км – Железнодорожный Рог» с тепловозом №022.

Наименование параметра	Поезд № 2024 (две секции в тяге)	Поезд № 2004 (две секции в тяге)	Поезд № 3001 (две секции в тяге)	Поезд № 3005 (две секции в тяге)
Дата поездки	10.03.2017 г.	11.03.2017 г.	11.03.2017 г.	11.03.2017 г.
Направление	Разъезд 9 км – Железнодорожный Рог		Железнодорожный Рог – Разъезд 9 км	
Вес поезда, т	4781 (груженный состав)	5584 (груженный состав)	1659 (порожний состав)	1748 (порожний состав)
Количество осей, шт.	232	252	200	288

### 2.4.1 Показатели энергетической эффективности на участке «Минеральные Воды – Прохладная»

Параметры поездки грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ-080 с поездом №3168, построенные путем расшифровки и обработки записей бортового регистратора, функции которого выполняет МПСУ-ТП, приведены в таблице 2.1. Затем записи были обработаны с помощью АРМ «ProViewer» и программы EXCEL.

На рисунке 2.6 показан график скорости движения  $V$ , а на рисунке 2.7 – график касательной силы тяги  $F_k$ .

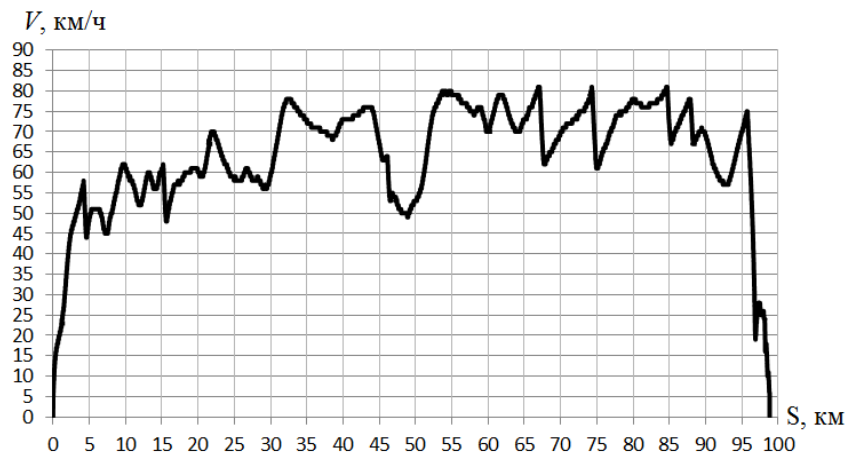


Рисунок 2.6 – Скорость движения поезда

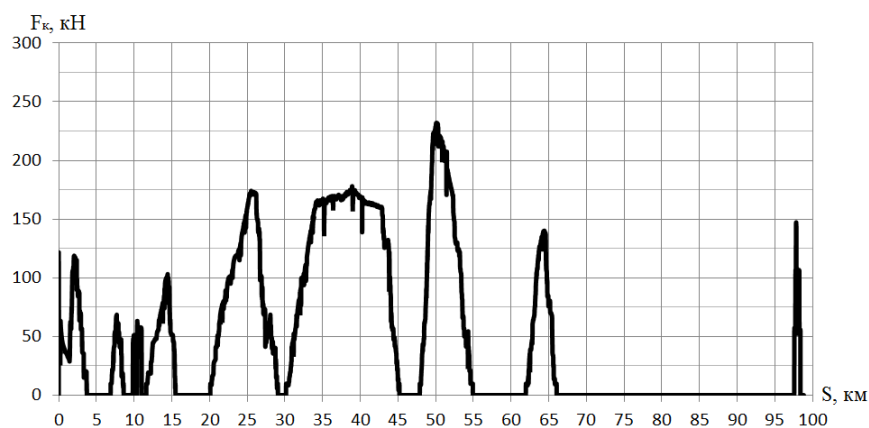


Рисунок 2.7 – Касательная сила тяги

В силу особенностей профиля пути (рисунок 2.3) имеются значительные по протяженности уклоны, когда тепловоз движется в режиме выбега (сила тяги отсутствует), а его дизель-генераторная установка работает на холостом ходу (рисунок 2.7).

Управление обеими секциями тепловоза ведется синхронно. График набора позиций контроллера машиниста за все время движения представлен на рисунке 2.8. Хорошо видно, что при движении под уклон обе дизель-генераторные установки работают на холостом ходу (нулевая позиция контроллера).

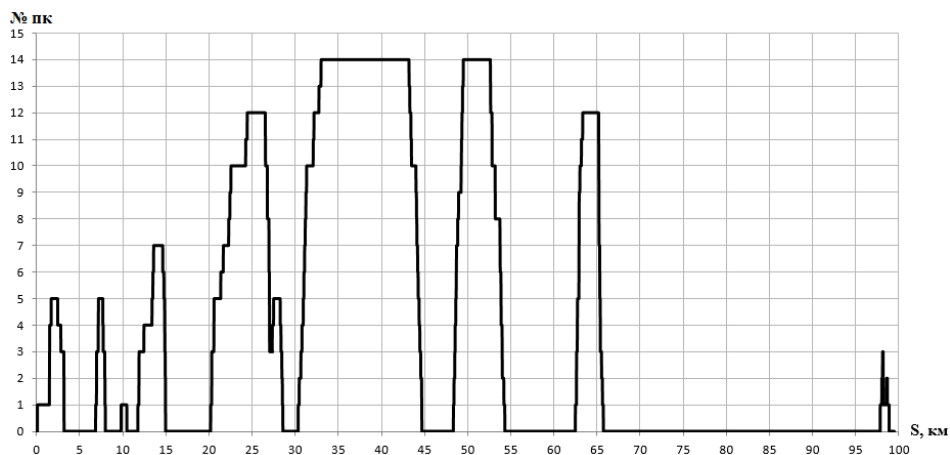


Рисунок 2.8 – Изменение позиций контроллера машиниста в ходе поездки

Для определения расхода топлива используем данные по расходу на каждой позиции контроллера машиниста и данные по набору позиций в процессе движения (см. рисунок 2.8).

$$G_{ei} = \int_{t_1}^{t_2} g_{ei} dt, \quad (2.15)$$

где  $g_{ei}$  – мгновенное значение расхода топлива, кг/с.

Для получения полного расхода топлива  $G$  необходимо выполнить суммирование по всем интервалам времени работы тепловоза на каждой позиции контроллера машиниста:

$$G = \Sigma G_{ei}. \quad (2.16)$$

График расхода дизельного топлива в ходе поездки приведен на рисунке 2.9 и за все время движения составил  $G = 473$  кг.

Удельный расход дизельного топлива за поездку составляет

$$g = \frac{G}{Q \cdot S} = \frac{473}{2468 \cdot 97} = 19,76 \text{ кг}/10^4 \text{ т-км брутто}.$$

где  $Q$  – масса состава, т;

$S$  – длина участка.

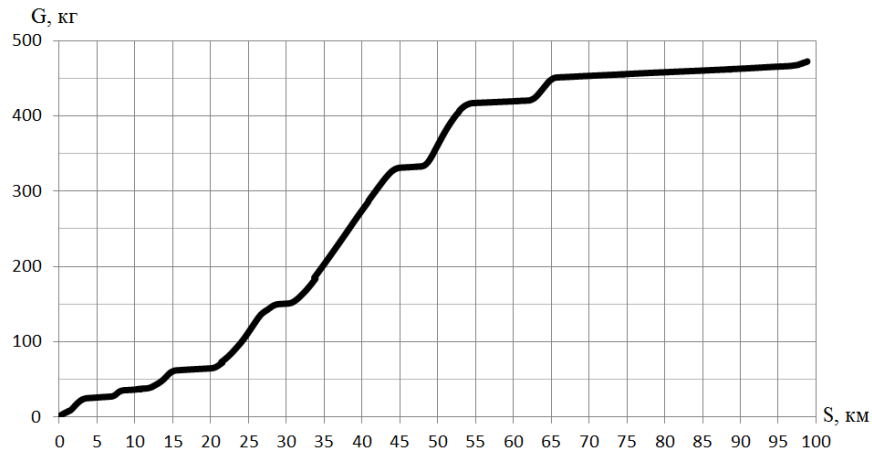


Рисунок 2.9 – График расхода топлива в ходе поездки

Согласно (2.1), определяем потребляемую мощность (по топливу) за время поездки. Изменение потребляемой тепловозом мощности (по топливу)  $P_{\text{потр}}$  (2.1) приведено на рисунке 2.10 (зеленая линия).

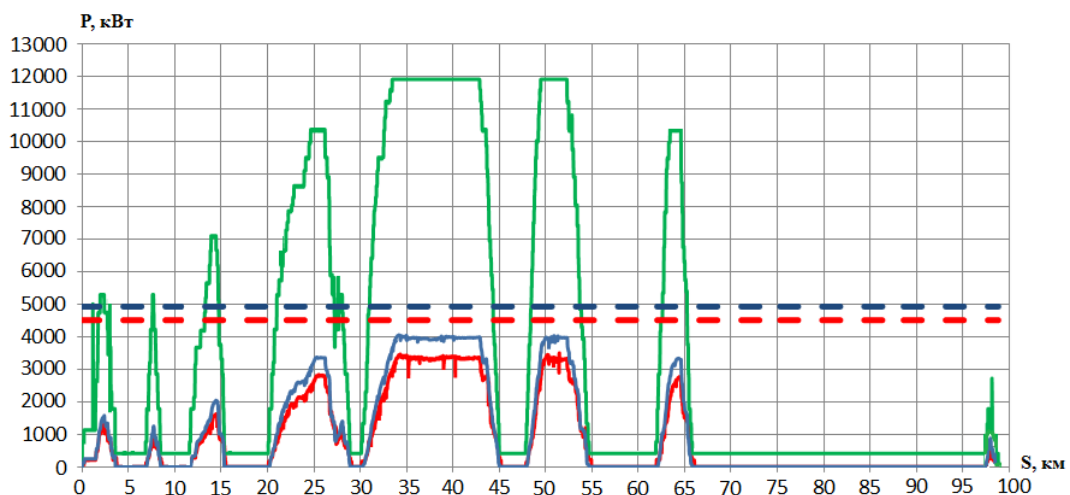


Рисунок 2.10 – Основные энергетические показатели тепловоза:  
зеленая линия – потребляемая мощность (по топливу); пунктирная оранжевая линия – номинальная мощность ДГУ тепловоза; синяя линия – электрическая мощность; пунктирная голубая линия – номинальная мощность ЭПМ тепловоза; красная линия – полезная мощность на тягу поезда

Электрическая мощность тепловоза (2.4) показана на рисунке 2.10 синей линией. Номинальная мощность ДГУ  $P_{\text{ном}}$  на рисунке 2.10 показана пунктирной оранжевой линией. Номинальная мощность ЭПМ показана на рисунке 2.10 пунктирной голубой линией.

Полезная мощность на тягу поезда (красная линия, см. рисунок 2.10) вычисляется согласно (2.5).



Чтобы оценить эффективность преобразования мощности в дизель-генераторной установке тепловоза, используем коэффициент использования мощности  $\gamma_{\text{ДГУ}}$  (2.10), соответствующий график показан на рисунке 2.11 синей линией. Как видно, значение  $\gamma_{\text{ДГУ}}$  при работе на 14-й позиции контроллера в этой поездке составляет  $0,72 \dots 0,75$ .

График изменения КПД дизель-генераторной установки  $\eta_{\text{ДГУ}}$  (2.7) показан на рисунке 2.11 красной линией. Значение  $\eta_{\text{ДГУ}}$  не превышает  $0,33 \dots 0,35$ .

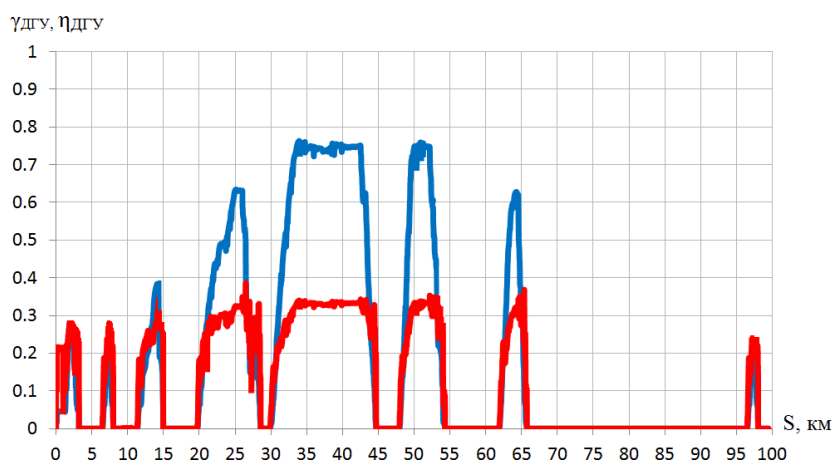


Рисунок 2.11 – Показатели энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ: синяя линия – КИМ ДГУ ( $\gamma_{\text{ДГУ}}$ ); красная – КПД ДГУ ( $\eta_{\text{ДГУ}}$ )

Значение КИМ электрической передачи мощности  $\gamma_{\text{ЭПМ}}$  достигает  $0,73 \dots 0,75$ . Значение  $\eta_{\text{ЭПМ}}$  находится при работе на 14-й позиции контроллера на уровне  $0,8 \dots 0,82$ . Как видим при установившемся режиме работы тепловоза на 14-й позиции  $\eta_{\text{ДГУ}} = 0,33 \dots 0,35$ , а  $\eta_{\text{ЭПМ}} = 0,8 \dots 0,82$ .

Соответственно, согласно (2.6), мгновенное значение КПД тепловоза при работе на 14-й позиции находится в следующих пределах

$$\eta = \eta_{\text{ДГУ}} \cdot \eta_{\text{ЭПМ}} \cdot \eta_{\text{мех}} = (0,33 \dots 0,35) \cdot (0,8 \dots 0,82) \cdot 0,97 = 0,25 \dots 0,28.$$

### ***Интегральные показатели***

Совершенная тепловозом полезная работа и потребленная энергия показаны на рисунке 2.12, причем полезная работа на тягу поезда согласно (2.12) составила:

$$A_{\text{пол}} = 1323,13 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

а потребленная энергия (по топливному эквиваленту) (2.13), составила

$$E_{\text{потр}} = 5584,03 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Следовательно, среднее значение КПД тепловоза за поездку составляет:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}} = \frac{1323,13}{5584,03} = 0,236.$$

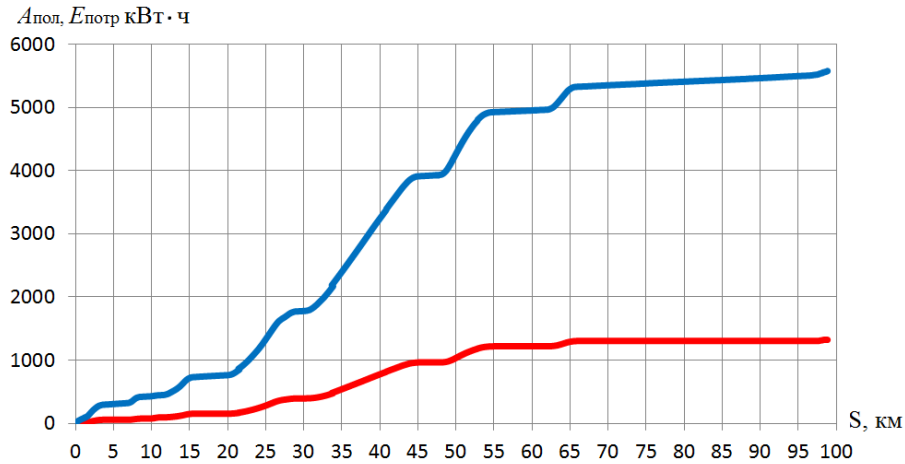


Рисунок 2.12 – Графики совершенной работы (красная линия) и потребленной энергии (синяя линия) за поездку

Для получения наглядной картины того, какое количество энергии потребляется в каких режимах работы, представим график потребленной энергии (см. рисунок 2.12, синяя линия) в виде гистограммы (рисунок 2.13), показывающей распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза. Мы видим, что во время движения бóльшая часть энергии – 58,51 % была израсходована, когда локомотив использовался с КИМ больше 0,5. Хотя состав был порожним, характер распределения обусловлен движением поезда на достаточно высокой скорости и отсутствием остановок в пути следования.

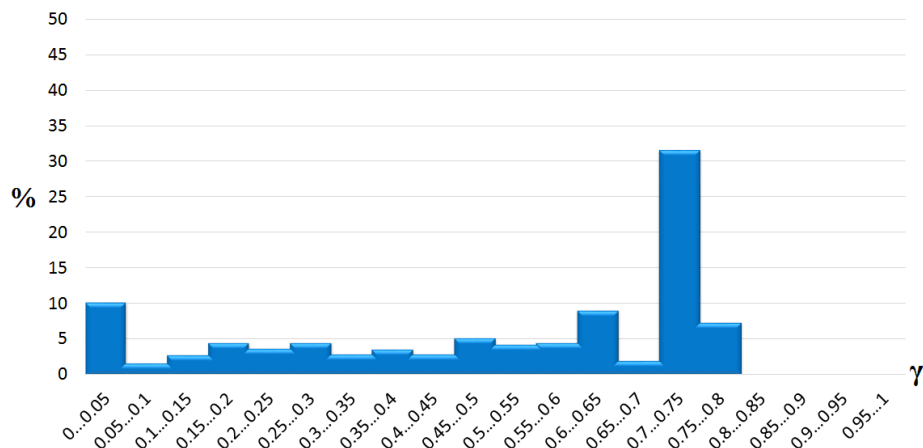


Рисунок 2.13 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза

Анализ других поездок на участке «Минеральные Воды – Прохладная» (см. таблицу 2.1) был выполнен аналогичным образом. Основные энергетические показатели тепловоза по трем оставшимся поездкам приведены на рисунке 2.14 и сведены в итоговую таблицу 2.4.

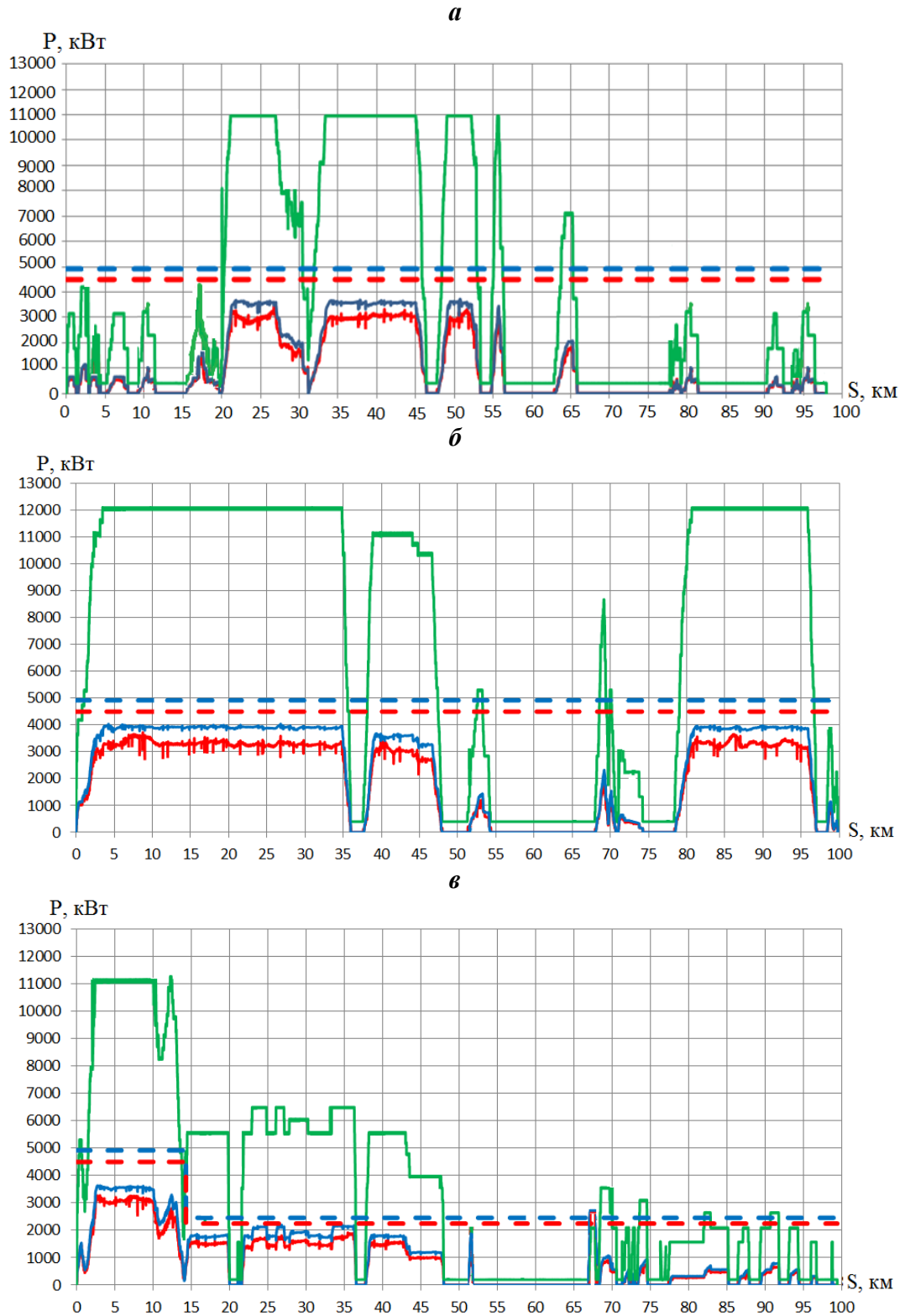


Рисунок 2.14 – Основные энергетические показатели тепловоза:  
*а* – поезд № 3026; *б* – поезд № 2351; *в* – поезд № 3057 (обозначения см. рисунок 2.10)

Таблица 2.4 – Показатели энергетической эффективности тепловоза на участке «Минеральные Воды – Прохладная»

Наименование параметра	Поезд № 3168 (две секции в тяге)	Поезд № 3026 (две секции в тяге)	Поезд № 2351 (две секции в тяге)	Поезд № 3057 (с изменением числа секций в тяге)
1	2	3	4	5
Дата поездки	01.03.2018	02.03.2018	02.03.2018	02.03.2018
Направление	Минеральные Воды – Прохладная		Прохладная – Минеральные Воды	
Вес поезда, т	2468 (порожний состав)	4972 (груженный состав)	5587 (груженный состав)	4168 (груженный состав)
Расход топлива за поездку, кг	473	693	1319	776
Удельный расход топлива за поездку, кг/10 <sup>4</sup> т-км брутто	19,76	14,37	24,34	19,2
Полезная работа на тягу, кВт·ч	1323,13	2093,9	4099,5	2527,2
Потребленная энергия, кВт·ч	5584,03	8183,95	15563,6	9194,1
Средний КПД ДГУ	0,3...0,32	0,31...0,33	0,31...0,33	0,33...0,35
Средний КПД ЭПМ	0,78...0,8	0,81...0,83	0,83...0,85	0,83...0,85
<b>Средний КПД тепловоза</b>	<b>0,236</b>	<b>0,256</b>	<b>0,263</b>	<b>0,275</b>

Гистограммы, показывающие распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза, приведены на рисунке 2.15, данные для их построения сведены в итоговую таблицу 2.5.

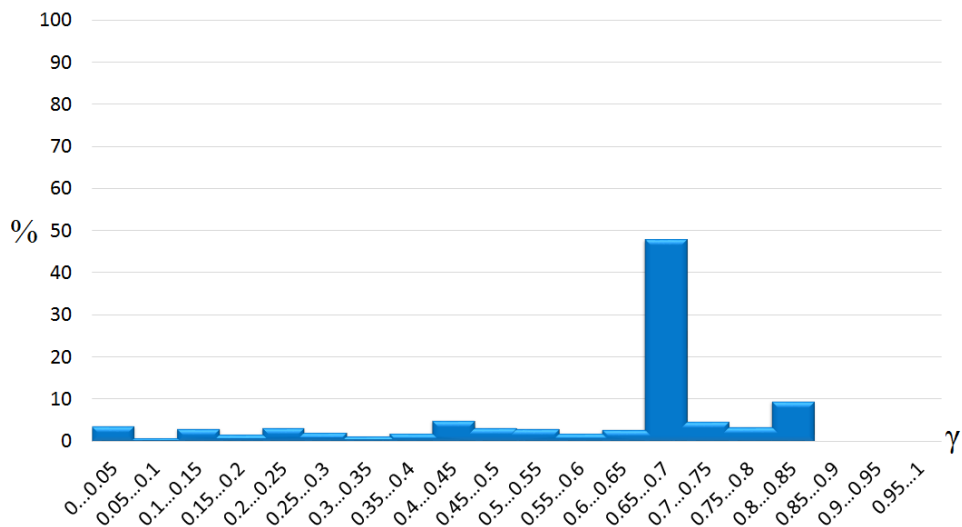
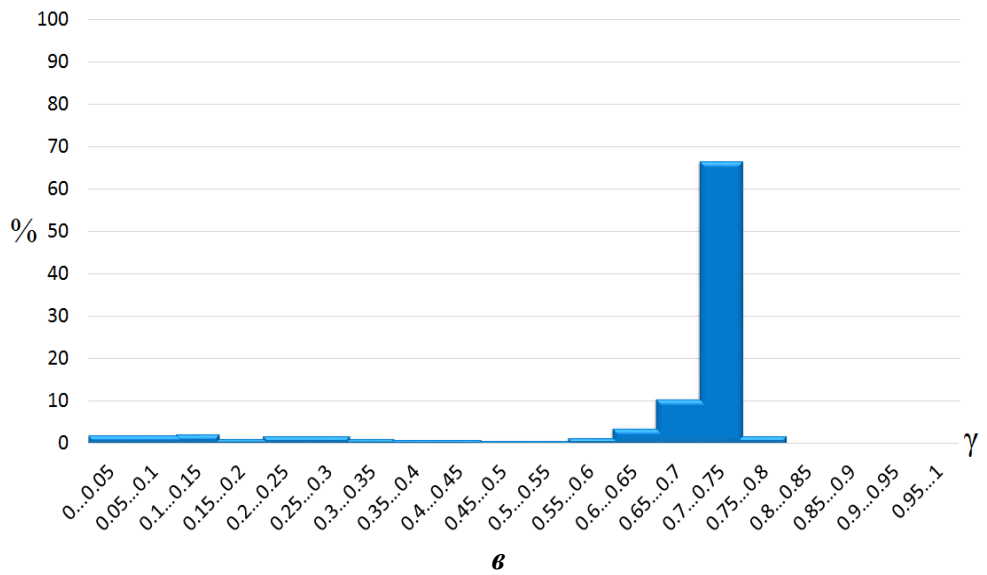
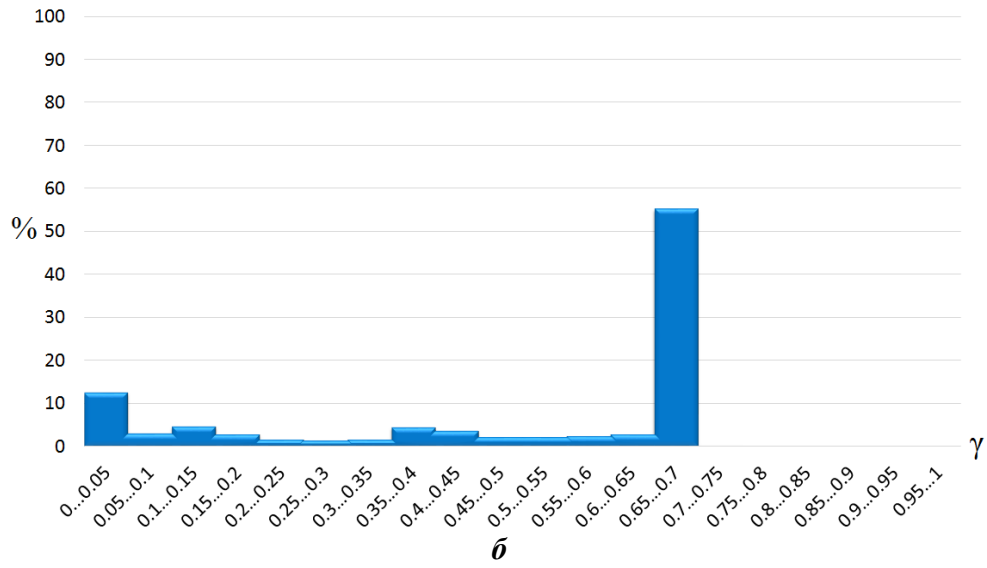
*a*

Рисунок 2.15 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза:  
*a* – поезд № 3026; *б* – поезд № 2351; *в* – поезд № 3057

Таблица 2.5 – Распределение потребленной энергии по режимам работы тепловоза на участке «Минеральные Воды – Прохладная»

Интервалы КИМ	Поезд № 3168 (две секции в тяге)		Поезд № 3026 (две секции в тяге)		Поезд № 2351 (две секции в тяге)		Поезд № 3057 (с изменением числа секций в тяге)	
	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%
0...0,05	566,9	10,16	1027,37	12,55	317,83	2,04	348,06	3,79
0,05...0,1	92,21	1,65	242,12	2,96	306,78	1,97	83,7	0,9
0,1...0,15	155,13	2,78	379,53	4,64	353,6	2,27	281,44	3,06
0,15...0,2	248,14	4,45	227,78	2,78	200,32	1,29	163,67	1,78
0,2...0,25	211,25	3,7	124,85	1,53	294,79	1,9	301,11	3,28
0,25...0,3	246,49	4,42	103,06	1,26	293,24	1,88	193,66	2,11
0,3...0,35	159	2,85	128,88	1,57	176,96	1,14	124,06	1,35
0,35...0,4	197,81	3,55	351,15	4,29	141,29	0,91	170,85	1,86
0,4...0,45	158,08	2,83	296,16	3,62	157,89	1,01	464,3	5,04
0,45...0,5	284,61	5,1	181,69	2,22	127,39	0,82	298,71	3,25
0,5...0,55	236,96	4,25	184,38	2,25	115,73	0,74	289,25	3,15
0,55...0,6	246,29	4,41	185,86	2,27	229,15	1,47	183,43	2
0,6...0,65	503,38	9,02	231,31	2,83	556,81	3,58	256,53	2,79
0,65...0,7	109,45	1,96	4507,5	55,08	1638,91	10,53	4403,86	47,9
0,7...0,75	1762,58	31,6	12,31	0,15	10367,9	66,62	444,68	4,84
0,75...0,8	405,75	7,27	0	0	285,01	1,83	311,64	3,39
0,8...0,85	0	0	0	0	0	0	875,11	9,51
0,85...0,9	0	0	0	0	0	0	0	0
0,9...0,95	0	0	0	0	0	0	0	0
0,95...1	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Σ=</b>	<b>5584,03</b>	<b>100</b>	<b>8183,95</b>	<b>100</b>	<b>15563,6</b>	<b>100</b>	<b>9194,1</b>	<b>100</b>

Из проведенного анализа поездок на участке видно, что при порожнем составе массой 2468 т КПД составил 0,236; при груженом составе массой 4972 т – 0,256, а массой 5587 т – 0,263; в то время как при груженом поезде меньшей массы (4168 т), но с отключением секций – 0,275.

Делаем вывод, что наибольшее значение КПД имеет место для груженого состава массой 4168 т (поезд №3057) при работе тепловоза с отключением секций (выводом избыточной мощности из тяги).

## 2.4.2 Показатели энергетической эффективности на участке «Астрахань-2 – Артезиан»

Отличительной особенностью поездок на данном участке является то, что в процессе движения управление секциями тепловоза ведется отдельно, о чем свидетельствует график набора позиций контроллера машиниста магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ-123 с поездом №2502, представленный на рисунке 2.16.

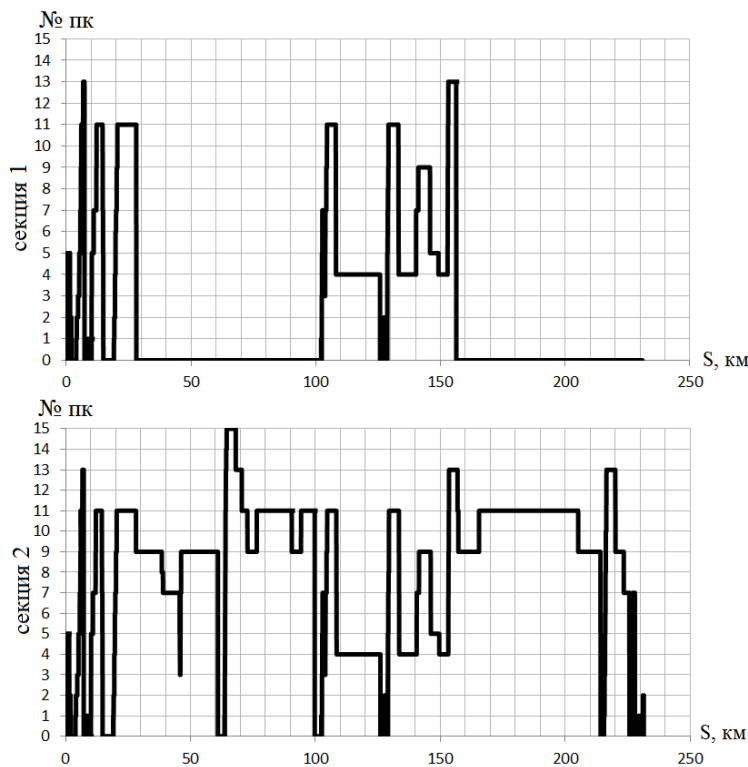


Рисунок 2.16 – Графики набора позиций контроллера машиниста.

Асинхронность работы заключается в том, что в процессе движения *секция 1* выводится из тяги (см. рисунок 2.16). Стоит отметить, что *секция 1* выводится из тяги два раза и на достаточно длительные промежутки времени (с 39,5 по 101,7 км и с 166,5 по 230 км). Отметим, что дизель-генераторная установка, в эти промежутки времени, не переводится в режим холостого хода, а выключается полностью – топливо не подается в цилиндры двигателя, обороты равны нулю (см. рисунок 2.17).

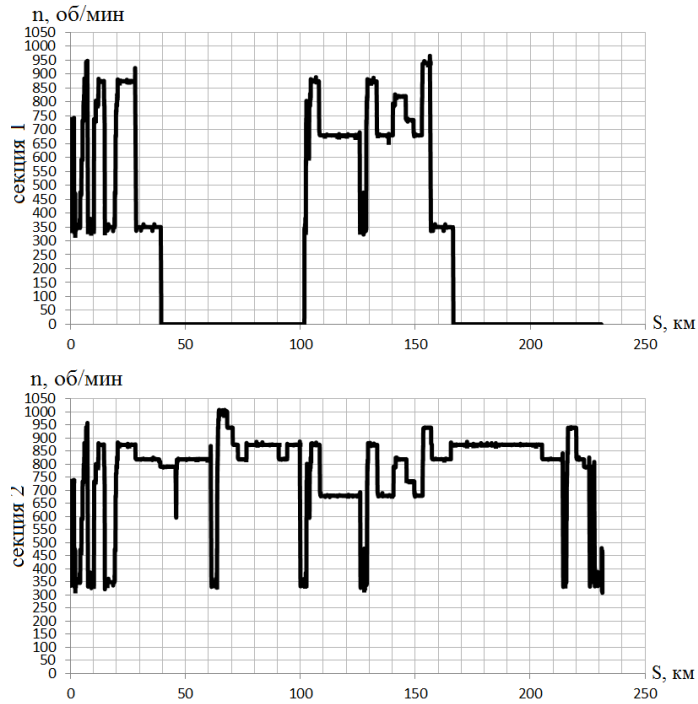


Рисунок 2.17 – Графики изменения частоты вращения ДГУ тепловоза

Энергия, расходуемая на собственные нужды, поступает от вспомогательного генератора работающей секции – *секции 2*. Возможность вывода части доступной мощности из тяги обусловлена профилем пути на данном участке (см. рисунок 2.5), который носит равнинный характер. Отключение одной из секций, т.е. вывод части доступной мощности из тяги, никак не отражается на таком важном параметре, как скорость движения. На участках движения, где отключается одна из секций, скорость поддерживается на достаточно высоком уровне, около 50 км/ч (рисунок 2.18).

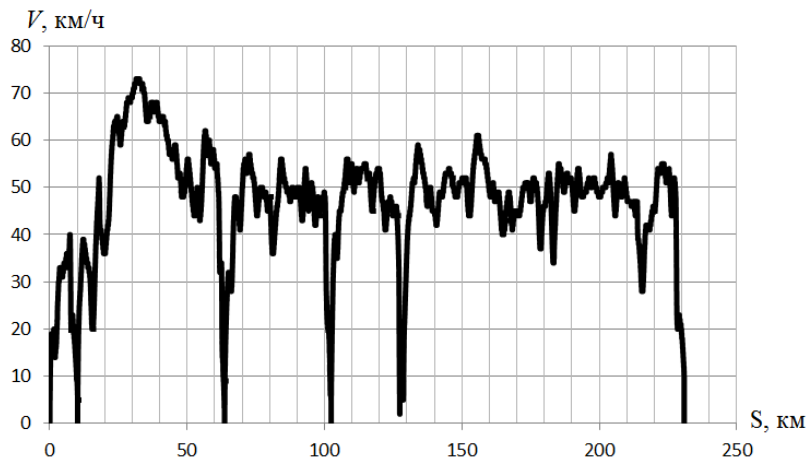


Рисунок 2.18 – График скорости движения поезда на участке



График изменения касательной силы тяги в процессе движения приведен на рисунке 2.19

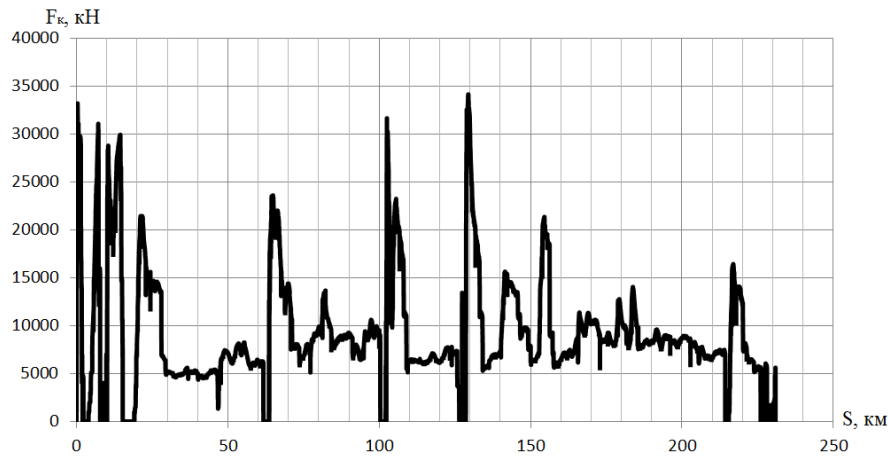


Рисунок 2.19 – Графики силы тяги, развиваемой тепловозом в процессе движения.

График расхода дизельного топлива в ходе поездки приведен на рисунке 2.20 и за все время движения составил  $G = 2036$  кг.

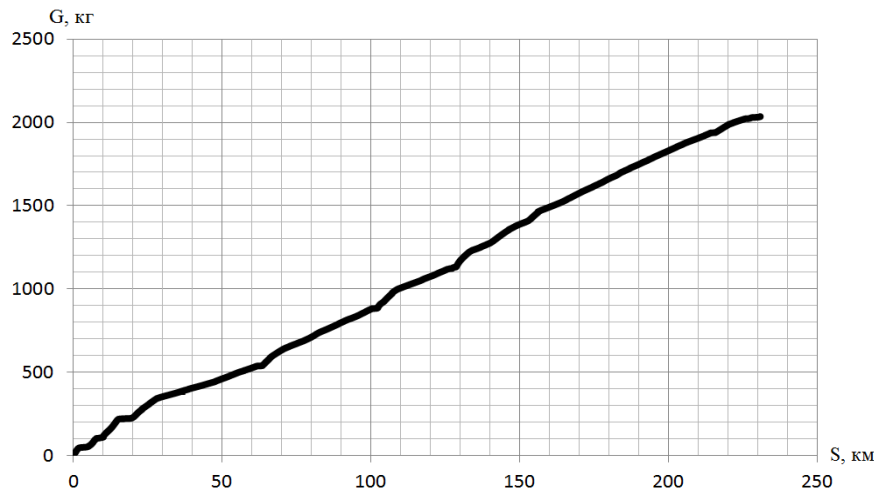


Рисунок 2.20 – График расхода топлива в ходе поездки

Удельный расход дизельного топлива за поездку составляет

$$g = \frac{G}{Q \cdot S} = \frac{2036}{5062 \cdot 233} = 17,26 \text{ кг}/10^4 \text{ т-км брутто.}$$

Основные энергетические показатели тепловоза в ходе поездки приведены на рисунке 2.21. График изменения потребляемой тепловозом мощности (по топливу)  $P_{\text{потр}}$  (2.1) показан на рисунке 2.21 зеленой линией; электрической мощности тепловоза (2.4) показан на рисунке 2.21 синей линией; номинальной мощности ДГУ

$P_{\text{ном}}$  на рисунке 2.21 показан пунктирной оранжевой линией, а номинальной мощности ЭПМ показан на рисунке 2.21 пунктирной голубой линией. Изменение полезной мощности на тягу поезда (2.5) показан на рисунке 2.21 красной линией.

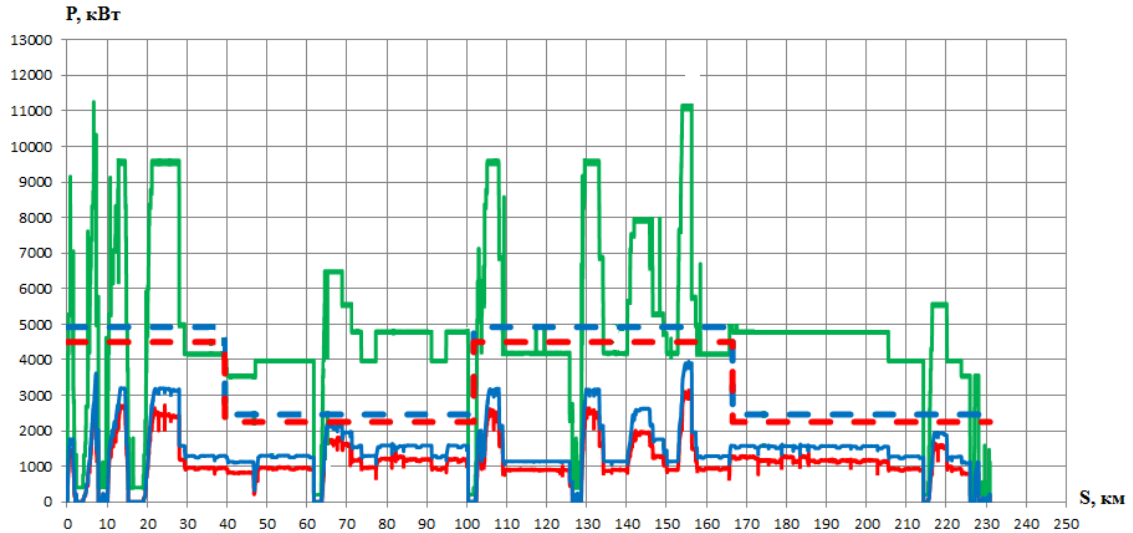


Рисунок 2.21 – Основные энергетические показатели тепловоза:  
 зеленая линия – потребляемая мощность (по топливу); пунктирная оранжевая линия – номинальная мощность ДГУ тепловоза; синяя линия – электрическая мощность;  
 пунктирная голубая линия – номинальная мощность ЭПМ тепловоза; красная линия – полезная мощность на тягу поезда

Для оценки эффективности преобразования мощности в ДГУ тепловоза, используем КИМ  $\gamma_{\text{ДГУ}}$  (2.10), а график его изменения в процессе движения показан на рисунке 2.22 синей линией.

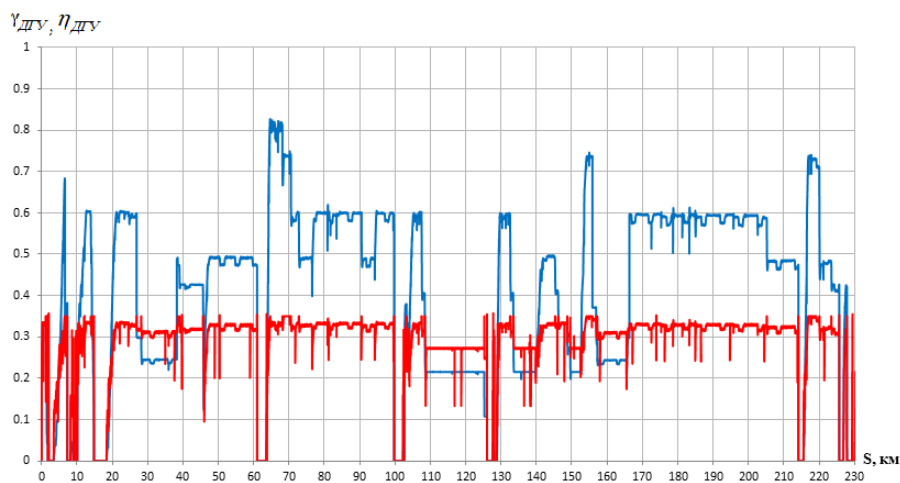


Рисунок 2.21 – Показатели энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ:  
 синяя линия – КИМ ДГУ ( $\gamma_{\text{ДГУ}}$ ); красная – КПД ДГУ ( $\eta_{\text{ДГУ}}$ )

Как видно, значение  $\gamma_{дгУ}$  при работе на 15-й позиции контроллера в этой поездке составляет  $0,8 \dots 0,82$ . Отметим, что такой высокий КИМ наблюдается именно в промежутке времени, когда *секция 1* выведена из тяги. График изменения КПД дизель-генераторной установки  $\eta_{дгУ}$  (2.7) показан на рисунке 2.22 красной линией. Значение  $\eta_{дгУ}$  не превышает  $0,33 \dots 0,36$ . В периоды отключения, доступная мощность, оставшейся секции реализуется более полно (см. рисунок 2.21, синяя линия), так КИМ дизель-генераторной установки  $\gamma_{дгУ}$  достигает  $0,8 \dots 0,83$ .

Значение КИМ электрической передачи мощности  $\gamma_{ЭПМ}$  достигает  $0,8 \dots 0,82$ . Значение  $\eta_{ЭПМ}$  находится при работе на 15-й позиции контроллера на уровне  $0,84 \dots 0,86$ . Как видим при установившемся режиме работы тепловоза на 15-й позиции  $\eta_{дгУ} = 0,33 \dots 0,35$ , а  $\eta_{ЭПМ} = 0,84 \dots 0,86$ .

Тогда, согласно (2.6), мгновенное значение КПД тепловоза находится в следующих пределах:

$$\eta = \eta_{дгУ} \cdot \eta_{ЭПМ} \cdot \eta_{мех} = (0,33 \dots 0,34) \cdot (0,84 \dots 0,86) \cdot 0,97 = 0,27 \dots 0,29.$$

### ***Интегральные показатели***

Совершенная тепловозом полезная работа и потребленная энергия показаны на рисунке 2.23, причем полезная работа на тягу поезда согласно (2.12) составила:

$$A_{пол} = 5773,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

а потребленная энергия (по топливному эквиваленту) (2.13), составила:

$$E_{потр} = 24032,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Следовательно, среднее значение КПД тепловоза за поездку составляет:

$$\eta = \frac{A_{пол}}{E_{потр}} = \frac{5773,1}{24032,1} = 0,24.$$

Показатели энергетической эффективности тепловоза сведены в итоговую таблицу 2.8.

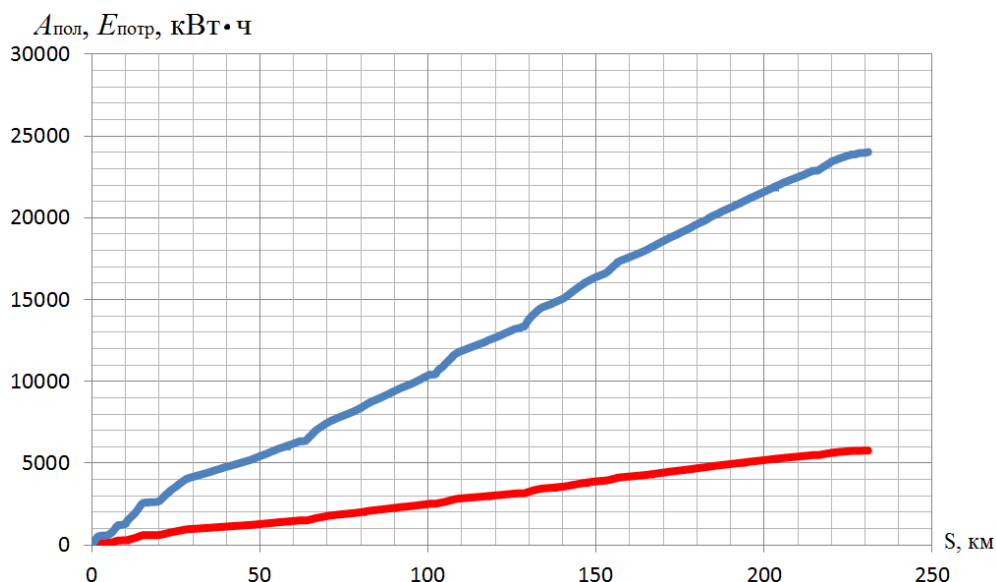


Рисунок 2.23 – Графики совершенной работы (красная линия) и потребленной энергии (синяя линия) за поездку

Представим график потребленной энергии (см. рисунок 2.23, синяя линия) в виде гистограммы (рисунок 2.24), показывающей распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза. Отметим, что во время движения с груженым составом 48,12 % энергии было израсходовано, когда локомотив использовался с КИМ больше 0,5, а также, что энергия, потребленная на холостом ходу составила около 3 %.

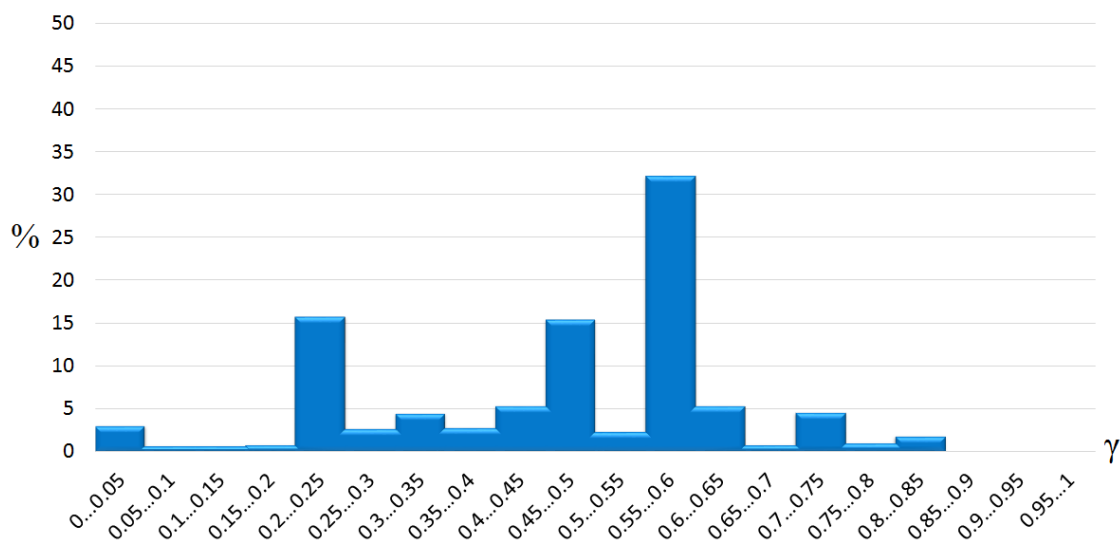


Рисунок 2.24 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза

Таблица 2.6 – Распределение потребленной энергии по режимам работы тепловоза на участке «Астрахань-2 – Артезиан»

Интервалы КИМ	$E_{\text{потр}}$ , кВт·ч	%
0...0,05	722,93	3,01
0,05...0,1	177,77	0,74
0,1...0,15	178,55	0,74
0,15...0,2	209,95	0,87
0,2...0,25	3793,19	15,78
0,25...0,3	651,02	2,71
0,3...0,35	1078,44	4,49
0,35...0,4	672,42	2,8
0,4...0,45	1283,73	5,34
0,45...0,5	3700,72	15,4
0,5...0,55	563,73	2,35
0,55...0,6	7722,45	32,13
0,6...0,65	1288,02	5,36
0,65...0,7	207,09	0,86
0,7...0,75	1103,26	4,59
0,75...0,8	241,99	1,01
0,8...0,85	436,84	1,82
0,85...0,9	0	0
0,9...0,95	0	0
0,95...1	0	0
<b><math>\Sigma=</math></b>	<b>24032,1</b>	<b>100</b>

В отличие от поездки с груженым составом, при движении поезда №2563 по участку в обратном направлении с магистральным тепловозом 2ТЭ25КМ-080 и порожним составом весом 2085 тонн наблюдается отключение *секции 2* (рисунок 2.25) и отчетливо видно, что при движении с порожним составом, доступная мощность используется крайне неэффективно, т.к. максимальная набранная позиция – 7-я, а в основном машинист использует позиции с 3-й по 5-ю.

Вывод из тяги наблюдается на пяти интервалах, но уже меньших по протяженности (с 10,6 по 45,5 км, с 55,3 по 69,4 км, с 118,1 по 143,9 км, с 185,1 по 210,1 км и с 215,5 по 224,4 км). В отличие от предыдущей поездки, ДГУ отключаемой секции тепловоза не перестает работать, а переводится на режим холостого хода – топливо в цилиндры двигателя продолжает поступать (рисунок 2.26), энергия на собственные нужды вырабатывается вспомогательным генератором, находящимся на одном валу с тяговым генератором.

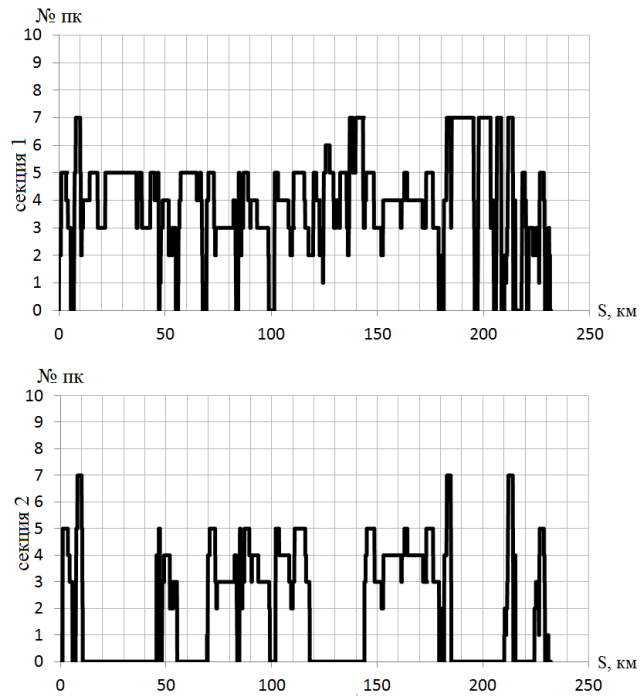


Рисунок 2.25 – Графики набора позиций контроллера машиниста.

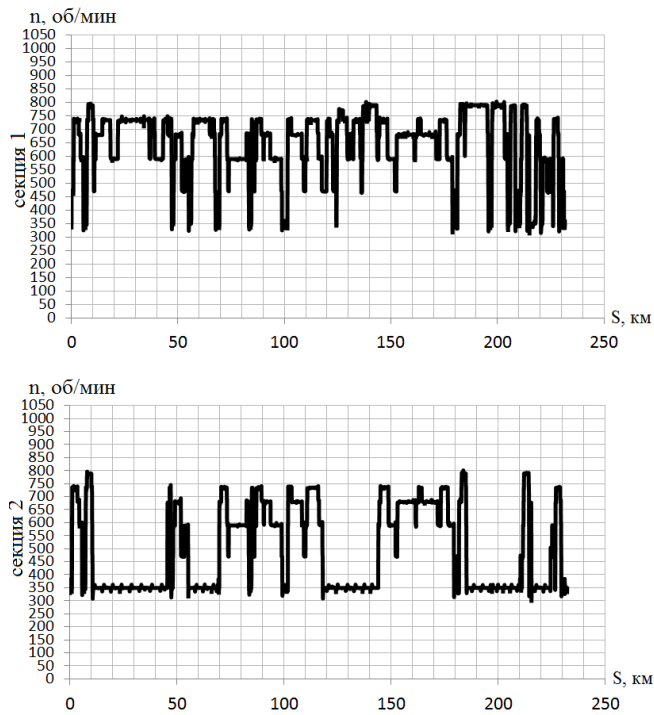


Рисунок 2.26 – Графики изменения частоты вращения ДГУ тепловоза

Отключение одной из секций также не отражается на скорости движения (см. рисунок 2.27).

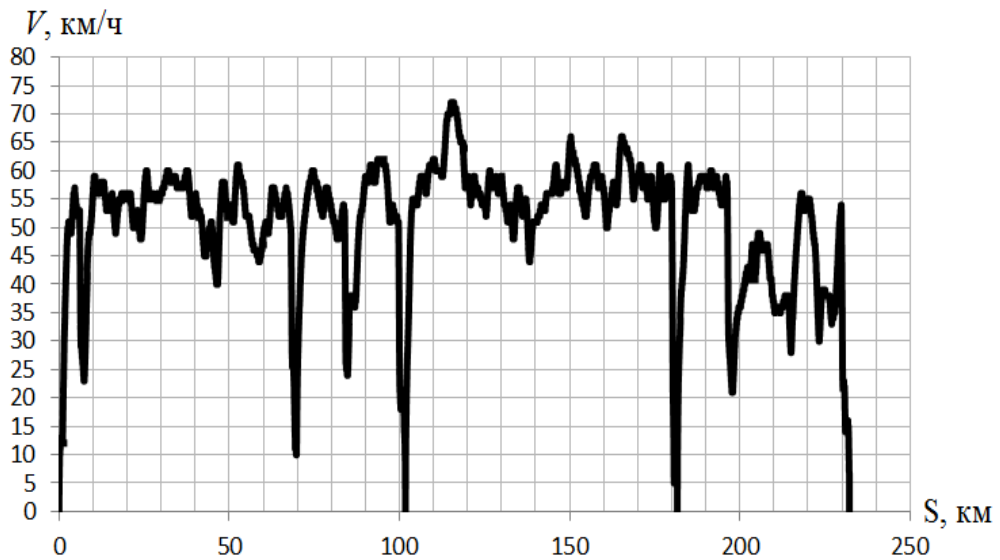


Рисунок 2.27 – График скорости движения поезда на участке

График изменения касательной силы тяги в процессе движения приведен на рисунке 2.28.

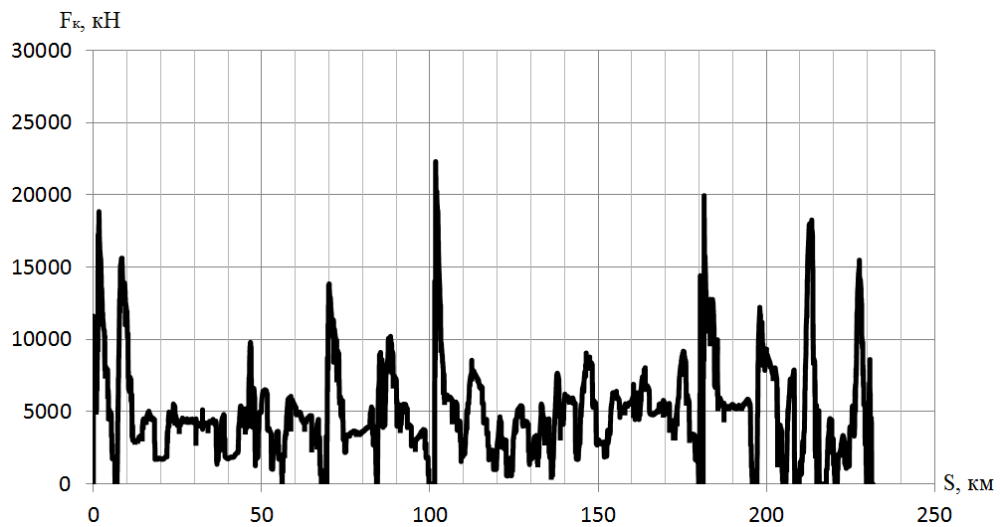


Рисунок 2.28 – Графики силы тяги, развиваемой тепловозом в процессе движения.

График расхода дизельного топлива в ходе поездки приведен на рисунке 2.29 и за все время движения составил  $G = 1305$  кг.

Удельный расход дизельного топлива за поездку составляет

$$g = \frac{G}{Q \cdot S} = \frac{1305}{2085 \cdot 233} = 26,86 \text{ кг}/10^4 \text{ т-км брутто.}$$

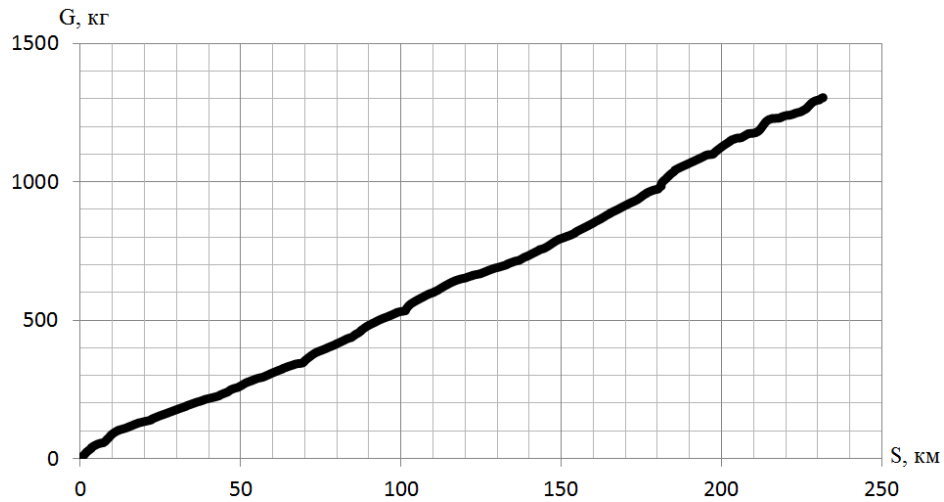


Рисунок 2.29 – График расхода топлива в ходе поездки

Основные энергетические показатели тепловоза в ходе поездки приведены на рисунке 2.30. График изменения потребляемой тепловозом мощности (по топливу)  $P_{\text{потр}}$  (2.1) показан на рисунке 2.30 зеленой линией; электрической мощности тепловоза (2.4) показан на рисунке 2.30 синей линией; номинальной мощности ДГУ  $P_{\text{ном}}$  на рисунке 2.30 показан пунктирной оранжевой линией, а номинальной мощности ЭПМ показан на рисунке 2.30 пунктирной голубой линией.

Изменение полезной мощности на тягу поезда (2.5) показан на рисунке 2.30 красной линией.

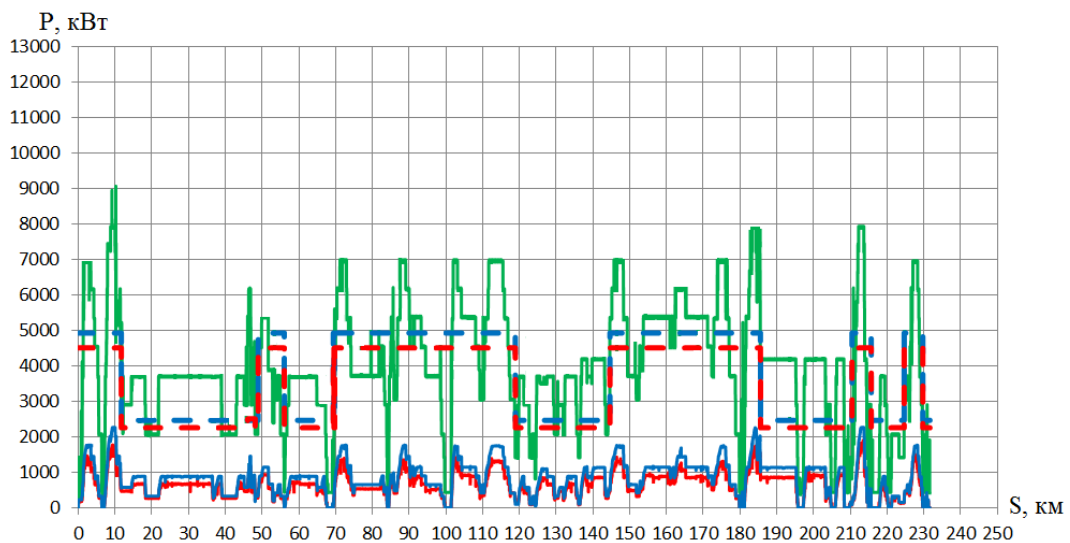


Рисунок 2.30 – Основные энергетические показатели тепловоза:  
 зеленая линия – потребляемая мощность (по топливу); пунктирная оранжевая линия – номинальная мощность ДГУ тепловоза; синяя линия – электрическая мощность;  
 пунктирная голубая линия – номинальная мощность ЭПМ тепловоза; красная линия – полезная мощность на тягу поезда



Для оценки эффективности преобразования мощности в ДГУ тепловоза, используем КИМ  $\gamma_{ДГУ}$  (2.10), а график его изменения в процессе движения показан на рисунке 2.31 синей линией. Как видно, максимальное значение  $\gamma_{ДГУ}$  в этой поездке не превышает 0,45. Отметим, что в интервалах работы обеих секций тепловоза на 1...5 позиции контроллера КИМ не превышает значений 0,12...0,15, в то время как в интервалах вывода из тяги *секции 2* и работе на той же позиции КИМ увеличивается в 2 – 2,5 раз и достигает значений 0,3...0,35.

График изменения КПД дизель-генераторной установки  $\eta_{ДГУ}$  (2.7) показан на рисунке 2.31 красной линией. Значение  $\eta_{ДГУ}$  не превышает 0,32...0,34. В периоды отключения, доступная мощность, оставшейся секции реализуется более полно (см. рисунок 2.31). Как видим при установившемся режиме работы тепловоза с отключенной секцией на 5-ой позиции контроллера машиниста (с 21-го по 36-й км)  $\eta_{ДГУ} = 0,3...0,32$ , а  $\eta_{ЭПМ} = 0,73...0,75$ . А при установившемся режиме работы тепловоза без отключения секций на 4-ой позиции контроллера машиниста (с 155-го по 165-й км)  $\eta_{ДГУ} = 0,25...0,27$ , а  $\eta_{ЭПМ} = 0,72...0,74$ .

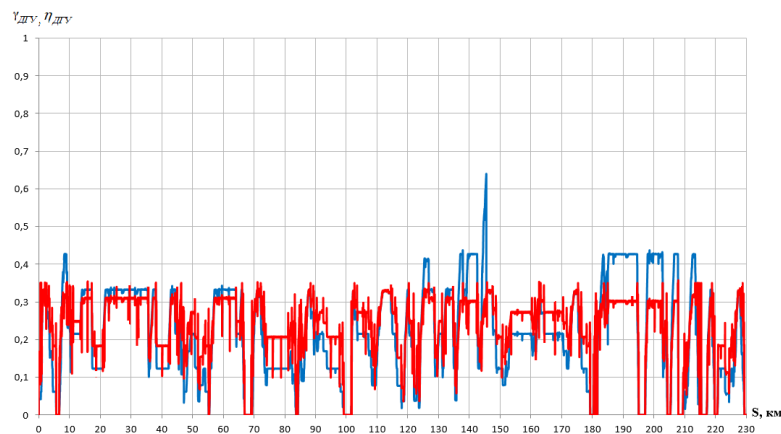


Рисунок 2.31 – Показатели энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ:  
синяя линия – КИМ ДГУ ( $\gamma_{ДГУ}$ ); красная – КПД ДГУ ( $\eta_{ДГУ}$ )

Тогда, согласно (2.6), мгновенное значение КПД тепловоза при работе на выбранных интервалах находится в следующих пределах:

$$\eta = \eta_{ДГУ} \cdot \eta_{ЭПМ} \cdot \eta_{мех} = (0,3...0,32) \cdot (0,73...0,75) \cdot 0,97 = 0,21...0,23. \text{ – с 21-го по 36-й км}$$

$$\eta = \eta_{ДГУ} \cdot \eta_{ЭПМ} \cdot \eta_{мех} = (0,25...0,27) \cdot (0,72...0,74) \cdot 0,97 = 0,18...0,19. \text{ – с 155-го по 165-й км}$$

Отметим, что даже при работе тепловоза с низкими значениями КИМ вывод из тяги избыточной мощности (отключение секции) дает повышение энергетической эффективности на 14...18 %.

### *Интегральные показатели*

Совершенная тепловозом полезная работа и потребленная энергия показаны на рисунке 2.32, причем полезная работа на тягу поезда согласно (2.12) составила:

$$A_{\text{пол}} = 3138,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

а потребленная энергия (по топливному эквиваленту) (2.13), составила:

$$E_{\text{потр}} = 15381,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Следовательно, среднее значение КПД тепловоза за поездку составляет:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}} = \frac{3138,7}{15402,7} = 0,204.$$

Остальные итоговые показатели энергетической эффективности тепловоза сведены в итоговую таблицу 2.8.

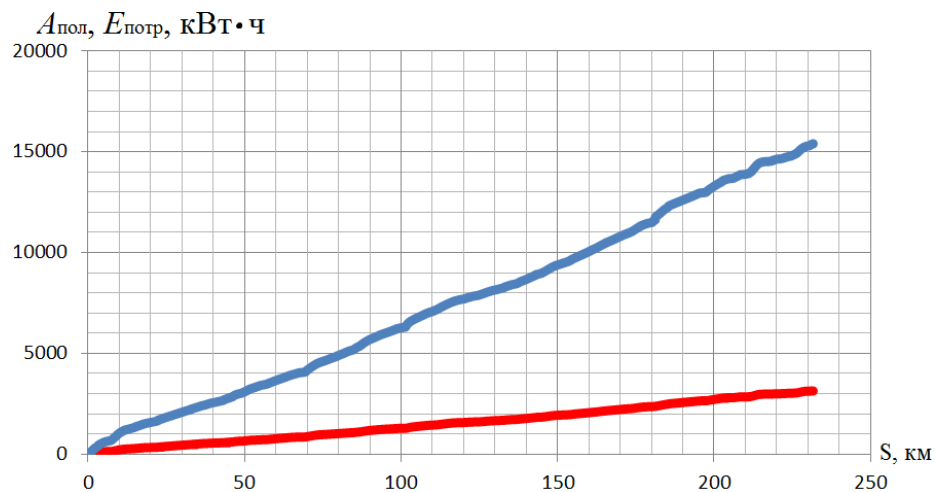


Рисунок 2.32 – Графики совершенной работы (красная линия) и потребленной энергии (синяя линия) за поездку

Показатели энергетической эффективности тепловоза сведены в итоговую таблицу 2.8.

Представим график потребленной энергии (см. рисунок 2.32, синяя линия) в виде гистограммы (рисунок 2.35), показывающей распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза. Отметим, что

во время движения с порожним составом практически вся энергия (99,51 %) была израсходована, когда локомотив использовался с КИМ меньше 0,5.

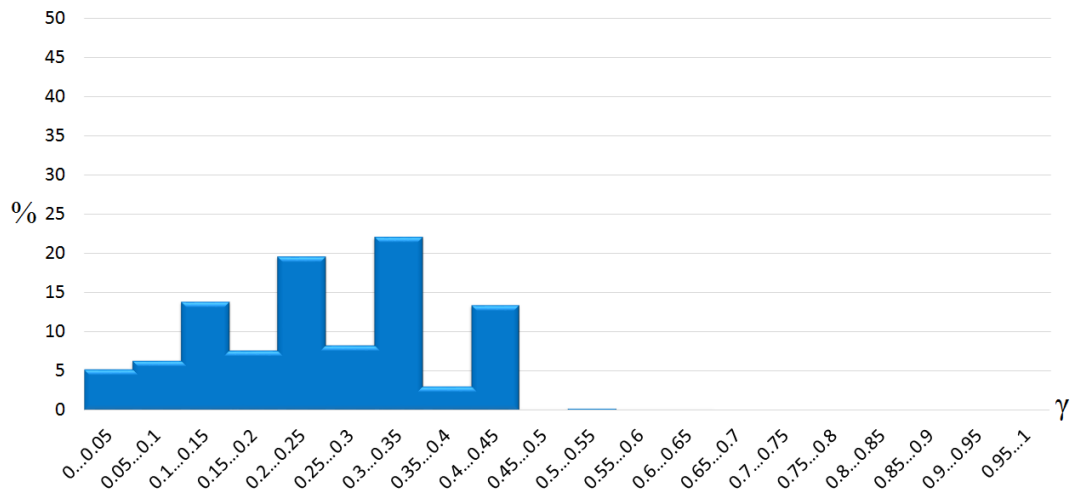


Рисунок 2.33 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза

Таблица 2.7 – Распределение потребленной энергии по режимам работы тепловоза на участке «Астрахань-2 – Артезиан»

Интервалы КИМ	$E_{\text{потр}}$ , кВт·ч	%
0...0,05	812,61	5,28
0,05...0,1	975,86	6,34
0,1...0,15	2129,76	13,83
0,15...0,2	1169,68	7,59
0,2...0,25	3018,24	19,6
0,25...0,3	1279,6	8,3
0,3...0,35	3401,44	22,08
0,35...0,4	464,66	3,02
0,4...0,45	2060,12	13,38
0,45...0,5	7,9	0,05
0,5...0,55	38,78	0,25
0,55...0,6	22,03	0,14
0,6...0,65	22,02	0,14
0,65...0,7	0	0
0,7...0,75	0	0
0,75...0,8	0	0
0,8...0,85	0	0
0,85...0,9	0	0
0,9...0,95	0	0
0,95...1	0	0
<b>Σ=</b>	<b>15402,7</b>	<b>100</b>

Таблица 2.8 – Показатели энергетической эффективности тепловоза на участке «Астрахань-2 – Артезиан»

Наименование параметра	Поезд № 2502 (с изменением числа секций в тяге)	Поезд № 2563 (с изменением числа секций в тяге)
1	2	3
Дата поездки	04.03.2018 г.	04.03.2018 г.
Направление	Астрахань-2 – Артезиан	Артезиан – Астрахань-2
Вес поезда, т	5062 (груженный состав)	2085 (порожный состав)
Расход топлива за поездку, кг	2036	1305
Удельный расход топлива за поездку, кг/10 <sup>4</sup> т-км брутто	17,46	26,86
Полезная работа на тягу, кВт·ч	5773,1	3138,7
Потребленная энергия, кВт·ч	24032,1	15402,7
Средний КПД ДГУ	0,33...0,35	0,3...0,32
Средний КПД ЭПМ	0,84...0,86	0,7...0,73
<b>Средний КПД тепловоза</b>	<b>0,24</b>	<b>0,204</b>

Из проведенного анализа поездок на участке видно, что при порожнем составе массой 2085 т (поезд №2563) КПД составил 0,204, а при груженом составе массой 5062 т (поезд №2502) – 0,24. Можно сделать вывод, что для груженого состава значение КПД тепловоза выше на 3,6 %, чем для порожнего.

Отметим, что показатели получены при эксплуатации тепловозов с изменением числа секций в тяге (в обеих поездках) и, как показывают полученные данные, если бы отключение секций не производилось, то данные показатели имели бы значения ниже на 14...18 %.

### 2.4.3 Показатели энергетической эффективности на участке «Разъезд 9 км – Железный Рог»

На рисунке 2.34 показан график скорости движения  $V$  грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ-022 с поездом №2004 (см. таблицу 2.3) В силу особенностей профиля пути (см. рисунок 2.5) наблюдается чередование значительных по протяженности уклонов, когда тепловоз движется в режиме выбега – сила тяги отсутствует, а его дизель-генераторная установка работает на холостом ходу (см. рисунки 2.35 и 2.36) и подъемов, когда тепловоз движется на 11...13-й позициях контроллера машиниста, реализуя значительную по величине силу тяги (см. рисунки 2.35 и 2.36).

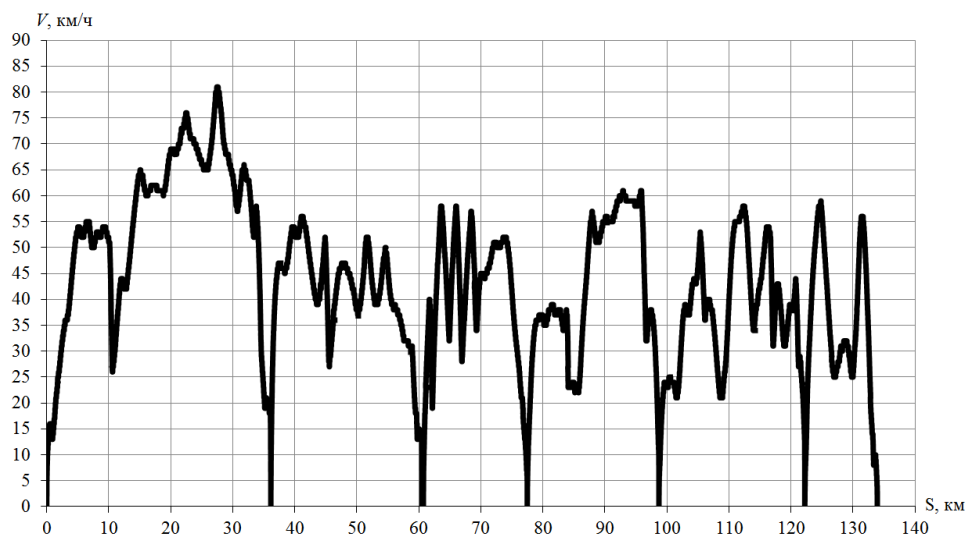


Рисунок 2.34 – График скорости поезда на участке «Разъезд 9-й км – Железный Рог»

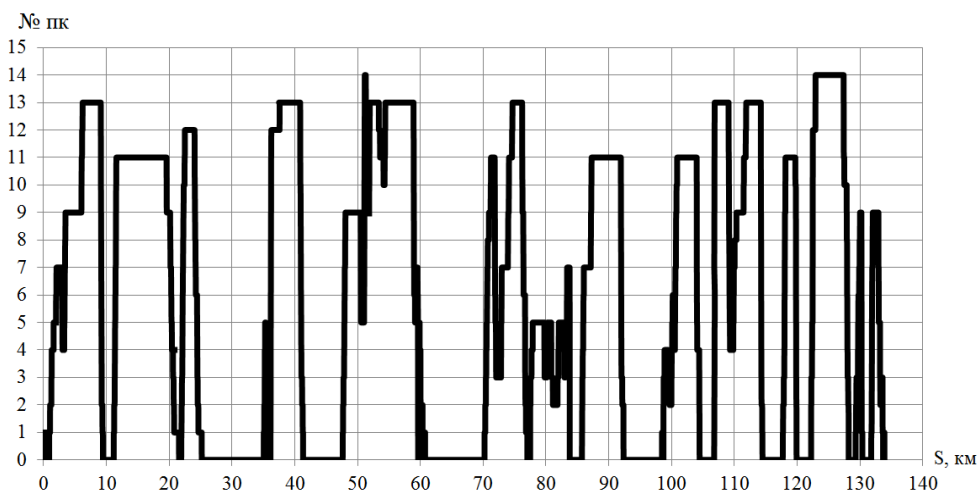


Рисунок 2.35 – График изменения позиций контроллера машиниста

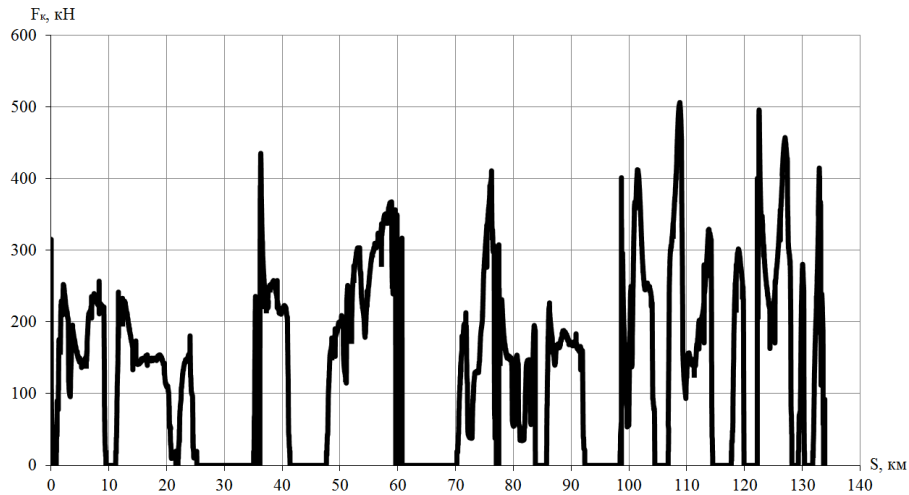


Рисунок 2.36 – График изменения касательной силы тяги

График расхода дизельного топлива в ходе поездки приведен на рисунке 2.37 красной линией и за все время движения составил  $G = 1607$  кг. Для данной поездки также имеются данные системы АСК [2.9] по контролю топлива в процессе движения (см. рисунок 2.37, синяя линия). По данным этой системы расход топлива составил 1567 кг. Относительное расхождение находится в пределах 2,5 %, что позволяет говорить о высоком уровне достоверности результатов.

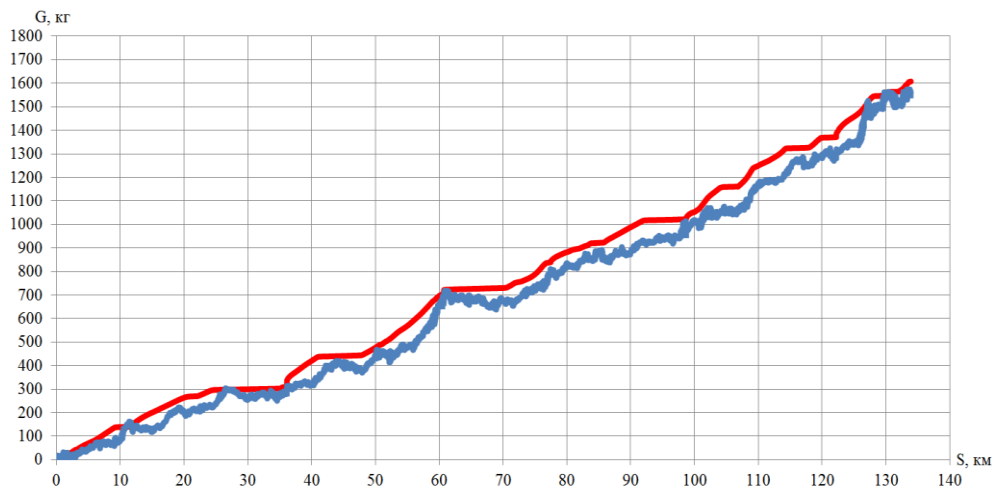


Рисунок 2.37 – График расхода топлива в ходе поездки:  
синяя линия – по данным системы АСК, красная линия – по расчетным данным.

Удельный расход дизельного топлива за поездку составляет

$$g = \frac{G}{Q \cdot S} = \frac{1607}{5584 \cdot 133} = 21,64 \text{ кг}/10^4 \text{ т-км брутто.}$$

Согласно (2.1), определяем потребляемую мощность (по топливу) за время поездки. Изменение потребляемой тепловозом мощности (по топливу)  $P_{\text{потр}}$  (2.1) приведено на рисунке 2.38 (зеленая линия).

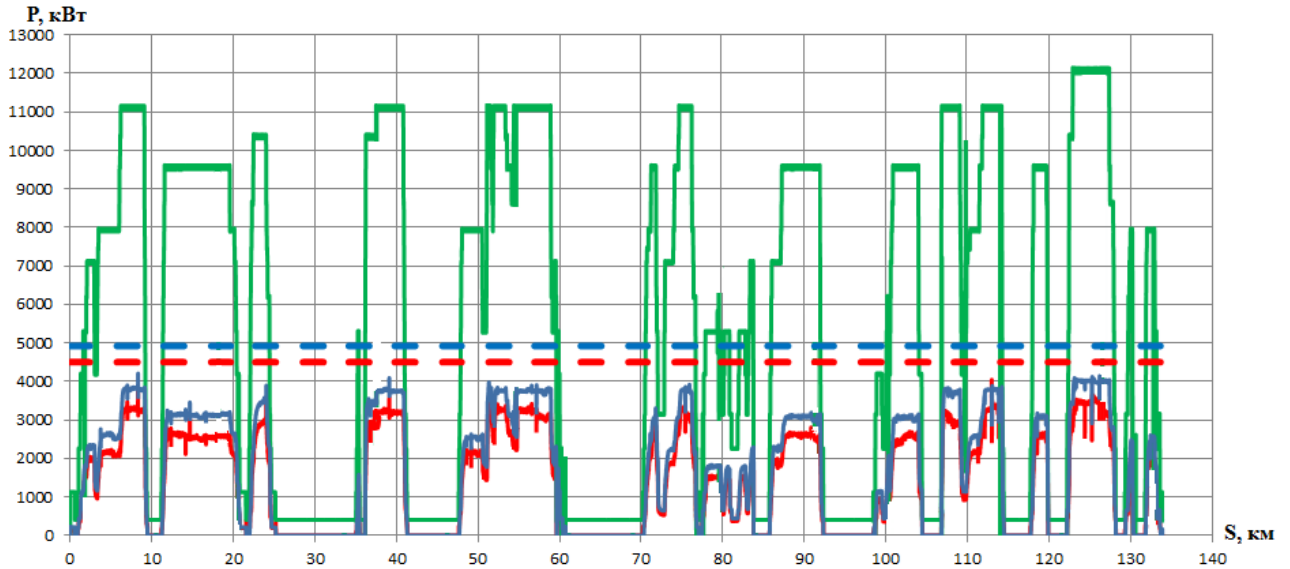


Рисунок 2.38 – Основные энергетические показатели тепловоза:  
 зеленая линия – потребляемая мощность (по топливу); пунктирная оранжевая линия – номинальная мощность ДГУ тепловоза; синяя линия – электрическая мощность; пунктирная голубая линия – номинальная мощность ЭПМ тепловоза; красная линия – полезная мощность на тягу поезда

Электрическая мощность тепловоза (2.4) показана на рисунке 2.38 синей линией. Номинальная мощность ДГУ  $P_{\text{ном}}$  на рисунке 2.38 показана пунктирной оранжевой линией. Номинальная мощность ЭПМ показана на рисунке 2.38 пунктирной голубой линией. Полезная мощность на тягу поезда (красная линия, см. рисунок 2.38) вычисляется согласно (2.5).

Чтобы оценить эффективность преобразования мощности в ДГУ тепловоза, используем КИМ  $\gamma_{\text{дгу}}$  (2.10), соответствующий график показан на рисунке 2.39 синей линией. Как видно, значение  $\gamma_{\text{дгу}}$  при работе на 14-й позиции контроллера в этой поездке составляет 0,74...0,76. График изменения КПД дизель-генераторной установки  $\eta_{\text{дгу}}$  (2.7) показан на рисунке 2.39 красной линией. Значение  $\eta_{\text{дгу}}$  не превышает 0,33...0,35.

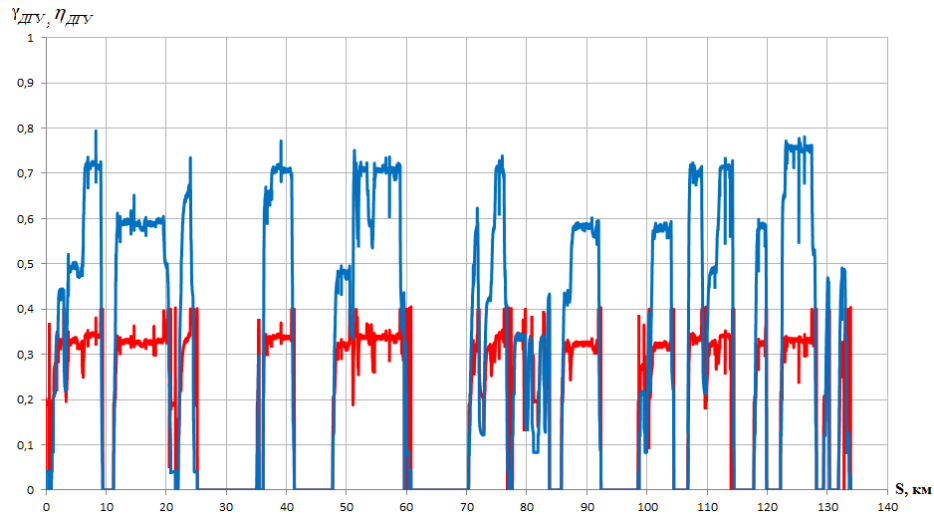


Рисунок 2.39 – Показатели энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ:  
синяя линия – КИМ ДГУ ( $\gamma_{\text{ДГУ}}$ ); красная – КПД ДГУ ( $\eta_{\text{ДГУ}}$ )

Значение КИМ электрической передачи мощности  $\gamma_{\text{ЭПМ}}$  достигает  $0,73 \dots 0,75$ .  
Значение  $\eta_{\text{ЭПМ}}$  находится при работе на 14-й позиции контроллера на уровне  $0,8 \dots 0,82$ .

Как видим при установившемся режиме работы тепловоза на 14-й позиции  $\eta_{\text{ДГУ}} = 0,33 \dots 0,35$ , а  $\eta_{\text{ЭПМ}} = 0,8 \dots 0,82$ . Соответственно, согласно (2.6), мгновенное значение КПД тепловоза при работе на 14-й позиции находится в следующих пределах:

$$\eta = \eta_{\text{ДГУ}} \cdot \eta_{\text{ЭПМ}} \cdot \eta_{\text{мех}} = (0,33 \dots 0,35) \cdot (0,81 \dots 0,83) \cdot 0,97 = 0,27 \dots 0,29.$$

### ***Интегральные показатели***

Совершенная тепловозом полезная работа и потребленная энергия показаны на рисунке 2.40, причем полезная работа на тягу поезда согласно (2.12) составила:

$$A_{\text{пол}} = 4704,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

а потребленная энергия (по топливному эквиваленту) (2.13), составила

$$E_{\text{потр}} = 18978,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следовательно, среднее значение КПД тепловоза за поездку составляет:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}} = \frac{4704,5}{18978,7} = 0,248..$$



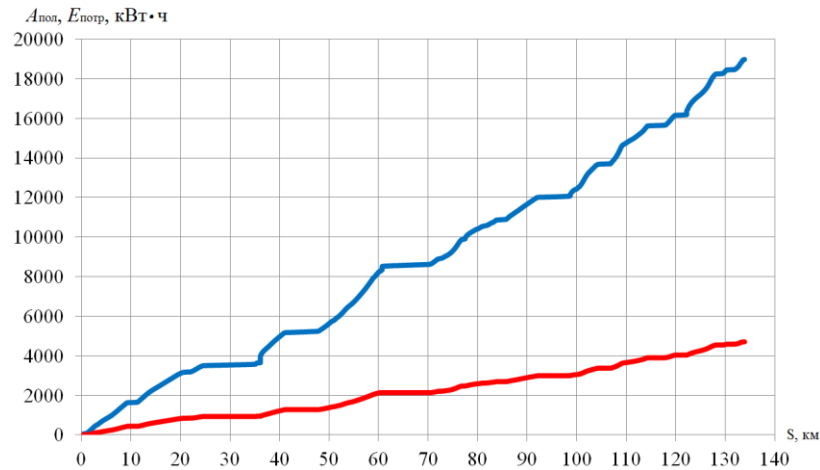


Рисунок 2.40 – Графики совершенной работы (красная линия) и потребленной энергии (синяя линия) за поездку

Представим график потребленной энергии (см. рисунок 2.40, синяя линия) в виде гистограммы (рисунок 2.41), показывающей распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза. Мы видим, что во время движения большая часть энергии – 61,5 % была израсходована, когда локомотив использовался с КИМ больше 0,5.

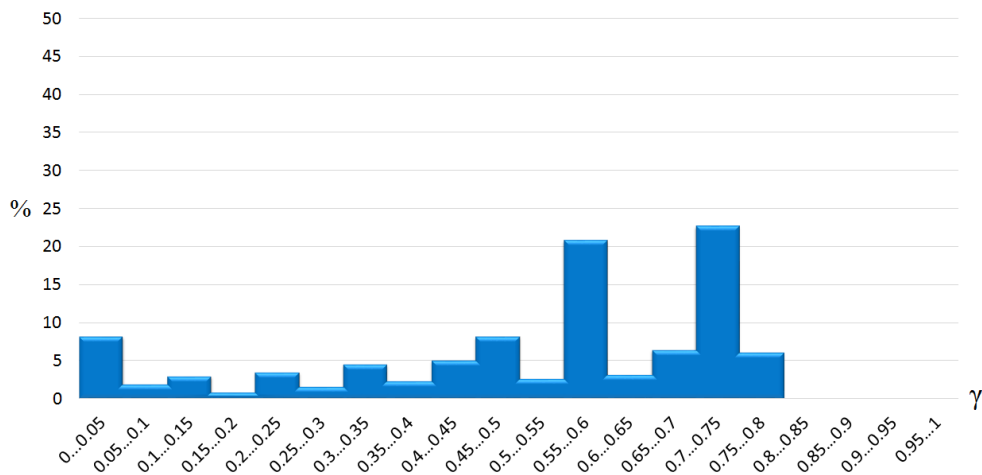


Рисунок 2.41 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза

Анализ других поездок на данном участке (см. таблицу 2.3) был выполнен аналогичным образом. Основные энергетические показатели тепловоза по трем оставшимся поездкам приведены на рисунке 2.42 и сведены в итоговую таблицу 2.9. А распределение потребленной энергии по режимам работы тепловоза по поездкам приведены на рисунке 2.43 и сведены в итоговую таблицу 2.10.

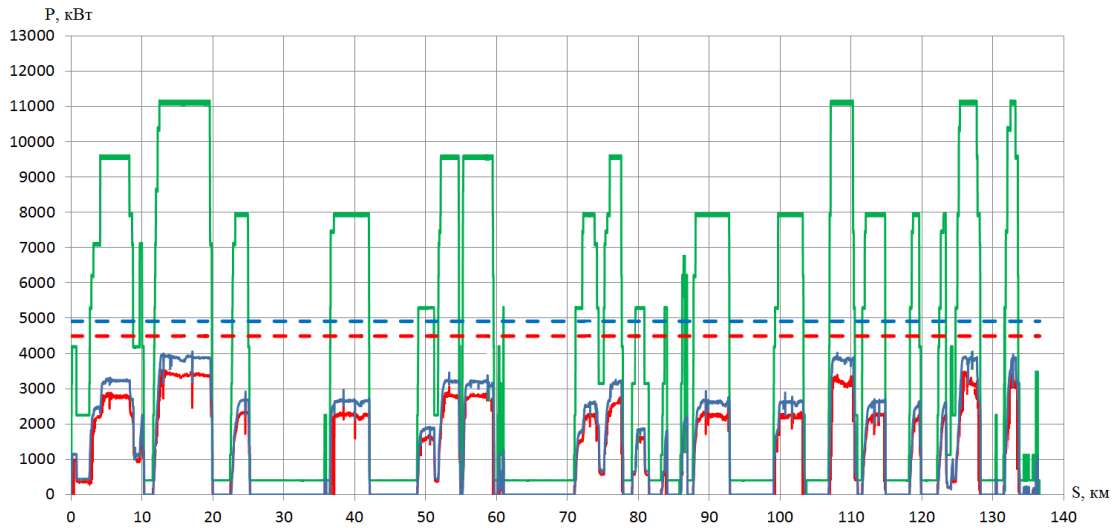
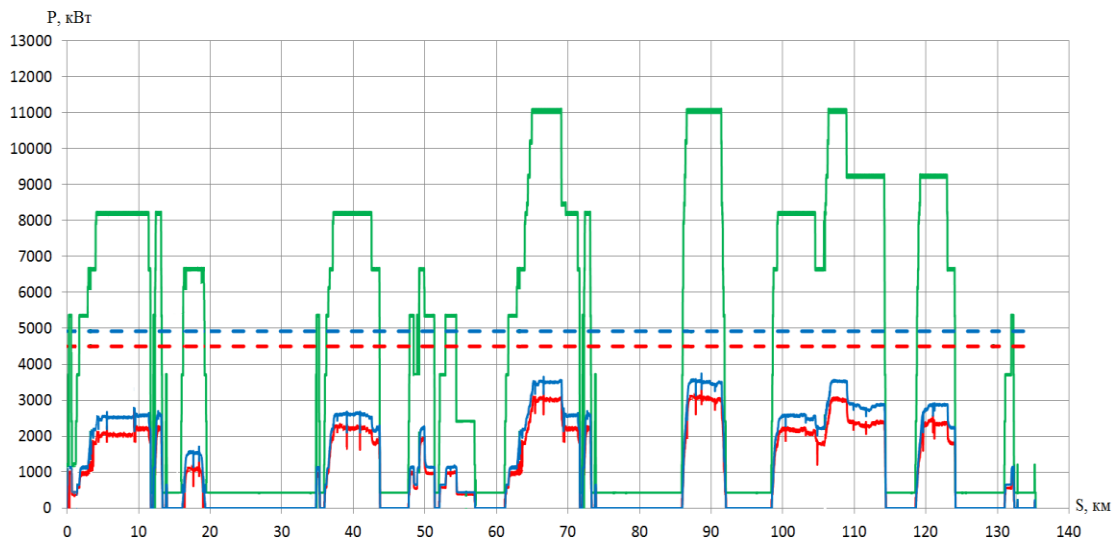
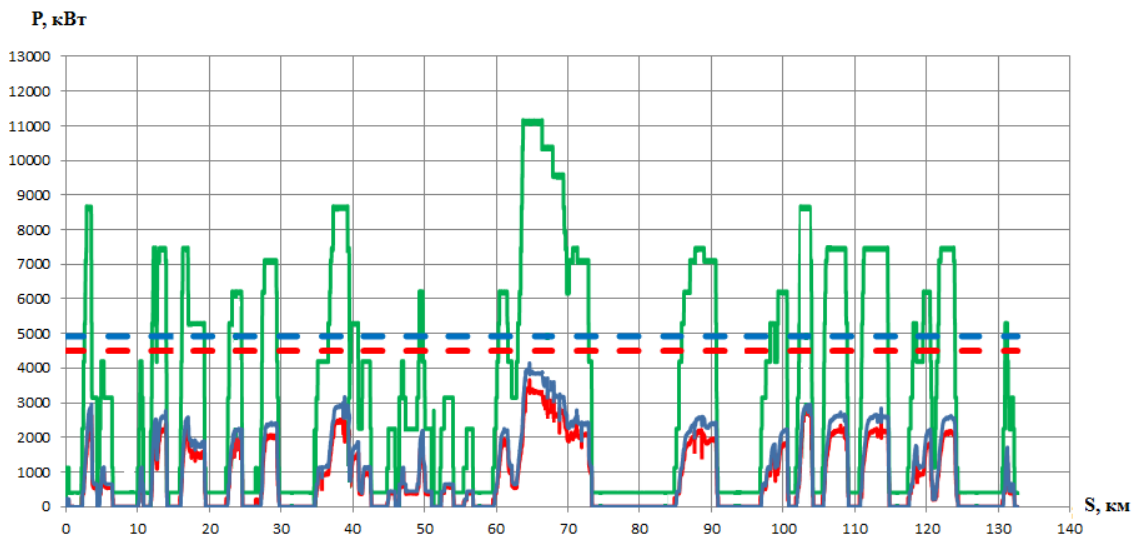
*a**б**в*

Рисунок 2.42 – Основные энергетические показатели тепловоза:  
*a* – поезд № 2024; *б* – поезд № 3001; *в* – поезд № 3005 (обозначения см. рисунок 2.10)

Таблица 2.9 – Показатели энергетической эффективности тепловоза на участке «Разъезд 9-й км – Железный Рог»

Наименование параметра	Поезд № 2024 (две секции в тяге)	Поезд № 2004 (две секции в тяге)	Поезд № 3001 (две секции в тяге)	Поезд № 3005 (две секции в тяге)
1	2	3	4	5
Дата поездки	10.03.2017 г.	11.03.2017 г.	11.03.2017 г.	11.03.2017 г.
Направление	Разъезд 9 км – Железный Рог		Железный Рог – Разъезд 9 км	
Вес поезда, т	4781 (груженный состав)	5584 (груженный состав)	1659 (порожний состав)	1748 (порожний состав)
Расход топлива за поездку, кг	1269	1607	990,5	947,5
Удельный расход топлива за поездку, кг/10 <sup>4</sup> т-км брутто	19,96	21,64	44,89	40,78
Полезная работа на тягу, кВт·ч	3647	4704,5	2192	2217
Потребленная энергия, кВт·ч	14976	18978,7	11653	11185
Средний КПД ДГУ	0,3...0,32	0,31...0,33	0,24...0,26	0,24...0,26
Средний КПД ЭПМ	0,78...0,8	0,79...0,81	0,75...0,77	0,75...0,77
<b>Средний КПД тепловоза</b>	<b>0,244</b>	<b>0,248</b>	<b>0,188</b>	<b>0,198</b>

Из проведенного анализа поездок на участке видно, что при порожнем составе массой 1659 т (поезд №3001) КПД составил 0,188, а при груженом составе массой 5584 т (поезд №2502) – 0,248. Можно сделать вывод, что для груженого состава значение КПД тепловоза выше на 6 %, чем для порожнего. Отключение секций на данном участке не производилось.

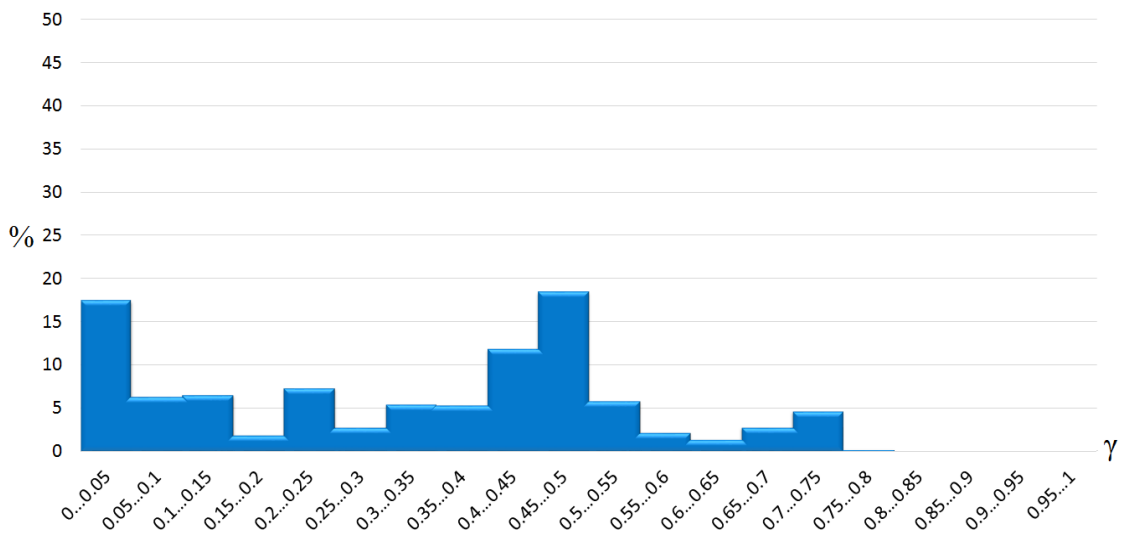
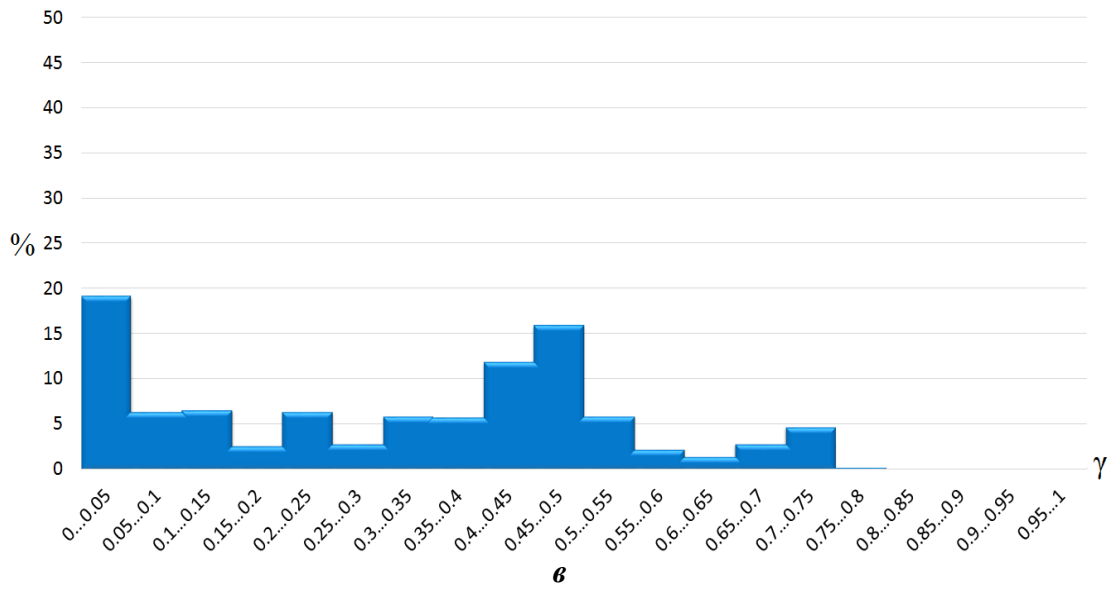
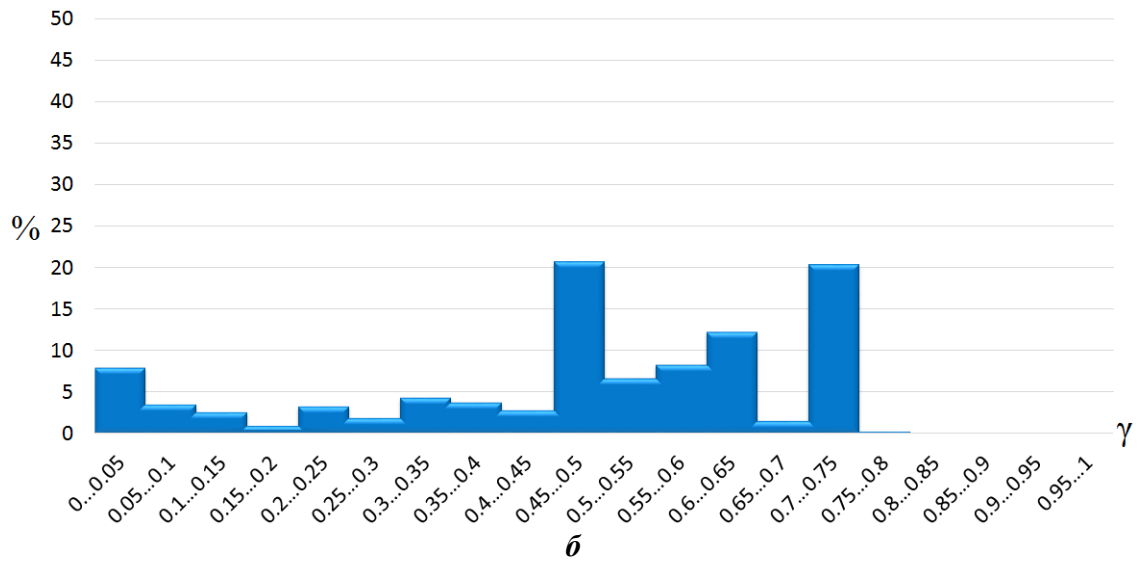
*a*

Рисунок 2.43 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза:

*a* – поезд № 2024; *б* – поезд № 3001; *в* – поезд № 3005

Таблица 2.10 – Распределение потребленной энергии по режимам работы тепло-  
воза на участке «Разъезд 9-й км – Железный Рог»

Интервалы КИМ	Поезд № 2024 (две секции в тяге)		Поезд № 2004 (две секции в тяге)		Поезд № 3001 (две секции в тяге)		Поезд № 3005 (две секции в тяге)	
	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%	Е <sub>потр</sub> , кВт·ч	%
0...0,05	1176,34	7,86	1533,1	8,08	2237,4	19,2	1948,43	17,42
0,05...0,1	525,42	3,51	352	1,86	656,07	5,63	702,42	6,28
0,1...0,15	386,37	2,58	548,97	2,88	682,87	5,86	729,26	6,52
0,15...0,2	134,45	0,9	160,37	0,85	376,39	3,23	212,52	1,9
0,2...0,25	482,89	3,22	650,57	3,43	832,02	7,14	817,85	7,31
0,25...0,3	266,5	1,78	287,5	1,52	308,81	2,65	303,12	2,71
0,3...0,35	647,61	4,32	847,68	4,47	705,01	6,05	609,58	5,45
0,35...0,4	544,76	3,64	436,02	2,3	695,68	5,97	599,52	5,36
0,4...0,45	412,12	2,75	953,02	5,02	1444,97	12,4	1319,83	11,8
0,45...0,5	3086,46	20,6	1536,05	8,09	1796,89	15,42	2058,04	18,4
0,5...0,55	988,35	6,6	482,46	2,54	666,55	5,72	655,44	5,86
0,55...0,6	1228,45	8,2	3940,68	20,76	244,71	2,1	240,48	2,15
0,6...0,65	1820,56	12,16	588,65	3,1	154,99	1,33	152,12	1,36
0,65...0,7	214,15	1,43	1210,22	6,38	313,47	2,69	307,59	2,75
0,7...0,75	3036,77	20,28	4307,1	22,69	522,05	4,48	513,39	4,59
0,75...0,8	24,65	0,17	1144,31	6,03	15,15	0,13	15,41	0,14
0,8...0,85	0	0	0	0	0	0	0	0
0,85...0,9	0	0	0	0	0	0	0	0
0,9...0,95	0	0	0	0	0	0	0	0
0,95...1	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Σ=</b>	<b>14975,9</b>	<b>100</b>	<b>18978,7</b>	<b>100</b>	<b>11653</b>	<b>100</b>	<b>11185</b>	<b>100</b>

## 2.5 Заключение. Выводы по главе 2

1. Объектом рассмотрения является грузовой магистральный тепловоз 2ТЭ25КМ с электрической передачей мощности переменного-постоянного тока и плавным регулированием силы тяги. Выполнена обработка массивов записей бортовых регистраторов. В результате получены качественные и количественные оценки, позволяющие установить зависимость показателей энергетической эффективности локомотива в различных условиях эксплуатации от массы поезда, профиля участка пути и условий движения на Южном полигоне.

2. Выделен и оценен вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – КИМ и КПД тепловоза.

3. Получены количественные характеристики потребления топлива (в энергетическом эквиваленте) в различных условиях эксплуатации в зависимости от веса поезда, профиля участка пути и условий движения. Например, для одной из поездок по данным системы АСК расход топлива за поездку составил 1567 кг. По расчетным данным, расход топлива составил 1607 кг. Относительное расхождение находится в пределах 2,5 %, что позволяет говорить о высоком уровне достоверности результатов.

4. Получены зависимости (в виде таблиц и гистограмм), показывающие распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности тепловоза, которые позволили дать объективную оценку использования мощности тепловоза в различных условиях эксплуатации на Южном полигоне.

5. КПД силовой установки, для условий работы на Южном полигоне, находится в пределах от 20% (равнинный профиль, порожний поезд) до 36% (движение на подъем, груженный поезд).

6. Из проведенного анализа поездок на участке «Минеральные Воды – Прохладная» видно, что при порожнем составе массой 2468 т КПД составил 0,236; при груженом составе массой 4972 т – 0,256, а массой 5587 т – 0,263; в то время как при груженом поезде меньшей массы (4168 т), но с отключением секций – 0,275.

Делаем вывод, что наибольшее значение КПД имеет место для груженого состава массой 4168 т (поезд №3057) при работе тепловоза с отключением секций (выводом избыточной мощности из тяги). Для груженого состава значение КПД тепловоза выше на 3,9 %, чем для порожнего.

7. Из проведенного анализа поездок на участке видно, что при порожнем составе массой 2085 т (поезд №2563) КПД составил 0,204, а при груженом составе массой 5062 т (поезд №2502) – 0,24. Можно сделать вывод, что для груженого состава значение КПД тепловоза выше на 3,6 %, чем для порожнего. Отметим, что показатели получены при эксплуатации тепловозов с изменением числа секций в тяге (в обеих поездках) и, как показывают полученные данные, если бы отключение секций не производилось, то данные показатели имели бы значения ниже на 14...18 %.

8. Из проведенного анализа поездок на участке «Разъезд 9-й км – Железнодорожный Рог» видно, что при порожнем составе массой 1659 т (поезд №3001) КПД составил 0,188, а при груженом составе массой 5584 т (поезд №2502) – 0,248. Можно сделать вывод, что для груженого состава значение КПД тепловоза выше на 6 %, чем для порожнего. Отключение секций на данном участке не производилось.

9. Виден характер зависимости среднеэксплуатационного КПД тепловоза от массы поезда. Чем выше масса состава (чем более полно используется доступная мощность тепловоза), тем выше значение КПД.

10. При равнинном профиле, отключение секций позволяет более полно использовать доступную мощность работающей секции тепловоза, и как следствие увеличить значение КПД. Этот эффект ярче проявляется при порожнем составе.

11. Обобщая сделанные выводы и продолжая выявленные тенденции, мы имеем основания заключить, что переход к модульной структуре СЭУ и ЭПМ позволит получить дальнейшее увеличение показателей энергетической эффективности автономных локомотивов.

## Глава 3

# НАХОЖДЕНИЕ ПОЛЕЗНОЙ РАБОТЫ, СОВЕРШАЕМОЙ ЛОКОМОТИВОМ С ПООСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СИЛЫ ТЯГИ ПРИ ВЕДЕНИИ ПОЕЗДА

### 3.1 Введение

В главе 2 выполнен анализ показателей энергетической эффективности грузовых магистральных тепловозов серии 2ТЭ25КМ в различных условиях эксплуатации.

В настоящей главе получено решение дифференциального уравнения движения поезда, составлены уравнения баланса сил, баланса мощностей и энергетического баланса и предложена методика для нахождения полезной работы, совершаемой локомотивом с поосным регулированием силы тяги при известном профиле пути, массе поезда и заданном скоростном режиме. Она позволяет получить объективную основу для оценки эффективности использования мощности, которую потребляет силовая энергетическая установка.

Материалы главы 3 опубликованы в [3.4 – 3.6].

### 3.2 Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги

Энергетическая эффективность локомотивной тяги характеризуется коэффициентом полезного действия и коэффициентом использования мощности [1.1]. Переход от мгновенных значений КПД (1.2) к среднему значению КПД  $\eta_{\text{средн}}$  за время движения по перегону осуществляется путем интегрирования [1.51, 1.52] и приводит к выражению вида:

$$\eta_{\text{средн}} = \frac{A_{\text{пол}}}{E_{\text{потр}}}, \quad (3.1)$$

где  $A_{\text{пол}}$  – полезная работа на тягу поезда, кВт·ч;  $E_{\text{потр}}$  – потребленная энергия, кВт·ч.



Полезная работа на тягу поезда  $A_{\text{пол}}$  в (3.1) представляет собой «полезный эффект от использования энергетических ресурсов» и определяется по (2.12), а потребленная энергия  $E_{\text{потр}}$  – «затраты энергетических ресурсов, произведенные в целях получения такого эффекта» (2.13).

Таким образом, видим, что среднее значение КПД локомотива  $\eta_{\text{средн}}$  (3.1) представляет собой именно «отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта», предусмотренное Федеральным законом № 261-ФЗ [3.1]. Повышение КПД локомотива означает увеличение энергетической эффективности. При этом необходимо различать КПД локомотива как силовой установки (именно это значение указывается в технической документации) и КПД эксплуатационный, который зависит от времени работы локомотива в различных режимах [1.1, 3.2] при движении поезда и от расхода энергии на поддержание локомотива в работоспособном состоянии во время стоянок.

Выполним переход от мгновенного значения КИМ (2.9) к среднему значению КИМ  $\gamma_{\text{средн}}$ , которое представляет собой отношение полезной работы на тягу поезда  $A_{\text{пол}}$  к работе, совершенной локомотивом в номинальном режиме за то же время  $A_{\text{ном}}$ :

$$\gamma_{\text{средн}} = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{ном}}}. \quad (3.2)$$

### 3.3 Соотношения теории локомотивной тяги

Соотношения теории локомотивной тяги, связанные с расчетом полезной работы локомотива, совершенной на некотором перегоне, изложим согласно [1.51, 1.52].

**Параметры участка пути.** Длину перегона обозначим как  $S$ . План и профиль пути полагаем известными, в дальнейшем отсюда получаем спрямленный профиль пути, необходимый для проведения тяговых расчетов согласно [1.52].

Спрямленный профиль состоит из элементарных участков, в пределах каждого из которых уклон  $i$  (измеряется в ‰) постоянен. Кроме того, необходимо учитывать тип уложенного пути – звеньевой или бесстыковой.

**Параметры поезда.** Модель движения поезда, принятая в тяговых расчетах, строится следующим образом. Подразумеваются следующие общепринятые упрощения [1.52]: не принимаются во внимание техническое состояние вагонов и локомотива (достаточно того, что они могут двигаться в составе), их вертикальные и поперечные колебания и т. д. Однако, должно быть указано число вагонов и число осей, а также указан тип подшипников (качения или скольжения) и тип тормозных колодок.

Поезд, как система связанных между собой элементов (локомотив и вагоны), движется поступательно с общей для всех элементов скоростью  $V$ . Массу локомотива обозначим  $P$ , т; массу вагонов –  $q_1, \dots, q_n$ , т; суммарную массу вагонов (массу состава) обозначим  $Q$ , т. Далее, поезд представляется как твердое тело массы  $m = P + Q$ , сосредоточенной в его центре масс.

Для записи кинетической энергии с учетом вращающихся элементов конструкции (колесные пары, роторы тяговых электродвигателей и т.п.), вводится в рассмотрение величина  $\gamma_{вр}$  – коэффициент инерции вращающихся частей.

Тогда приведенная масса поезда запишется как

$$m_{пр} = m \cdot (1 + \gamma_{вр}) . \quad (3.3)$$

Таким образом, пренебрегаем конечной длиной поезда, а его движение считаем поступательным.

**Действующие силы.** Перейдем к рассмотрению действующих на поезд внешних продольных сил. К ним относятся: касательная сила тяги локомотива  $F_k$ ; силы сопротивления движению  $W_k$ , включающие в себя скатывающие силы при движении по уклонам; тормозные силы  $B_t$ .

Касательной силой тяги локомотива  $F_k$  называется внешняя управляемая сила, создаваемая локомотивом при взаимодействии его колес с рельсами и направленная в сторону движения. В режиме электрического (реостатного или ре-

куперативного) торможения  $F_k$  является силой электрического торможения, которая направлена противоположно движению.

Силами сопротивления движению называются возникающие в процессе движения внешние неуправляемые силы, величину этих сил обозначим как  $W_k$ . К их числу относятся силы сопротивления воздуха, силы трения в подшипниках и т.п., которые зависят от скорости и массы поезда. При движении по участкам, имеющим подъемы и спуски, существенное влияние оказывают силы тяжести. Сюда же относится дополнительное сопротивление, возникающее при прохождении кривых.

Тормозными силами поезда  $B_T$  называются искусственно вызываемые машинистом внешние управляемые тормозные силы колодочного или дискового тормоза, направленные в сторону, противоположную движению, и предназначенные для уменьшения скорости движения поезда или полной его остановки.

Различают три основных режима движения поезда: 1) тяга; 2) выбег; 3) торможение (пневматическое или электрическое).

### 3.4 Дифференциальное уравнение движения поезда

Дифференциальное уравнение движения поезда запишем в проекции на ось  $x$ , направленную в сторону движения поезда (рисунок 3.1):

$$x: m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} = F_{\text{кx}} + W_{\text{кx}} + B_{\text{Tx}}, \quad (3.4)$$

где  $t$  – время, с;

$v_x = V$  – скорость, м/с;

$m_{\text{пр}}$  – приведенная масса поезда, т;

$F_k$  – касательная сила тяги, кН;

$W_k$  – силы сопротивления движению кН;

$B_T$  – тормозные силы, кН.

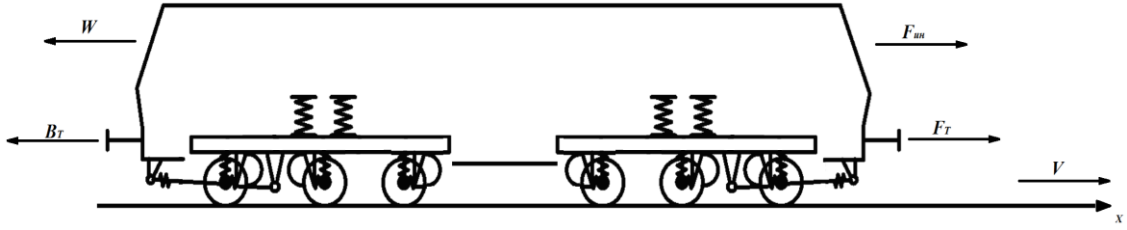


Рисунок 3.1 – Схема действия сил

Первое слагаемое в правой части уравнения (3.4) представляет собой силу, которая при работе локомотива в режиме тяги направлена в сторону движения, а при электрическом торможении – противоположно движению. Величина этой силы  $F_k$  определяется машинистом, путем набора позиций, а её проекция на ось  $x$  равна:

$$F_{кx} = k_1 F_k, \quad (3.5)$$

здесь  $F_k > 0$ .

Коэффициент  $k_1$  в (3.5) определяется следующим образом:

$$k_1 = \begin{cases} +1, & \text{в режиме тяги,} \\ -1, & \text{в режиме электрического торможения,} \\ 0, & \text{на выбеге.} \end{cases}$$

Заметим, что тепловоз 2ТЭ25КМ оснащен многодвигательным тяговым электроприводом с поосным регулированием силы тяги, поэтому, суммарное тяговое усилие тепловоза  $F_k$  складывается из сил тяги  $F_{kn}$ , создаваемых активными (находящимися в тяге) ТЭД:

$$F_k = \sum_{n=1}^{N_{акт}} F_{kn}, \quad (3.6)$$

где  $N_{акт} \leq N_{ТЭД}$ , здесь  $N_{ТЭД}$  – общее число тяговых двигателей локомотива.

Далее, в правой части уравнения (3.4) присутствует проекция силы сопротивления движению  $W_{кx}$ . Полное сопротивление движению поезда  $W_k$  состоит из основного сопротивления движению  $W_0$  и дополнительных сопротивлений, возникающих от наличия уклонов и кривых:

$$W_k = W_0 + W_i + W_r. \quad (3.7)$$

Сила основного сопротивления всегда направлена противоположно движению:

$$W_{\text{от}} = -W_0 < 0. \quad (3.8)$$

По величине, основное сопротивление  $W_0$  зависит от скорости движения  $V$ , массы поезда и нагрузки на ось, она вычисляется согласно [3.3], пример показан на рисунке 3.2 для движения поезда с тепловозом 2ТЭ25КМ по прямому горизонтальному участку пути. Видно, что сила основного сопротивления возрастает с увеличением скорости и массы поезда.

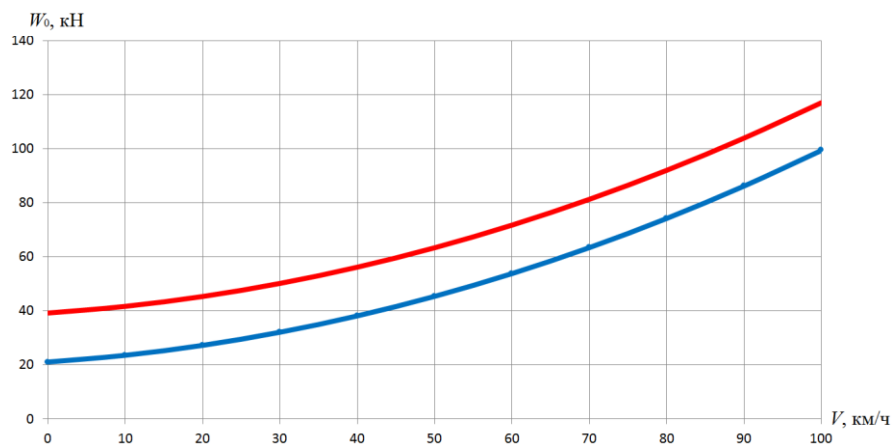


Рисунок 3.2 – Изменение силы основного сопротивления  $W_0(V)$  для поездов с тепловозной тягой различной массы: 5000 т (красная линия); 1500 т (синяя линия).

Дополнительное сопротивление от уклона  $W_i$  выражает действие сил тяжести. Удельное дополнительное сопротивление от уклона  $w_i$  численно равно величине уклона, а его проекция на ось  $x$  положительна при движении на спуск ( $i < 0$ , здесь  $i$  измерено в ‰) и отрицательна при движении на подъем ( $i > 0$ ), то есть

$$w_{ix} = -i. \quad (3.9)$$

Таким образом, при движении на подъем ( $i > 0$ ), дополнительное сопротивление от уклона  $w_i$  направлено противоположно движению. При движении под уклон ( $i < 0$ ), дополнительное сопротивление от уклона направлено в сторону движения и вызывает увеличение скорости поезда.

При движении поезда возникает также дополнительное сопротивление при прохождении кривых  $W_r$ , которое всегда направлено против движения. В тяговых расчетах используют спрямленный профиль пути (кривые заменяются фиктивным подъемом  $i_r = 700/R > 0$ , где  $R$  – радиус кривой, м). Проекция удельного дополнительного сопротивления при движении в кривой определяется как [3.3]:

$$w_{rx} = -i_r = -700/R. \quad (3.10)$$

Таким образом, из (3.7) получаем проекцию полного сопротивления движению поезда на ось  $x$  в виде

$$W_{кx} = W_{ox} + W_{ix} + W_{rx}, \quad (3.11)$$

причем  $W_{ox}$  и  $W_{rx}$  всегда отрицательны, а  $W_{ix}$  может быть и положительна, и отрицательна в зависимости от того, на спуск или на подъем движется поезд.

Проекцию сил пневматического торможения на направление движения  $B_{tx}$  запишем как:

$$B_{tx} = -B_t = k_2 B_t \leq 0. \quad (3.12)$$

Введем в рассмотрение коэффициент  $k_2$  следующим образом:

$$k_2 = \begin{cases} -1, & \text{при работе в режиме торможения,} \\ 0, & \text{при работе в других режимах.} \end{cases}$$

Тогда (3.4), с учетом принятых обозначений, примет вид:

$$x : m_{np} \frac{dV}{dt} = k_1 F_k + W_{кx} + k_2 B_t. \quad (3.4^*)$$

Далее будем рассматривать только движение в режиме тяги. Движение на выбеге и при торможении могут быть изучены аналогичным образом.

### 3.5 Баланс сил в режиме тяги

При работе локомотива в режиме тяги (то есть при  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 0$ ), из (3.4\*) получаем уравнение кинетостатики:

$$F_{инх} + F_k + W_{кx} = 0. \quad (3.13)$$

Проекция силы инерции на ось  $x$  в (3.13) равна

$$F_{\text{инх}} = -m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt}. \quad (3.14)$$

Из уравнения (3.13) выражаем силу тяги:

$$F_{\text{к}} = -F_{\text{инх}} - W_{\text{кx}}, \quad (3.15)$$

и получаем баланс сил, действующих на поезд, в режиме тяги [3.4]

$$F_{\text{к}} = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} - W_{\text{кx}}(V). \quad (3.16)$$

Стоит отметить, что для выполнения конкретных расчетов, должны быть известны все параметры перегона и поезда, указанные выше. Кривая скорости  $V(t)$  может быть получена при помощи бортовых приборов регистрации, таких как «КЛУБ», РПРТ, МСУД, МПСУ-ТП и других. Тогда мы приходим к первой (прямой) задаче динамики: по известному движению, в нашем случае – по известной скорости движения  $V = V(t)$  найти действующие силы, которые вызывают это движение. Нас интересует сила тяги  $F_{\text{к}}$ , которая может быть определена из (3.16) при известном законе изменения скорости.

Исходя из (3.16), проанализируем возможные ситуации.

1) Пусть перегон представляет собой прямой горизонтальный участок пути, и поезд движется по нему с постоянной скоростью  $V = \text{const}$ . Тогда сила инерции и скатывающая сила отсутствуют, и из (3.16) получаем:

$$F_{\text{к}} = -W_{\text{кx}}(V) = W_{\text{к}}(V), \quad (3.16^*)$$

то есть в данном случае сила тяги уравнивает только лишь силу основного сопротивления, возникающую при движении со скоростью  $V$  (см. рисунок 3.1). Этот случай соответствует тому факту, что энергетические затраты на тягу минимальны при движении поезда с постоянной скоростью по прямому горизонтальному участку пути (см. [3.3]).

2) Пусть перегон представляет собой горизонтальный прямой участок пути, но скорость движения изменяется, в зависимости от обстановки поезд может как разгоняться, так и замедляться, то есть  $\frac{dV}{dt} \neq 0$ . В этом случае скатывающая сила равна нулю, и из (3.16) получаем силу тяги в виде

$$F_k = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} + W_k(V). \quad (3.16^{**})$$

Первое слагаемое в правой части (3.9) – это проекция силы инерции, взятая с противоположным знаком. При разгоне, когда ускорение поезда положительно (то есть направлено в сторону движения), имеем  $\frac{dV}{dt} > 0$  и скорость растет, это слагаемое принимает большое значение. Соответственно при разгоне, по сравнению с равномерным движением, требуется увеличить силу тяги. После набора скорости, первое слагаемое в правой части (3.16\*\*) становится равным нулю, и выражение (3.16\*\*) превращается в (3.16\*). Соответственно, после набора скорости сила тяги локомотива может быть несколько уменьшена.

3) Пусть перегон представляет собой участок сложного плана и профиля, имеющим подъемы, спуски и кривые, а скорость движения постоянно меняется. В этой ситуации, наиболее приближенной к реальности, для определения силы тяги  $F_k$  применяется непосредственно выражение (3.16). По сравнению со случаем 1, сила тяги локомотива будет иметь гораздо бóльшие значения.

### 3.6 Баланс мощностей в режиме тяги

Перейдем к рассмотрению баланса мощностей, для чего умножим выражение (3.17) на скорость  $V$ . Получим:

$$F_k \cdot V = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} \cdot V - W_{\text{кx}}(V) \cdot V. \quad (3.17)$$

Мощность локомотива на тягу в данный момент времени равна произведению силы тяги на скорость (левая часть выражения (3.17)):

$$P_{\text{т}} = F_k \cdot V. \quad (3.18)$$

Мощность сил инерции (первое слагаемое в правой части выражения (3.17)) представляет собой производную по времени от кинетической энергии поезда:

$$P_{\text{ин}} = m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} \cdot V = \frac{dT}{dt}, \quad (3.19)$$



где  $T = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \cdot V^2$  – кинетическая энергия поезда, который движется со скоростью  $V$ .

Мощность действующих на поезд сил сопротивления (второе слагаемое в правой части выражения (3.17)) равна

$$P_{\text{сопр}} = -W_{\text{кx}}(V) \cdot V = W_{\text{к}}(V) \cdot V. \quad (3.20)$$

Таким образом, из (3.17) – (3.20) получаем баланс мощностей в данный момент времени  $t$ :

$$P_{\text{т}} = P_{\text{ин}} + P_{\text{сопр}}, \quad (3.21)$$

то есть, при работе локомотива в режиме тяги его полезная мощность  $P_{\text{т}}$  в каждый момент времени равна сумме мощностей сил инерции и сил сопротивления.

### 3.7 Энергетический баланс в режиме тяги

Перейдем к нахождению работы, совершенной локомотивом за время прохождения  $t_{12} = t_2 - t_1$  некоторого элементарного участка спрямленного профиля, имеющего постоянный уклон  $i$  [3.5]. Для этого умножим (3.21) на  $dt$  и проинтегрируем по времени:

$$\int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt. \quad (3.22)$$

Полезная работа, совершенная локомотивом при перемещении поезда по этому элементарному участку, находится в левой части (3.22) и определяется выражением

$$A_{12}^{\text{пол}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{т}} dt. \quad (3.23)$$

Работа сил инерции на этом же элементарном перемещении, с учетом (3.20), будет равна разности значений кинетической энергии поезда:

$$A_{12}^{\text{ин}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{ин}} dt = \int_{t_1}^{t_2} dT = T_2 - T_1 = \frac{1}{2} m_{\text{пр}} \cdot (V_2^2 - V_1^2), \quad (3.24)$$

то есть работа сил инерции обеспечивает изменение скорости движения.

Далее, работа сил сопротивления

$$A_{12}^{\text{сопр}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{сопр}} dt. \quad (3.25)$$

Окончательно, согласно (3.22) – (3.25), получаем для полезной работы на элементарном перемещении следующее выражение (энергетический баланс):

$$A_{12}^{\text{пол}} = A_{12}^{\text{ин}} + A_{12}^{\text{сопр}}. \quad (3.26)$$

Приходим к выводу, что полезная работа локомотива на каждом элементарном участке с постоянным уклоном  $i$  затрачивается на:

- увеличение скорости движения при разгоне (то есть на увеличение кинетической энергии поезда),
- на преодоление основного сопротивления (во все время движения), и
- на преодоление дополнительного сопротивления при движении по участку, имеющему уклон, а также при движении в кривых (то есть на изменение потенциальной энергии и на преодоление сил трения в боковом контакте «колесо-рельс» при движении в кривых).

Для получения полной полезной работы  $A_{\Sigma}^{\text{пол}}$ , совершенной локомотивом за время движения поезда по перегону, необходимо выполнить суммирование по всем элементарным участкам, из которых состоит перегон.

Изложенная методика легла в основу программы, составленной с помощью пакета прикладных программ «Matlab Simulink».

### 3.8 Пример расчета с помощью предложенного метода

Для подтверждения достоверности предложенного расчетного метода [3.6], рассмотрим движение грузового поезда на участке обращения тепловозов «Разъезд 9-й км – станция Железный Рог» СКЖД (см. рисунок 2.5, *a*).

Поездка состоялась 11 марта 2017 г., поезд №2004, тепловоз 2ТЭ25КМ. Как уже отмечалось ранее, данный тепловоз оснащен микропроцессорной системой управления, благодаря чему возможно получить подробную информацию о рабо-

те локомотива, в том числе кривые скорости, силы тяги, полезной и потребляемой мощности и другие. Масса поезда составила 5584 т, в том числе  $P = 288$  т – масса тепловоза и  $Q = 5296$  т – масса состава, число четырехосных полувагонов равно 63.

Длина перегона составляет  $S = 133$  км. На перегоне уложен бесстыковой путь. Спрямоленный профиль (см. рисунок 2.5 б) взят согласно режимным картам, разработанным Северо-Кавказской Дирекцией тяги.

На бесстыковом пути, основное удельное сопротивление  $w'_0$ , Н/кН, грузового тепловоза 2ТЭ25КМ определяется согласно [3.3]:

$$w'_0 = 1,76 + 0,0045 \cdot V + 0,00027 \cdot V^2, \quad (3.27)$$

здесь скорость  $V$  взята в км/ч.

Полное основное сопротивление локомотива находится как:

$$W'_0 = P \cdot g \cdot w'_0, \quad (3.28)$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Основное удельное сопротивление  $w''_0$ , Н/кН, движению состава, состоящего из 4-х осных грузовых полувагонов на роликовых подшипниках качения, равно:

$$w''_0 = 0,53 + \frac{3,49 + 0,075V + 0,0022V^2}{q_0}, \quad (3.29)$$

в нашем случае средняя для состава масса, приходящаяся на ось колесной пары полувагона  $q_0 = 21$  т.

Полное основное сопротивление состава будет равно:

$$W''_0 = Q \cdot g \cdot w''_0. \quad (3.30)$$

Таким образом, согласно (3.27–3.28) и (3.29–3.30) силы основного сопротивления локомотива и состава представлены как функции скорости движения:

$$W'_0 = W'_0(V), \quad W''_0 = W''_0(V), \quad (3.31)$$

а основное сопротивление движению поезда равно:

$$W_0 = W'_0 + W''_0 = P \cdot g \cdot w'_0 + Q \cdot g \cdot w''_0. \quad (3.32)$$

Сила сопротивления движению поезда от уклонов, с учетом (3.9), будет равна:

$$W_i = (P+Q) \cdot g \cdot w_i, \quad (3.33)$$

а сила сопротивления движению поезда в кривых, с учетом (3.10), будет равна:

$$W_r = (P+Q) \cdot g \cdot w_r. \quad (3.34)$$

Таким образом, согласно (3.9–3.10) и (3.33–3.34), силы дополнительного сопротивления движению поезда представлены как функции уклонов с учетом спрямленных элементов профиля пути:

$$W_i = W_i(i), \quad W_r = W_r(i_r) \quad (3.35)$$

Окончательно, сила сопротивления движению поезда (3.7) примет вид:

$$\begin{aligned} W_k &= W_o' + W_o'' + W_i + W_r = \\ &= \left[ P \cdot w_o' + Q \cdot w_o'' + (P+Q) \cdot (w_i + w_r) \right] \cdot g. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Как было отмечено выше, для проведения расчетов разработана математическая модель в программном комплексе Matlab, который ориентирован на обработку больших массивов данных. Алгоритм расчета следующий:

1. По массивам значений скорости в зависимости от времени, записанных регистратором, определяется расстояние, пройденное локомотивом, и тем самым осуществляется привязка кривой скорости к реальному профилю пути.

2. Используя формулу (3.36), определяются силы сопротивления, действующие на поезд.

3. Дифференцируя скорость по времени и применяя уравнение (3.16), определяем силу тяги  $F_k$  (электрического торможения) локомотива.

4. По формуле (3.18) определяем мгновенную мощность локомотива на тягу  $P_T$ .

5. Интегрируя  $P_T$  по времени, находим совершенную тепловозом полезную работу  $A_\Sigma^{\text{пол}}$ .

В качестве исходной информации были заданы приведенные выше параметры пути на участке «Разъезд 9-й км – Железный Рог» и параметры поезда. Из-

менение скорости поезда в зависимости от его положения на перегоне показано в соответствии с записями МПСУ-ТП (см. рисунок 2.33).

Сопоставим результаты компьютерного моделирования с записями бортового регистратора.

На рисунке 3.3 показано сопоставление значений силы тяги при движении: 1) по данным МПСУ-ТП  $F_{к(рег)}$ ; 2) по расчетным данным  $F_{к(расч)}$ , полученным в результате компьютерного моделирования.

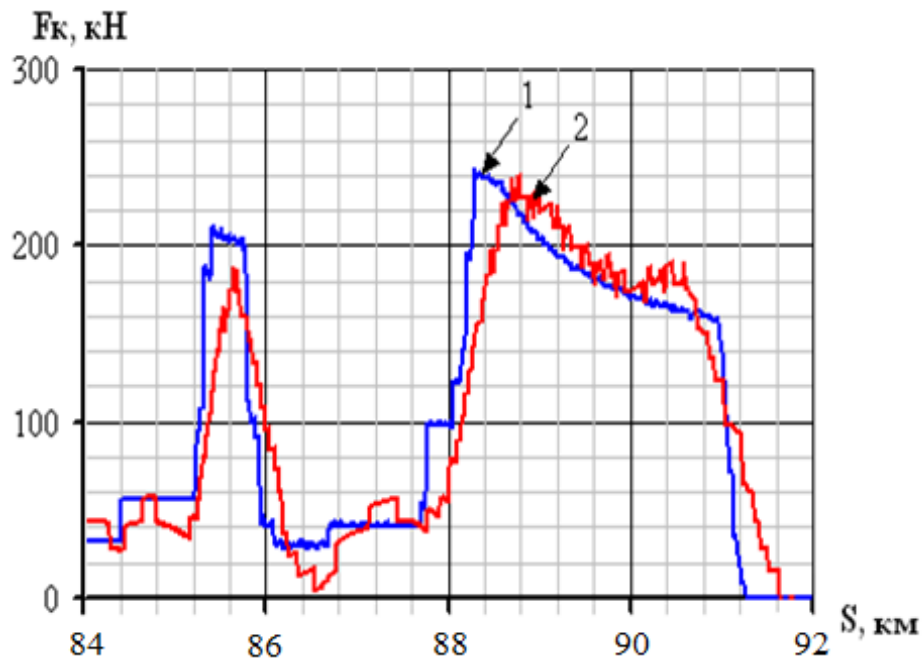


Рисунок 3.3 – Сила тяги: 1) по данным МПСУ-ТП  $F_{к(рег)}$ , 2) по расчету  $F_{к(расч)}$ .

Графики изменения мощности на тягу при движении по тому же участку показаны на рисунке 3.4: 1) по данным МПСУ-ТП  $P_{т(рег)}$ ; 2) по расчетным данным  $P_{т(расч)}$ , полученным в результате компьютерного моделирования.

Исходя из мощности  $P_{т(рег)}$ , записанной МПСУ-ТП, получаем величину полезной работы на всем участке «Разъезд 9-й км – Железный Рог»  $A_{рег}^{пол} = 2239,7$  кВт·ч. Если же исходить из мощности, полученной расчетным путем, по предлагаемой методике, то получаем  $A_{расч}^{пол} = 2201,3$  кВт·ч. Таким образом, относительное расхождение находится в пределах 2 %.

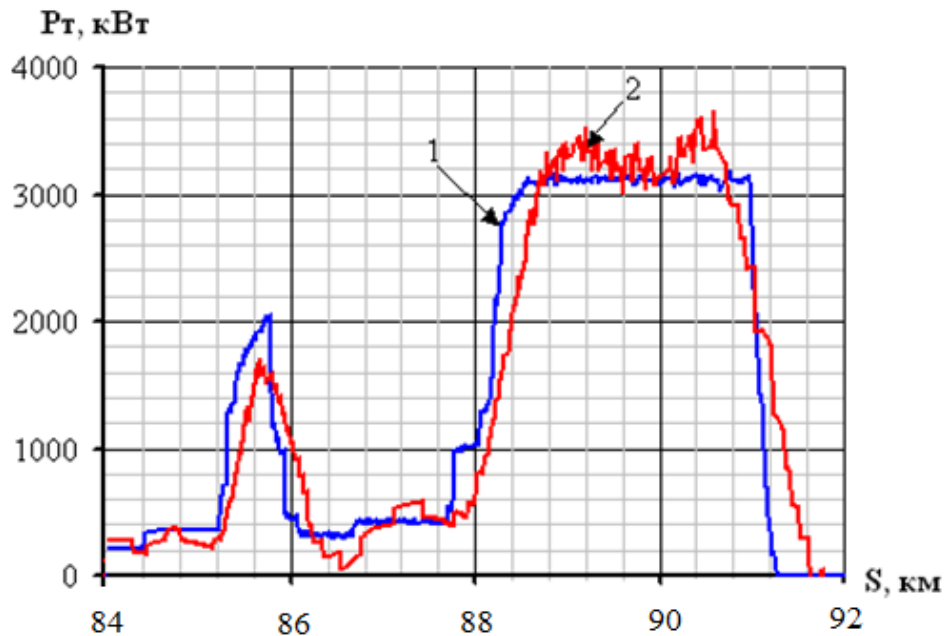


Рисунок 3.4 – Мощность на тягу: 1) по данным МСУ-ТП  $P_{т(рег)}$ , 2) по расчету  $P_{т(расч)}$ .

### 3.9 Заключение. Выводы по главе 3

1. Опираясь на методы теории локомотивной тяги получено решение дифференциального уравнения движения поезда, а также уравнение баланса сил, баланса мощностей и энергетического баланса. Исходными данными для расчета являются профиль пути, масса состава и график движения (диаграмма скорости).

2. Предложена методика нахождения полезной работы, совершаемой локомотивом с поосным регулированием силы тяги при известной массе поезда, профиле участка пути и заданном скоростном режиме. Тем самым удалось получить объективную основу для оценки энергетической эффективности локомотивной тяги в конкретных условиях.

3. На основе изложенной методики составлена компьютерная модель. Выполнено сопоставление результатов компьютерного моделирования с записями бортового регистратора, которое показало относительное расхождение в пределах 2 %, что позволяет говорить о высоком уровне достоверности результатов, получаемых при помощи предлагаемой методики.

## Глава 4

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНОЙ ТЯГИ ПУТЕМ ПЕРЕХОДА К МОДУЛЬНЫМ СИЛОВЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УСТАНОВКАМ

### 4.1 Введение

В главе 2 выполнен анализ показателей энергетической эффективности магистральных грузовых тепловозов серии 2ТЭ25КМ в различных условиях эксплуатации.

В результате показано, что тепловоз работает, главным образом, в переменных режимах, основная часть которых характеризуется неполной реализацией доступной мощности ДГУ. В особенности это наблюдается при ведении порожних поездов по равнинному профилю (см. рисунки 2.30, 2.31).

Кроме того, было показано, что именно на дизель-генераторную установку приходится основная доля снижения эффективности системы преобразования энергии (см. рисунок 2.10) и тепловоза в целом. Еще раз подчеркнем, что моноблочная ДГУ является наименее эффективным звеном системы преобразования энергии. Более того, при неполной нагрузке, энергетическая эффективность ДГУ резко снижается.

В связи с этим, в настоящей главе предлагается способ повышения энергетической эффективности тепловозной тяги путем перехода к модульным силовым энергетическим установкам. Этот способ основан на принципе приведения мгновенной мощности, потребляемой и генерируемой ДГУ, в прямое соответствие с полезной мощностью локомотива, то есть мощностью, которая необходима на тягу поезда в данный момент времени.

Для реализации данного способа необходимо иметь информацию о мощности, требуемой на тягу поезда в данный конкретный момент времени. Этот вопрос был рассмотрен в главе 3, в которой приведен метод определения мощности на тягу и полезной работы, совершаемой локомотивом на некотором участке.

В настоящей главе представлен, прежде всего, анализ конструкции моноблочной ДГУ грузового тепловоза 2ТЭ25КМ, а затем изложены и обоснованы предложения по переходу к модульной структуре силовой энергетической установки, что позволит существенно повысить показатели энергетической эффективности локомотива.

Материалы настоящей главы опубликованы в [1.24, 1.43, 2.5, 2.7, 2.8, 4.3, 4.5, 4.6, 4.13 – 4.15].

## **4.2 Основные элементы тяговой системы грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ и показатели ее энергетической эффективности**

Как показывает опыт эксплуатации магистральных тепловозов (см. главу 2), их доступная мощность полностью практически не используется. Причина заключается в специфике грузового движения, а именно в том, что в одну сторону (порты выгрузки, грузовые терминалы и т.д.) локомотив ведет груженный состав, а в обратную порожний. Наряду с этим участки эксплуатации одной и той же серии тепловоза имеют самый разнообразный рельеф местности и состояние пути. Для грузовых поездов по указанию диспетчера характерны длительные остановки, во время которых ДГУ продолжает работать. Как следствие, эксплуатационный КПД тепловоза гораздо ниже номинального значения.

Рассмотрим тяговую систему грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ. В соответствии со схемой, а также этапами и уровнями преобразования энергии (см. рисунок 2.1) выделим основные элементы тяговой системы (рисунок 4.1).

На рисунке 4.1 красным цветом выделены элементы силовой энергетической установки – топливный бак и дизель-генераторная установка, относящиеся к верхнему уровню преобразования энергии, а синим цветом элементы тягового электропривода – тяговый преобразователь и электродвигатели, относящиеся к нижнему уровню. Перейдем к рассмотрению этих элементов.



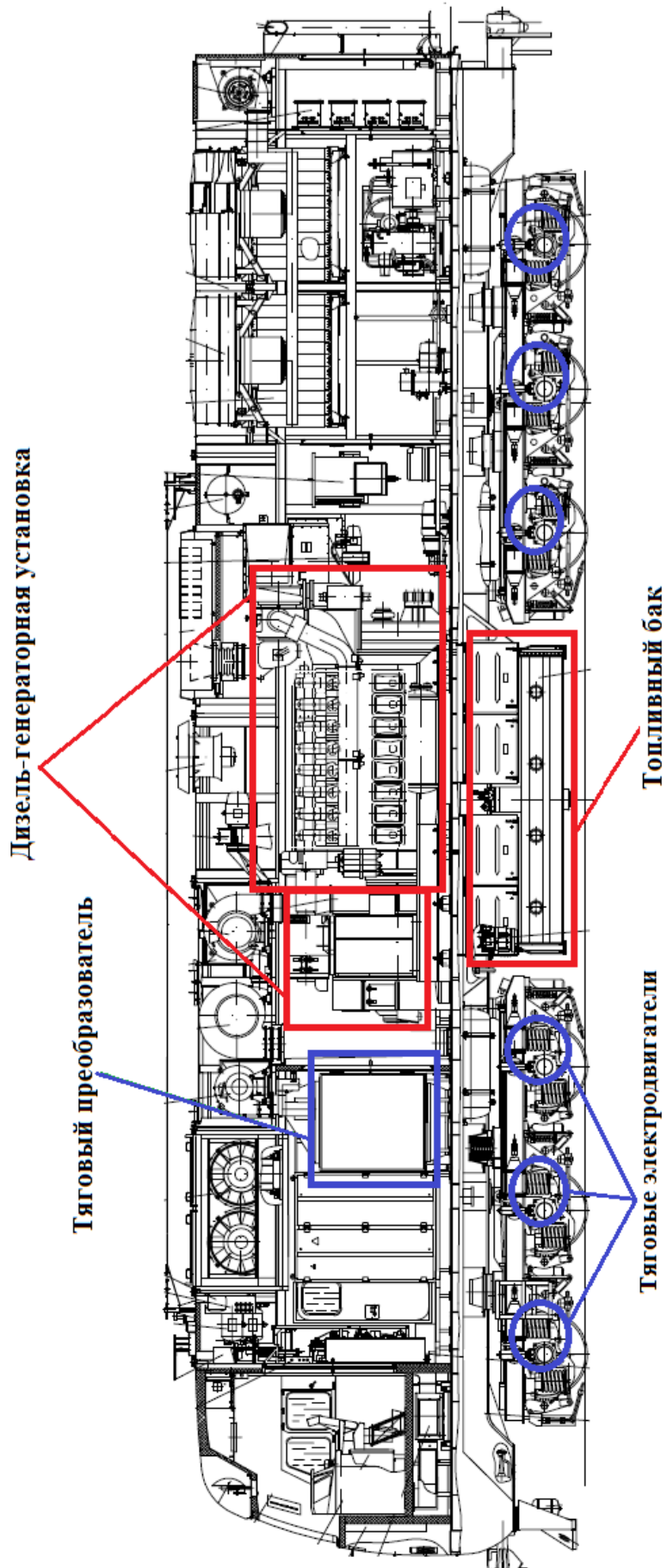


Рисунок 4.1 – Основные элементы тяговой системы тепловоза 2ТЭ25КМ

Каждая секция тепловоза 2ТЭ25КМ оснащена моноблочной дизель-генераторной установкой 18-9ДГ в составе шестнадцати-цилиндрового дизельного двигателя 5Д49 (16ЧН26/26) средней быстроходности (номинальная частота вращения 1000 об/мин) и синхронного тягового генератора ГС-501АУ2 (или ГСТ-2800-1000У2). В главе 1 было отмечено, что частота вращения дизеля напрямую влияет на его массогабаритные показатели (см. рисунок 1.1). Типичная для тепловозных дизелей частота вращения 1000 об/мин обусловлена тем, что ранее применялись тяговые генераторы постоянного тока, для которых более высокие частоты вращения были нежелательны ввиду возможного возникновения кругового огня на коллекторе [4.1]. Напомним, что производство дизеля Д49 было начато в середине 60-х гг. прошлого века и к настоящему времени конструкция принципиально не изменилась, хотя в паре с ним применяются синхронные тяговые генераторы [4.2].

Мощность секции по дизелю равна 2650 кВт (3604 л.с.), а номинальное значение мощности на клеммах выпрямительной установки составляет 2460 кВт [1.40]. Габаритные размеры (Д × Ш × В) ДГУ составляют 6195 × 3005 × 1964 мм, а ее полная масса около 30000 кг. Исходя из этого удельная масса ДГУ равна 12,2 кг/кВт. Ресурс работы дизельного двигателя является определяющим для всей ДГУ и составляет 24000 моточасов до капитального ремонта.

Как уже отмечалось ранее (см. главу 2), процесс преобразования энергии при работе тепловоза протекает на двух уровнях: на верхнем уровне химическая энергия дизельного топлива сначала преобразуется в механическую энергию коленчатого вала дизеля, а затем в электрическую энергию на клеммах тягового генератора. На нижнем уровне электрическая энергия, выработанная дизель-генераторной установкой, преобразуется в полезную механическую работу на тягу поезда.

Тяговый преобразователь М-ТПП-3600М-1-У2 – управляемая шестиканальная выпрямительная установка на тиристорах. Габаритные размеры (Д × Ш × В) преобразователя составляют 1250 × 740 × 1250 мм, а масса – 840 кг. Преобразователь позволяет реализовать поосное регулирование силы тяги каждого из шести

коллекторных тяговых электродвигателей ЭДУ-133Ц (или ДТК-417Ц), номинальной мощностью 366 кВт. Масса каждого из ТЭД составляет 2700 кг. Удельная масса ТЭД составляет 7,4 кг/кВт.

Исходя из вышесказанного, на эффективность работы тепловоза (КПД) можно существенно повлиять путем повышения эффективности этих уровней: верхнего, представляющего собой дизель-генераторную установку, и нижнего – тяговый электропривод.

Максимально эффективно оба уровня работают при номинальной нагрузке. КПД дизель-генераторной установки достигает своих максимальных значений при КИМ, близком к единице (рисунок 4.2) [1.24, 1.43, 2.5, 4.3]. Как видно, КПД при номинальной мощности составляет порядка 38...39 %, а при малой мощности 26...27 %.

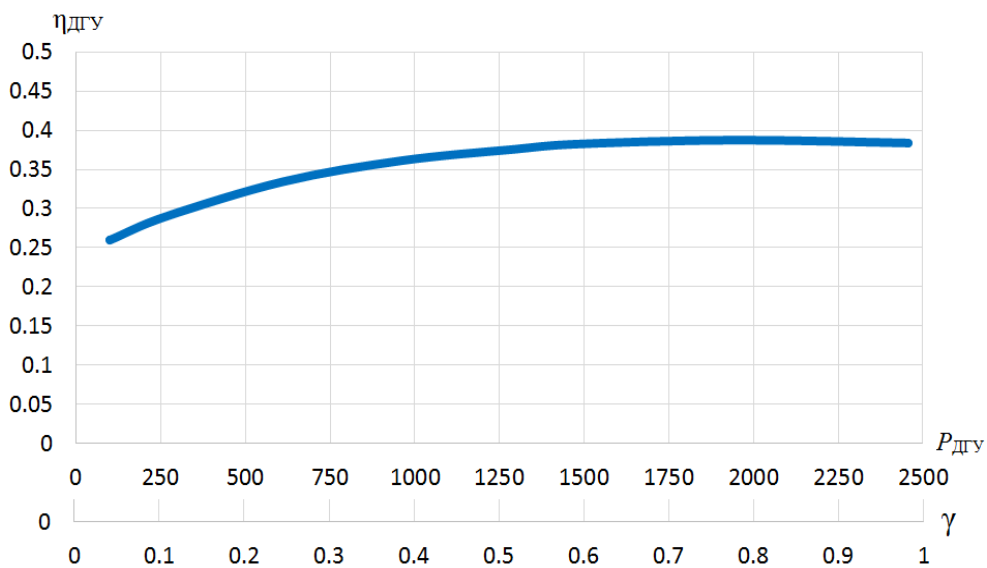


Рисунок 4.2 – Зависимость КПД дизель-генераторной установки 18-9ДГ от мощности

Что касается электрической передачи мощности, то по своей структуре она идентична тяговому электроприводу электровозов с поосным регулированием силы тяги [4.4]. Соответственно характер изменения КПД электрической передачи аналогичен полученному для электровозов [4.5]. По своей сути характер изменения КПД остается тем же: чем более полно используется мощность, тем выше КПД.

Приходим к выводу, что возможным вариантом достижения максимальной энергоэффективности грузового тепловоза была бы его постоянная работа на номинальной мощности.

Однако, как показано в главе 2, локомотивы работают в условиях переменных нагрузок, что связано со спецификой организации грузового движения.

Приведем результаты изучения эксплуатационных показателей грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ-022 с поездом №2004 и грузенным составом массой 5584 т на участке «Разъезд 9 км – Железный Рог». На рисунке 4.3 приведена гистограмма, показывающая распределение времени работы тепловоза по степени использования доступной мощности.

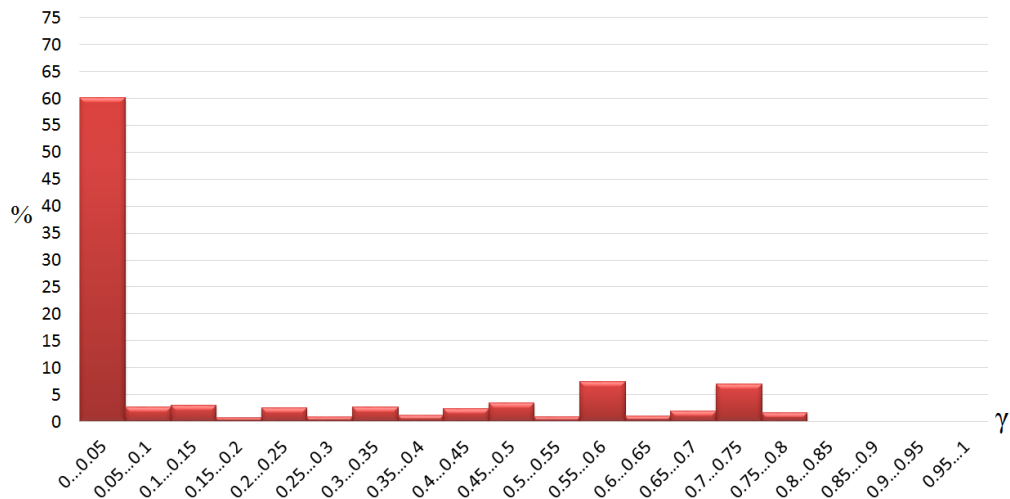


Рисунок 4.3 – Распределение времени работы по степени использования доступной мощности

Из рисунка 4.3 ясно видно, что в эксплуатационных условиях ДГУ тепловоза основную часть времени работает в режимах с низкой энергоэффективностью, а именно 60 % времени ДГУ работает со степенью использования мощности от 0 до 5 %, т.е. на холостом ходу. Фактически, временной ресурс дизеля расходуется главным образом на холостом ходу.

На рисунке 4.4 приведена гистограмма, показывающая распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности. Из этого рисунка видно, что при степени использования мощности от 0 до 0,6

включительно потребляется 61,8 % энергии, тогда как при степени использования мощности от 0,6 до 0,8 потребляется 38,2 % энергии.

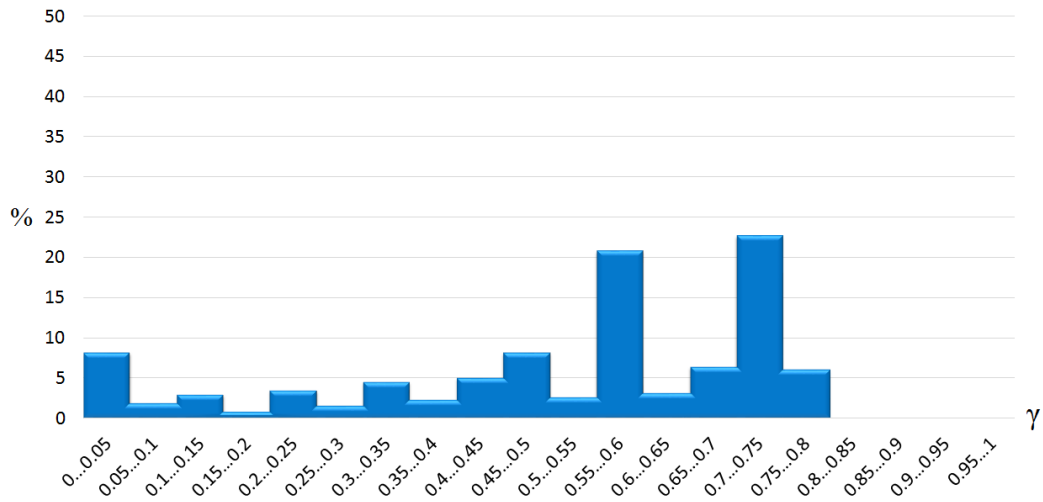


Рисунок 4.4 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности

При ведении порожних поездов время работы с низкой степенью использования мощности (0...0,05) возрастает до 72 %, тогда как при степени использования мощности от 0,6 до 0,8 потребляется 8,85 % энергии (см. рисунок 2.42).

Таким образом, мы приходим к выводу о том, что в реальных условиях эксплуатации грузовой магистральной тепловоз основное время (порядка 60...70 %) работает на холостом ходу, в результате чего моторесурс дизеля расходуется крайне нерационально.

Что касается режима тяги, основная часть потребляемой энергии преобразуется в полезную работу при неполной степени использования мощности от 0,4 до 0,8, т.е. когда КПД силовой установки значительно уступает номинальному значению (см. рисунок 4.2). Степень использования мощности более 0,8 практически не реализуется.

Сказанное выше остается справедливым для работы локомотива, оснащенного моноблочной СЭУ, как с груженными, так и с порожними поездами.

В связи с этим необходимо найти другие способы более полной реализации доступной мощности тепловоза.

### **4.3 Повышение показателей энергоэффективности тепловоза путем перехода к модульной силовой установке**

Выше было показано, что тяговая система тепловоза имеет два уровня. Соответственно задача повышения ее энергетической эффективности является двухуровневой: на нижнем уровне проводится оптимизация тягового электропривода, а на верхнем уровне – оптимизация силовой энергетической установки путем перехода к модульной структуре [2.7, 2.8, 4.6].

Для нижнего уровня улучшение энергоэффективности реализовано за счет регулирования количества работающих ТЭД. Алгоритм дискретно-адаптивного управления ТЭП [1.19, 1.20, 1.3] позволяет в каждый момент времени иметь необходимое количество ТЭД в режиме тяги, а избыточные ТЭД временно выводить из работы.

Таким образом мощность, которую должна выработать СЭУ тепловоза, определяется величиной мощности, потребляемой ЭПМ.

После того, как число активных ТЭД приведено в соответствие с нагрузкой, необходимой на тягу поезда (нижний уровень), СЭУ должна обеспечить поступление мощности, достаточной для питания ЭПМ при минимальном потреблении дизельного топлива (верхний уровень). Как было показано выше, при имеющейся моноблочной структуре силовой энергетической установки достичь этого невозможно.

#### ***4.3.1 Принципиальная схема силовой установки, имеющей модульную структуру***

Основываясь на результатах, изложенных в предыдущем разделе и опираясь на имеющийся опыт создания многодизельных силовых установок (см. главу 1),

сформулируем предложения, направленные на переход к модульной структуре тяговой системы тепловоза. На рисунке 4.5 приведена принципиальная структурная схема СЭУ секции тепловоза, отображающая эти предложения.

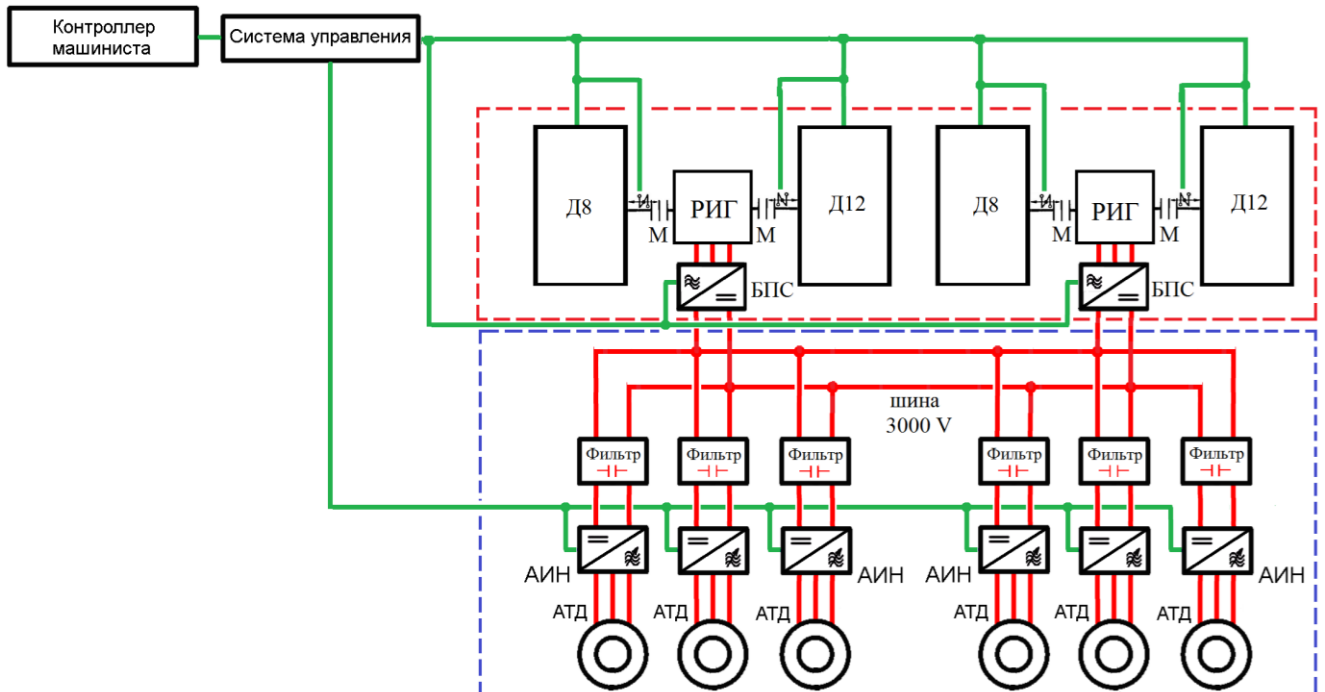


Рисунок 4.5 – Принципиальная структурная схема силовой части секции тепловоза: Д8, Д12 – дизельные двигатели; М – управляемая электромагнитная муфта; РИГ – реактивный индукторный генератор; БПС – блок питания силовой; АИН – автономный инвертор напряжения; АТД – асинхронный тяговый двигатель

Схема имеет два уровня: нижний – тяговый электропривод (обведено синей пунктирной линией) и верхний – силовая энергетическая установка (обведено красной пунктирной линией). Цепи системы управления обозначены зеленым цветом.

Отметим, что нижний уровень имеет в качестве прототипа электрическую передачу мощности переменного тока тепловоза 2ТЭ25А [1.39], и по своей архитектуре повторяет тяговый привод электровоза с асинхронными тяговыми двигателями при питании от сети постоянного тока [4.7]. Подробнее о ТЭП будет сказано в пункте 4.3.2.

На верхнем уровне, СЭУ одной секции будет представлять не моноблок, состоящий из одного дизель-генератора, как в случае тепловозов 2ТЭ25А и 2ТЭ25КМ, а будет состоять из нескольких тяговых модулей.

Каждый тяговый модуль состоит из двух дизельных двигателей, которые соединяются с валом генератора через управляемые электромагнитные муфты, как показано на рисунке 4.5. Мощность одного восьмицилиндрового дизеля Д8 обеспечивает питание одного ТЭД, а мощность одного двенадцати-цилиндрового дизеля Д12 – питание двух ТЭД. Соответственно работа двух дизелей обеспечивает питание всех ТЭД трехосной тележки. Подробнее о дизельных двигателях будет сказано в пункте 4.3.3. О генераторе будет сказано в пункте 4.3.4.

При этом наличие электромагнитных управляемых муфт и алгоритмов управления позволяет реализовать «энергетическую колонну» – «дизель–генератор–преобразователь–ТЭД».

#### ***4.3.2 Тяговый электропривод (электрическая передача мощности)***

Нижний уровень системы преобразования энергии конструктивно идентичен тяговому электроприводу электровоза при питании от сети постоянного тока. Шина в нашей конструкции является звеном постоянного тока (см. рисунок 4.5).

В принципе, имеется возможность применения тягового электропривода тепловоза 2ТЭ25КМ в составе шестиканального преобразователя М-ТПП-3600М-1-У2 и коллекторных ТЭД ДТК-417Ц. Однако, для того чтобы в дальнейшем увеличить касательную мощность тепловоза, представляется более целесообразным рассмотреть применение асинхронного тягового привода [4.8].

В этом случае, на каждую ось будет приходиться один асинхронный тяговый электродвигатель (АТД) и преобразователь – автономный инвертор напряжения (АИН). Данное конструктивное решение позволяет реализовать поосное регулирование силы тяги каждого АТД.

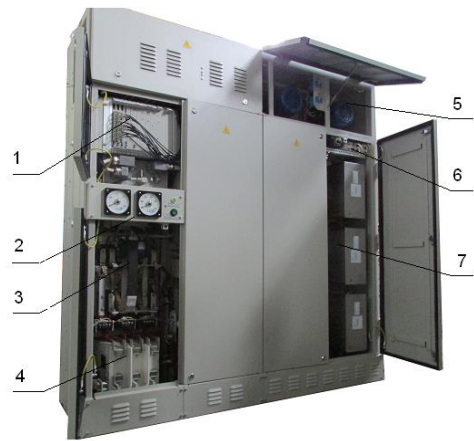


Прототипом АД для использования в схеме является тяговый двигатель (рисунок 4.6, а) ДАТ–350–6 УХЛ1 [4.8], который устанавливается на грузовые магистральные тепловозы 2ТЭ25А, его номинальная мощность составляет 350 кВт при массе 2350 кг, отметим, что на его базе изготовлены опытные ТЭД ДАТ–470, мощностью 470 кВт [4.9]. В перспективе мощность ТЭД может быть увеличена до 600...700 кВт. Удельная масса ТЭД составляет 6,7 кг/кВт.

В качестве прототипа был взят тяговый преобразователь отечественной разработки М–ТЗТП–Т–1–У2 (рисунок 4.6, б), обеспечивающий поосное регулирование силы тяги и имеющий три канала (для питания ТЭД одной тележки) [4.8]. На секции необходима установка двух таких преобразователей.



а



б

Рисунок 4.6– Общий вид асинхронного тягового электродвигателя ДАТ–350–6 УХЛ1 (а) и тягового преобразователя М–ТЗТП–Т–1–У2 (б):

1 – отсек САУТП, 2 – приборная панель, 3 – отсек выпрямителя и тормозного регулятора, 4 – разъединитель, 5 – отсек вентиляторов, 6 – блоки питания драйверов, 7 – отсек инверторов

### 4.3.3 Прототип дизеля для модульной СЭУ

В предлагаемой конструкции СЭУ тепловоза (см. рисунок 4.5) предполагается применять высокооборотные дизельные двигатели, что обусловлено их лучшими массогабаритными показателями (см. рисунок 1.1). В нашей стране производством высокооборотных дизелей, которые могут быть приняты в качестве прототипов, занимается несколько заводов. В таблице 4.1 приведены параметры

дизелей, предназначенных для применения на железнодорожном транспорте [4.10].

Таблица 4.1 – Параметры высокооборотных дизельных двигателей, предназначенных для применения на железнодорожном транспорте.

Параметр	ОАО «Гутаевский моторный завод»				ПАО «ЗВЕЗДА»			
	ТМЗ-880 V-8-I	ТМЗ-880 V-8-II	ТМЗ-880 V-12-I	ТМЗ-880 V-12-II	М756Б-1	М756Б-2	М756В-1	М790
Наименование дизельного двигателя	ТМЗ-880 V-8-I	ТМЗ-880 V-8-II	ТМЗ-880 V-12-I	ТМЗ-880 V-12-II	М756Б-1	М756Б-2	М756В-1	М790
Число цилиндров	8	8	12	12	12	12	12	12
Номинальная мощность, кВт	560	650	883	1030	736	736	603	800
Номинальная частота вращения, об/мин	2100	2300	2100	2300	1500	1500	1400	1550
Номинальный удельный расход топлива, г/кВт·ч	217	220	217	220	215	215	208	215
Ресурс двигателя, час (* – моторесурс)	12000*	12000*	12000*	12000*	29000	29000	29000	29000
Масса двигателя, кг	1410	1410	1850	1850	2000	2000	2000	2000
Удельная масса двигателя кг/кВт	2,52	2,17	2,1	1,8	2,72	2,72	3,32	2,5

Рассмотрим вариант конструкции, при котором в качестве прототипа дизеля для тяговых модулей взяты высокооборотные дизельные двигатели семейства ТМЗ-880 (рисунок 4.8) производства ОАО «Гутаевский моторный завод» [4.11], а именно восьмицилиндровый дизель ТМЗ-880 V-8-I (обозначен Д8) и ТМЗ-880 V-12-I (обозначен Д12), см. таблицу 4.1. Отметим, что удельное потребление топлива составляет  $g_e = 200$  г/кВт·ч при частоте вращения 1400...1600 об/мин (см. рисунок 4.9).

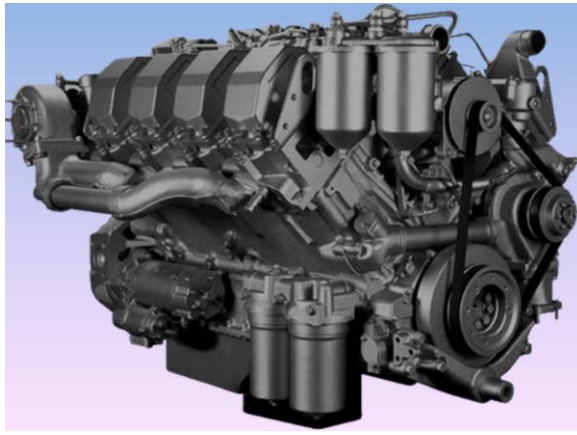


Рисунок 4.8 – Дизельный двигатель семейства ТМЗ-880

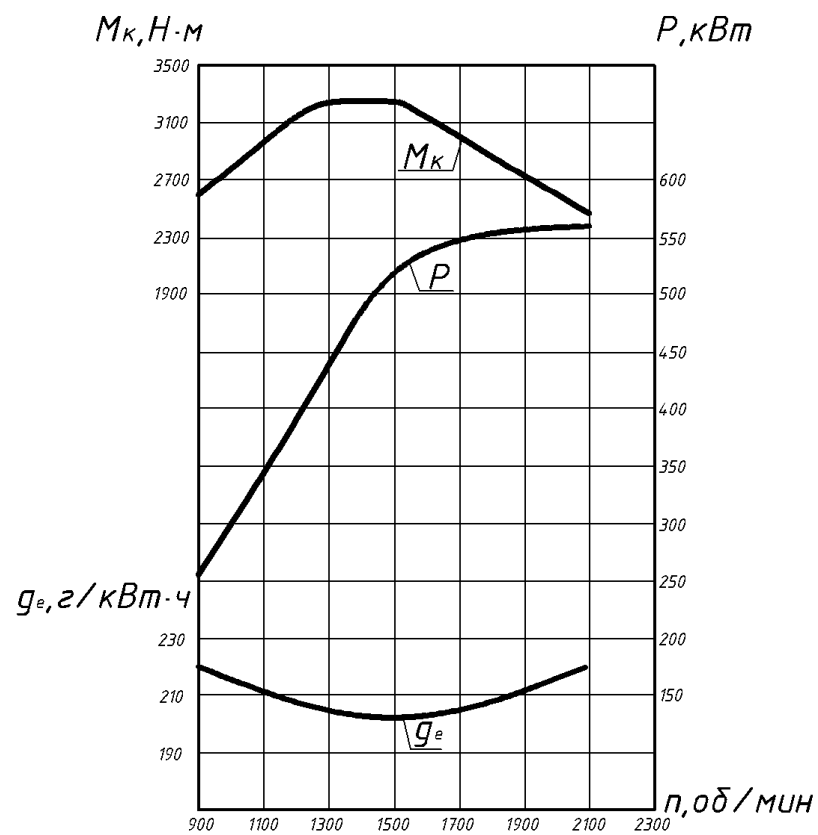


Рисунок 4.9 – Характеристики дизеля ТМЗ-880 V-8-I [4.11]

#### 4.3.4 Прототип генератора для модульной СЭУ

После выбора дизельных двигателей Д8 и Д12, необходимая мощность генератора для применения в разработанной схеме (см. рисунок 4.5) составит 1500 кВт при частоте вращения 2100 об/мин. В качестве прототипа генератора

предлагается использовать реактивную индукторную машину ТРИГ-680 [4.12], которая показана на рисунке 4.10.

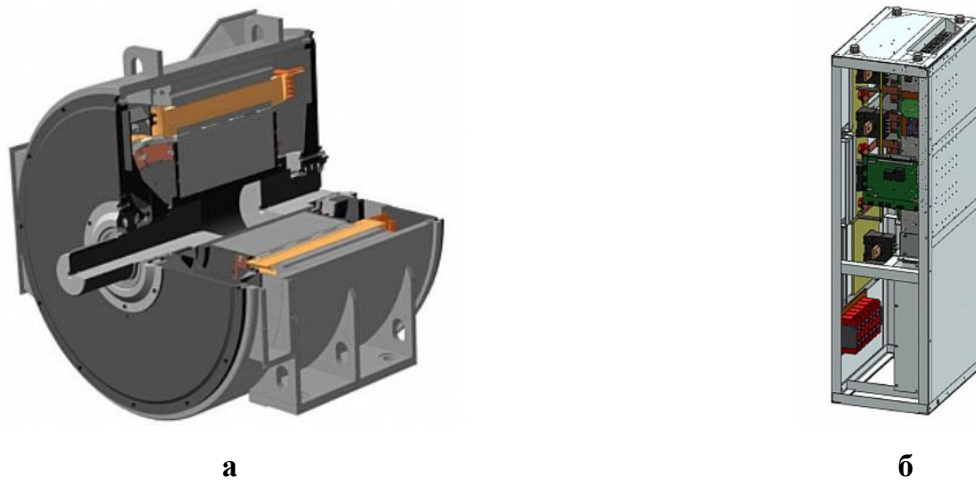


Рисунок 4.10 – Реактивный индукторный генератор (а) и БПС (б)

Эта машина оснащается силовым блоком питания БПС-680 [4.12], имеющим на выходе постоянное стабилизированное напряжение, поступающее на шину постоянного напряжения 3000 В. Преимуществом данного генератора, является то, что он способен поддерживать номинальное значение КПД при частичных нагрузках. На рисунке 4.11, а приведен пример зависимости КПД такого РИГ от основных параметров управления: амплитудного тока (ток отсечки) и угла опережения  $\alpha$ , что позволяет поддерживать номинальный КПД в широком диапазоне рабочих скоростей вращения и мощностей. Для выбора оптимальных параметров управления РИГ целесообразно использовать методы компьютерного моделирования [4.13] в основе которых лежит схема замещения магнитной цепи. Анализ и построение данных параметров для различных частот вращения позволил получить зависимость КПД, которая приведена на рисунке 4.11, б из которого видно, что при помощи управления КПД генератора может достигать значений 0,98. Эта особенность позволяет использовать два дизеля на один генератор (см. рисунок 4.5) и тем самым уменьшить массу и габариты тягового модуля. Масса генератора вместе с БПС составит около 4500 кг.

По предварительным оценкам, масса одного тягового модуля в составе дизелей Д8 и Д12, генератора вместе с БПС будет равна около 8000 кг. Тогда масса СЭУ одной секции составит около 16000 кг (вместо 30000 кг для моноблочной установки).

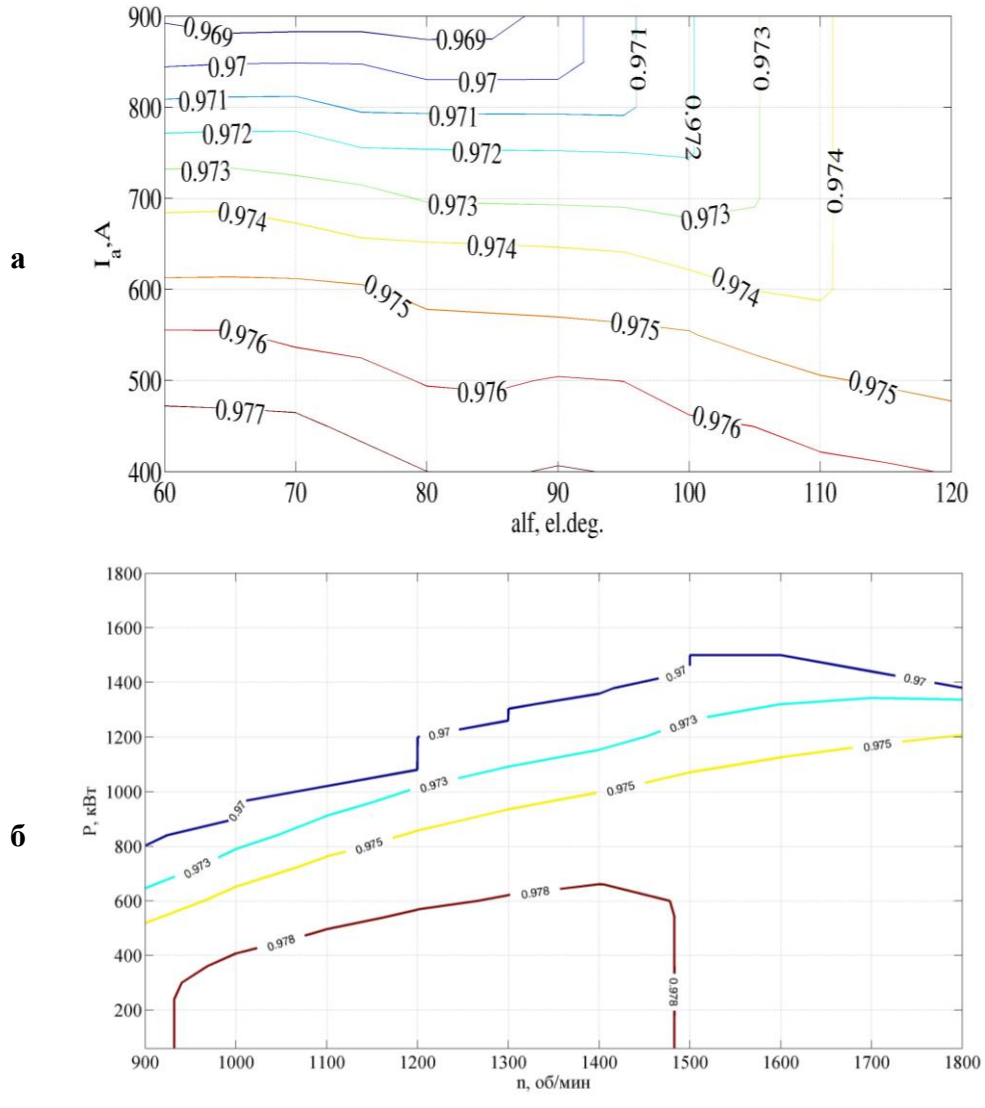


Рисунок 4.11 – Показатели энергетической эффективности РИГ

Данная конструкция позволяет в процессе эксплуатации регулировать значение генерируемой мощности за счет отключения/подключения отдельных дизельных двигателей, а не путем перевода одного моноблочного дизеля в режимы неполной нагрузки, что приводит к снижению энергоэффективности.

#### **4.4 Сравнительный анализ эксплуатационных показателей энергетической эффективности и результатов компьютерного моделирования**

Для оценки эффективности предлагаемых решений выполним сопоставление реальных эксплуатационных показателей энергетической эффективности тепловоза 2ТЭ25КМ с моноблочной СЭУ на участке и результатов компьютерного моделирования для предлагаемого локомотива с модульной силовой установкой. Сравнение выполнено для участка «Разъезд 9 км – Железный Рог» (см. п. 2.4).

Записи бортового регистратора (МПСУ-ТП) были взяты для поезда №2004, 11.03.2017, тепловоз 2ТЭ25КМ-022, состав массой 5584 т. Подробный анализ данной поездки был выполнен в главе 2.

Обе секции тепловоза работали синхронно на протяжении всего времени поездки. По записям регистратора построены графики скорости и силы тяги (см. рисунки 2.34, 2.36). Расчетное потребление топлива за поездку составило 1607 кг, что подтверждается данными системы АСК (расхождение данных находится в пределах 2,5 %, см. рисунок 2.37), потребленная энергия (по топливу) составила 18978,7 кВт·ч, а совершенная работа (работа на тягу) равна 4704,5 кВт·ч (см. графики на рисунке 2.40). Следовательно, эксплуатационный КПД за время поездки составил 0,248.

Определение полезной работы было выполнено также расчетным путем с применением компьютерного моделирования. В качестве исходных данных, в программу были введены спрямленный профиль участка, масса поезда и количество вагонов, а скоростной режим воспроизводил записи регистратора. Силы сопротивления движению взяты согласно ПТР. Полученные результаты показали, что отклонение значений, полученных по результатам моделирования, от записей регистратора крайне незначительно (см. главу 3). Отсюда был сделан вывод об адекватности модели, и осуществлен переход ко следующему этапу расчетов.

После определения параметров тяговой системы АГМЛ новой конструкции, была разработана ее компьютерная модель на основе ранее выполненных [4.14 –

4.18] с использованием программных комплексов «Matlab Simulink» и «Универсальный механизм» [4.19]. Было выполнено моделирование движения грузового поезда с выполнением всех условий реальной поездки на участке «Разъезд 9 км – Железный Рог», масса состава 5584 т. Изменение числа работающих дизельных двигателей производилось в зависимости от мощности, потребляемой ЭПМ (тяговым приводом), и показано на рисунке 4.12. Изменение числа активных ТЭД производилось в зависимости от мощности, необходимой на тягу поезда, и показано на рисунке 4.13.

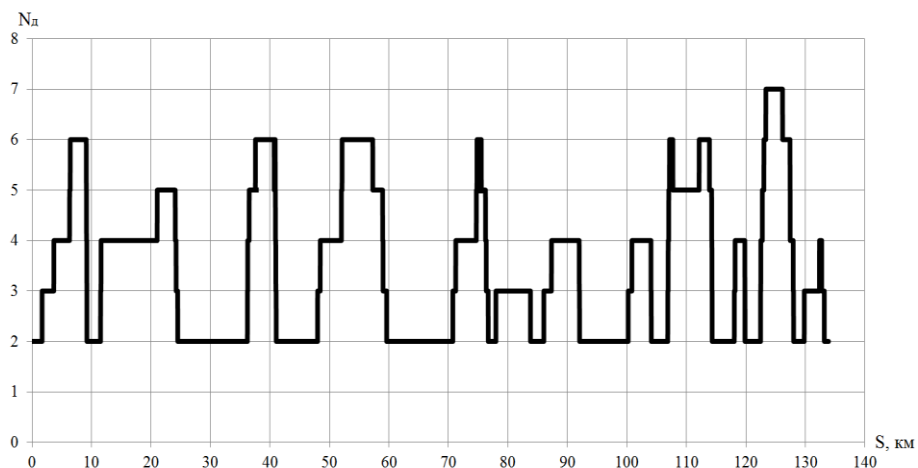


Рисунок 4.12 – Количество работающих дизельных двигателей

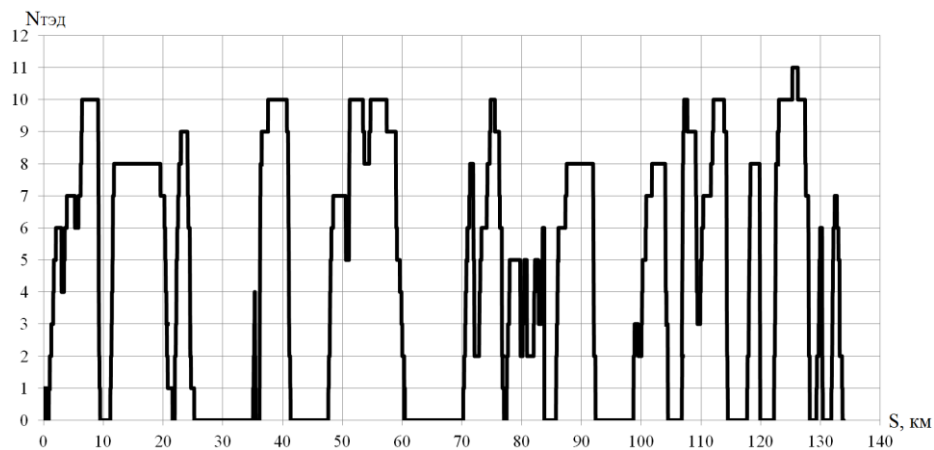


Рисунок 4.13 – Количество активных ТЭД

Расчетное потребление дизельного топлива тепловозом 2ТЭ25КМ на участке «Разъезд 9 км – Железный Рог» показано на рисунке 4.14 синей линией. Результат компьютерного моделирования работы локомотива с модульной СЭУ по-

казан на рисунок 4.14 зеленой линией. Как видно, расход топлива уменьшается на  $1607 - 1291 = 316$  кг, что составляет 19,7 %.

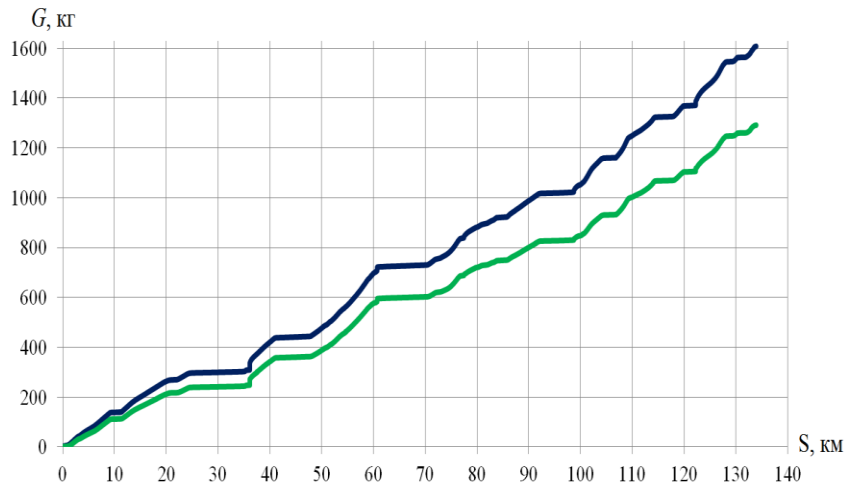


Рисунок 4.14 – Расход топлива за поездку:  
синяя линия – тепловозом 2ТЭ25КМ; зеленая линия – тепловоз с модульной СЭУ

Потребленная энергия по топливу тепловозом 2ТЭ25КМ составила 18978,7 кВт·ч (рисунок 4.15, синяя линия). Тепловоз с модульной СЭУ потребил 15237,6 кВт·ч (рисунок 4.15, зеленая линия). Совершенная полезная работа (работа на тягу поезда) одинакова и равна 4704,5 кВт·ч (рисунок 4.15, красная линия). Эксплуатационный КПД тепловоза 2ТЭ25КМ составил 0,248. Тепловоз с модульной СЭУ имеет КПД, равный 0,31.

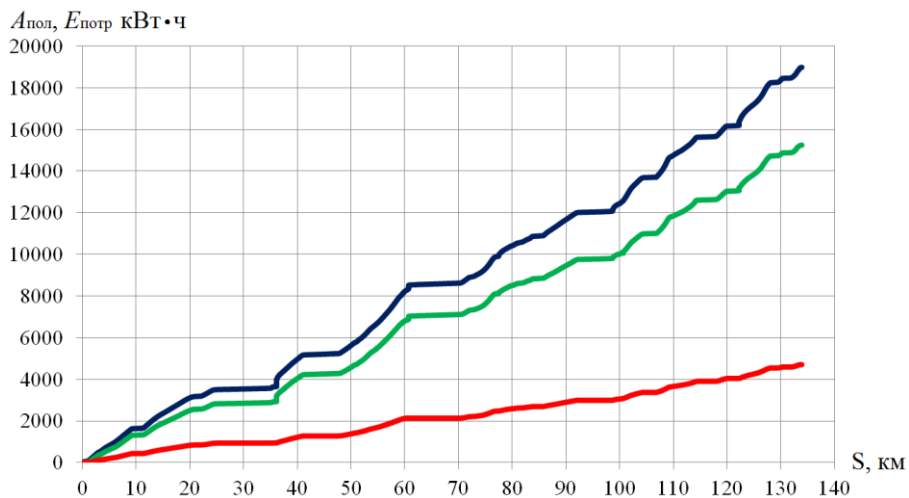


Рисунок 4.15 – Энергетические показатели:  
красная линия – полезная работа на тягу поезда;  
синяя линия – потребленная энергия тепловозом 2ТЭ25КМ;  
зеленая линия – потребленная энергия тепловозом с модульной СЭУ



На рисунке 4.16 показано распределение времени работы тепловоза с модульной СЭУ по степени использования доступной мощности (с учетом количества работающих дизелей).

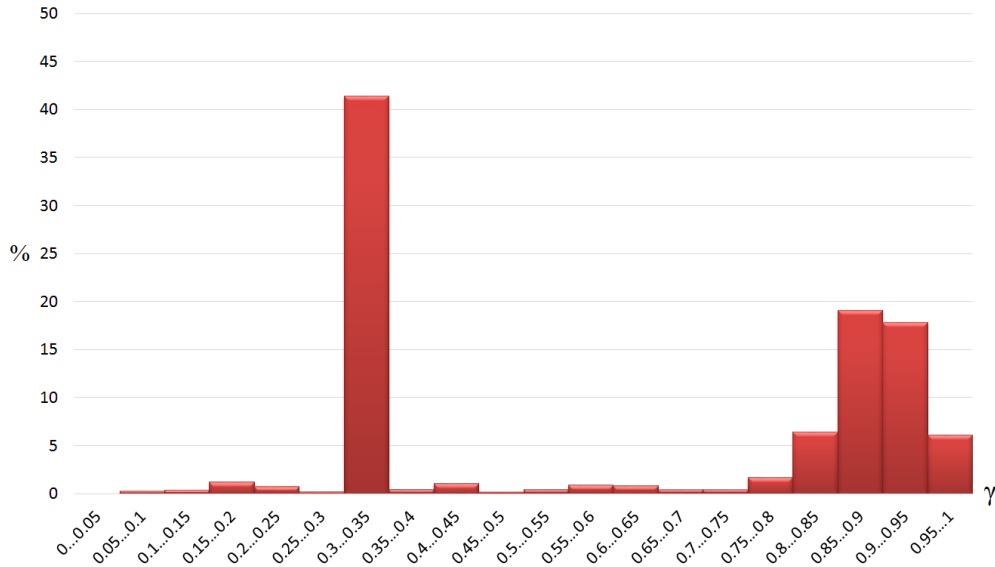


Рисунок 4.16 – Распределение времени работы по степени использования доступной мощности для тепловоза с модульной СЭУ

Из рисунка 4.16 видно, что в эксплуатационных условиях СЭУ тепловоза предлагаемой конструкции значительную часть времени (42 %) работает со степенью использования доступной мощности 0,3...0,35, в то время как работа на холостом ходу, а также в диапазоне 0...0,3 практически не совершается. Таким образом, работа дизелей с низкими значениями КПД исключена.

В тоже время, основная часть временного ресурса дизельных двигателей (52 %), приходится на степень использования мощности 0,75...1 включительно, т.е. в зоне высоких значений КПД.

На рисунке 4.17 показано распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности. Видно, что при использовании модульной СЭУ основная часть энергии, а именно 90 %, потребляется при степени использования доступной мощности от 0,75 до 1 включительно.

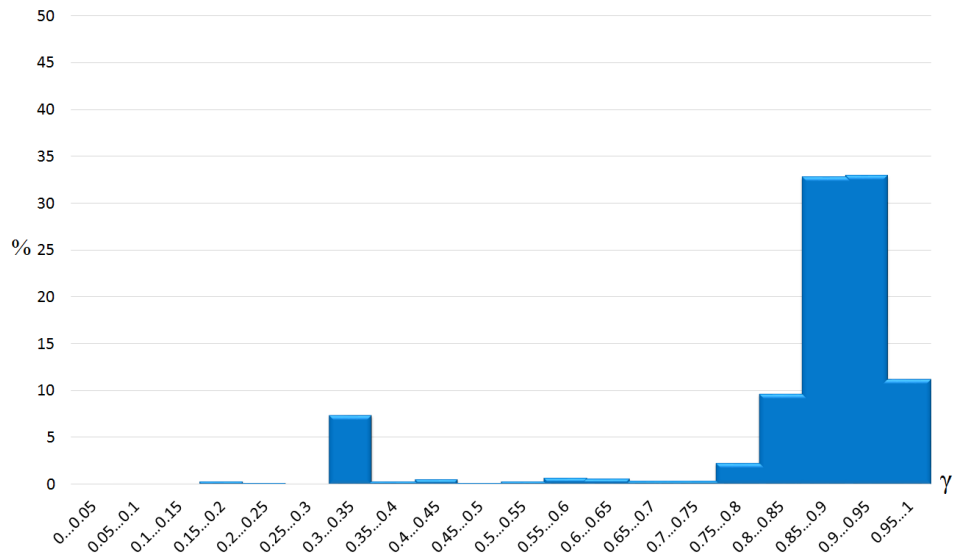


Рисунок 4.17 – Распределение потребленной энергии по степени использования доступной мощности для тепловоза с модульной СЭУ

Таким образом мы приходим к выводу о том, что модульная СЭУ грузового магистрального тепловоза основную часть времени (порядка 52 %) работает при степени использования мощности 0,75...1 включительно, на которую приходится и основная часть потребленной энергии (порядка 90 %). Это означает, что основная часть потребляемой энергии преобразуется в полезную работу на тягу, когда КПД силовой установки находится на уровне своего номинального значения.

#### 4.5 Сопоставление показателей моторесурса

Одним из важнейших показателей, определяющих срок службы тепловоза, является ресурс работы его силовой энергетической установки. Ресурс может измеряться в километрах пробега, в астрономических часах, а также в моточасах. Именно ресурс СЭУ в моточасах (моторесурс) наиболее объективно показывает степень износа узлов и деталей, прежде всего цилиндропоршневой группы, газораспределительного механизма, коренных и шатунных подшипников [4.20].

Для оценки расхода моторесурса была принята линейная модель. Один моточас соответствует работе СЭУ на номинальной мощности в течении одного ча-

са. Для тепловозной ДГУ, мощность которой жестко связана с позициями контроллера машиниста и оборотами коленчатого вала дизеля, моточас работы может быть определен количеством оборотов, совершаемых за один час при номинальной частоте вращения.

Для ДГУ 18-9ДГ тепловоза 2ТЭ25КМ номинальная частота вращения (на 15-й позиции КМ) составляет 1000 об/мин, тогда 1 моточас работы данной ДГУ будет эквивалентен 60000 оборотов. При работе дизеля на других позициях, с частотой вращения ниже номинальной, количество моточасов рассчитывается согласно рисунку 4.18.

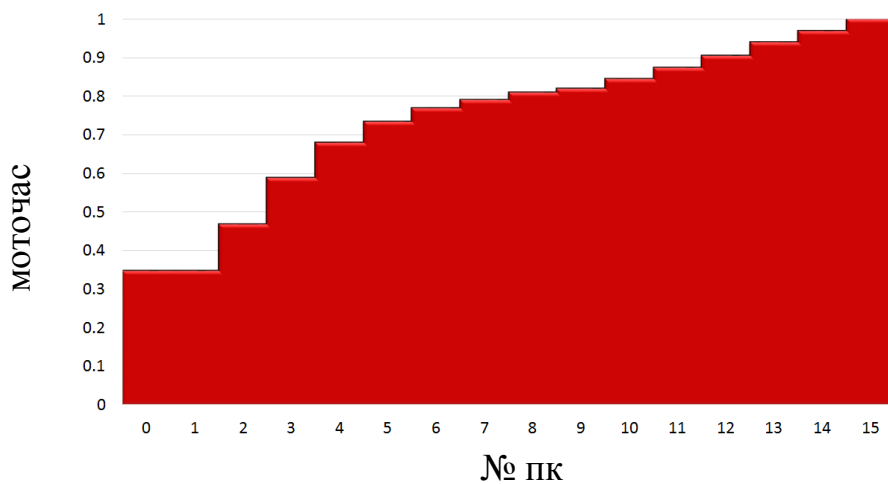


Рисунок 4.18 – Количество моточасов дизель-генераторной установкой тепловоза 2ТЭ25КМ по позициям контроллера

Пользуясь данной зависимостью и распределением времени работы тепловоза по степени использования доступной мощности (см. рисунок 4.3), получим распределение расхода моторесурса по степени использования доступной мощности для грузового магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ (рисунок 4.19). Как видно, основной расход моторесурса (40 %) моноблочной СЭУ происходит на холостом ходу. Обратим внимание на то, что на рисунке 4.3, где показано распределение времени работы по степени использования доступной мощности, доля времени работы на холостом ходу составляет 60 %. Различие объясняется тем, что на холостом ходу частота вращения составляет 350 об/мин и один час времени работы эквивалентен 0,35 моточаса.

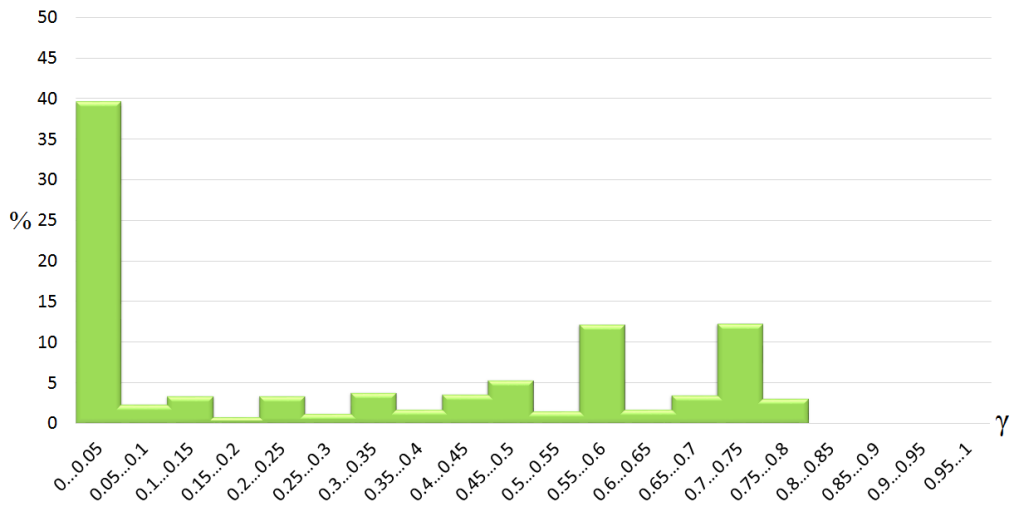


Рисунок 4.19 – Распределение расхода моторесурса по степени использования доступной мощности для тепловоза 2ТЭ25КМ

Время работы ДГУ на каждой секции тепловоза 2ТЭ25КМ за поездку составило 5,6 часа, что эквивалентно 3,01 моточаса.

Аналогичным образом было получено распределение расхода моторесурса по степени использования доступной мощности предлагаемой модульной СЭУ (рисунок 4.20). Обратим внимание на то, что на рисунке 4.15, где показано распределение времени работы по степени использования доступной мощности, доля времени работы со степенью использования доступной мощности 0,3...0,35 составляет 42 %. Различие объясняется тем, что в данном диапазоне частота вращения составляет 750...800 об/мин (при номинальной частоте вращения 2100 об/мин) и один час времени работы эквивалентен 0,36...0,38 моточаса.

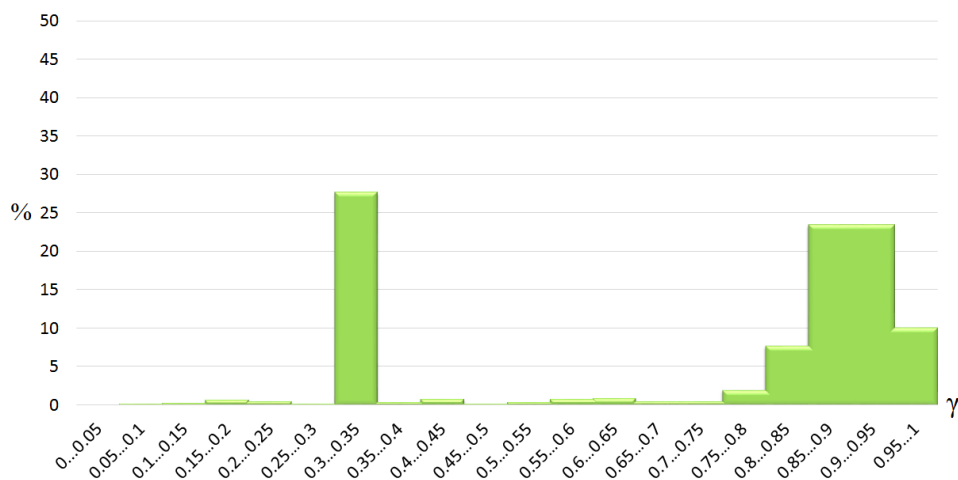


Рисунок 4.20 – Распределение расхода моторесурса по степени использования доступной мощности для тепловоза с модульной СЭУ

Среднее время работы каждого из восьми дизельных двигателей, входящих в состав модульной СЭУ (см. рисунок 4.5), с учетом выравнивания ресурса работы за поездку, составило 1,98 часа, что эквивалентно 1,1 моточаса.

Значения моторесурса для дизеля 16ЧН26/26 в составе моноблочной СЭУ тепловоза 2ТЭ25КМ, который составляет 24000 моточасов и прототипа высокооборотного дизеля в составе модульной СЭУ, который составляет 12000 моточасов.

Таким образом, если принять рассмотренную поездку на данном участке за эталонную, то затраченный моторесурс тепловоза 2ТЭ25КМ (по дизелю) составил 3,01 моточаса, а для тепловоза с модульной СЭУ – 1,1 моточаса. Тогда тепловоз 2ТЭ25КМ может совершить  $24000 / 3,01 = 7973$  таких поездок, тепловоз с модульной СЭУ может совершить  $12000 / 1,1 = 10909$  поездок.

Таким образом, число эталонных поездок для тепловоза с модульной СЭУ на 27% больше.

В заключение отметим, что реализация предлагаемой модульной структуры требует, с одной стороны, наличия соответствующего силового оборудования (дизельные двигатели, электромагнитные муфты, генераторы, преобразователи, ТЭД), а с другой стороны, разработки алгоритмов управления и программного обеспечения для надлежащего функционирования тяговой системы локомотива.

#### **4.6 Заключение и выводы по главе 4**

1. В свете тенденций мирового и отечественного локомотивостроения, предложен способ повышения энергетической эффективности АГМЛ за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой СЭУ, в соответствие с полезной мощностью на тягу поезда.

2. Разработана и обоснована модульная структура тяговой системы АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ. Определены ее параметры. Раз-

работана ее компьютерная модель с использованием программных комплексов «Matlab Simulink» и «Универсальный механизм».

3. Выполнено компьютерное моделирование движения грузового поезда. Изменение числа работающих дизельных двигателей производилось в зависимости от мощности, необходимой для питания ТЭД. Изменение числа активных ТЭД производилось в зависимости от мощности, необходимой на тягу поезда. Результаты сопоставлены с записями бортового регистратора. Получено, что при использовании предложенного способа повышения энергетической эффективности увеличение КПД составляет 6,2 % при сокращении расхода топлива на 19,7 %.

4. Выполнена оценка моторесурса СЭУ согласно линейной модели. Получено, что за время одной и той же поездки затраченный моторесурс тепловоза 2ТЭ25КМ (по дизелю) составляет 3,01 моточаса, а для тепловоза с модульной СЭУ – 1,1 моточаса. Таким образом, если принять рассмотренную поездку за эталонную, то число эталонных поездок для тепловоза с модульной СЭУ на 27% больше, и как следствие срок службы тепловоза с модульной СЭУ увеличится на 27 % по сравнению с тепловозом 2ТЭ25КМ, имеющим моноблочную СЭУ.

5. Необходимо отметить, что реализация предлагаемой модульной структуры требует, с одной стороны, наличия соответствующего силового оборудования (дизельные двигатели, электромагнитные муфты, генераторы, преобразователи, ТЭД), а с другой стороны, разработки алгоритмов управления и программного обеспечения для надлежащего функционирования тяговой системы локомотива.

## Глава 5

# ПЕРСПЕКТИВНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА ЛОКОМОТИВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ГАЗОВЫХ МИКРОТУРБИН

### 5.1 Введение

В настоящее время, наиболее распространенным первичным двигателем в составе силовых энергетических установок локомотивов является дизельный двигатель. Однако, наряду со всем известными достоинствами, он имеет и ряд существенных недостатков, о которых было сказано в предыдущих разделах. В связи с этим, в течении длительного времени предпринимаются попытки применения альтернативных типов тепловых двигателей, а также альтернативных видов топлива.

Что касается тепловых двигателей на подвижном составе, то в принципе имеют перспективы развития гибридные энергоустановки [5.1]. Хотя в их составе первичным двигателем является дизель, за счет применения накопителя энергии удастся повысить эффективность работы ТПС в целом, а также сократить выбросы загрязняющих веществ, шумовое воздействие, а также расход топлива [5.2]. Гибридный тяговый привод наиболее целесообразно применять на маневровых и промышленных локомотивах [1.22].

Еще одним перспективным решением является применение на легком автономном ТПС энергоустановок на основе топливных ячеек – электрохимических генераторов [5.3, 5.4], данное решение позволяет полностью исключить загрязнение окружающей среды.

Но оба этих подхода сдерживаются отсутствием надежной элементной базы и высокой стоимостью таких систем. Кроме того, в случае применения электрохимических генераторов, которые питаются водородом, возникает целый ряд вопросов безопасности.

Исходя из этого, наиболее перспективным является рассмотрение альтернативных видов топлива, которые могут быть использованы вместо дизельного топлива. В этой связи актуальным представляется применение природного газа в качестве моторного топлива для магистральных локомотивов [1.25], так как газ имеет преимущества по сравнению с дизельным топливом в плане стоимости, а также по уровню содержания загрязняющих веществ в продуктах сгорания. В данной области имеется два направления – перевод дизельных двигателей на газодизельный цикл работы [1.26], а также применение на автономном ТПС газовых турбин в качестве первичного двигателя в составе СЭУ [1.27].

## 5.2 Конструкция газотурбовозов

В течение длительного времени, рассматривается вопрос применения газовых турбин на автономном ТПС. Так с 2005 года ведутся работы по созданию локомотива с силовой установкой мощностью до 8500 кВт на основе газовой турбины, работающей на сжиженном природном газе. Это обусловлено существенным повышением тепловой экономичности современных газовых турбин, которая приближается к уровню поршневых двигателей.

На данный момент, в нашей стране построены и находятся в опытной эксплуатации два газотурбовоза (ГТ1-001 и ГТ1h-002).

При создании газотурбовоза ГТ1-001 (рисунок 5.1) был решён ряд сложных научно-технических задач [1.41]. Экипажная часть и кузов были взяты от электровоза ВЛ15. Газовая турбина НК-361 мощностью 8300 кВт при КПД порядка 30% вращает высокооборотный синхронный тяговый генератор с частотой вращения до 6000 об/мин. На локомотиве применяются электрическая передача мощности переменного-постоянного тока и микропроцессорная система управления и диагностики тяговой системы. Вспомогательные нужды, а также незначительные маневровые перемещения обеспечиваются за счет дизельного двигателя малой мощности, установленного рядом с емкостью для газа.





Рисунок 5.1 – Газотурбовоз ГТ1-001

Впоследствии, локомотив получил гибридный тяговый привод и, соответственно, новое обозначение – ГТ1h-002 [1.42] (рисунок 5.2), так как его конструкцию дополнили накопителем энергии – тяговой аккумуляторной батареей, позволяющей исключить эксплуатацию турбины на режимах с низкой энергоэффективностью.



Рисунок 5.2 – Газотурбовоз ГТ1h-002

Также газотурбовоз получил экипажную часть новой конструкции с осевой формулой  $2 \times (2o+2o - 2o+2o)$ , на основе главной рамы и тележек тепловоза ТЭМ7А. В бустерной секции массой 184 тонны расположена принципиально новая криогенная ёмкость, которая вмещает до 20 т газа, а конструктивные решения позволяют осуществлять дозаправку без ее демонтажа с локомотива. Тяговая секция, на которой расположена СЭУ мощностью 8500 кВт, имеет такую же массу, а максимальная нагрузка на ось составляет 23 т. Эксплуатация локомотива под-

твердила возможность вождения составов массой до 9000 т, при пробеге до 700 км без экипировки топливом.

Однако, накопленный опыт показал, что в процессе работы у газотурбовоза возникают проблемы с энергетической эффективностью, аналогичные проблемам, имеющимся у магистральных тепловозов. Эти проблемы связаны с низким КПД (7...9 %) газовой турбины на режимах с частичной нагрузкой, что вызвано спецификой работы газовой турбины, а также моноблочной структурой СЭУ, как и в случае с тепловозом (повышенный удельный расход топлива при работе с составами меньше 6000 т).

В связи со схожестью проблем, для решения вопроса энергетической эффективности применения газовых турбин на автономном ТПС предлагается применить подход, аналогичный изложенному в главе 4.

### **5.3 Предложения по использованию газовых микротурбин в качестве источника энергии для автономного ТПС**

Как было сказано выше, в связи со схожестью проблем, для решения задачи повышения энергетической эффективности применения газовых турбин на тяговом подвижном составе предлагается применить подход, изложенный в главе 4.

Применительно к СЭУ на основе газовых турбин, такой подход возможен за счет использования газовых микротурбин и высокооборотных электрогенераторов (ВЭГ) [5.5], конструктивно объединенных в микро-газотурбинную установку (микро-ГТУ). Мощностной ряд микро-ГТУ, которые могут быть приняты в качестве прототипа, находится в диапазоне 30...500 кВт [5.6].

По аналогии с рисунком 4.5, представим силовую схему тяговой секции перспективного автономного локомотива с модульной силовой установкой на основе микро-ГТУ (рисунок 5.3).

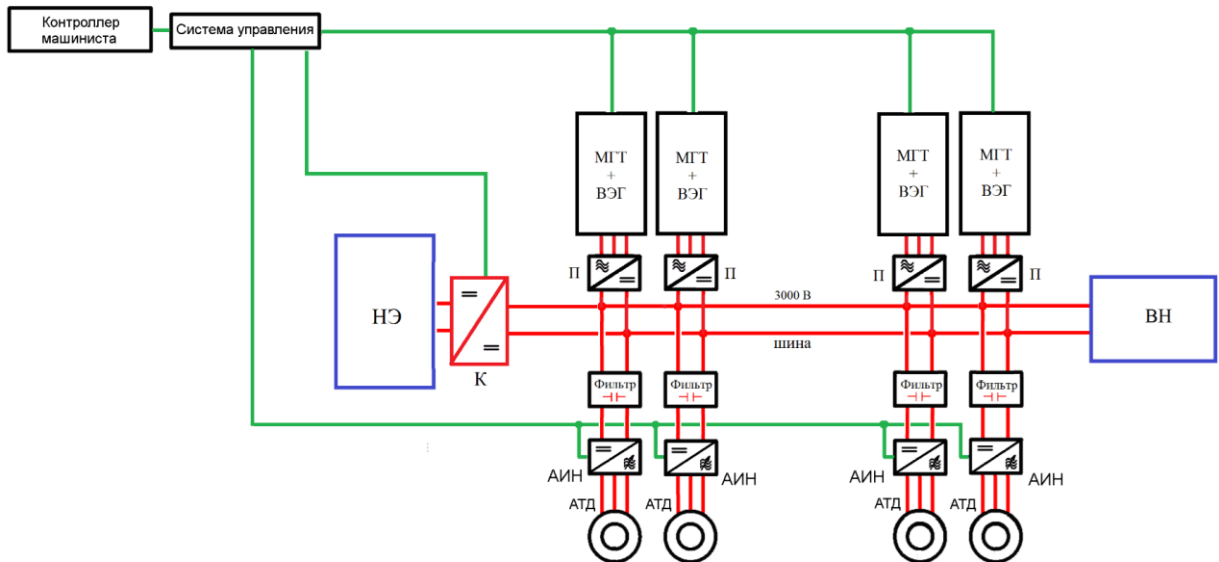


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема силовой части тяговой секции:  
 МГТ – газовая микротурбина; ВЭГ – высокооборотный электрогенератор; МГТ + ВЭГ – микро-ГТУ; П – силовой преобразователь; НЭ – накопитель энергии; К – коммутатор;  
 ВН – вспомогательные нужды; АИН – автономный инвертор напряжения; АТД – асинхронный тяговый двигатель

Нижний уровень системы преобразования энергии локомотива – тяговый электропривод – полностью идентичен описанному в главе 4.

Отличие тяговой системы от приведенной ранее заключается в верхнем уровне системы преобразования энергии локомотива, а именно в конструкции силовой энергетической установки. Так, в данной конструкции, тяговый модуль представляет собой не дизель-генераторную установку, а микро-ГТУ. Количество тяговых модулей (микро-ГТУ) может варьироваться в зависимости от требуемой мощности, которая определяется мощностью, потребляемой тяговым электроприводом.

Особо подчеркнем необходимость наличия в структуре накопителя энергии. Потребность в нем заключается в особенностях эксплуатации и рабочего процесса микротурбины [5.7]. Локомотив с такой тяговой системой по своей сути является гибридным автономным локомотивом [5.8].

Эффективность работы такой тяговой системы достигается за счет:

– применения более дешевого вида топлива (газ) по сравнению с дизельным;

- снижения количества вредных выбросов в атмосферу и, как следствие, уменьшения вредного воздействия на окружающую среду;
- возможности рекуперации энергии посредством использования в структуре накопителя энергии;
- применения алгоритмов энергооптимального управления, позволяющего повысить эффективность работы всех элементов системы преобразования энергии.

Подход к повышению показателей энергетической эффективности идентичен представленному в главе 4. Однако особый интерес представляют технические решения по применению микро-ГТУ в составе СЭУ.

#### **5.4 Предлагаемые технические решения по применению микро-газотурбинных установок**

Эффективность газовой турбины и системы преобразования механической энергии в электрическую энергию определяют эффективность микро-ГТУ. Она достигается при работе микро-ГТУ с коэффициентом использования мощности выше 0,7, который возможен только при высоких скоростях вращения вала. Для газовой микротурбины мощностью до 500 кВт рациональная частота вращения, определяемая свойствами рабочего тела должна быть не менее 100000...200000 об/мин, при которой достигается ее наибольшая эффективность. В этом случае электрический КПД установки может достигать 35 %.

Такие высокие показатели эффективности микро-ГТУ могут быть достигнуты только при использовании ВЭГ, конструктивно расположенных с турбиной на общем валу (рисунок 5.4). Данная особенность обусловлена тем, что использование зубчатого редуктора для передачи вращения на электрический генератор увеличивает вес и размеры установки, а также приводит к потерям энергии и как следствие снижению эффективности работы такой силовой установки.

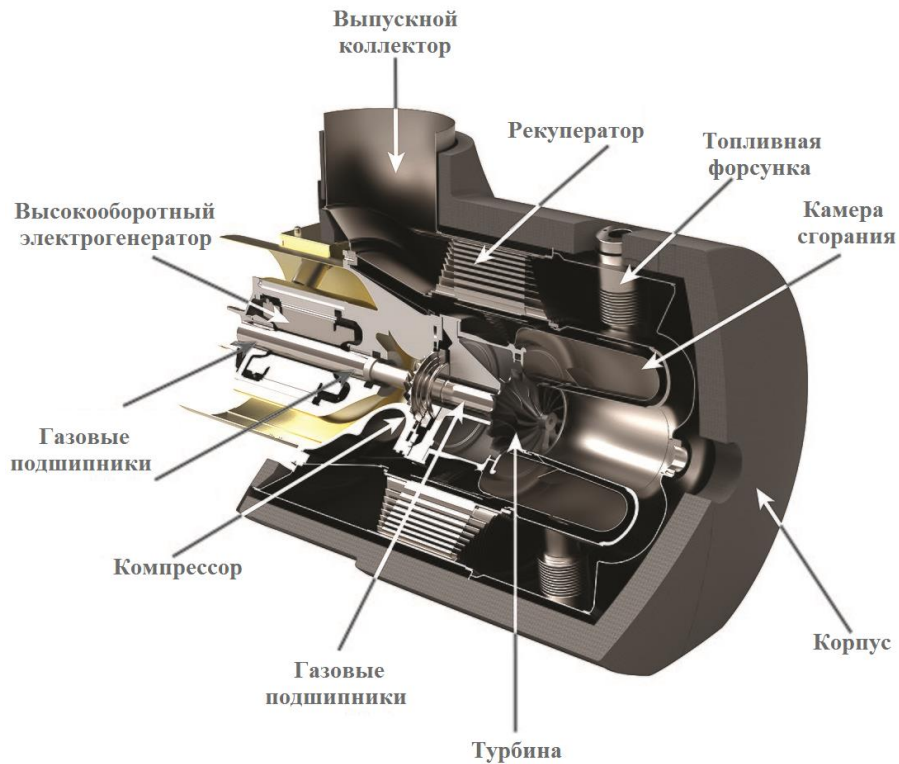


Рисунок 5.4 – Общий вид микро-ГТУ [5.9]

В связи с этим, высокооборотный электрогенератор микро-ГТУ должен быть расположен на общем валу [5.10]. Разработка ВЭГ требует выбора его типа, конструкции и параметров, а также структуры и схемных решений преобразователя мощности и методов управления.

Эти вопросы рассматриваются и решаются в ходе выполнения работ в рамках соглашения № 14.604.21.0174 о субсидировании от 26.09.2017. Тема: «Разработка научно-технических решений для создания эффективного высокоскоростного генераторного оборудования для газовой микротурбины» по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации, Федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки в соответствии с приоритетными направлениями развития российской науки и техники на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификационный код прикладных исследований (проект) – RFMEFI60417X0174. И будут подробно описаны далее.

### **5.4.1 Выбор типа ВЭГ**

Эффективность высокооборотного электрогенератора во многом определяет показатели энергетической установки в целом. Поэтому его создание является одной из наиболее сложных задач при разработке микро-ГТУ. При этом наиболее сложным является обеспечение прочности вращающихся частей ВЭГ.

В качестве ВЭГ в составе микро-ГТУ возможно применение различных типов бесколлекторных электрических машин: синхронных машин с постоянными магнитами на роторе, а также синхронных реактивных или асинхронных машин. Наилучшими удельными показателями обладают синхронные электрические машины с постоянными магнитами на роторе, что делает их наиболее распространенным типом ВЭГ, используемых в составе микро-ГТУ [5.11].

Наиболее сложной частью ВЭГ в составе микро-ГТУ является ротор, так как статор практически не имеет отличий для различных типов машин и выполняется по традиционной конструкции.

Существует обратная зависимость между мощностью и предельной скоростью вращения, которая определяется прочностными характеристиками постоянных магнитов, способами их фиксации и предельной скоростью вращения ротора. Недопустима работа постоянных магнитов на растяжение, поэтому в конструкции ротора ВЭГ необходимо применять специальные меры по их закреплению – применение бандажа, как обязательного элемента конструкции ротора. Бандаж не должен допускать перехода от напряжений сжатия к напряжениям растяжения при рабочей частоте в наиболее нагруженной части постоянного магнита и должен быть выполнен из немагнитного материала, чтобы не допускать замыкания магнитного потока. Как показал анализ материалов для изготовления бандажа, в качестве материала бандажа в конструкциях роторов ВЭГ вращающихся с частотой вращения более 60000 об/мин применяют хромоникелевый сплав марки 36НХТЮ, нержавеющей и немагнитную сталь 12Х18Н10Т, латунь ЛС59-1, титановые сплавы ВТ1-1 и ВТ6 [5.12].

Однако применение бандажа приводит к зависимости, которая накладывает ограничения по мощности ВЭГ. На рисунке 5.5 представлена зависимость мощности электрической машины с постоянными магнитами от частоты вращения ротора. Как видно, мощность снижается по мере увеличения частоты вращения. Причиной этого является снижение величины индукции магнитного поля в воздушном зазоре вызываемое увеличением толщины бандажа.

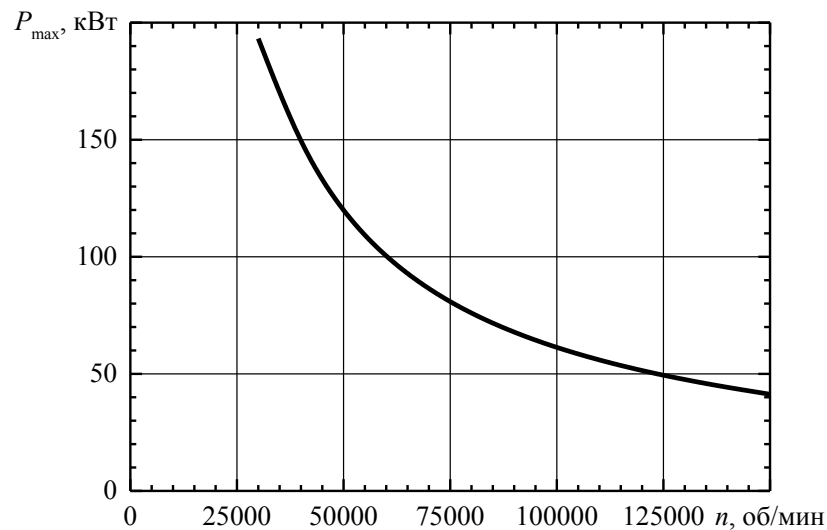


Рисунок 5.5 – Зависимость мощности ВЭГ от частоты вращения ротора

Необходимость увеличения скорости вращения и, в тоже время, сохранения уровня мощности требует либо отказа от постоянных магнитов, либо поиска материала бандажа, который бы не увеличивал его толщину, и как следствие, и немагнитный зазор, снижающий индукцию магнитного поля.

Альтернативой металлическим сплавам, в качестве материала для бандажа, могут выступать композиционные материалы на основе стеклянной или угольной нити (стеклопластик и углепластик), так как их основными преимуществами являются высокая прочность и меньшая плотность. Применение композиционных материалов для изготовления бандажей рассматривается в ряде работ [5.13 – 5.15] и считается перспективным. Высокая прочность композиционных материалов позволяет получить предельный диаметр ротора существенно больше, чем для металлических сплавов.

Анализ результатов, полученных в ходе выполнения работ по соглашению показывает, что применение композиционных материалов для изготовления бандажей позволит – в перспективе – существенно поднять мощность ВЭГ. Причем применение углепластика является предпочтительным, так как он имеет большую, по сравнению со стеклопластиком и, тем более металлическим сплавом, прочность, что позволяет делать бандаж меньшей толщины, что снижает величину немагнитного зазора и позволяет значительно увеличить мощность ВЭГ [5.16].

В связи со сложностями изготовления ВЭГ на основе электрической машины с постоянными магнитами, в качестве прототипа целесообразно использовать асинхронную электрическую машину с массивным ротором, который изготавливается из сплошного ферромагнитного материала (того же самого, что и вал микротурбины), не имеет прорезей и обмоток, что обеспечивает наибольшую прочность [5.16]. Это позволяет выполнять ротор ВЭГ и вал микротурбины в виде единой детали.

#### ***5.4.2 Прототип высокооборотного электрогенератора***

В ходе выполнения работ по соглашению изготовлен испытательный стенд для исследования возможности применения микро-ГТУ в составе СЭУ перспективного автономного ТПС, который показан на рисунке 5.6.



Рисунок 5.6 – Высокооборотный электрогенератор и АИН



В состав стенда входят две бесколлекторные электрические машины (рисунок 5.7), одна из которых выполняет роль турбины (в режиме двигателя), а вторая – представляет собой ВЭГ, что позволяет проводить испытания на полной рабочей частоте вращения по методу взаимной нагрузки, а также преобразователь (рисунок 5.8).



Рисунок 5.7 – Бесколлекторные электрические машины в составе испытательного стенда



Рисунок 5.8 – Преобразователь для ВЭГ мощностью 100 кВт

Обе электрические машины имеют идентичный статор, а ротор может быть разного типа, что позволяет выполнить экспериментальное сравнение эффективности применения его различных конструкции.

Для применения в составе энергетической установки на базе микро-ГТУ был разработан проект асинхронного высокооборотного ЭГ с массивным ротором. Ротор такого ЭГ должен выполняться из материала с магнитными свойствами. При высокой скорости вращения диаметр ротора ограничен условиями прочности. Частота вращения ротора должна быть ниже первой критической частоты. Это накладывает ограничения на активную длину ЭМ.

Таким образом, размеры ротора и реализуемый электромагнитный момент определяются прочностными характеристиками материала. Поэтому в качестве материала ротора предполагается использование нержавеющей магнитной стали типа AMS 5617 (AISI 455), относящейся к классу прецизионных сплавов, обладающей высокими прочностными характеристиками и жаростойкостью. Она имеет индукцию насыщения порядка 1,4 Тл, допустимую рабочую температуру до 1000°C и предел прочности более 1200 МПа. Электромагнитный момент в такой конструкции будет создаваться за счет возникновения вихревых токов в стали. Учитывая высокие прочностные характеристики материала, ротор может быть выполнен в виде одной детали. В этом случае его конструкция представляет собой деталь вращения из сплошного материала, наиболее простой геометрической формы, с гладкой поверхностью. Диаметр ротора определяется по условиям прочности. Выбранная сталь марки AISI 455 имеет предел текучести 1345 МПа и плотность 7760 кг/м<sup>3</sup>. При коэффициенте запаса, равном трем (ЭГ расположен на одном валу с турбиной), предельный диаметр ротора равен 46 мм. В дальнейших расчетах диаметр ротора принят 45 мм.

Величина воздушного зазора асинхронных ЭМ традиционного исполнения с таким диаметром ротора составляет величину около 0,2 мм. С учетом теплового расширения ротора при рабочей температуре, а также с особенностями работы

опор вала (газовых подшипников), величина воздушного зазора должна быть увеличена до 0,5 мм.

По результатам предварительных расчетов [5.17], мощность 100 кВт при частоте вращения 100000 об/мин и принятом диаметре ротора по зазору 45 мм достигается при активной длине ЭМ 400 мм. Исходя из прочностных характеристик материала, такой ротор также удовлетворяет условиям жесткости конструкции (первая критическая частота выше рабочих частот вращения ЭГ). При частоте перемагничивания ротора (абсолютном скольжении) порядка 10...15 Гц и воздушном зазоре 0,5 мм глубина проникновения поля составляет порядка 15 мм, потери в роторе имеют величину около 800...1000 Вт. Указанные преимущества делают применение сплошного ротора из магнитной нержавеющей стали реальной альтернативой ротору на постоянных магнитах.

Конструкция статора разрабатываемого электрогенератора является традиционной для электрических машин переменного тока. Многофазная обмотка укладывается в пазы. Поскольку частота тока в обмотке даже при одной паре полюсов достаточно высока, она должна выполняться из отдельных тонких проводников (литцендрат, litz wire) для снижения потерь. Секции обмотки формируются до их укладки в пазы. Поэтому для размещения такой обмотки возможно применение только пазов прямоугольной формы. Для снижения рассеяния магнитного потока и защиты обмотки статора со стороны ротора пазы закрыты магнитными клиньями.

Число пазов на статоре определяется минимально возможным размером зубца. С точки зрения технологии изготовления магнитопровода статора и сборки ЭГ зубец в месте выхода в воздушный зазор не должен быть меньше 9 – 10 мм. Тогда для принятого диаметра ротора по зазору 45 мм количество пазов не должно превышать 15.

В соответствии с требованиями электрогенератор должен выдавать линейное напряжение 380 В. Поскольку частота токов статора ЭГ в номинальном режиме составляет 1,7 кГц, возникает необходимость снижения токовой нагрузки на

полупроводниковые приборы силового преобразователя. Для снижения тока протекающего через фазы преобразователя был рассмотрен вариант применения пятифазной обмотки с числом пазов равным 10. На рисунке 5.9 представлены эскизы активной части высокооборотного электрогенератора с пятифазной обмоткой. Кроме снижения токовой нагрузки на силовые полупроводниковые приборы преобразователя, применение пятифазной обмотки позволяет снизить уровень высших пространственных гармоник поля в воздушном зазоре и потери от этих гармоник.

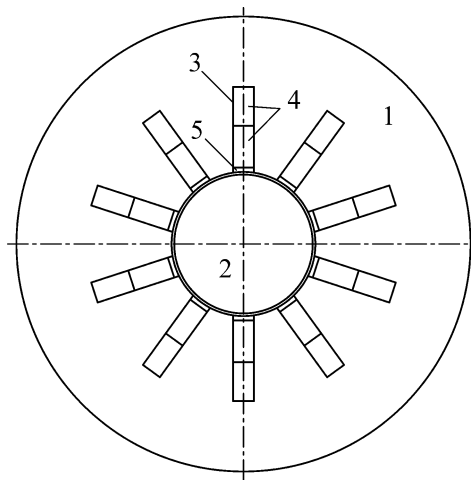


Рисунок 5.9 – Схема активной части пятифазного ВЭГ для микро-ГТУ:  
1 – магнитопровод статора; 2 – ротор; 3 – паз статора; 4 - обмотка статора; 5 – щелевой клин

#### **5.4.3 Система управления и формирования выходного напряжения ВЭГ**

В энергетической установке на базе микро-ГТУ ЭГ работает совместно с полупроводниковым преобразователем энергии (автономным инвертором). Поэтому форма напряжения, приложенного к обмоткам статора является несинусоидальной. Высшие гармоники напряжения создают высшие временные гармоники магнитного поля в зазоре и тока статора. Эти гармоники, учитывая их высокую частоту, существенно увеличивают потери в магнитопроводе статора и в массивном роторе. Также, обратно вращающиеся гармоники создают тормозной момент и ухудшают эффективность ЭГ.

Наиболее распространенным способом для снижения уровня высших гармоник в выходном напряжении автономного инвертора является увеличение частоты модуляции. Улучшение гармонического состава напряжения достигается за счет увеличения количества переключений полупроводниковых приборов инвертора. Применение синусоидальной ШИМ (PWM) с независимым управлением по фазам или пространственно-векторной ШИМ (Space-Vector PWM) за счет повышения частоты модуляции позволяет снизить уровень высших гармоник, но они все равно остаются в спектре выходного напряжения. Поскольку частота основной гармоники выходного напряжения составляет величину более 1,5 кГц, добиться снижения уровня высших гармоник можно только повышая частоту модуляции до уровня в несколько сот килогерц. Существующие типы силовых полупроводниковых приборов в рассматриваемом диапазоне мощностей не в состоянии работать с такими частотами переключений. Поэтому в случае, когда к спектральному составу выходного напряжения выдвигаются высокие требования связанные, как в случае с высокооборотным асинхронным ЭГ, с необходимостью снижения потерь в элементах магнитной системы от высших гармоник поля, возникает необходимость применения способов формирования выходного напряжения инвертора гарантирующих отсутствие определенных гармоник.

Одним из наиболее широко применяемых в этом случае методов является модуляция с предварительно вычисляемыми моментами переключения (Pre-calculated PWM). Идея метода заключается в том, что моменты переключения силовых полупроводниковых модулей предварительно рассчитываются таким образом, чтобы обеспечить подавление заданных гармоник в выходном напряжении инвертора [5.18 – 5.23]. Управление каждой фазой ведется независимо. На рисунке 5.10 представлена форма выходного напряжения (потенциал фазы относительно половины напряжения в звене постоянного тока)

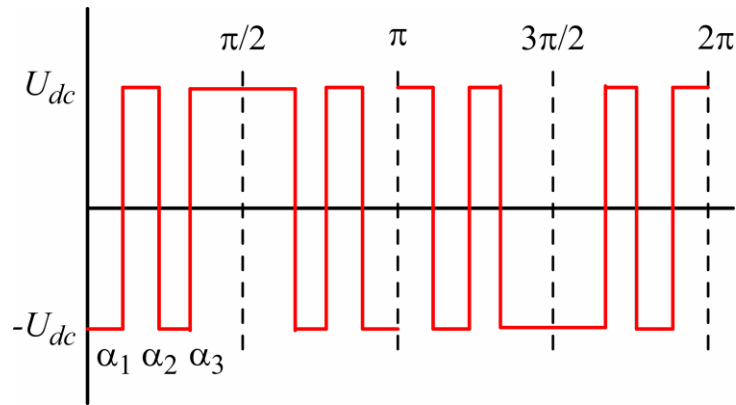


Рисунок 5.10 – Выходное напряжение автономного инвертора напряжения (потенциал фазы) при использовании Pre-calculated PWM

Определение моментов переключения полупроводниковых приборов выполняется с использованием следующей методики. Выходное напряжение представляется в виде разложения в ряд Фурье:

$$U_f(t) = \sum_n a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (5.1)$$

Поскольку напряжение симметрично относительно оси абсцисс, четные гармоники в выходном напряжении отсутствуют. Тогда амплитуда  $n$ -й гармоники выражается как

$$b_n = \frac{4}{\pi n} \left[ 1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right] \quad (5.2)$$

Углы переключения от  $\alpha_1$  до  $\alpha_m$  должны удовлетворять условию

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_m < \pi/2 \quad (5.3)$$

Задавая требуемое значение амплитуды основной гармоники выходного напряжения, а также приравнивая к нулю амплитуды выбранных гармоник, углы переключения определяются из уравнений (5.2). Решая сформированные нелинейные трансцендентные уравнения, вычисляют значения углов переключения. Описанный подход позволяет подавлять в выходном напряжении инвертора ( $m - 1$ ) гармоник, где « $m$ » – количество переключений силовых приборов фазы инвертора на четверть периода выходного напряжения. Решение системы уравнений (5.2) в реальном времени при управлении инвертором не производится. Вместо этого заранее рассчитываются и аппроксимируются углы переключения для нескольких используемых значений  $m$ .

В рассматриваемом случае при частоте основной гармоники более 1,5 кГц при допустимой частоте переключения полупроводниковых приборов 15 кГц возможна реализация модуляции с тремя контролируруемыми гармониками (семь переключений полупроводникового прибора на период основной гармоники). Дальнейшее увеличение количества переключений (кратности частоты модуляции) не дает существенного эффекта в плане улучшения гармонического состава выходного напряжения инвертора, так как по мере увеличения номера гармоники ее амплитуда быстро снижается. Кроме того, частота переключения силовых полупроводниковых приборов ограничена уровнем тепловых потерь.

В случае трех контролируемых гармоник задается величина основной гармоники и еще две могут быть обращены в нуль. Четные гармоники в выходном напряжении отсутствуют, пятая гармоника в симметричной пятифазной системе отсутствует. Поэтому подавляться должны 3 и 7 гармоники. Тогда первой из неконтролируемых гармоник будет гармоника с номером 11. Для этого случая путем решения уравнений (5.2) было выполнено определения углов переключения  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  в зависимости от коэффициента модуляции (величины основной гармоники). На рисунке 5.11 показаны зависимости углов переключения от коэффициента модуляции.

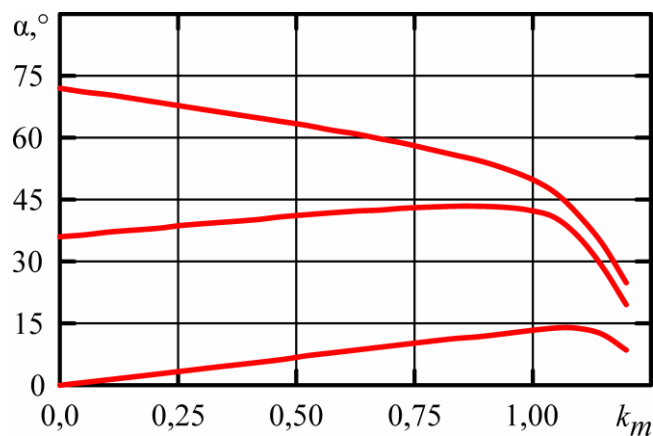


Рисунок 5.11 – Зависимости углов переключения от коэффициента модуляции

Рассмотренный способ модуляции относится к виду модуляции с независимым управлением каждой фазой. Предельная величина коэффициента модуляции, при котором возможно формирование напряжения без искажения формы исход-

ного синусоидального сигнала равно единице. За счет увеличения коэффициента модуляции больше единицы возможно увеличение амплитуды основной гармоники выходного напряжения за счет роста высших гармоник. Это позволяет улучшить использование инвертора по напряжению. Для рассматриваемого способа модуляции возможно увеличение коэффициента модуляции до 1,17. При этом амплитуда контролируемых гармоник не изменяется. Анализ гармонического состава выходного напряжения показал, что коэффициент модуляции может быть увеличен до 1,1 без существенного ухудшения гармонического состава напряжения. Поэтому такое значение коэффициента модуляции было принято для формирования напряжения статора высокооборотного ЭГ при частотах вращения от номинальной и выше.

#### ***5.4.4 Анализ электромагнитных процессов в высокооборотном электрогенераторе***

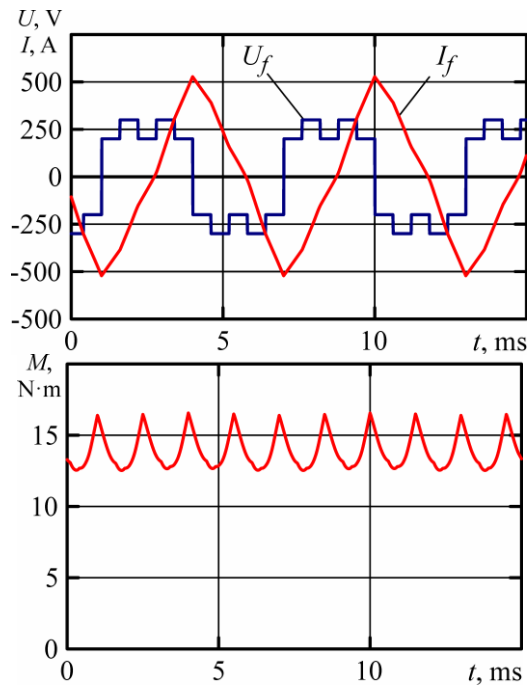
Для оценки правильности положений, принятых при разработке высокооборотного ЭГ, был выполнен расчет электромагнитных процессов методами теории поля. Расчеты выполнялись в программном комплексе ELCUT v.6.3 [5.24]. Задача о расчете электромагнитного поля решалась в двумерной постановке. Выполнялся расчет динамики при питании обмотки статора ЭГ от пятифазного источника напряжения заданной формы. Рассмотрены два варианта формирования выходного напряжения инвертора: одноимпульсный режим и с использованием описанной выше SHE PWM с тремя контролируруемыми гармониками и коэффициентом модуляции равным 1,1.

На рисунке 5.12 приведены зависимости фазного напряжения, приложенного к обмотке электрической машины, фазного тока и электромагнитного момента для рассматриваемых случаев формирования выходного напряжения инвертора.

На рисунке 5.13 показан гармонический состав фазного напряжения и фазного тока. Расчеты проводились для номинального режима. Обмотки статора соединены в пятифазную звезду.



## Одноимпульсная модуляция



## SHE PWM

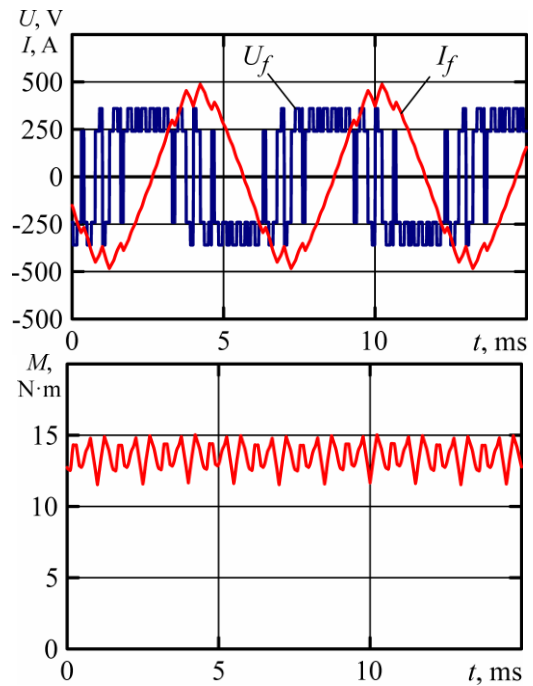
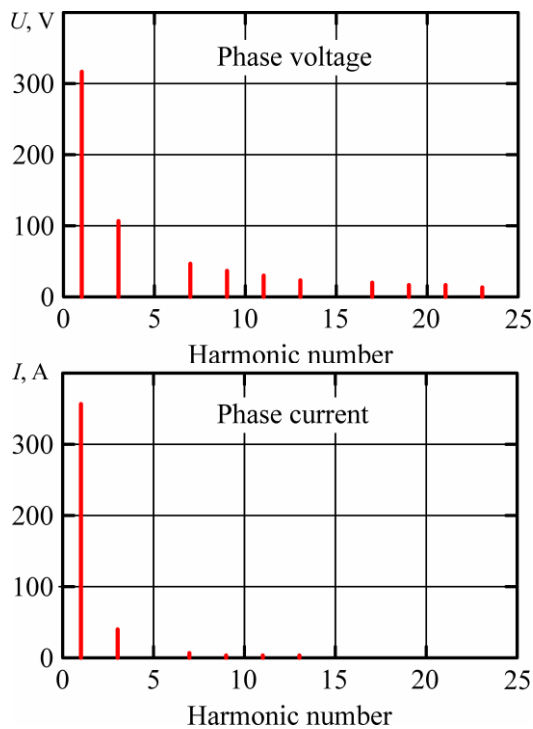


Рисунок 5.12 – Фазное напряжение и ток, электромагнитный момент ВЭГ

## Одноимпульсная модуляция



## SHE PWM

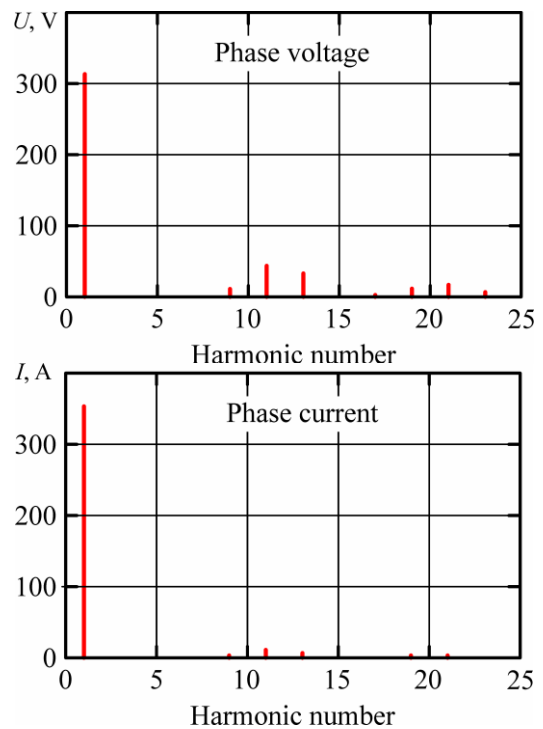


Рисунок 5.13 – Гармонический состав фазного напряжения и тока ВЭГ

Напряжение в звене постоянного тока инвертора выбиралось таким образом, чтобы величина основной гармоники были одинаковыми в обоих рассматри-

ваемых вариантах. Оно равно 550 В для одноимпульсной модуляции и 600 В – в случае применения SHE PWM. Частота вращения ротора равна 100 000 об/мин, частота напряжения инвертора приложенного к обмотке статора меньше на 10 Гц частоты вращения ротора (режим генерации).

На рисунке 5.14 показано распределения индукции магнитного поля в расчетной области ЭГ.

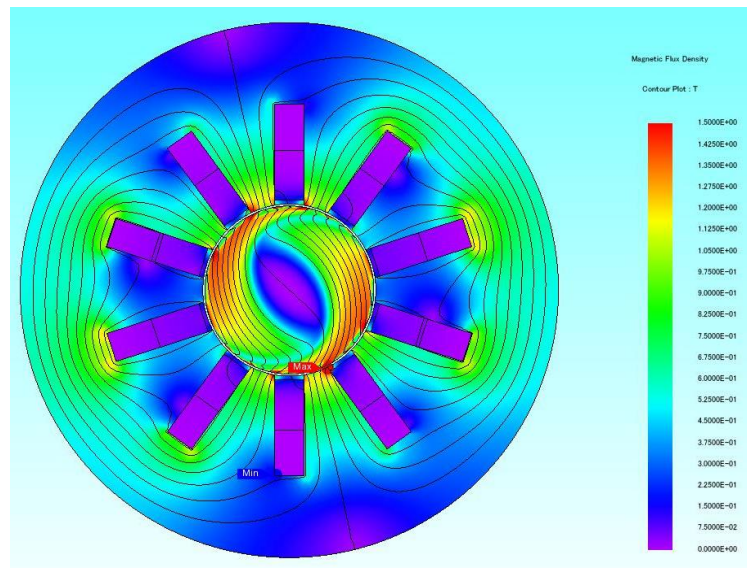


Рисунок 5.14 – Распределение электромагнитной индукции в расчетной области высокооборотного ЭГ с пятифазной обмоткой

Анализ полученных результатов показывает, что применение одноимпульсной модуляции приводит к появлению в гармоническом составе фазного напряжения высших гармоник со значительной амплитудой. Особенно большую амплитуду имеет третья гармоника. Эти же гармоники присутствуют в гармоническом составе фазного тока. Следует отметить, что создаваемые высшими гармониками напряжения гармоники тока резко снижаются при увеличении номера гармоники. Поэтому подавление в напряжении на выходе инвертора гармоник с номерами выше 10 не дает значительного эффекта.

Кроме значительных пульсаций электромагнитного момента с относительно низкой частотой, способной вызвать вибрацию ротора, в одноимпульсном режиме

возрастают потери в роторе вызываемые высшими гармониками магнитного поля. В рассмотренном случае они составляют 1700 Вт.

При использовании SHE PWM в спектре фазного напряжения отсутствуют гармоники с номерами меньше 11, что подтверждает правильность принятого подхода к формированию напряжения инвертора. В гармоническом составе фазного тока также отсутствуют гармоники с номерами меньше 11, что обеспечивает снижение пульсаций электромагнитного момента до приемлемого уровня. Потери в роторе при использовании такого способа модуляции снижаются до 1150 Вт.

Следует обратить внимание на то, что у высокооборотных ЭМ, в отличие от низкооборотных, потери в магнитопроводе (магнитные потери) значительно превышают джоулевы потери в обмотках (электрические потери). Поэтому, для снижения уровня потерь в стали до приемлемого значения, магнитопровод статора следует проектировать с меньшим уровнем насыщения.

Анализ полученных результатов показал, что разработанный высокооборотный ЭГ позволяет реализовать заданную мощность при приемлемом уровне потерь энергии, подтвердив реализуемость высокооборотного электрогенератора мощностью 100 кВт с частотой вращения 100 000 об/мин в виде асинхронной ЭМ с массивным ротором.

Управление высокооборотным электрогенератором не имеет принципиальных отличий от управления асинхронной электрической машиной. Для достижения высокой точности и быстродействия регулирования рациональным является применение методов, базирующихся на поле-ориентированном управлении. Так как установка датчиков положения или частоты вращения ротора в случае высокооборотного электрогенератора невозможна, необходимо применение бездатчиковых алгоритмов управления.

Одной из наиболее сложных проблем при управлении высокооборотным электрогенератором с массивным асинхронным ротором является определение активного сопротивления ротора. Оно изменяется не только в зависимости от температуры, как у асинхронных двигателей традиционного исполнения, но и при

изменении скольжения. Поэтому необходимо применение специальных алгоритмов, позволяющих оценивать величину активного сопротивления ротора в реальном времени.

Конструкция ротора, вала, статора, схемные решения силового полупроводникового преобразователя, принципы и алгоритмы управления электрических машин, являющихся частью испытательного стенда идентичны применяемым в дальнейшем при использовании в составе микро-ГТУ.

### **5.5 Заключение и выводы по главе 5**

1. В настоящее время газ является альтернативой дизельному топливу. Природный или сжиженный газ доступен, дешев и более экологичен и перспективен по сравнению с дизельным топливом.

2. Необходимо увеличить скорость вращения ротора для повышения эффективности газовой микротурбины. При мощности до 500 кВт скорость вращения микротурбины должна быть не менее 100 000 об / мин.

3. Условия механической прочности требуют создания цельного массивного ротора из ферромагнитной нержавеющей стали, либо применения композиционных материалов для изготовления бандажа в случае применения синхронной машины с постоянными магнитами.

4. Обосновано, что в качестве электрогенератора, на данном этапе, рациональным является применение асинхронной электрической машины с массивным ротором. Приведены основные положения разработки электрогенератора, выбора структуры и способов формирования выходного напряжения преобразователя электроэнергии. Обосновано, что рациональным является применение пятифазной электрической машины, которая имеет приемлемый уровень потерь энергии.

5. Снижение уровня высших гармоник в выходном напряжении инвертора снижает потери в высокоскоростном электрическом генераторе. Для этой цели необходимо использовать модуляцию с задаваемым гармоническим составом.

При помощи методов математического моделирования выполнен анализ электромагнитных процессов в системе «преобразователь электроэнергии – высокооборотный электрогенератор». Использование модуляции с тремя контролируемыми гармониками значительно уменьшило магнитные потери в электрическом генераторе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В работе сформулированы и обоснованы предложения по повышению энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам:

1 Для тепловоза 2ТЭ25КМ выполнена обработка массивов записей бортовых регистраторов. В результате получены качественные и количественные оценки, позволяющие установить зависимость показателей энергетической эффективности локомотива в различных условиях эксплуатации от массы поезда, профиля участка пути и условий движения на Южном полигоне.

2 Выделен и оценен вклад каждого из элементов системы преобразования энергии в конечные показатели энергетической эффективности – КИМ и КПД тепловоза.

3 Получены зависимости, показывающие распределение времени работы и потребляемой энергии тепловоза от степени использования доступной мощности. Установлено, что в эксплуатационных условиях моноблочная СЭУ тепловоза основную часть времени работает в режимах с низкими значениями КПД дизель-генератора, при работе, как с груженными, так и с порожними поездами.

4 Получено решение дифференциального уравнения движения поезда, а также уравнение баланса мощностей и энергетического баланса. Предложена методика нахождения полезной работы, совершаемой локомотивом с поосным регулированием силы тяги при известной массе поезда, профиле участка пути и заданном скоростном режиме.

5 На основе изложенной методики составлена компьютерная модель. Выполнено сопоставление результатов компьютерного моделирования с записями бортового регистратора, которое показало относительное расхождение в пределах 2 %.

6 В свете тенденций мирового и отечественного локомотивостроения, предложен способ повышения энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, осно-

ванный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой СЭУ, в соответствие с полезной мощностью на тягу поезда, путем отключения/подключения избыточных модулей.

7 Разработана и обоснована модульная структура тяговой системы АГМЛ, позволяющая реализовать предлагаемый способ. Определены ее параметры. Разработана ее компьютерная модель с использованием программных комплексов «Matlab Simulink» и «Универсальный механизм».

8 Выполнено компьютерное моделирование движения грузового поезда. Изменение числа работающих дизельных двигателей производилось в зависимости от мощности, необходимой для питания ТЭД. Изменение числа активных ТЭД производилось в зависимости от мощности, необходимой на тягу поезда. Результаты сопоставлены с записями бортового регистратора. Получено, что при использовании предложенного способа повышения энергетической эффективности увеличение КПД составляет 6,2 % при сокращении расхода топлива на 19,7 %.

9 Выполнена оценка моторесурса СЭУ согласно линейной модели. Получено, что срок службы тепловоза с модульной структурой СЭУ увеличится на 27 %.

10 Необходимо отметить, что реализация предлагаемой модульной структуры требует, с одной стороны, наличия соответствующего силового оборудования (дизельные двигатели, электромагнитные муфты, генераторы, преобразователи, ТЭД), а с другой стороны, разработки алгоритмов управления и программного обеспечения для надлежащего функционирования тяговой системы локомотива.

11 Рассмотрены альтернативные СЭУ для применения на АГМЛ. В качестве наиболее перспективных отмечены установки на основе газовых турбин и гибридные СЭУ. Для повышения энергетической эффективности таких локомотивов также может быть применен способ, заключающийся в замене моноблочной силовой установки модульной структурой на основе микро-ГТУ и накопителя энергии.

12 Соискатель лично участвовал в разработке генераторов для применения в составе модульной СЭУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *К главе 1*

1.1 Гапанович, В.А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте / В.А. Гапанович, В.Д. Авилов, Б.А. Аржанников [и др.]; под ред. В.А. Гапановича. – М.: Изд. дом МИСиС, 2012. – 620 с.

1.2 Энергетическая стратегия ОАО "РЖД" на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rzd.ru/doc/public/ru?id=4043&layer\\_id=5104&STRUCTURE\\_ID=704](http://www.rzd.ru/doc/public/ru?id=4043&layer_id=5104&STRUCTURE_ID=704).

1.3 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/docs/36094/>.

1.4 Системы электронного управления для дизельных двигателей / Фурман // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – №5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rucont.ru>.

1.5 Коссов Е. Е., Нестрахов А. С., Аникиев И. П., Бычков Д. А., Кирьянов А. Н., Лобанов С. В., Фурман В. В. «Электронный регулятор для дизель-генератора магистрального тепловоза» М.: Локомотив, 2004 г., № 6 и 7.

1.6 Коссов Е. Е., Нестрахов А. С., Аникиев И. П., Бычков Д. А. «Микропроцессорная система регулирования дизель-генератора» М.: Локомотив, 2002 г., № 12, 48 с.

1.7 Крайнюк О.І. Регульовані системи газорозподілу ДВЗ. Монографія. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. – 232 с.: табл. 3; іл. 104; библиогр. 125 назв.

1.8 Балабин В.Н. Современные системы газораспределения транспортных двигателей. –М. Изд-во «Железнодорожное дело», 2004.

1.9 Балабин, В.Н. Регулирование транспортных двигателей отключением части цилиндров: монография/ В.Н. Балабин. -М.: ГОУ "УМЦ ЖДТ", 2007. -146 е.: ил. -Библиогр.: 30 назв.



1.10 Кудрявцев Я. Б. «Асинхронное нагружение дизелей двухсекционных тепловозов как средство повышения топливной экономичности» Сборник ВНИИЖТ «Совершенствование системы ремонта и технического обслуживания тепловозов», М.: Транспорт, 1995 г.

1.11 Руденко В. Ф., Шевченко С. И., Котов И. М «Разработка алгоритма неравномерного нагружения дизелей двухсекционного тепловоза» Труды ВНИТИ. Коломна. 1988 г., № 67, 167 с.

1.12 Петраков, Д. И. Новый вид маневрового железнодорожного транспорта - ТЭМ28 / Д. И. Петраков, П.Л. Чудаков, О. М. Котов // Техника железных дорог. – 2017 – №2(38). – С. 59–64.

1.13 Тепловоз ТЭМ33 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tmholding.ru/products/manevrovye\\_teplovozy/tem33.html](http://www.tmholding.ru/products/manevrovye_teplovozy/tem33.html)

1.14 Магнитский, Я.Ю. Повышение экономичности тепловозов включением в секцию нескольких дизелей разной мощности: дисс. ... к.т.н. – Ростов-на-Дону, 2002. – 126 с.

1.15 Кручек, В.В. Улучшение эксплуатационных показателей маневровых тепловозов: дисс. ... к.т.н. – СПб, 2012. – 144 с.

1.16 Многодизельные тепловозы TRAXX DE ME // Железные дороги мира. – 2016 – № 3. – С. 55–57.

1.17 Improvement of diesel electric locomotive traction system / T. Nakagawa, E. Morita, H. Nishizawa, M. Numazaki [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studylib.net/doc/18112634/improvement-of-diesel-electric-locomotive-traction-system/>

1.18 Росин Е.И. Автоматизированные гребные электрические установки. Движение судна и его главная установка: Текст лекций /ЛЭТИ. – Л.,1986. – 48 с.

1.19 Зарифьян, А.А. (мл.) Алгоритм повышения энергетической эффективности электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А.А. Зарифьян (мл.) // Вестник РГУПС. – 2016. – № 1. – С. 50–61.

1.20 Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян (мл.), Ю.А. Ор-

лов, К.П. Солтус / Патент RU 2617857; приоритет от 15.09.2015 - Бюлл. №13 - Опубликовано 28.04.2017.

1.21 Мировой опыт в гибридном локомотивостроении / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко, А.В. Илларионов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. №3(36). – С. 54–59.

1.22 Зарифьян, А.А. Обзор конструкций тягового подвижного состава, оснащенных гибридным тяговым приводом / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 1. Технические науки. – РГУПС. Ростов н/Д, 2017 – С. 136–139.

1.23 Носков, В.Н. К вопросу использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии в энергосистемах железнодорожного транспорта / В.Н. Носков // Вестник РГУПС. – 2008. – № 3. – С. 54–59.

1.24 Пути повышения энергетической эффективности перспективных локомотивов / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, В.В. Черников // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век: материалы V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России. С.-Петербург, 14-16 ноября 2017 г. – СПб.: ФГБОУ ВО РГУПС, 2017. – С. 351–356.

1.25 Презентация на тему: " ОАО «ВНИКТИ» Использование сжиженного природного газа в локомотивах." [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/773664/>.

1.26 Носырев, Д. Я. Перспективы и проблемы перевода тепловозов на сжиженный природный газ [Текст] / Д. Я. Носырев, П. А. Кабанов, А. Ю. Балакин // Вестник транспорта Поволжья. - 2014. - № 6. - С. 34-38

1.27 Коссов Е.Е., Перец В.В. Перспективы применения газотурбинных двигателей на тяговом подвижном составе// Вестник ВНИИЖТ-2000-№5-С.16-19.

1.28 Валинский, О.С. Локомотивная тяга: настоящее и задачи на будущее / О.С. Валинский // Локомотив – 2017 – № 12 – С. 2–6.

1.29 Типы и основные параметры локомотивов (№747р от 27.11.2002 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://russia.bestpravo.ru/fed2002/data02/tex12030.htm>.

1.30 Зарифьян, А.А. (мл.) Дискретно-адаптивное управление тяговым приводом грузового электровоза при работе с неполной нагрузкой / А.А. Зарифьян (мл.) // Вестник РГУПС. – 2018. – № 1. – С. 49–59.

1.31 Знакомьтесь: электровоз 2ЭС5С. / Локомотив – 2018 – № 8 – С.35–37.

1.32 Результаты испытаний электровоза 3ЭС5К с порожними грузовыми поездами по оптимизации режимов эксплуатации силового оборудования локомотива серии 3ЭС5К с отключением тяговых двигателей в нечетном направлении участка Таксимо – Лена Северобайкальского региона В-Сибирской ж.д. – 684 стр. М: 2017

1.33 Васильев И.П. Повышение тяговых свойств и энергетической эффективности грузовых электровозов 2,3,4ЭС5К. Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век: материалы V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России. С.-Петербург, 14-16 ноября 2017 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. – с. 170-173.

1.34 Научно-технический совет ОАО "РЖД" одобрил концепцию "Цифровой железной дороги" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE\\_ID=654&layer\\_id=4069&refererLayerId=4069&id=90901](http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE_ID=654&layer_id=4069&refererLayerId=4069&id=90901)

1.35 «Локомотивные технологии» представили проект «умный локомотив» бизнес-сообществу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.locotech.ru/press-center/news/1470/>

1.36 Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждено ОАО «РЖД» 26.12.2014, №519. Одобрено Научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», протокол № 3 от 11.12.2014 г. – 29 с.

1.37 Грузопоток ж/д грузов в направлении портов Юга России к 2025 году достигнет 135 млн тонн – эксперты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portnews.ru/news/274193/>

1.38 Послание Президента РФ Федеральному Собранию от 01.03.2018 "Послание Президента Федеральному Собранию" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_291976/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_291976/)

1.39 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25А. Руководство по эксплуатации. Часть 1 – Брянск, 2019. – С. 199.

1.40 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. – Брянск, 2015. – С. 521.

1.41 Газотурбовоз ГТ1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://prolokomotiv.ru/gazoturbovoz-gt1.html>

1.42 Магистральный газотурбовоз ГТ1h [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sinaratm.ru/products/teplovozy/gt1h-gazoturbovoz/>

1.43 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.

1.44 Бычков, Д.А. Снижение эксплуатационного расхода топлива тепловозами 2ТЭ116 путем применения микропроцессорной системы управления дизель-генератором: дисс. ... к.т.н. – Москва, 2005. – 178 с.

1.45 Зарифьян, А.А. Компьютерная модель подсистемы «дизель – синхронный генератор – выпрямительная установка» магистрального тепловоза. / А.А. Зарифьян, А.В. Козубенко, П.Г. Колпахчян. – Вестник РГУПС –2011. – №1.

1.46 Лакин, И. К. Применение статистических методов при диагностировании тепловозов / И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2015. – №1(21). – С. 20 – 29.

1.47 Тягово-энергетическая лаборатория для испытаний локомотивов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rgups.ru/science/razrabotki-143/tiagovo-energeticheskaja-laborato-400/>

1.48 «АВП Технология» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avpt.ru/>

1.49 Мониторинг технического состояния локомотивов по данным бортовых микропроцессорных систем управления / К.В. Липа, В.И. Гриненко и др. // ТМХ-Сервис. –М., 2013. –156 с.

1.50 Мельников, В.А. Автоматизированное рабочее место диагностирования тепловоза по данным бортовой микропроцессорной системы управления / В.А. Мельников, А.А. Аболмасов // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы междунар. науч.-практ. конф. / ТМХ-Сервис. –М., 2014. – с.222.

1.51 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров // М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

1.52 Кузьмич, В.Д. Теория локомотивной тяги / В.Д. Кузьмич, В.С. Руднев, С.Я. Френкель // М.: Маршрут, 2005. – 448 с.

## *К главе 2*

2.1 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Сайт АО «УК «БМЗ» Брянский машиностроительный завод «ТРАНСМАШХОЛДИНГ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ukbmz.ru/production/magistralnye-teplovozy/583/>

2.2 Модульная силовая энергетическая установка современного тепловоза / А.А. Зарифьян, Н.В. Гребенников, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России», Том 1. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2018. – С. 191–195.

2.3 Зарифьян, А.А. Повышение энергетической эффективности тепловозов за счет применения модульной силовой установки / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство". Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2018. С. 100–104.

2.4 Зарифьян, А.А. Повышение энергетической эффективности тепловозной тяги путем перехода к модульным силовым установкам / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Сборник материалов 6 Международной научно-технической конференции ЛОКОМОТИВЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ. 21 ВЕК. (Том 2) ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра 1» – 2018, С. 208–212.

2.5 Программный комплекс «Matlab Simulink» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matlab.ru/products/Simulink>.

### *К главе 3*

3.1 Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 29.07.2017) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2018).

3.2 Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода / Н.Ф. Ильинский – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224 с.

3.3 Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» приказом № 867р от 12.05.2016 г. – ОАО «Российские железные дороги», 2016. – 513 с.

3.4 Зарифьян, А.А. Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги. уравнение баланса сил / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. №5 (Спецвыпуск). – С. 20–25.

3.5 Зарифьян, А.А. Показатели энергетической эффективности локомотивной тяги. Уравнение энергетического баланса / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Труды

Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. №5 (Спецвыпуск). – С. 27–31.

3.6 Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда / А.А. Зарифьян, Н.В. Гребенников, Т.З. Талахадзе, В.В. Сироткин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 1 (69). – С.40-49.

#### *К главе 4*

4.1 Вольдек, А. И. Попов В. В. / Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. Вольдек, В. В. Попов // Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

4.2 Технические условия «Тепловозные дизель-генераторы 1А-9ДГ» ТУ 24.06.374-83, ПО "Коломенский завод", Коломна, 1983 г.

4.3 Зарифьян, А.А. О возможности повышения энергетической эффективности локомотивов при работе с частичной нагрузкой / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе // Сб. научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Том 2. Технические науки. – Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов н/Д, 2016. – С. 74–76.

4.4 Солтус, К.П. Знакомьтесь: электровоз ЭП20 / К.П. Солтус // Локомотив – 2013 – №4-6.

4.5 Increasing the Energy Efficiency of Rail Vehicles Equipped with a Multi-Motor Electrical Traction Drive (Conference Paper) / T. Talakhadze, N. Grebennikov, A. Zarifyan, A. Zarifyan (jr.), N. Romanchenko, A. Shapshal // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). Publisher: IEEE. – 2019. DOI: 10.1109/IWED.2019.8664283.

4.6 Зарифьян, А.А. Концепция повышения энергетической эффективности тепловозной тяги / А.А. Зарифьян, Н.В. Гребенников, Т.З. Талахадзе, // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9. – 2017. – № 6. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/PDF/122TVN617.pdf>

4.7 Андриющенко, А.А. Показатели энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока. / А.А. Андриющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 2. – С. 21-29.

4.8 Андриющенко, А.А. Асинхронный тяговый привод локомотивов / А.А. Андриющенко, Ю.В. Бабков [и др.] // М.: УМЦ ЖДТ, 2013. – 413 с.

4.9 Двигатели асинхронные тяговые ДАТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://privod-lysva.ru/index.php?id=93>.

4.10 Дизельные двигатели для железнодорожного транспорта размерности ЧН18/20 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zvezda.spb.ru/index.php/produksiya/vidy-produktsii/973-dizelnye-dvigateli-dlya-zheleznodorozhnogo-transporta-razmernosti-chn18-20>.

4.11 ТМЗ Программа развития ОАО «Тутаевский моторный завод» на период до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://paotmz.ru/>.

4.12 Электрокомпоненты для ж/д транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://privod-n.ru/nashi-proekty/elektrokomponenty-dlya-zhd-transporta/>

4.13 Grebennikov, N. Equivalent Magnetic Circuit for Switched Reluctance Motor with Strong Mutual Coupling between Phases (Conference Paper) / T. Talakhadze, A. Kashuba // 2019 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED). Publisher: IEEE – 2019. – DOI: 10.1109/IWED.2019.8664226.

4.14 An experimental setup to study a hybrid drive train for a shunting locomotive (Conference Paper) / S. Le Ballois, T. Talakhadze, L. Vido, A. Zarifyan // 2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2016. – DOI: 10.1109/EVER.2016.7476355.

4.15 Компьютерная модель реостатных испытаний / Н.В. Гребенников, А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, В.В. Черников // Локомотивы. XXI век: материалы III Международной научно-технич. конференции, посвященной 85-летию со дня



рождения д.т.н., профессора В.В. Стрекопытова. – С.-Петербург, 17-19 ноября 2015 г. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С. 33–38.

4.16 Kolpahchyan, P.G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. Part 1: Problem formulation and computer model / P.G. Kolpahchyan, A.A. Zarifyan (Jr) // Transport Problems. International scientific journal. – 2015. Vol. 10, Issue 2. – P. 125-136.

4.17 Kolpahchyan, P.G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. Part 2: Simulation results and analysis / P.G. Kolpahchyan, A.A. Zarifyan (Jr) // Transport Problems. International scientific journal. – 2015. Vol. 10, Issue 3. – P. 5-15.

4.18 Андрющенко, А.А. Оценка энергетической эффективности электровоза с асинхронным тяговым приводом методами компьютерного моделирования / А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: (3-й научно-технический семинар). Сборник тезисов. 6-7 апреля 2016 г. – Брянск, БГТУ, 2016. – С. 9-11.

4.19 Программный комплекс «Универсальный механизм» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.universalmechanism.com>.

4.20 Сиротенко, И.В. РЕСУРС ТЕПЛОВОЗНЫХ ДИЗЕЛЕЙ: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ / И.В. Сиротенко, Г.В. Гогричиани // Мир транспорта. – 2014 (6). – С. 212-221.

## *К главе 5*

5.1 Konarzewski M., Niezgodna T., Stankiewicz M., Szurgott P., “Hybrid Locomotives: Overview of Construction Solutions”, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.20, No.1, 2013.

5.2 Abdallah, N. “Etude de développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable”, Université de Technologie de Belfort- Montbéliard (PhD in French), 2009.

5.3 Зарифьян, А.А. Разработка тягового подвижного состава на гибридной тяге / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. №4 (41). – С. 35–39.

5.4 Alstom unveils hydrogen fuel cell regional train Coradia iLint [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.greencarcongress.com/2016/09/alstom-unveils-hydrogen-fuel-cell-regional-train-coradia-ilint.html>

5.5 The rolling stock with hybrid generator set based on hi-speed gasmicroturbine electric / N. Grebennikov, P. Kolpakhchyan, T. Talakhadze, A. Zarifyan, A. Zarifyan (jr.) // X International Scientific Conference TRANSPORT PROBLEMS 2018, June 27-29, 2018, Katowice, Poland, P. 237–245.

5.6 Giampaolo T. Gas Turbine Handbook: Principles and Practice, Fifth Edition. - Lulu Press, Inc, 2015

5.7 Voicea, A. V. Optimal operation of a microturbine cluster with partial-load efficiency and emission characterization / A. V. Voicea, G. Chicco, P. Mancarella // 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, 2009, pp. 1-8.

5.8 Колпахчян, П.Г. Применение энергетических установок на основе газовых микротурбин на гибридном тяговом подвижном составе / П.Г. Колпахчян, Т.З. Талахадзе, М.С. Подберезная // Сборник материалов 6 Международной научно-технической конференции ЛОКОМОТИВЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ.21 ВЕК. (Том 2) ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра 1» – 2018, С. 159–164.

5.9 Микротурбинные установки Capstone [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.bpcenergy.ru/imgcompany/bpcenergy/events/2009/Capstone\\_brochure5.pdf](http://www.bpcenergy.ru/imgcompany/bpcenergy/events/2009/Capstone_brochure5.pdf)

5.10 Soares C. Microturbines: applications for distributed energy systems. – Butterworth-Heinemann, 2011.

5.11 Bernard, N. Design Methodology of a Permanent Magnet Synchronous Machine for a Screwdriver Application / N. Bernard, F. Martin, M. El-Hadi Zaïm // 2012, pp. 624-633.

5.12 Arkkio, A. Induction and permanent-magnet synchronous machines for high-speed applications / A. Arkkio, T. Jokinen, E. Lantto // Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems - ICEMS 2005, Vol. 2, 27-29 September 2005, pp. 871-876.

5.13 High-speed electrical machines: Technologies, trends, and developments / D. Gerada, A. Mebarki, N.L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino, A. Boglietti // IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 6, pp. 2946–2959, Jun. 2014.

5.14 Strength Design on Permanent Magnet Rotor in High Speed Motor Using Finite Element Method / T. Zhang, X. Ye, H. Zhang, H. Jia // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014, 12, (3), pp. 1758 – 1763

5.15 Электромеханические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов // – М.: Машиностроение, 2014. –267 с.

5.16 Об одной возможности изготовления роторов высокоскоростных электрогенераторов с постоянными магнитами / П.Г. Колпахчян, Б.Н. Лобов, И.В. Русакевич, А.П. Микитинский // Труды X Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2018. Материалы докладов конференции. – 2018. – С.14-19.

5.17 High Speed Generator for Gas Microturbine Installations / P.G. Kolpakhchyan, V.I. Parshukov et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, Vol 12, Nr. 23, P. 13874–13878.

5.18 Holmes, D. T. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice / D. Holmes, T. Lipo // John Wiley & Sons INC, 2003.

5.19 Patel, H.S. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I–Harmonic Elimination / H.S. Patel, R.G. Hoft // IEEE Transactions on Industry Applications. 1973, Vol IA-9, No. 3, P. 310–317.

5.20 Patel, H.S. Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part II – Voltage Control Techniques / H.S. Patel, R.G. Hoft // IEEE Transactions on Industry Applications. 1974, Vol IA-10, No. 5, P. 666–673.

5.21 Estimation of Switching Angles by Using PSO of Three Phase Voltage Source Inverter / B. Patra, B. Kumar, J. Yadagiri, A. Dasgupta // International Journal of Modeling and Optimization. 2012, Vol 2, No. 4, P. 513–517.

5.22 A Complete Solution to the Harmonic Elimination Problem / J. N. Chiasson, L. M. Tolbert, K. J. McKenzie, Du. Zhong // IEEE Transactions on Power Electronics. 2004, Vol 19, No. 2, P. 491–499.

5.23 Madichetty, S. Selective harmonic elimination: Comparative analysis by different optimization methods / S. Madichetty, M. Rambabu, A. Dasgupta // 2014 IEEE 6th India International Conference on, Kurukshetra, IEEE. 2014. P. 1–6.

5.24 ELCUT Новый подход к моделированию полей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elcut.ru/>

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

**Акты об использовании результатов диссертационного исследования**



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ  
СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ  
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ

Привокзальная пл. 1/2  
г. Ростов-на-Дону, 344001  
Тел.: (863) 259-53-09, факс: (863) 259-53-09  
E-mail: SekrT@skzkd.rzd

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальник  
Северо-Кавказской  
Дирекции тяги  
Д.В. Попов

2019 г.



« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ г. № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### АКТ

#### об использовании диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук Талахадзе Темура Зурабовича

Комиссия под председательством главного инженера Северо-Кавказской Дирекции тяги В.Б. Мыльникова составила настоящий акт о том, что результаты научных исследований Т.З. Талахадзе на тему «Повышение энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам» рекомендованы к использованию при составлении режимных карт ведения поездов на не электрифицированных участках с целью повышения энергетической эффективности эксплуатации грузовых магистральных тепловозов в условиях полигона Северо-Кавказской железной дороги за счет выведения избыточной мощности из тяги путем отключения части силовых установок.

Автором предложен способ повышения энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой установкой, в соответствие с полезной мощностью локомотива, необходимой на тягу поезда. Предложена модульная структура силовой энергетической установки, позволяющая реализовать предлагаемый способ повышения энергетической эффективности. Получены и обоснованы количественные оценки экономии дизельного топлива (до 20%) в результате применения модульной структуры силовой энергетической установки.

Главный инженер  
Северо-Кавказской Дирекции тяги

В.Б. Мыльников



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

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038  
 Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up\_del@dep.rgups.ru  
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001



Проректор по научной работе  
 А.Н. Гуда  
 «05» 12 2018 г.

**АКТ**

об использовании результатов диссертационного исследования  
 Талахадзе Темура Зурабовича «Повышение энергетической эффективности  
 магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым  
 установкам» при выполнении научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, директор научно-исследовательской части, к.т.н., доцент Носков В.Н., заведующий кафедрой «Электрические машины и аппараты», д.т.н., доцент Колпахчян П.Г. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени кандидата технических наук Талахадзе Темура Зурабовича использовались при выполнении научно-исследовательской работы:

– Соглашение № 14.604.21.0174 о субсидировании от 26.09.2017. Тема: «Разработка научно-технических решений для создания эффективного высокоскоростного генераторного оборудования для газовой микротурбины» по заказу Министерства образования и науки Российской Федерации, Федеральной целевой программы (ФЦП) «Исследования и разработки в соответствии с приоритетными направлениями развития российской науки и техники на 2014 – 2020 годы». Уникальный идентификационный код прикладных исследований (проект) – RFMEFI60417X0174.

Авторский вклад Талахадзе Темура Зурабовича в работу заключался в анализе перспектив применения на автономном тяговом подвижном составе модульных силовых энергетических установок, состоящих из газовых микротурбин и высокооборотных электрогенераторов.

Директор НИЧ  
 ФГБОУ ВО РГУПС  
 к.т.н., доц.

В.Н. Носков

Заведующий кафедрой ЭМА  
 ФГБОУ ВО РГУПС  
 д.т.н., доц.

П.Г. Колпахчян



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

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038  
 Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up\_del@dep.rgups.ru  
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001



Проректор по научной работе  
 А.Н. Гуда  
 «05» 12 2018 г.

**АКТ**

**об использовании результатов диссертационного исследования**  
**Талахадзе Темура Зурабовича «Повышение энергетической эффективности**  
**магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым**  
**установкам» при выполнении научно-исследовательской работы**

Мы, нижеподписавшиеся, директор научно-исследовательской части, к.т.н., доцент Носков В.Н., и. о. декана факультета «Электромеханический», к.т.н., доцент Яицков И.А., заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав», к.т.н., доцент Богославский А.Е. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени кандидата технических наук Талахадзе Темура Зурабовича использовались при выполнении научно-исследовательской работы:

– Грант Российского научного фонда № 18-79-00130. Тема: «Разработка научно-технических основ и исследование реактивных индукторных машин нового класса».

Авторский вклад Талахадзе Темура Зурабовича в работу заключался в составлении компьютерной модели реактивно индукторного генератора для анализа перспектив его применения в составе модульной силовой энергетической установки автономного грузового магистрального локомотива.

Директор НИЧ  
 ФГБОУ ВО РГУПС  
 к.т.н., доц.

В.Н. Носков

И. о. декана факультета  
 «Электромеханический» ФГБОУ ВО РГУПС,  
 к.т.н., доцент

И.А. Яицков

Заведующий кафедрой ТПС  
 ФГБОУ ВО РГУПС  
 к.т.н., доц.

А.Е. Богославский





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

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038  
 Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up\_del@dep.rgups.ru  
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026104207409, ИНН/КПП 6165009334/616501001



Первый проректор ФГБОУ ВО РГУПС

А.В. Челохьян

2019 г.

АКТ

об использовании диссертационного исследования Талахадзе Темура Зурабовича «Повышение энергетической эффективности магистральных автономных локомотивов за счет перехода к модульным силовым установкам» в учебном процессе ФГБОУ ВО РГУПС

Мы, нижеподписавшиеся, и. о. декана факультета «Электромеханический», к.т.н., доцент Яицков И.А., заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав», к.т.н., доцент Богославский А.Е., председатель учебно-методического совета специальности 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог», к.т.н., доцент Шапшал А.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени кандидата технических наук Талахадзе Темура Зурабовича использованы в учебном процессе по образовательным программам специалитета по специальностям 23.05.03 – «Подвижной состав железных дорог», 23.05.04 – «Эксплуатация железных дорог» и образовательным программам магистратуры по направлению подготовки 15.04.01 – Машиностроение «Моделирование и проектирование подвижного состава железных дорог» при разработке учебно-методических комплексов для студентов по дисциплинам «Теория тяги поездов», «Математическое моделирование систем подвижного состава», «Теория тяги поездов», «Подвижной состав и тяга поездов», «Спецкурс (на основе профессионального стандарта)», научно-исследовательской работе, курсовом и дипломном проектировании студентов факультетов «Электромеханический» и «Управление процессами перевозок».

Основные положения и выводы диссертационного исследования были апробированы в рамках научно-практических конференций, семинаров кафедры и нашли свое отражение в следующих опубликованных работах:

1. 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.
2. Зарифьян, А.А. Повышение энергетической эффективности тепловозной тяги путем перехода к модульным силовым установкам / А.А. Зарифьян, Т.З. Талахадзе, Н.В. Романченко // Сборник материалов 6 Международной научно-технической конференции ЛОКОМОТИВЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ. 21 ВЕК. (Том 2) ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I» – 2018, С. 208–212.
3. Спецкурс (на основе профессионального стандарта). Электрические передачи локомотивов. Учебное пособие. Часть 1 / А.А. Зарифьян, Талахадзе Т.З., Н.В. Гребенников / Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2015. – 113 с.

4. Учебно-методический комплекс специализации "Локомотивы": учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 1 / А. С. Шапшал, В. М. Коротков, С. А. Шапшал [и др.]; ред. А. С. Шапшал; ФГБОУ ВО РГУПС. - Ростов н/Д: [б. и.], 2017. - 131 с.

5. Учебно-методический комплекс специализации "Локомотивы": учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 2 / А. Е. Богославский, А. В. Донченко, А. А. Зарифьян [и др.]; ред. А. С. Шапшал; ФГБОУ ВО РГУПС. - Ростов н/Д: [б. и.], 2017. - 159 с.

6. Учебно-методический комплекс специализации "Локомотивы": учеб. пособие: в 3 ч. Ч. 3 / М. Н. Жулькин, А. А. Зарифьян, Т. З. Талахадзе [и др.]; ред. А. С. Шапшал; ФГБОУ ВО РГУПС. - Ростов н/Д: [б. и.], 2017. - 142 с.

И. о. декана факультета  
«Электромеханический» ФГБОУ ВО РГУПС,  
к.т.н., доцент




И.А. Яицков

Заведующий кафедрой  
«Тяговый подвижной состав»,  
к.т.н., доцент



А.Е. Богославский

УМС специальности  
23.05.03 «Подвижной состав железных дорог»,  
к.т.н., доцент



А.С. Шапшал

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОП ООО «ТМХ-Инжиниринг»  
в г. Брянск



В.В. Чернышев  
«19» 04 2019 г.

Заместитель главного конструктора  
ОП ООО «ТМХ-Инжиниринг» в г. Брянск

Д.И. Петраков  
«19» 04 2019 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Талахадзе Темура Зурабовича  
«Повышение энергетической эффективности магистральных автономных ло-  
комотивов за счет перехода к модульным силовым установкам»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог, тяга поездов и  
электрификация

Комиссия в составе начальника бюро перспективного проектирования В.С. Титомира, начальника бюро электрооборудования И.В. Крихели и начальника бюро дизельных систем С.Н. Шугаева составила настоящий акт о том, что научно-технические предложения по повышению энергетической эффективности грузовых магистральных тепловозов за счет перехода к модульным силовым установкам, изложенные в диссертационной работе соискателем Т.З. Талахадзе, могут быть приняты как материал для разработки проекта перспективного многодизельного автономного локомотива.

Соискателем построены зависимости, показывающие распределение потребляемой энергии и времени работы от коэффициента использования доступной мощности тепловоза в различных условиях эксплуатации. Этим получена объективная информация по степени загруженности силовой энергетической установки локомотива.

Предложен способ повышения энергетической эффективности, основанный на принципе приведения мгновенной мощности, генерируемой силовой энергетической установкой, в соответствие с мощностью локомотива на тягу поезда в данный момент времени,

В результате предложена структура модульной силовой установки магистрального грузового тепловоза, позволяющая реализовать предлагаемый

способ повышения энергетической эффективности, что позволяет обеспечить повышение КПД силовой установки тепловоза при работе тепловоза с частичной нагрузкой до уровня, близкого к номинальному значению КПД силовой установки. Этим достигается повышение энергетической эффективности тепловозной тяги и снижение расхода топлива в зависимости от режима работы. Дизельные двигатели, при помощи которых могут быть построены модульные силовые установки, выпускаются отечественной промышленностью.

Расчетным путем получены и обоснованы количественные оценки экономии дизельного топлива (до 20 %) в результате применения модульной структуры СЭУ. Выполнен сравнительный анализ моторесурса моноблочной и модульной СЭУ, показано, что при прочих равных условиях ресурс модульной СЭУ не уменьшается (увеличивается до 25 %).

Сформулированные соискателем предложения представляют значительный интерес в связи с тем, что в ООО «ТМХ-Инжиниринг» постоянно ведутся работы, направленные на повышение энергетической эффективности локомотивов с учетом требований ОАО «РЖД».

#### **Председатель комиссии**

Начальник отдела электрооборудования



Т.В. Бурносов

#### **Члены комиссии**

Начальник бюро перспективного проектирования



В.С.Титомир

Начальник бюро электрооборудования



И.В.Крихели

Начальник бюро дизельных систем



С.Н.Шугаев