

РОСЖЕЛДОР

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Ростовский государственный университет путей сообщения»

(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

МУСТАФИН Адель Шамильевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ СЕМЕЙСТВА «ЕРМАК»
ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ
РЕШЕНИЙ ПРИ ЗАВОДСКОМ РЕМОНТЕ**

Специальность 2.9.3. 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

2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	6
1	СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	15
1.1	Обзор публикаций по вопросу экономии электроэнергии на тягу за счет отключения части двигателей	16
1.2	Тяговая система электровоза «Ермак» и варианты её модерниза- ции	32
1.2.1	<i>Силовая электрическая схема</i>	33
1.2.2	<i>Варианты модернизации</i>	36
1.3	Использование мощности грузовых электровозов в условиях эксплуатации	38
1.4	Изучение теплового режима тягового электрооборудования при наличии регулируемой принудительной вентиляции	40
1.5	Улучшение условий работы коллекторно-щеточного узла	41
1.6	Программно-аппаратное моделирование процессов при работе электровоза в энергоэффективном режиме	44
1.7	Выводы по главе	45
2	ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОВОЗА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ	48
2.1	Энергетическая эффективность тягового трансформатора в зави- симости от нагрузки	48
2.2	Энергетическая эффективность выпрямительно-инверторного преобразователя и сглаживающего реактора	57
2.2.1	<i>Работа ВИП в 1-й зоне</i>	60

2.2.2	<i>Работа ВИП во 2-й зоне</i>	61
2.2.3	<i>Работа ВИП во 3-й зоне</i>	62
2.2.4	<i>Работа ВИП во 4-й зоне</i>	63
2.2.5	<i>Энергетическая эффективность сглаживающего реактора</i>	65
2.3	Энергетическая эффективность тягового электродвигателя серии НБ-514 в зависимости от нагрузки.	67
2.3.1	<i>Конструкция и основные параметры тягового электродвигате- ля НБ-514</i>	68
2.3.2	<i>Уравнения процессов в электрических цепях.</i>	72
2.3.3	<i>Дифференциальное уравнение вращательного движения якоря</i> . .	75
2.3.4	<i>Система уравнений электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь</i>	77
2.3.5	<i>Баланс мощностей тягового электродвигателя</i>	77
2.3.6	<i>Построение компьютерной модели в среде SimInTech</i>	80
2.3.7	<i>Результаты компьютерного моделирования</i>	91
2.4	Выводы по главе	96
3	ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ.	98
3.1	Условия работы грузовых электровозов на Северо-Кавказской ж.д.	99
3.2	Оценка энергопотребления грузовых электровозов при работе в штатном режиме тяги.	100
3.2.1	<i>Энергопотребление при работе в прямом направлении Батайск – Тимашевская (штатный режим, состав массой 6300 т)</i>	101
3.2.2	<i>Энергопотребление при работе в обратном направлении Тима- шевская – Батайск (штатный режим, состав массой 1750 т)</i> . .	103

3.3	Оценка энергопотребления грузовых электровозов при работе в энергоэффективном режиме тяги	105
3.3.1	<i>Энергопотребление при работе в прямом направлении Батайск – Тимашевская (энергоэффективный режим, состав массой 6300 т)</i>	105
3.3.2	<i>Энергопотребление при работе в обратном направлении Тимашевская – Батайск (энергоэффективный режим, состав массой 1750 т)</i>	106
3.4	Оценка показателей потребления электроэнергии	107
3.5	Выводы по главе	109
4	МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ	111
4.1	Расчет текущей температуры перегрева силового оборудования электровоза.	112
4.2	Моделирование перегрева оборудования.	115
4.3	Экспериментальные исследования	119
4.4	Методика расчета текущей температуры перегрева силового оборудования	120
4.5	Выводы по главе	124
5	ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ СМАЗКИ	126
5.1	Опыт применения электропроводящей смазки	126
5.2	Перспективы применения электропроводящей смазки в современных условиях	128
5.3	Выводы по главе	130

6	ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВОЗА В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ РЕЖИМЕ	132
6.1	Программно-аппаратный симулятор	132
6.2	Тестовый расчет	134
6.3	Основные результаты компьютерного моделирования	138
6.4	Варианты подключения ТЭД и другого оборудования при работе в энергоэффективном режиме	143
6.5	Выводы по главе	147
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	148
	Список литературы	151
	Приложение 1	166
	Приложение 2	168

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В «Стратегии развития холдинга "РЖД" на период до 2030 года» и других нормативных документах сказано, что снижение удельного расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) относится к числу стратегических инициатив в локомотивном комплексе. Отмечено, что доля электроэнергии, затрачиваемой на тягу поездов, составляет около 90% от всей электрической энергии, потребляемой холдингом. Поэтому уровень эффективности использования электроэнергии на тягу оказывает ключевое влияние на величину затрат компании на закупку ТЭР, в силу чего предусматривается последовательное снижение удельного расхода электроэнергии на тягу: если уровень 2012 года принять за 100%, то к 2030 году он должен составить 94,1%.

В ответ на это требование, промышленность приступает к производству нового поколения электровозов. Выпущены первые грузовые электровозы 2(3)ЭС5С семейства «Атаман» с асинхронным тяговым приводом, которые позволили сократить затраты электроэнергии на тягу на 20%¹. Это обеспечено применением новых высокоэффективных алгоритмов управления тяговым приводом (дискретно-адаптивное управление – алгоритм ДАУ²), которые в режиме реального времени приводят число работающих тяговых электродвигателей (ТЭД) в соответствие с нагрузкой и тем самым поддерживают оптимальное значение КПД в любых условиях работы электровоза. По существу, такие алгоритмы являются элементами искусственного интеллекта в системе управления тяговыми единицами.

¹ Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог, 2020, № 1(49). – С. 10-13.

² Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян, Ю.А. Орлов, К.П. Солтус // Патент RU 2617857; приоритет от 15.09.2015 – Бюллетень № 13 – Опубликовано 28.04.2017.

Необходимо отметить, что алгоритмы ДАУ могут быть применены и на находящихся в эксплуатации двух-, трёх- и четырёх секционных грузовых электровозах 2(3,4)ЭС5К семейства «Ермак». В общей сложности, на путях ОАО «РЖД» работает около пяти тысяч секций, которые последовательно поступают на средний и капитальный заводской ремонт. В ходе ремонта, кроме восстановления основных эксплуатационных характеристик, представляется целесообразным провести модернизацию, направленную на повышение энергетической эффективности, что обеспечит сокращение удельного расхода электроэнергии в соответствии с показателями, предусмотренными долгосрочными программами развития ОАО «РЖД».

Грузовые электровозы семейства «Ермак» оснащены коллекторными тяговыми двигателями, что обуславливает ряд дополнительных требований при реализации алгоритма ДАУ. Для выполнения этих требований необходимо в ходе инновационной модернизации: 1) внести ряд изменений в программное обеспечение системы управления электровоза; 2) принять меры по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла тех ТЭД, которые временно выводятся из тяги; и 3) применить регулируемый вспомогательный привод. Эти условия могут быть выполнены при заводском ремонте с минимальными финансовыми и материальными издержками.

В настоящей работе, обозначенные проблемы решались в комплексе, что позволило получить мультипликативный эффект и сформулировать актуальные практически значимые предложения. В дальнейшем, при получении положительных итогов испытаний модернизированных локомотивов, можно будет распространить предлагаемую программу модернизации на весь парк электровозов семейства «Ермак», поступающих на заводской ремонт на предприятиях АО «Желдорремаш».

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью настоящей диссертации является разработка комплекса научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности, в результате чего будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать возможность повышения энергоэффективности многодвигательного тягового привода путем отключения/подключения коллекторных ТЭД в зависимости от нагрузки.

2. Сформулировать и обосновать требования, которые должны быть соблюдены при реализации алгоритма ДАУ на электровозах с коллекторными ТЭД.

3. Изучить изменение энергетической эффективности основных элементов тяговой системы электровоза (трансформатор, преобразователь, сглаживающий реактор, ТЭД и др.) в зависимости от нагрузки.

4. Разработать методологию получения аналитического описания электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь, записать баланс мощностей. Построить компьютерную модель процессов в пакете SimInTech.

5. Получить зависимость коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента использования мощности (КИМ) тягового электродвигателя от потребляемой им мощности.

6. Изучить степень использования установленной мощности грузовых электровозов в реальных условиях эксплуатации на Северо-Кавказской ж.д.

Дать оценку энергопотребления при ведении груженых и порожних поездов при работе электровоза в штатном и энергоэффективном режимах.

7. Выполнить моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции. Этот вопрос изучить применительно к условиям работы ТЭД в энергоэффективном режиме.

8. Рассмотреть вопрос обеспечения надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла ТЭД при работе в энергоэффективном режиме за счет применения электропроводящей смазки.

9. Путем применения методов программно-аппаратного моделирования, исследовать варианты подключения ТЭД и другого силового и вспомогательного оборудования при работе электровоза в энергоэффективном режиме.

Объектом исследования являются грузовые электровозы переменного тока 2(3, 4)ЭС5К семейства «Ермак», имеющие коллекторные тяговые двигатели с плавным регулированием напряжения.

Предметом исследования является изучение возможностей повышения энергетической эффективности грузовых электровозов переменного тока 2(3, 4)ЭС5К семейства «Ермак» в режиме тяги.

Степень разработанности темы диссертации. Исследования по фундаментальной проблеме энергосбережения на железнодорожном транспорте, в том числе в области электрической тяги, проводятся научными коллективами отраслевых НИИ и ВУЗов. Значительный вклад в решение названной проблемы внесли такие ученые и специалисты как В.Д. Авилов, А.Е. Алексеев, Б.А. Аржанников, А.А. Бакланов, В.А. Гапанович, А.В. Грищенко, А.М. Евстафьев, А.В. Клименко, А.Б. Косарев, А.С. Космодемьянский, В.А. Кучумов, Л.А. Мугинштейн, В.В. Никитин, О.Е. Пудовиков, Е.Н. Школьников, С.Г. Шантаренко, В.П. Янов и другие.

Вопрос неполного использования доступной мощности локомотива при легком профиле пути и небольшой скорости движения, для неполновесных и порожних составов, неоднократно поднимался в связи с грузовыми перевозками. Тяговый привод локомотива является многодвигательным, и для реализации тягового усилия в текущий момент времени целесообразно использовать минимально достаточное число двигателей. Различные аспекты рассмотрели А.А. Андриющенко, В.М. Бабич, Г.К. Гетьман, А.А. Зарифьян, А.В. Заручейский, А.С. Курбасов, А.Н. Крыгин, Р.В. Мурзин, О.А. Некрасов, Н.Б. Никифорова, Ю.А. Орлов, А.В. Плаксин, А.Е. Пыров, В.А. Сенаторов и др.

По регулируемой вентиляции силового электрооборудования, имеют публикации В.А. Завалко, В.В. Михайлов, В.Н. Михайловский, А.И. Орленко, В.Н. Памалюк, Н.А. Платов, И.В. Скогорев, В.Е. Чернохлебов и др.

По вопросу повышения надежности коллекторно-щеточного узла с учетом условий эксплуатации, и в частности, использования электропроводящей смазки, отметим публикации таких авторов как Ю.А. Евдокимов, О.С. Качин, В.И. Колесников, В.В. Кончиц, В.М. Коротков, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин, В.А. Соломин, В.В. Харламов и др.

Методы программно-аппаратного моделирования (ПАМ) применительно к исследованию задач управления электротехническими комплексами рассматривали Б.А. Авдеев, А.В. Вынгра, А.М. Зюзев, А.М. Костыгов, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров, А.Н. Никонов и др.

Однако, в вышеуказанных работах недостаточно полно, в свете растущих требований к локомотивостроению, рассмотрена проблема энергетической эффективности. Именно раскрытие комплексной функциональной связанности разрабатываемых мер по обеспечению надежной работы коллекторно-щеточного узла, регулируемого вспомогательного привода и программного обеспечения системы управления локомотивом открывает перспективу повы-

шения энергоэффективности большинства находящихся в эксплуатации электровозов, что является главным предметом в данной диссертации.

Теоретическая значимость и научная новизна диссертационной работы заключаются:

1. В результатах исследования процессов в важнейших элементах тяговой системы электровоза (трансформатор, выпрямительно-инверторный преобразователь, сглаживающий реактор, ТЭД) и в полученных закономерностях изменения энергетической эффективности этих элементов при работе в различных режимах, что позволило создать основу для применения алгоритма дискретно-адаптивного управления (ДАУ).

2. В построении компьютерной модели электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь, созданной в программном пакете *SiminTech*. Достоверность результатов моделирования подтверждена путем сопоставления с данными квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е.

3. В установлении закономерностей изменения КИМ и КПД двигателя, которые представлены в виде зависимостей КИМ и КПД от мощности, потребляемой двигателем, что значительно облегчает реализацию алгоритма ДАУ при модернизации электровозов, так как не требует установки дополнительных датчиков.

4. В создании программно-аппаратного симулятора, предназначенного для имитационного моделирования процессов управления многодвигательным тяговым приводом электровоза, с помощью которого исследованы варианты подключения ТЭД и другого оборудования при работе в энергоэффективном режиме.

5. В разработке методологии применения электропроводящей смазки щёток (подана заявка на изобретение), что позволяет, в рамках модернизации, увеличить ресурс и избежать повреждений коллекторных ТЭД, и тем самым обес-

печить успешное применение алгоритма ДАУ на электровозах семейства «Ермак».

Практическая ценность заключается в получении значительного экономического эффекта за счет сокращения потребления электроэнергии на тягу. Показано, что степень использования установленной мощности грузовых электровозов на линии Лихая – Крымская (профиль I-II и III типа) является неудовлетворительной: в штатном режиме работы тягового электропривода она составляет, в среднем, $\gamma_{\text{ср}} = 0,22$ для поездов массой 6300 т, и $\gamma_{\text{ср}} = 0,12$ – для поездов массой 1750 т. За счет применения алгоритма ДАУ, расчетным путем доказана возможность существенного повышения энергетической эффективности электровозов. Оценка экономической эффективности составляет 4,78 млн. руб. на один электровоз (180 оборотов локомотива в год, при уровне цен 5 руб/кВт·ч). Результаты диссертации реализованы в виде рекомендаций по проведению модернизации электровозов «Ермак» в ходе заводского ремонта.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач применены методы следующих научных дисциплин: теории электрических цепей (дифференциально-алгебраические уравнения процессов в силовой цепи); динамики твердого тела (дифференциальное уравнение вращательного движения якоря ТЭД); статистической обработки больших массивов экспериментальных данных (оценка энергопотребления грузовых электровозов в условиях эксплуатации); моделирования теплового режима ТЭД (при рассмотрении работы регулируемой вентиляции); трибологии (обоснование целесообразности применения электропроводящей смазки в КЩУ); программно-аппаратного моделирования для исследования работы ТЭД в штатном и энергоэффективном режимах (на основе программного пакета SimInTech отечественной разработки).

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью формулировок поставленных задач, надежностью примененных теоретических

методов и специализированных программных пакетов, и подтверждается сопоставлением результатов, полученных путем компьютерного моделирования, с данными заводских квалификационных и стендовых испытаний. Различие по основным показателям энергоэффективности ТЭД находится в пределах долей процента, что свидетельствует об адекватности построенных компьютерных моделей и о достоверности результатов моделирования, и позволяет использовать их для оценки энергопотребления.

Положения, выносимые на защиту: 1) результаты аналитического исследования электромеханических процессов в основных элементах тяговой системы электровозов переменного тока (трансформатор, выпрямительно-инверторный преобразователь, сглаживающий реактор, коллекторный тяговый электродвигатель) с учетом потерь и полученные закономерности изменения показателей энергетической эффективности этих элементов при работе в различных режимах; 2) компьютерная модель электромеханических процессов в коллекторном тяговом электродвигателе с учетом потерь и результаты моделирования, достоверность которых подтверждена путем сопоставления с экспериментальными данными; 3) установление закономерности изменения КПД коллекторного тягового двигателя в зависимости от потребляемой мощности, чем создана основа для применения алгоритма дискретно-адаптивного управления (ДАУ) электровозами с коллекторными ТЭД; 4) разработка технологии применения электропроводящей смазки коллекторно-щёточного узла, что позволяет избежать повреждений коллекторных ТЭД при их отключении, что является главным препятствием для применения алгоритма ДАУ на электровозах с коллекторными ТЭД.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.9.3 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: **п. 1.** Эксплу-

атационные характеристики и параметры подвижного состава (...) Методы и средства снижения энергетических потерь (...); **п. 2.** Системы и технологии эксплуатации, технического обслуживания, ремонта подвижного состава (...); **п. 4.** Совершенствование подвижного состава (...) Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава (...).

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт-2020, 21 и 22) – Ростов н/Д, РГУПС; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2020»). – Ростов н/Д, РГУПС, 01-03 декабря 2020 г.; XIII International Scientific Conference «Transport Problems-2021» – Silesian University of Technology - Katowice (Poland), 28-30 июня 2021 г.; Международных научно-практических конференциях «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава». Ростов-на-Дону, РГУПС, 23-24 ноября 2021 г. и 22-23 ноября 2022 г.

Работа полностью доложена и обсуждена 9 июня 2023 г. на расширенном заседании кафедры «Тяговый подвижной состав» с приглашением специалистов других кафедр ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

Публикации. Основные положения опубликованы в 14 работах, из них 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и 1 статья в журнале, входящих в базу *Scopus*.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа общим объемом 170 страниц состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрифицированные железные дороги являются крупнейшим потребителем электроэнергии. Поэтому экономное ее использование на тягу поездов является важнейшей народнохозяйственной задачей [1.1]. Железнодорожный транспорт является – по сравнению с автомобильным и воздушным – наиболее энергетически эффективным видом транспорта. Вместе с тем, поскольку бóльшая часть энергии, потребляемой в грузовых и пассажирских железнодорожных перевозках, используется на тягу поездов, затраты на энергетические ресурсы являются основной частью расходов на железнодорожные перевозки (рисунок 1.1). По этой причине вопросы энергосбережения постоянно находятся в центре внимания руководства ОАО «РЖД».

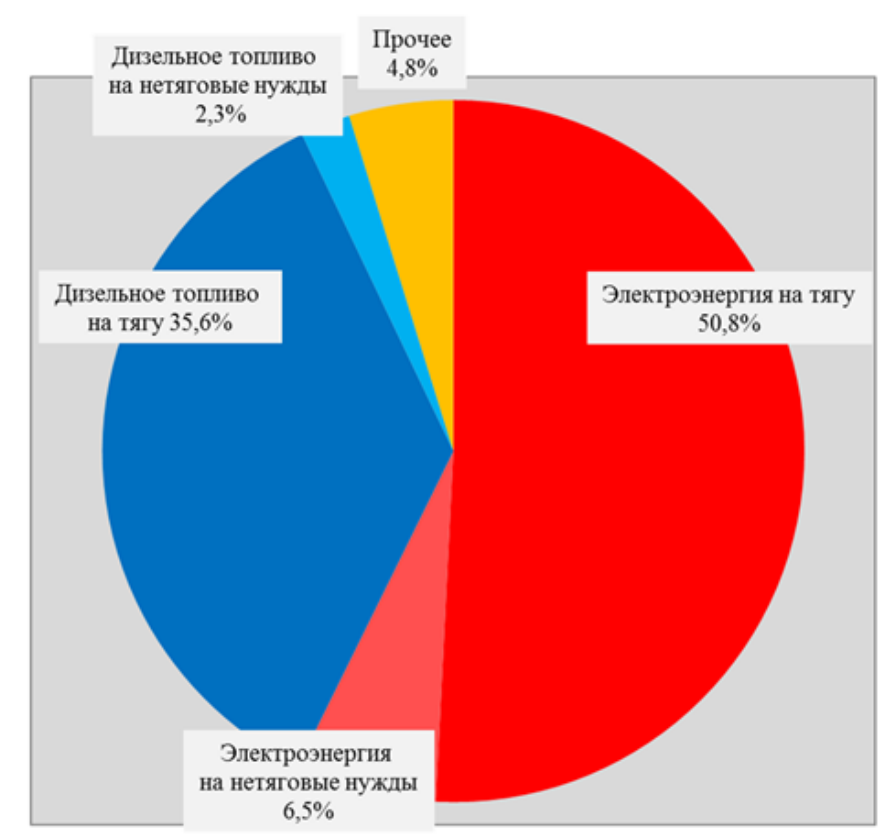


Рисунок 1.1 – Структура потребления топливно-энергетических ресурсов ОАО «РЖД» (источник <https://ar2020.rzd.ru/ru/annexes>)

Проблема недоиспользования доступной мощности локомотивов при легком профиле пути и небольшой скорости движения, для неполновесных и порожних составов, неоднократно поднималась в связи с грузовыми перевозками, поскольку многие участки железных дорог характерны неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях.

В настоящей главе выполнен анализ публикаций в отраслевой технической литературе по проблеме повышения энергетической эффективности локомотивов за счет изменения числа работающих тяговых электродвигателей в зависимости от нагрузки. В связи с этим, изучено использование доступной мощности грузовых электровозов в реальных условиях эксплуатации. Рассмотрены вопросы конструкции тяговой системы электровоза «Ермак» и варианты её модернизации с целью повышения энергоэффективности.

В заключение, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

1.1 Обзор публикаций по вопросу экономии электроэнергии на тягу за счет отключения части двигателей

Поскольку магистральные электровозы имеют многодвигательный тяговый привод, идея экономии электроэнергии на тягу поездов за счет частичного отключения тяговых двигателей, т. е. за счет регулирования величины используемой части установленной мощности, регулярно обсуждается в технической литературе, начиная с 50-х – 60-х годов XX века. Причина заключается в том, что при работе тягового привода электровоза с частичной нагрузкой его КПД значительно снижается.

По этому поводу аргументировались и высказывались самые разные и зачастую взаимоисключающие точки зрения [1.2 – 1.40] и др.

В настоящем разделе представлен аналитический обзор состояния указанного вопроса и сформулированы предложения о возможности применения этой технологии на современных грузовых электровозах переменного тока с коллекторным тяговым электроприводом.

В [1.3] отмечается, что при работе с частичной нагрузкой, за счёт выключения части тяговых двигателей (отключением одного электровоза при двойной тяге) можно увеличить загрузку остальных двигателей, тем самым повысить КПД электровоза и снизить общий расход энергии.

Работа по осуществлению этого метода выполнялась в локомотивном депо Пермь II на электровозах ВЛ22М с 1955 г., где эти электровозы работали двойной тягой по системе многих единиц (рисунок 1.2). Электровоз ВЛ22М выпускался с 1947 по 1958 гг., его электрическая схема предусматривала контактно-реостатное регулирование напряжения на ТЭД.

Аналогичное предложение по отключению одной секции электровоза ВЛ8 (выпуск с 1955 по 1967 годы, рисунок 1.3) было реализовано в депо Инская Западно-Сибирской дороги. Электрическая схема реализует контактно-реостатное регулирование напряжения.

Было проведено исследование для определения эффекта отключения части тяговых двигателей (одной секции) и установления, при каких условиях оно целесообразно. Показано, что отключение части тяговых двигателей при соответствующей скорости движения, весе поезда и уклоне пути дает определенное уменьшение расхода энергии.

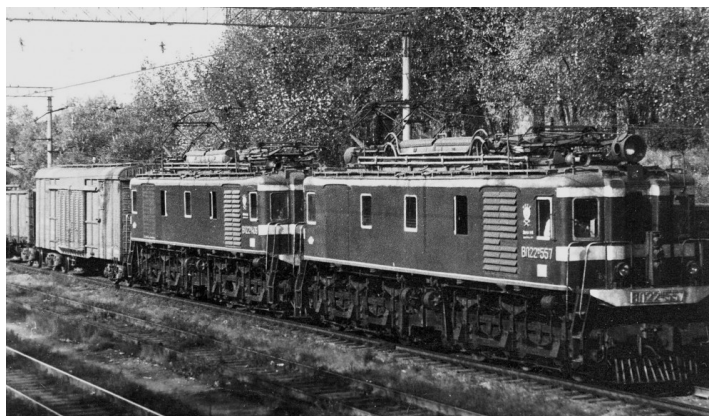


Рисунок 1.2 – Электровоз постоянного тока ВЛ22М при работе двойной тягой (осевая формула $3o + 3o + 3o + 3o$)



Рисунок 1.3 – Электровоз постоянного тока ВЛ8 (осевая формула $2_0+2_0+2_0+2_0$)

Большой интерес представляет работа [1.4]. Здесь отмечено, что когда на Юго-Восточной дороге шестиосные электровозы ВЛ60к (выпуск 1957 – 67 гг., рисунок 1.4) были заменены более мощными восьмиосными локомотивами ВЛ80к (выпуск 1963 – 1971 гг., рисунок 1.5), то оказалось, что удельный расход электрической энергии на тягу поездов возрос.

Опытные поездки с динамометрическим вагоном показали, что на участках, имеющих легкий профиль пути, мощность восьмиосного электровоза используется не полностью. В связи с этим, встал вопрос: как добиться снижения затрат энергии? Наибольший эффект дал метод частичного отключения тяговых двигателей. Ведя легкий поезд на легком профиле пути, машинист отключает часть тяговых двигателей с тем, чтобы за счет повышения КПД оставшихся в работе двигателей и отключения четырех вентиляторов охлаждения выпрямительных установок добиться экономии электрической энергии, затрачиваемой на ведение поезда с заданной скоростью. Полученные данные дают возможность полагать, что при идеальных условиях, применяя способ отключения, можно добиться снижения расхода энергии с легкими поездами в летний период на 7...8%.



Рисунок 1.4 – Электровоз переменного тока ВЛ60к (осевая формула 3о – 3о)



Рисунок 1.5 – Электровоз переменного тока ВЛ80к (осевая формула 2(2о – 2о))

Однако из-за опасения, что пыль может попасть в коллекторные камеры, на кронштейны щеткодержателей, а также для лучшего охлаждения изоляции двигателей, мотор-вентиляторы обдува выключенных ТЭД отключать запрещено. Кроме того, в силовую цепь тяговых двигателей вместо отключателей ножевого типа следует ставить линейные электропневматические контакторы. Указано также, что в перспективе можно автоматизировать процесс поддержания наивысшего КПД электровоза в зависимости от тока и скорости.

В [1.5] приводятся практические рекомендации о методах получения максимально возможной экономии электроэнергии при отключении нескольких двигателей без нарушения режима работы оставшихся. При любом весе состава на легких участках пути электровоз работает в режимах пониженного к. п. д., перерасходуя энергию. Чтобы избежать этого, целесообразно в таких случаях отключать одну или две пары тяговых двигателей.

В критической публикации [1.8] вполне справедливо отмечены слабые места предложений по отключению-подключению коллекторных ТЭД:

- при отсутствии тока и вращении якоря коллектор быстро теряет защитный слой (политуру), увеличивается коэффициент трения и тепловые потери, начинает гореть изоляция; именно по этой причине у локомотивов, перегоняемых на длинные расстояния, рекомендуется снимать щетки;

- нельзя выключать мотор-вентиляторы, охлаждающие длительно отключенные двигатели, поскольку резко возрастает до опасных величин температура на коллекторах этих двигателей из-за высокого коэффициента трения щеток о поверхность коллектора, тем более, что на некоторых электровозах система вентиляции тяговых двигателем связана с охлаждением другого оборудования. В корпусах отключенных ТЭД должно поддерживаться избыточное давление, чтобы туда не попадали пыль, влага и т.п.

В работе [1.31] отмечено, что предложения по снижению расхода электроэнергии на тягу за счет отключения части тяговых двигателей электровоза при ведении легковесных поездов поступают достаточно часто, например, при обсуждении вопросов модернизации электровозов при ремонте с продлением срока их службы. Далее изложены данные оригинальных испытаний на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ, проведенных в 1979 г.

Опытные поездки электровоза ВЛ10 (выпуск 1963 – 1971 гг., рисунок 1.6) с восемью и четырьмя включенными двигателями систематически чередовали и проводили на режимах, близких по скорости движения. Поездки проводили с составами из 4-осных груженых вагонов с роликовыми под-

шипниками и осевой нагрузкой 21 т. Вес составов в четырех поездках был 1488 т, в четырех поездках 3084 т, и в одной 4596 т.



Рисунок 1.6 – Электровоз постоянного тока ВЛ10 (осевая формула 2(2о – 2о))

Отмечено, что отключать вентиляцию неработающих ТЭД нельзя, поскольку известно, что отсутствие напора воздуха может привести к попаданию в двигатель пыли, влаги и снега с увлажнением изоляции, а иногда также приводит к затеканию масла из подшипников и скоплению его в смеси с пылью, в том числе угольной от щеток, на деталях коллекторно-щеточного узла. Кроме того, при работе двигателей на холостом ходу без вентиляции возрастают потери от трения щеток, что приводит к повышенному их износу, разогреву коллектора и заволакиванию у него меди. Полное отключение секции электровоза возможно, если обеспечен надежный контроль за исключением попадания влаги и пыли в двигатели, а депо готово нести дополнительные расходы на увеличение объема работ при техобслуживании двигателей (то есть устранение заволакивания меди, запыления и загрязнения коллекторно-щеточного узла, устранение дополнительных повреждений от загрязнения и увлажнения изоляции обмоток ТЭД и т. д.). По итогам испытаний на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ, экономия энергии на тягу составила 1,6% при скорости, близкой к 100 км/ч. При опытных поездках на Западно-

Сибирской ж.д., выполненных в 1983...84 гг., заметной экономии электроэнергии зарегистрировано не было.

В заключение отмечено, что изложенная проблема – технико-экономическая и может быть решена только после опытной эксплуатации на линии соответственно оборудованных электровозов.

А.Е. Пыровым была предложена система оперативного регулирования мощности локомотива (ОРМЛ), направленная на оптимизацию режима ведения поездов, масса и скорость движения которых меняется в широких пределах [1.10]. Регулирование применялось главным образом на пассажирских электровозах постоянного тока ЧС7 и на грузовых электровозах переменного тока ВЛ80С, работающих по системе многих единиц. Мощность регулировалась машинистом вручную в зависимости от режима работы за счет оперативного отключения/подключения тяговых двигателей по группам при помощи специальной аппаратуры (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Аппаратура ОРМЛ

Аппаратура ОРМЛ-2М была разработана для электровозов постоянного тока, ОРМЛ-4 – для электровозов переменного тока. За период 2001-2004 гг. на железных дорогах было внедрено 978 единиц ОРМЛ-2М и 518 единиц ОРМЛ-4. По данным Южно-Уральской ж.д., приведенным в [1.10], экономия электроэнергии на тягу поезда составила в среднем не менее 8%.

Однако, в ходе эксплуатации локомотивов с ОРМЛ начались массовые выходы коллекторных ТЭД из строя в силу причин, отмеченных в [1.8]. Аппаратура ОРМЛ была демонтирована, а идея экономии электроэнергии путем

отключения-подключения ТЭД в зависимости от нагрузки понесла большие репутационные потери. Доказательством чего служит тот факт, что в [1.1] нет об этом никакого упоминания.

В работе [1.32] отмечается, что на железных дорогах нашей страны существует резкая неравномерность перевозок. Ранее, при уменьшении объема перевозок часть электровозов отставлялась в запас. Сейчас очень дорогие электровозы нового поколения, построенные при участии зарубежных фирм, реально отставить в запас невозможно, и они эксплуатируются с уменьшенными суточными пробегами и уменьшенными массами поездов.

До недавних пор в нашей стране у вновь выпускаемых электровозов ставилась задача съема максимально возможной мощности с колеса. Между тем, даже в благоприятные периоды, максимально загруженные поезда составляли всего лишь порядка 40–50%. Ставилась задача – любой электровоз обеспечивает тягой состав произвольной массы в заданных пределах. Задача подбора электровоза к составу без увеличения количества электровозов в настоящих условиях может ставиться только при применении специализированных систем управления обеспечением тяги.

Учитывая, что основную долю в годовых эксплуатационных затратах грузовых электровозов составляют затраты на электроэнергию, одним из основных направлений совершенствования грузовых электровозов было и остается снижение удельного расхода электроэнергии и, в частности, при вождении неполновесных поездов. Из известных технических решений следует отметить отключение секций электровозов или некоторой части тяговых двигателей на электровозе. Эти подходы были исследованы ранее, однако в силу ограниченных возможностей регулирования ТЭД не удавалось достичь приемлемых результатов. Современные электровозы с управляемыми преобразователями позволяют вновь вернуться к этому вопросу.

Создание современных электровозов, в том числе с асинхронным тяговым приводом и широкими возможностями регулирования тягового привода,

микропроцессорными системами управления, требует актуализации ранее применявшихся подходов, ранжирования их по степени влияния на конечный результат – повышение эффективности эксплуатации электровоза. Поскольку тяговый привод локомотива является многодвигательным, для реализации необходимого тягового усилия нужно использовать минимально достаточное число двигателей, отключая избыточные.

В работе [1.33] отмечено, что недоиспользование установленной мощности электрооборудования многоосных и многосекционных электровозов ведет к снижению их эксплуатационного КПД, и следовательно, к росту удельного энергопотребления на тягу поездов.

Причины этого связаны, прежде всего, с недоиспользованием многосекционных электровозов по мощности при вождении неполновесных составов, особенно при движении на легких элементах профиля пути. Из анализа экспериментальных данных следует, что посекционное регулирование трехсекционного электровоза ВЛ80С и регулирование мотор-вентиляторов кузовного электрооборудования обеспечивают снижение энергозатрат: при вождении угольных маршрутов массой 6000 т, на отдельных перегонах до 7%, а в целом на тяговом плече Экибастуз-Целиноград около 1,5-2,5%; при вождении порожних составов массой 1300-1600 т, на отдельных перегонах до 9%, а в целом по участку около 7-8%.

В работе [1.34] указано, что ряд участков железных дорог Сибири и Забайкалья характерны неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях, особенно в местах зарождения грузов с энергетическим сырьем. Анализ профиля пути и нагрузок электровозов на этих участках показывает, что лишь 4-5% продолжительности тягового режима реализуется с мощностью, близкой к номинальной, 70-75% – с нагрузками 0,5...0,8 номинальной, остальное время использование сил тяги и мощности локомотивов не превышает 0,5 номинальных значений. Таким образом, все возрастающая мощность современных локомотивов усиливает проблему ее полной реали-

зации в эксплуатации, а, следовательно, и повышение эксплуатационного КПД электровозной тяги. Диапазон изменения КПД в режиме тяги охватывает значения от 0,3 до 0,86. Установлено, что повышение энергетической эффективности электровозов возможно, если применять частичное отключение тяговых тележек, секций электровозов или их сцепов в периоды работы с явным недоиспользованием их по силе тяги и мощности, реализацией оптимального числа движущих осей. Экономия составляет до 4...5%.

В [1.35] отмечено, что высокий КПД тяговых двигателей находится в узком диапазоне токовых нагрузок, близких к номинальным, и его реализация возможна только при большой массе состава и трудном профиле пути. Именно на такие условия работы рассчитаны все эксплуатируемые грузовые электровозы. При вождении легких поездов, доля которых на отдельных участках может быть 50% и более, особенно на равнинном профиле пути, мощность электровоза недоиспользуется. В этом случае КПД тяговых двигателей и электровоза в целом получается невысоким, а удельный расход электроэнергии большой.

Аналогичная точка зрения высказана в [1.36]. Указывается, что необходимо наметить и обосновать мероприятия, сводящиеся к улучшению использования электровозов в реальной ситуации, когда тяговое электрооборудование основную долю времени работает в режимах малой нагрузки. К таким мероприятиям можно отнести изменение числа работающих тяговых двигателей или секций в зависимости от массы поезда и профиля пути.

В работах омской школы [1.7, 1.14 - 1.23] рассмотрены различные аспекты работы тягового электропривода при отключении / подключении ТЭД. По материалам этих публикаций нами был построен график, показывающий зависимость КПД электровоза 1,5ВЛ80С, близкого по своим тяговым характеристикам к электровозу 3ЭС5К семейства «Ермак», от коэффициента использования мощности (КИМ) при работе на различных позициях КМЭ (рисунк 1.8).

Напряжение на ТЭД при различных позициях КМЭ таково:

$1 - 58 \text{ В}; \quad 5 - 203 \text{ В}; \quad 9 - 348 \text{ В}; \quad 13 - 493 \text{ В}; \quad 17 - 638 \text{ В};$
 $21 - 783 \text{ В}; \quad 25 - 928 \text{ В}; \quad 29 - 1073 \text{ В}; \quad 33 - 1218 \text{ В}.$

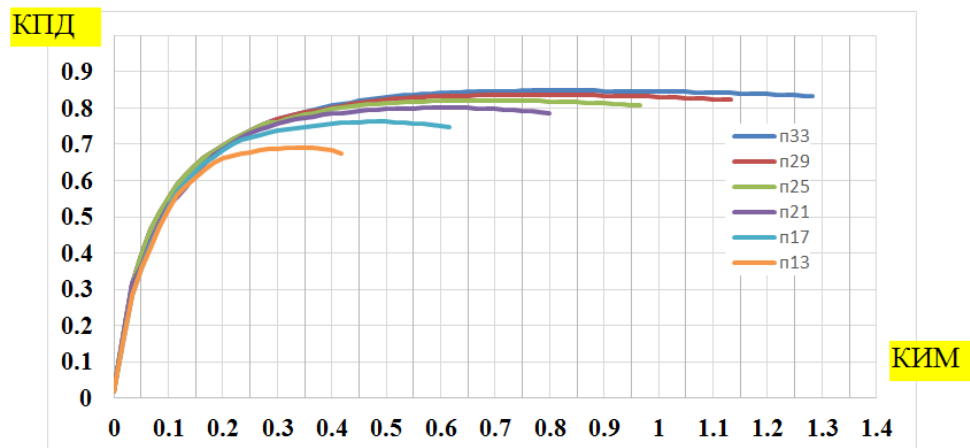


Рисунок 1.8 – Зависимость КПД электровоза ВЛ80С от КИМ при работе на различных позициях КМЭ

Сопоставление напряжения на ТЭД при работе электровоза «Ермак» в различных зонах (плавное регулирование) и при работе электровоза ВЛ80С на различных позициях КМ (ступенчатое регулирование) приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Напряжение на ТЭД

Зоны регулирования (напряжение на входе ВИП)	Среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{сред}}$ на ТЭД	Соответствие позициям КМ электровоза ВЛ80С
1: (0 ... 350 В)	0 ... 315 В	$1 - 5 - 9$ (58 ... 348 В)
2: (350 ... 700 В)	315 ... 630 В	$9 - 13 - 17$ (348 ... 638 В)
3: (700 ... 1050 В)	630 ... 945 В	$17 - 21 - 25$ (638 ... 928 В)
4: (1050 ... 1400 В)	945 ... 1260 В	$25 - 29 - 33$ (928 ... 1218 В)

В [1.37 - 1.38] указано, что расход электроэнергии на тягу зависит от большого числа эксплуатационных показателей, в том числе и от степени использования мощности. В связи с тем, что российские железные дороги характеризуются ярко выраженной неравномерностью участков пути, где наряду с холмисто-горным и горным профилем имеются и равнинные перегоны

большой протяженности, электровозы при эксплуатации на разных по сложности участках пути имеют различную нагрузку, а следовательно, эксплуатируются и с разными энергетическими показателями. Дана оценка энергетических показателей электровозов при вождении пассажирских поездов на равнинных участках пути и рассмотрены возможные пути повышения их энергетической эффективности.

Проведен анализ работы пассажирских электровозов ЭП2К (рисунок 1.9, выпуск с 2008 г.) на равнинном участке Новосибирск – Омск Западно-Сибирской ж.д., определены средние значения скоростей движения и масс пассажирских поездов, для которых были рассчитаны мощность, коэффициент использования мощности и оценка экономичности работы электровозов.



Рисунок 1.9 – Электровоз постоянного тока ЭП2К (осевая формула 3о – 3о)

На основании проведенного исследования показано, что электровозы ЭП2К на равнинных участках железных дорог большой протяженности работают в неэкономичных режимах из-за их избыточной мощности, которую невозможно реализовать. В связи с этим, был сделан вывод о резервах экономии электроэнергии на тех участках железных дорог, где по условиям эксплуатации наблюдается явное недоиспользование мощности электровозов. Предложен способ повышения эффективности их использования за счет

применения ступенчатого регулирования мощности и произведена сравнительная оценка работы электровозов ЭП2К на всех и на части тяговых двигателях.

Получена зависимость степени использования КПД электровоза $C_{\text{КПД}}$ от коэффициента использования мощности K_p (рисунок 1.10), видим, что $C_{\text{КПД}}$ достигает максимума при $K_p = 70\%$.

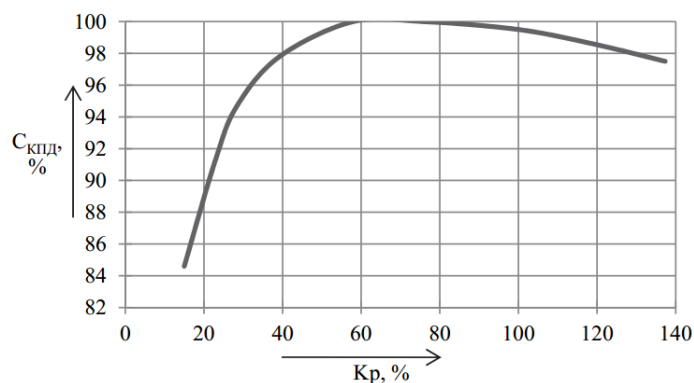


Рисунок 1.10 – Универсальная характеристика зависимости степени использования КПД электровоза от коэффициента использования мощности

Сделан вывод о том, что имеются резервы повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов на равнинных участках пути большой протяженности, такие как эксплуатация электроподвижного состава с рациональными значениями мощности и числа осей, соответствующих массе поезда, скорости движения и профилю пути, которые позволят значительно снизить расходы электроэнергии на тягу поездов.

В [1.39] отмечено, что задачу по повышению энергетической эффективности работы 8-осных пассажирских электровозов ЧС7 (выпуск 1983 - 1997 гг., рисунок 1.11) представляется возможным решить посредством отключения части тяговых электродвигателей и поддержания необходимой скорости движения согласно графику остающимися в режиме тяги электродвигателями, благодаря чему существенно сокращается расход электроэнергии на тягу поездов.



Рисунок 1.11 – Электровоз постоянного тока ЧС7 (осевая формула 2(2о-2о))

Предложенный метод актуален при вождении электровозами серии ЧС7 поездов, масса которых в несколько раз ниже установленных для определенных участков норм, а также для скоростных поездов, имеющих на своем пути следования минимальное количество остановок или не имеющих их вообще. Следует отметить, что трогание поезда с места и разгон до максимальной скорости движения производится на «полной схеме» — с участием в режиме разгона всех восьми тяговых электродвигателей, после чего в зависимости от массы поезда и графика движения в работе остаются от четырех до шести тяговых электродвигателей. Разработан вариант модернизации силовой схемы электровоза при отключении двух тяговых электродвигателей.

Обобщая вышесказанное, отметим следующие ключевые моменты:

- недостатки, отмеченные в критических публикациях, относятся исключительно к электровозам с коллекторными ТЭД;
- на локомотиве должна быть применена система поосного регулирования силы тяги;
- идея автоматизации процесса поддержания наивысшего КПД является весьма перспективной. Для её реализации необходимо выбрать критерий, по которому будет производиться выбор числа отключаемых ТЭД;
- режим работы мотор-вентиляторов должен быть управляемым.

В [1.40] отмечено, что при применении бесколлекторного тягового привода актуальным становится вопрос об обеспечении нагрузки тягового оборудования, близкой к номинальной (регулирование числа работающих тяговых двигателей в зависимости от загрузки электровоза, в том числе и на разных участках пути).

Ключом к энергосбережению является приведение любой энергоустановки в соответствие с номинальными параметрами по нагрузке, ориентированными на максимальный уровень КПД [1.1]. Сказанное в наибольшей степени относится к локомотивам нового поколения, оснащенным бесколлекторными (в частности, асинхронными) тяговыми двигателями, единичная мощность которых в полтора и более раз превышает мощность коллекторных двигателей. За счёт перехода на асинхронный тяговый привод и применения интеллектуальных систем управления и энергосберегающего тягового оборудования, предусматривается обеспечить уменьшение удельного расхода электроэнергии электровозами на 5... 10%.

В заключение настоящего параграфа отметим, что алгоритм дискретно-адаптивного управления энергетической эффективностью локомотива (далее по тексту ДАУ) при работе с неполной нагрузкой был предложен в патенте [1.26], в состав авторского коллектива входит Ю.А. Орлов, генеральный директор ООО "ТМХ Инжиниринг". Этот алгоритм впервые был реализован на электровозах 2(3)ЭС5С с асинхронным тяговым приводом. По итогам испытаний, сокращение удельного расхода электроэнергии на тягу составило до 20% [1.27]. Таким образом, высокая эффективность идеи отключения-подключения ТЭД «в чистом виде» подтверждена практикой. Следовательно, за счет применения адаптивного отключения-подключения тяговых двигателей в зависимости от нагрузки, имеется возможность более полного использования доступной мощности электровоза и существенного сокращения расхода электроэнергии.

По своей сути, алгоритм дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым электроприводом (в качестве критерия выбран коэффициент использования мощности) представляет собой ключевой элемент системы искусственного интеллекта, обеспечивающей значительное сокращение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов.

Применительно к грузовым электровозам семейства «Ермак» 2(3)ЭС5К, поступающим на заводской ремонт, целесообразно выполнить следующее:

- поскольку электровозы семейства «Ермак» оснащены коллекторными тяговыми двигателями, необходимо предусмотреть меры, направленные на предотвращение повреждения коллекторно-щеточного узла на время выведения ТЭД из режима тяги (применение электропроводящей смазки [1.29]);

- при работе в дискретно-адаптивном режиме, часть двигателей будет на некоторое время отключаться. Поэтому целесообразно на это время переводить мотор-вентиляторы на пониженную частоту вращения, что даст дополнительную экономию энергии [1.30];

- разработать дополнительное программное обеспечение, которое реализует алгоритм дискретно-адаптивного управления многодвигательным тяговым приводом [1.28] с учетом специфики коллекторных тяговых электродвигателей (такие ТЭД нельзя выводить из тяги на время более 15...20 минут).

В заключение настоящего параграфа отметим, что ни в отечественном [1.1], ни в американском [1.41], ни в китайском [1.42] обзорах по вопросам энергосбережения на железнодорожном транспорте даже не упоминается подход, основанный на изменении числа тяговых осей в зависимости от нагрузки.

1.2 Тяговая система электровоза «Ермак» и варианты её модернизации

Грузовые электровозы 2(3,4)ЭС5К семейства «Ермак» [1.43, 1.44] выпускаются предприятием ПК «НЭВЗ» с 2004 года (рисунок 1.12). Срок службы составляет не менее 40 лет. Накоплен значительный опыт эксплуатации, который показывает необходимость модернизации тяговой системы данных электровозов с целью повышения их тягово-энергетических показателей, что может быть выполнено при заводском ремонте.



Рисунок 1.12 – Электровоз 4ЭС5К

Сведения о выпуске грузовых электровозов семейства «Ермак» за 2004 – 2021 гг. приведен в таблице 1.2.

В общей сложности за 2004-21 гг. произведено 4968 четырехосных секций. Из приведенных в таблице 1.2 данных видно, что к концу 2021 года находятся в эксплуатации сроком 10 лет и более:

- 164 электровоза 2ЭС5К (328 секций),
- 259 электровозов 3ЭС5К (777 секций).

Эти электровозы будут поступать на средний (пробег свыше 800 тыс. км) и капитальный (пробег свыше 2400 тыс. км) заводской ремонт. В ходе ремонта, кроме восстановления основных эксплуатационных характеристик,

исправности и срока службы электровоза, представляется целесообразным провести модернизацию, направленную на повышение энергетической эффективности, что обеспечит сокращение удельного расхода электроэнергии в соответствии с показателями, предусмотренными Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД».

Таблица 1.2 – Выпуск грузовых электровозов семейства «Ермак»

Год Тип	2004- 2005	2006	2007	2008	2009	2010	Всего за 2004- 10 гг.	секций
2ЭС5К	2	41	20	67	17	5	152	304
3ЭС5К	-	-	22	24	51	74	171	513

Год Тип	2011	2012	2013	2014	2015	Всего за 2011- 15 гг.	секций
2ЭС5К	11	-	41	17	-	69	138
3ЭС5К	88	107	128	155	113	591	1773
4ЭС5К	-	-	-	3	-	3	12

Год Тип	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Всего за 2016- 21 гг.	секций
2ЭС5К	22	49	121	84	15	11	302	604
3ЭС5К	70	45	46	96	137	133	527	1581
4ЭС5К	-	5	10	4	15	5	39	43

1.2.1 Силовая электрическая схема

Перейдем к рассмотрению силовой схемы секций электровоза при полетележном регулировании силы тяги. Тяговый трансформатор (ТТ) питает два выпрямительно-инверторных устройства (ВИУ). Каждый ВИУ, в свою очередь, через сглаживающие реакторы (РС) питает два тяговых электродвигателя (ТЭД), что показано на схемах силовых цепей (рисунки 1.13 и 1.14).

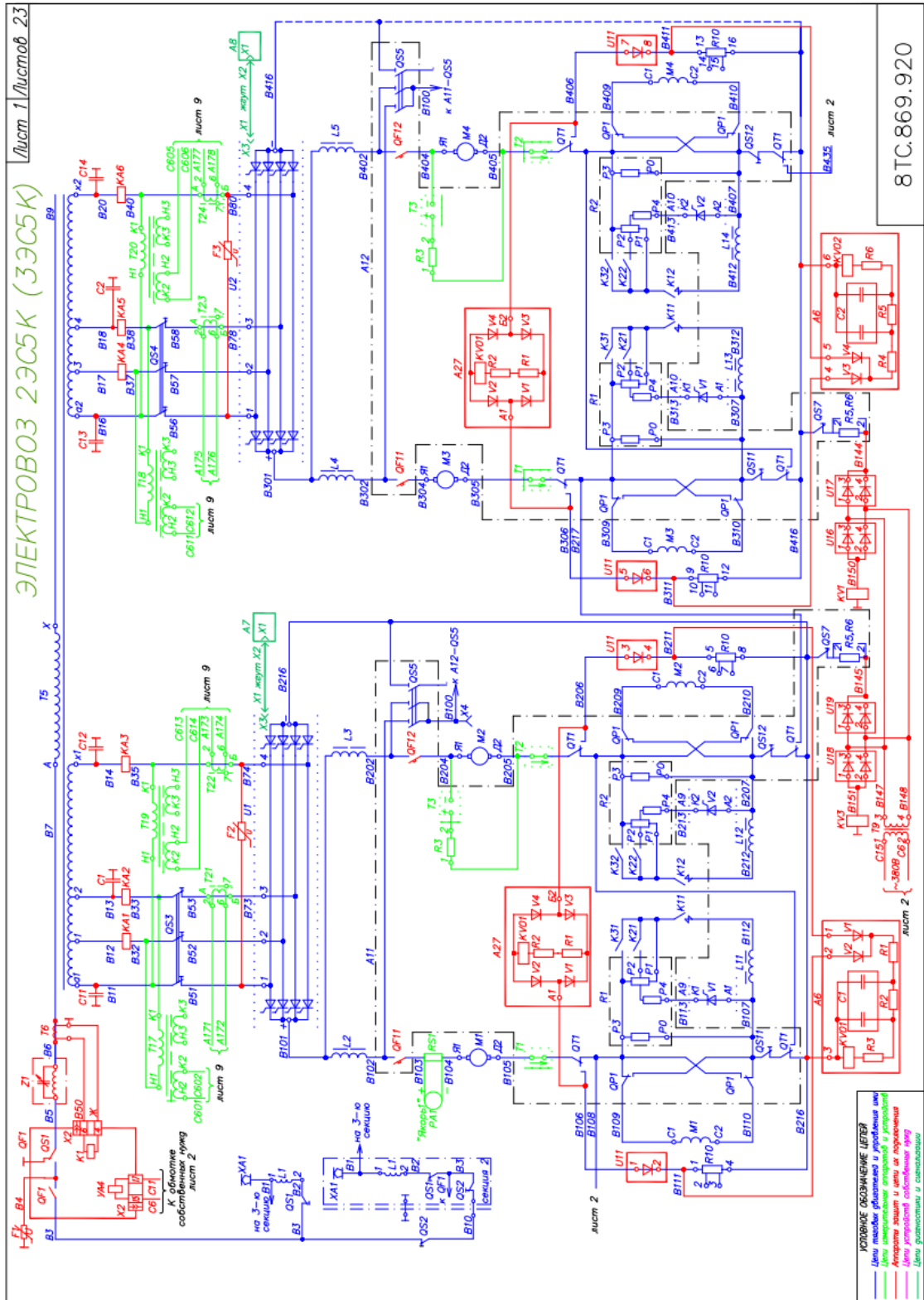


Рисунок 1.13 – Схема силовых цепей головной (хвостовой) секции при потележечном регулировании силы тяги

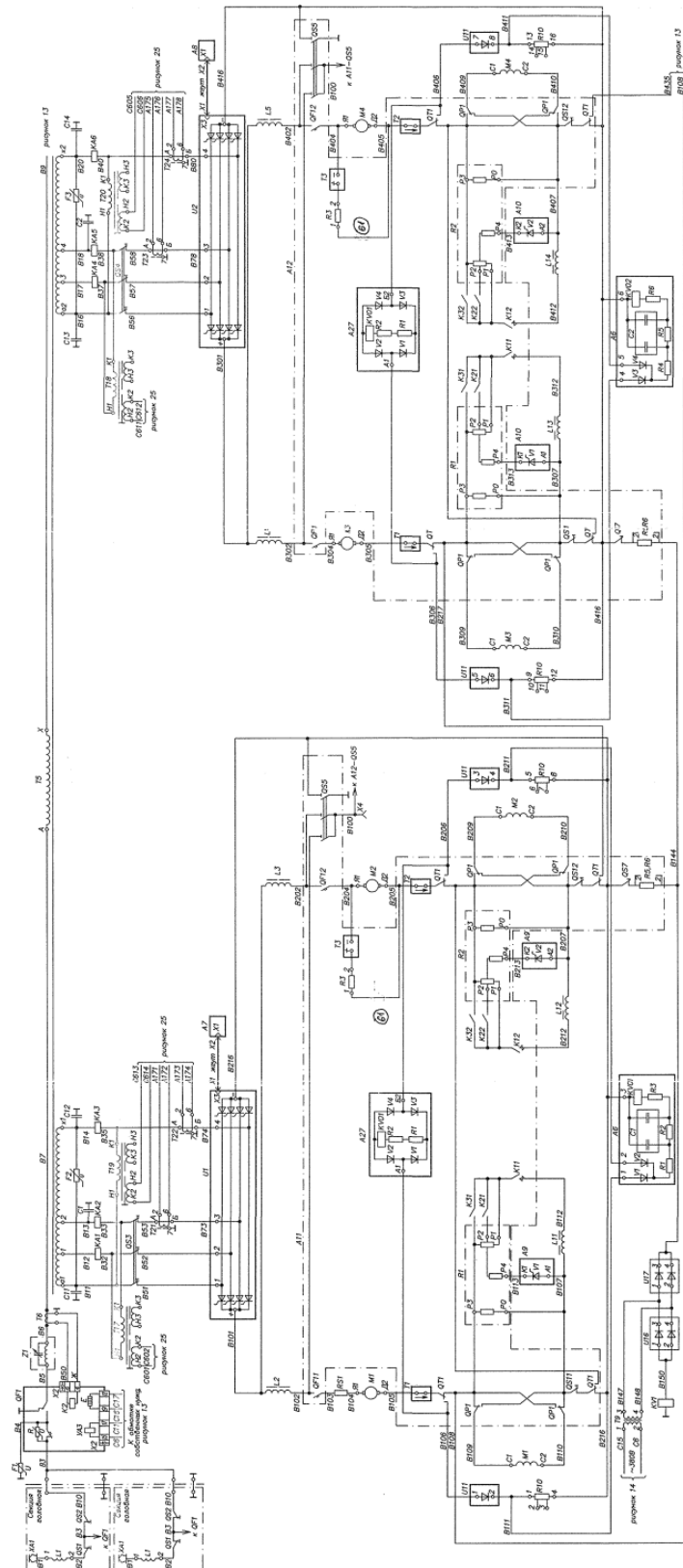


Рисунок 1.14 – Схема силовых цепей бустерной секции при потележечном регулировании силы тяги

Электровоз питается от сети переменного тока 25 кВ, 50 Гц. Тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350/25 [1.44] предназначен для преобразования напряжения контактной сети в напряжение цепей тяговых двигателей, включенных через полупроводниковые преобразователи, цепей собственных нужд и отопления.

Выпрямительно-инверторное устройство ВИУ выполнено на тиристорах и предназначено для регулирования тяги посредством преобразования однофазного переменного тока частоты 50 Гц в пульсирующий ток с обеспечением плавного регулирования выпрямленного напряжения питания тяговых двигателей в режиме тяги, а также для преобразования постоянного тока в однофазный переменный частотой 50 Гц в режиме рекуперативного торможения.

Управляющие сигналы на тиристоры поступают от микропроцессорной системы управления и диагностики (МСУД).

Реактор сглаживающий РС предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи одного тягового двигателя.

Двигатели тяговые пульсирующего тока НБ-514Б, НБ-514Д и НБ-514Е предназначены для преобразования электрической энергии, получаемой из контактной сети, в механическую, передаваемую с вала тягового двигателя на колесную пару электровоза. Двигатель НБ-514Е, в отличие от других модификаций, имеет моторно-осевые подшипники качения.

В технической литературе имеется значительное количество публикаций как по конструкции перечисленных выше элементов силовой схемы электровоза, так и по вопросам компьютерного моделирования процессов, протекающих в системе преобразования энергии. Соответствующие ссылки будут приведены далее по тексту.

1.2.2 Варианты модернизации

В 2013 году в соответствии с «Техническим решением о совершенствовании конструкции серийно выпускаемых электровозов серии ЭП1(М, П),

2(3)ЭС5К, 2ЭС4К» утвержденным руководством ЗАО «Трансмашхолдинг» и ОАО «РЖД», ОАО «ВЭЛНИИ» разработал конструкторскую документацию, а ООО «ПК "НЭВЗ"» по ней изготовил электровоз 3ЭС5К №434.

В 2014 году в соответствии с «Решением о принципах построения шестнадцатисосного магистрального грузового электровоза переменного тока 4ЭС5К производства ООО «ПК «НЭВЗ»», утвержденным руководством ЗАО «Трансмашхолдинг» и ОАО «РЖД», ОАО «ВЭЛНИИ» разработал конструкторскую документацию, а ООО «ПК "НЭВЗ"» по ней изготовил электровозы 4ЭС5К №№001-003.

На указанных электровозах нашли применение следующие основные технические решения, направленные на повышение тяговых свойств:

- поосное регулирование силы тяги;
- независимое возбуждение тяговых двигателей в режимах «Тяга» и «Рекуперация».

Применение поосного управления силой тяги совместно с системой подавления боксования создает перераспределение нагрузок между колесно-моторными блоками, позволяющее поддерживать реализуемую силу тяги электровоза практически на заданном уровне. Как показал опыт эксплуатации, при этом снижается расход песка на подсыпку при буксовании (юз), уменьшается износ бандажей колесных пар, улучшается использование заложенной мощности электрооборудования. Со второго полугодия 2019 г. ООО «ПК "НЭВЗ"» полностью освоило поставку для ОАО «Российские железные дороги» электровозов с поосным регулированием силы тяги (ПоР).

Однако, реализация независимого возбуждения на всех тяговых электродвигателях одной секции (то есть единый регулируемый уровень напряжения на обмотках возбуждения) находится в противоречии с необходимостью изменения числа работающих ТЭД в зависимости от нагрузки.

1.3 Использование мощности грузовых электровозов в условиях эксплуатации

Для обоснования целесообразности применения алгоритма ДАУ [1.26] при работе с неполной нагрузкой применительно к грузовым электровозам «Ермак» необходимо выполнить анализ их энергопотребления в реальных условиях эксплуатации.

Проведение таких исследований требует как расчетных методов, так и привлечения тягово-энергетической вагон-лаборатории. Для современных электровозов, оснащенных бортовыми регистраторами типа РПДА, могут быть использованы данные записей соответствующей аппаратуры.

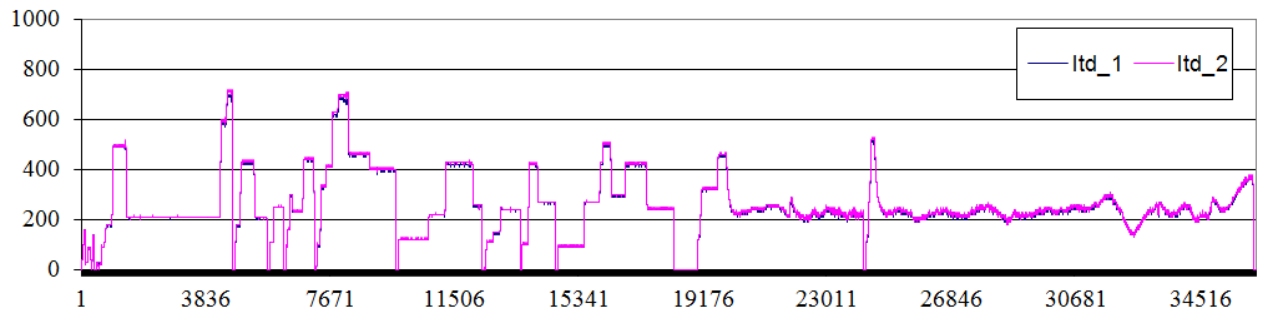
При работе в штатном режиме, когда в каждый момент времени на все ТЭД электровоза подается одно и то же напряжение, типичная картина изменения тока и температуры двух ТЭД одной тележки показана на рисунке 1.15. Записи, показанные на этом рисунке, были сделаны аппаратурой, установленной на электровозе ЗЭС5К-047 14 июля 2009 года во время поездки Батайск – Лихая.

Видим, что токи изменяются, главным образом, в диапазоне 200 ... 400 А, причем имеет место как их кратковременное возрастание до 500 ... 700 А, так и снижение до нуля. Что касается температуры двигателей, то она стабилизируется в диапазоне 40 ... 60°С.

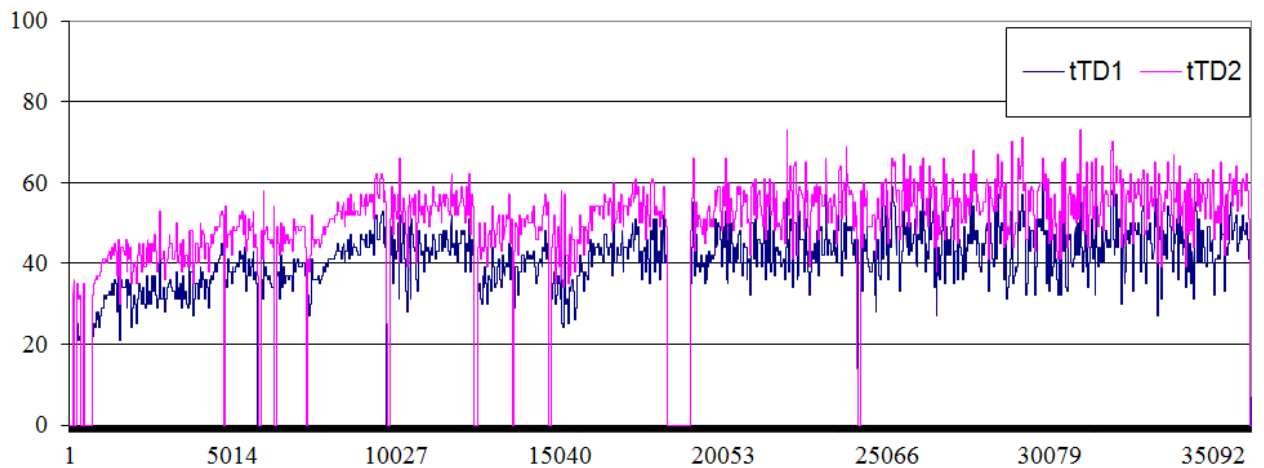
Исходя из таблицы 1.1 и рисунка 1.15 *a*, можно оценить потребляемую двигателем мощность при $U = 900$ В (примерно соответствует 25-й позиции КМ электровоза ВЛ80с):

при токе	$I_{я} = 200$ А,	мощность	$P_1 = 180$ кВт;
	$I_{я} = 300$ А,		$P_1 = 270$ кВт;
	$I_{я} = 400$ А,		$P_1 = 360$ кВт;
	$I_{я} = 500$ А,		$P_1 = 450$ кВт;
	$I_{я} = 600$ А,		$P_1 = 540$ кВт;
	$I_{я} = 700$ А,		$P_1 = 630$ кВт;

$$\begin{array}{ll}
 I_{\text{я}} = 800 \text{ A}, & P_1 = 720 \text{ кВт}; \\
 I_{\text{я}} = 900 \text{ A}, & P_1 = 810 \text{ кВт}; \\
 I_{\text{я}} = 1000 \text{ A}, & P_1 = 900 \text{ кВт}.
 \end{array}$$



а)



б)

Рисунок 1.15 – Изменение: а – тока, А, и б – температуры ТЭД, °С,
(по горизонтальной оси отложен номер записи, 10 записей в секунду)

Сопоставляя эти данные с диаграммами рисунка 2.26 (см. далее во 2-й главе), приходим к выводу о том, что при напряжении $U = 900 \text{ В}$ и токах в диапазоне $200 \dots 500 \text{ А}$, коэффициент использования мощности ТЭД изменяется в пределах $0,2 \dots 0,55$. Это означает, что установленная мощность двигателя используется лишь на $20 \dots 55\%$, что, в конечном итоге, влечет за собой низкую энергоэффективность при работе с частичными нагрузками.

Материал по этому вопросу изложен в главе 3, опираясь на [1.45, 1.46].

1.4 Изучение теплового режима тягового электрооборудования при наличии регулируемой принудительной вентиляции

На электровозах принудительная вентиляция применяется для обеспечения нормальных температурных условий работы основных элементов силовой цепи (выпрямительной установки, сглаживающих реакторов, тяговых двигателей) и другого оборудования (мотор-компрессоров, резисторов, индуктивных шунтов, теплообменников трансформатора), а также для охлаждения внутренних объемов кузова в летнее время. Кроме того, принудительная вентиляция обеспечивает некоторое избыточное давление в кузове электровоза и в корпусах ТЭД с целью предотвращения проникновения пыли и влаги во время движения.

При работе в режиме ДАУ, необходимо учитывать следующие особенности. Число работающих ТЭД определяется алгоритмом ДАУ, и они будут нагружены более чем на 55% своей номинальной мощности. В то же время избыточные ТЭД будут обесточены. Соответственно, вентиляция работающих ТЭД должна осуществляться в полном объеме, а для отключенных достаточно около трети номинальной подачи, чтобы обеспечить необходимое давление воздуха в корпусах двигателей.

Необходимо учитывать, что применяется изоляция класса F с допустимой температурой нагрева до 155°C (при температуре окружающей среды 40°C).

Следовательно, наличие регулируемой принудительной вентиляции становится настоятельной необходимостью. Поскольку при работе в энергоэффективном режиме часть двигателей будет временно выводиться из режима тяги, представляется целесообразным, на это время, переводить мотор-вентиляторы на пониженную частоту питания, что даст дополнительную экономию энергии. Подробно этот вопрос будет рассмотрен в главе 4.

1.5 Улучшение условий работы коллекторно-щеточного узла

В настоящее время подавляющее большинство магистральных локомотивов, работающих на путях ОАО «РЖД», оснащены коллекторными тяговыми электродвигателями постоянного или пульсирующего тока. В частности, грузовые электровозы семейства «Ермак» оборудованы ТЭД НБ-514Е со щётками марки ЭГ-61А размера 2/12,5×32×57 мм (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16 – Щётка ЭГ-61А (слева); скользящий контакт «щетка – коллектор» (справа), видно почернение поверхности коллектора вследствие переброса

Вопросам проектирования, эксплуатации и ремонта коллекторных ТЭД посвящена обширная литература [1.47-1.49] и др. В течение практически ста последних лет накоплен значительный опыт, заводы продолжают массовое производство таких двигателей. Вместе с тем, один из важнейших эксплуатационных вопросов до сих пор не имеет удовлетворительного решения, здесь имеется в виду работа скользящего контакта «щетка – коллектор» в силовой электрической цепи, через который проходит ток силой в сотни ампер.

Скользящий контакт является звеном, лимитирующим надежность и работоспособность двигателя. Недостаточная износостойкость его элементов увеличивает расходы на внеплановые ремонты, при этом увеличивается ве-

роятность возникновения аварийной ситуации и нарушения графика движения поездов. В настоящее время более 30% отказов локомотивов приходится на тяговые электродвигатели, причем более 15% из них составляют отказы по скользящему контакту. Щётки требуют периодической замены, соответствующая операция является трудоемкой и социально малопривлекательной для технического персонала.

Износостойкость элементов контакта определяется комплексом сложных явлений, связанных с трением, прохождением электрического тока, нагрузкой, взаимодействием контактирующих поверхностей с окружающей средой. Несмотря на значительный объем исследований, выполненных в области повышения эффективности работы скользящего контакта, далеки от совершенства представления о взаимосвязи механических и электрических характеристик контакта в условиях граничной смазки, роли третьего тела в контактном взаимодействии и токопрохождении. Не вполне оценено и влияние электрического тока в контакте на процессы трения и износа.

В нормальных условиях работы ТЭД в режиме тяги, на поверхности коллектора образуется политура – контактная пленка из окиси меди с примесью частиц щеточного материала, которая имеет высокую электропроводность и низкий коэффициент трения. В противном случае, возникает круговой огонь по коллектору или чрезмерное искрение под щетками, подгар коллектора [1.50-1.52] и др.

Если же ТЭД на длительное время выведен из тяги, то есть когда контакт обесточен, то политура разрушается, что приводит к перегреву с последующим выходом двигателя из строя. По этой причине при перемещении локомотива с завода-изготовителя (или с ремонтного завода) до депо зажимы щеткодержателей откидываются, и щетки извлекаются из своих гнезд. По этой же причине потерпела неудачу система ОРМЛ, о чем было сказано в п. 1.1.

Вместе с тем, как показывает опыт эксплуатации, при движении локомотива на выбеге в пределах 20...25 минут, никаких отрицательных последствий не возникает. На рисунке 1.17 показан фрагмент режимной карты для электровоза ВЛ80С, которая предписывает движение на 0-й позиции КМ как в прямом, так и в обратном направлении, на протяжении до 15 километров.

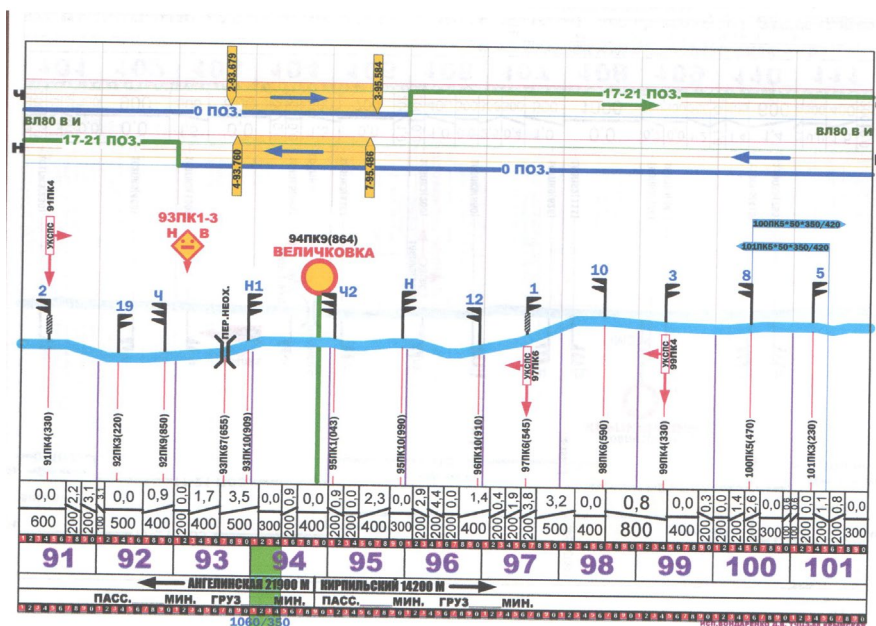


Рисунок 1.17 – Фрагмент режимной карты

Одним из подходов, существенно улучшающих условия работы скользящего контакта, является применение электропроводящей смазки, которая закладывается в разрез щётки [1.53, 1.54]. Отметим работы В.М Короткова [1.55-1.61], в которых обосновываются и развиваются различные аспекты такого подхода.

Во избежание повреждений скользящего контакта КЩУ, для обеспечения надёжности работы периодически отключаемых ТЭД, применение электропроводящей смазки щёток представляется весьма целесообразным.

1.6 Программно-аппаратное моделирование процессов при работе электровоза в энергоэффективном режиме

Прежде всего, необходимо отметить, что в последнее время всё чаще поднимаются вопросы, связанные с имитационным моделированием (симуляцией) работы систем электроприводов и электротехнических комплексов в реальном времени. Это вызвано сложностью проведения экспериментальных исследований и пусконаладочных работ в области силовой электротехники и электроэнергетики, их дороговизной, высокими рисками повреждения оборудования, а также появлением новых программно-аппаратных средств, позволяющих создавать симуляторы, способные моделировать работу электротехнических комплексов и систем с высокой степенью достоверности [1.62-1.65] и др.

Анализ публикаций показывает, что в зависимости от поставленных задач симуляторы электрооборудования разрабатываются для моделирования в реальном времени динамических характеристик электродвигателей, преобразователей, систем «преобразователь–двигатель» или «преобразователь–двигатель–механизм». Так, для наладки системы управления тяговым электроприводом вполне может быть использован симулятор силовой части электропривода, моделирующий работу преобразователей и электродвигателей с учетом изменяющейся нагрузки, возникающей при ведении поезда, который принимает реальные сигналы управления ключами преобразователя и выдаёт сигналы обратных связей в систему управления.

С учетом сказанного, приходим к следующей задаче: имея в наличии симулятор аппаратной управляющей части электровоза семейства «Ермак» с поосным регулированием силы тяги (контроллер машиниста, блок индикации и МСУД), а также компьютерную модель силовой электромеханической системы электровоза и записи бортового регистратора, полученные в ходе поездок, разработать и отладить программное обеспечение, обеспечивающее

повышение энергетической эффективности в тех режимах работы электровоза, когда его установленная мощность реализуется не полностью [1.26].

Решение сформулированной выше задачи можно выполнить, применяя технологию программно-аппаратного моделирования (ПАМ, англ. *Hardware-in-the-Loop Simulation*). Иногда употребляется также термин «полунатурное моделирование».

Программно-аппаратный симулятор может быть выполнен на базе персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы реального времени. Низкая скорость выдачи выходных сигналов обусловлена структурой персонального компьютера и ограничивает область применения подобных симуляторов моделированием систем, содержащих тиристорные преобразователи, что имеет место для электровозов семейства «Ермак».

Эффективно отрабатывать весь круг вопросов при непрерывном и высокоточном моделировании в реальном времени единого спектра нормальных и аварийных режимов работы электровоза возможно на специально разработанных и спроектированных стендах, применяя пакет *SimInTech* [1.67, 1.68].

1.7 Выводы по главе

На основании вышеизложенного, сформулируем цель и задачи диссертационного исследования.

Целью настоящей диссертации является разработка комплекса научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности, в результате чего будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Исследовать электромеханические процессы в основных элементах тяговой системы электровоза для получения закономерностей изменения энергетической эффективности этих элементов при работе электровоза в различных режимах. Получить уравнение баланса мощностей в динамических и стационарных условиях. Установить характер поведения основных показателей энергоэффективности электровоза, а именно КИМ и КПД, для чего применить методы компьютерного моделирования. Выполнить сопоставление результатов моделирования с квалификационными испытаниями силового электрооборудования.

2. Опираясь на записи бортовой аппаратуры, исследовать характер энергопотребления грузового электровоза в реальных условиях эксплуатации. Установить, в каких пределах изменяются КИМ и КПД в зависимости от скорости движения, профиля пути и составности поезда.

3. При работе в энергоэффективном режиме, избыточные ТЭД будут временно отключаться, а включенные ТЭД, количество которых определяется алгоритмом ДАУ, будут нагружены более чем на 45% своей номинальной мощности. Соответственно, вентиляция работающих ТЭД должна осуществляться в полном объеме, а для отключенных достаточно около трети номинальной подачи, чтобы обеспечить необходимое давление воздуха в корпусах двигателей. По этой причине, необходимо разработать систему регулируемой принудительной вентиляции и изучить тепловые режимы элементов тяговой цепи электровоза на основе уравнения теплового баланса.

4. Реализация энергоэффективного алгоритма ДАУ требует, при работе электровоза с неполной нагрузкой, отключения некоторого количества ТЭД с последующим возвратом их в режим тяги. Для того, чтобы избежать повреждений скользящего контакта и тем самым обеспечить надёжность работы

периодически отключаемых ТЭД, представляется целесообразным применять электропроводящую смазку щёток.

5. Применяя технологию программно-аппаратного моделирования (ПАМ), выполнить исследование работы электровоза в энергоэффективном режиме с целью установления основных закономерностей, связывающих действия машиниста, скорость движения и составность поезда. Также предусмотреть программное ограничение времени нахождения ТЭД в обесточенном состоянии не более 20...25 минут.

2 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОВОЗА В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В настоящей главе выполнен анализ процессов, протекающих в основных элементах тяговой системы электровоза, и изучено изменение энергетической эффективности этих элементов при работе в различных режимах.

Обзор состояния вопроса был дан в п. 1.1 и 1.2. Силовая электрическая схема электровоза «Ермак» приведена на рисунках 1.12 и 1.13.

2.1 Энергетическая эффективность тягового трансформатора в зависимости от нагрузки

Тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350/25 производства ООО «Тольяттинский трансформатор» предназначен для преобразования напряжения контактной сети в напряжение цепей тяговых двигателей, включенных через полупроводниковые преобразователи, цепей собственных нужд и отопления [2.1].

Устройство трансформатора ОНДЦЭ-4350/25 показано на рисунке 2.1. Принципиальная электрическая схема дана на рисунке 2.2.

Трансформатор имеет следующие обмотки:

СО (А-Х) – сетевая обмотка;

ТО1 (а1-1, 1-2, 2-х1); ТО2 (а2-3, 3-4, 4-х2) – две группы тяговых обмоток, каждая для питания двух тяговых двигателей;

ОВ (а3-5, 5-х3) – обмотки питания цепей возбуждения;

ОСН (а4-6, 6-х4) – обмотки собственных нужд.

Охлаждение трансформатора принудительное, масляно-воздушное.

Технические характеристики приведены в таблице 2.1.

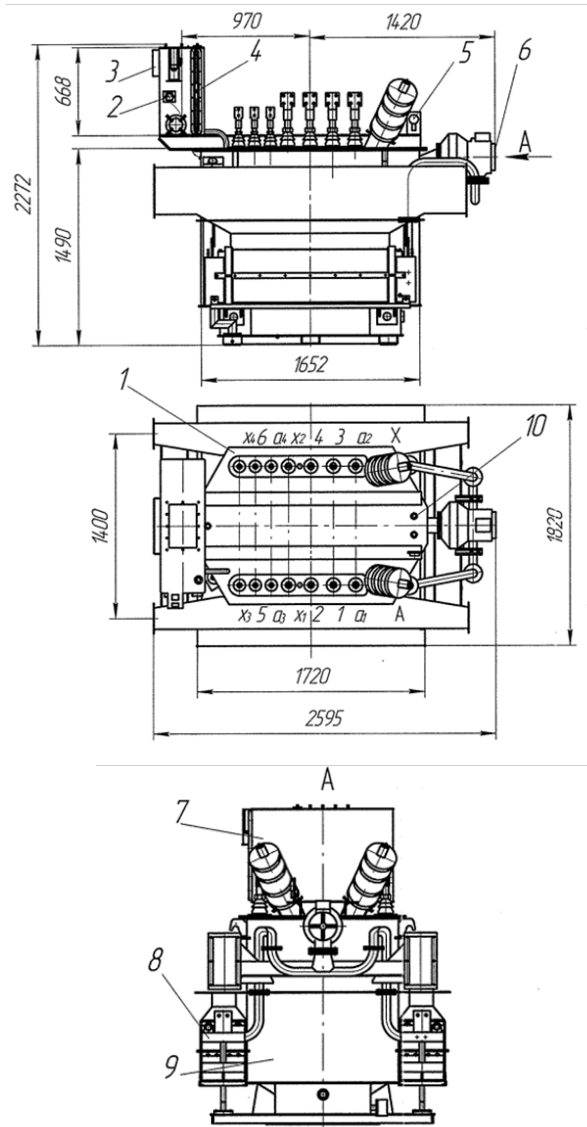


Рисунок 2.1 – Тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350/25:

1 – крышка; 2 – термометр; 3 – воздухоосушитель; 4 – маслоуказатель; 5 – манометр;
6 – электронасос; 7 - расширитель; 8 – секция радиаторов; 9 - бак;
10 - датчик реле температуры

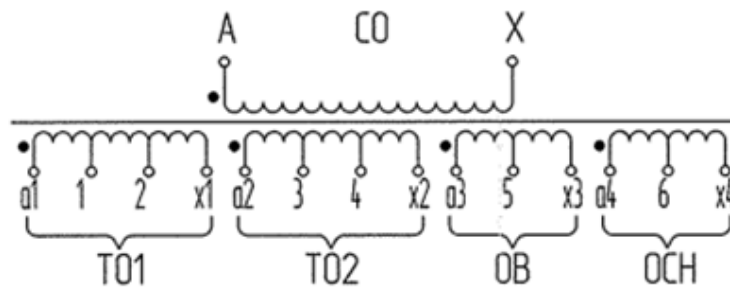


Рисунок 2.2 – Принципиальная электрическая схема

Таблица 2.1 – Технические характеристики трансформатора ОНДЦЭ-4350/25

Параметр	Значение
Номинальная мощность трансформатора, кВ.А	4350
Номинальная частота питающей сети, Гц	50
Схема и группа соединения обмоток	1/1/1/1/1-0-0-0-0
Ток холостого хода, % не более	0.8
Потери холостого хода, кВт	3.7
Потери короткого замыкания, кВт (приведенные к 75°C)	56.8
Суммарные потери, кВт	60.5
Полная масса трансформатора, кг не более	7800
Расход охлаждающего воздуха, м ³ /мин, не более	90
<i>Сетевая обмотка (СО)</i>	
Номинальная мощность, кВ.А	4345
Номинальный ток, А	173.8
Номинальное напряжение, В	25000
Максимальное напряжение, В	29000
Минимальное напряжение, В	19000
Величина перенапряжений на обмотке, ограничиваемых защитой электровоза, кВ, не более	90
Кратковременный максимум напряжения в контактной сети (длительность по ГОСТ 11677-85 равная 20с), кВ	32
Ток включения, А, не более	800
<i>Тяговые обмотки (ТО1, ТО2)</i>	
Номинальная мощность, кВ.А	2x2016
Номинальное напряжение, В, на зажимах:	
a1-x1, a2-x2	1260
a1-2, 2-x1, a2-4, 4-x2	630
a1-1, 1-2, a2-3, 3-4	315
Номинальный ток обмотки и ее частей, А	1600
Количество тяговых обмоток	2
Напряжение короткого замыкания между каждой тяговой обмоткой и сетевой (СО-ТО 1), (СО-ТО2), отнесенное к мощности соответствующей тяговой обмотки, %	7.0
Напряжение короткого замыкания между двумя тяговыми обмотками и сетевой (СО-2ТО), отнесенное к общей мощности тяговых обмоток, %	7.0
Разность напряжения короткого замыкания между обмотками СО - [(a1-2)+(a2-4)] и СО - [(2-x1)+(4-x2)), % по абсолютному значению, не более	0,5
Перегрузочный ток 15-минутного режима (при начальной температуре масла 20°C), А	2700
<i>Обмотка питания цепей возбуждения (ОВ)</i>	
Номинальная мощность, кВ.А	112
Номинальное напряжение между выводами a3-5, 5-x3, В	86
Номинальный ток обмотки на выводах a3-x3, А	650
Номинальный ток обмотки на выводе 5, А	900
Напряжение короткого замыкания между ОВ и сетевой, отнесенное к мощности ОВ, %	1.5

<i>Обмотка собственных нужд (ОСН)</i>	
Номинальная мощность, кВ.А	201
Номинальное напряжение между выводами а4-х4, В	401
Номинальное напряжение между выводами а4-6, В	229
Номинальный ток обмотки и ее частей, А	500
Напряжение короткого замыкания между обмоткой ОСН и сетевой, отнесенное к мощности ОСН, %	1.9

В таблице 2.2 приведены паспортные данные тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25-У2, необходимые для расчета значений параметров его схемы замещения.

Таблица 2.2 – Исходные данные для расчета параметров схемы замещения

Наименование параметра	Обозначение	Численное значение
Номинальная мощность, кВА	$S_{\text{НОМ}}$	4350
Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	$U_{\text{НОМ1}}$	25
Номинальный ток первичной обмотки, А	$I_{\text{НОМ1}}$	173,8
Номинальное напряжение вторичной (тяговой) обмотки, В	$U_{\text{НОМ2}}$	1260
		630
		315
Номинальное напряжение обмотки питания цепей возбуждения, В	$U_{\text{НОМВ}}$	650
Номинальное напряжение обмотки питания цепей собственных нужд, В	$U_{\text{НОМСН}}$	401
Потери холостого хода, кВт	$\Delta P_{\text{ХХ}}$	3,7
Ток холостого хода, %	$I_{\text{ХХ}}$	0,7
Напряжение короткого замыкания (тяговая обмотка), %	$U_{\text{кз т}}$	7
Напряжение короткого замыкания (обмотка питания цепей возбуждения), %	$U_{\text{кз в}}$	1,5
Напряжение короткого замыкания (обмотка питания цепей собственных нужд), %	$U_{\text{кз сн}}$	1,9
Потери при коротком замыкании, кВт	$\Delta P_{\text{кз}}$	56,8
Номинальная частота питающей сети, Гц	ω	50

Представим тяговый трансформатор ОНДЦЭ-4350/25 в виде системы отдельных трансформаторов, работающих на соответствующие каналы потребления энергии в электрической схеме электровоза [2.2]. Схемы замещения показаны на рисунке 2.3.

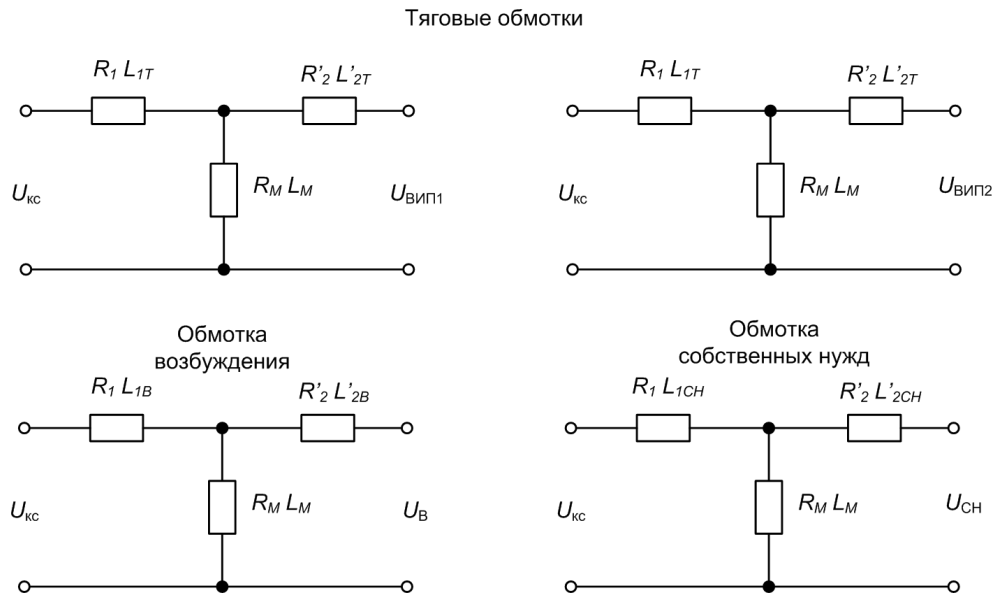


Рисунок 2.3 – Схемы замещения тягового трансформатора

Перейдем к расчету параметров схемы замещения.

1. Ток холостого хода трансформатора.

$$I_0 = \frac{I_{xx}\%}{100} I_{ном1} = \frac{0,7}{100} 173,8 = 1,2166 \text{ А.} \quad (2.1)$$

2. Полное сопротивление намагничивающего контура

$$Z_M = \frac{U_1}{I_0} = \frac{25000}{1,2166} = 20549 \text{ Ом.} \quad (2.2)$$

3. Активное сопротивление намагничивающего контура

$$R_M = \frac{\Delta P_{xx}}{I_0^2} = \frac{4700}{(1,2166)^2} = 2499 \text{ Ом.} \quad (2.3)$$

4. Реактивное сопротивление намагничивающего контура

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} = \sqrt{(20549)^2 - (2499)^2} = 20396 \text{ Ом.} \quad (2.4)$$

5. Активное сопротивление короткого замыкания

$$R_K = \frac{\Delta P_{K3}}{I_1^2} = \frac{56800}{173,8^2} = 1,8804 \text{ Ом.} \quad (2.5)$$

6. Полное сопротивление короткого замыкания

6.1 Тяговая обмотка

$$Z_{K3 T} = \frac{U_{K3 T} \% U_{1H}}{100 I_{1H}} = \frac{7 \cdot 25000}{100 \cdot 173,8} = 10,069 \text{ Ом.} \quad (2.6)$$

6.2 Обмотка питания цепей возбуждения

$$Z_{K3 B} = \frac{U_{K3 B} \% U_{1H}}{100 I_{1H}} = \frac{1,5 \cdot 25000}{100 \cdot 173,8} = 2,1577 \text{ Ом.} \quad (2.7)$$

6.3 Обмотка питания цепей собственных нужд

$$Z_{K3 CH} = \frac{U_{K3 CH} \% U_{1H}}{100 I_{1H}} = \frac{1,9 \cdot 25000}{100 \cdot 173,8} = 2,733 \text{ Ом.} \quad (2.8)$$

7. Реактивное сопротивление короткого замыкания

7.1 Тяговая обмотка

$$X_{K3 T} = \sqrt{Z_{K3 T}^2 - R_K^2} = \sqrt{(10,069)^2 - (1,8804)^2} = 9,8919 \text{ Ом.} \quad (2.9)$$

7.2 Обмотка питания цепей возбуждения

$$X_{K3 B} = \sqrt{Z_{K3 B}^2 - R_K^2} = \sqrt{(2,1577)^2 - (1,8804)^2} = 1,0582 \text{ Ом.} \quad (2.10)$$

7.3 Обмотка питания цепей собственных нужд

$$X_{K3 CH} = \sqrt{Z_{K3 CH}^2 - R_K^2} = \sqrt{(2,733)^2 - (1,8804)^2} = 1,9833 \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

8. Активное сопротивление первичной обмотки и приведенное активное сопротивление вторичной обмотки

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2} = \frac{1,8804}{2} = 0,9402 \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

9. Реактивное сопротивление первичной обмотки и приведенное реактивное сопротивление вторичной обмотки

9.1 Тяговая обмотка

$$X_{1 T} = X_{2 T}' = \frac{X_{K3 T}}{2} = \frac{9,8919}{2} = 4,9459 \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

9.2 Обмотка питания цепей возбуждения

$$X_{1В} = X'_{2В} = \frac{X_{кзВ}}{2} = \frac{1,0582}{2} = 0,5291 \text{ Ом.} \quad (2.14)$$

9.3 Обмотка питания цепей собственных нужд

$$X_{1сн} = X'_{2сн} = \frac{X_{кзсн}}{2} = \frac{1,9833}{2} = 0,9916 \text{ Ом.} \quad (2.15)$$

10. Индуктивность контура намагничивания

$$M = \frac{X_M}{2\pi f} = \frac{20396}{314} = 64,95 \text{ Гн.} \quad (2.16)$$

11. Индуктивности первичной обмотки тягового трансформатора

11.1 Для тяговой обмотки:

$$L_{1Т} = \frac{X_{1Т}}{2\pi f} = \frac{4,9459}{314} = 0,0157 \text{ Гн.} \quad (2.17)$$

11.2 Для обмотки питания цепей возбуждения:

$$L_{1В} = \frac{X_{1В}}{2\pi f} = \frac{0,5291}{314} = 0,0016 \text{ Гн.} \quad (2.18)$$

11.3 Для обмотки питания цепей собственных нужд

$$L_{1сн} = \frac{X_{1сн}}{2\pi f} = \frac{0,9916}{314} = 0,0031 \text{ Гн.} \quad (2.19)$$

12. Индуктивности вторичной обмотки тягового преобразователя, приведенные к первичной обмотке, определяются по соотношениям:

12.1 Для тяговой обмотки:

$$L_{1Т} = L_{2Т}' = 0,0157 \text{ Гн.} \quad (2.20)$$

12.2 Для обмотки питания цепей возбуждения:

$$L_{1В} = L_{2Т}' = 0,0016 \text{ Гн.} \quad (2.21)$$

12.3 Для обмотки питания цепей собственных нужд

$$L_{1сн} = L_{2Т}' = 0,0031 \text{ Гн.} \quad (2.22)$$

Перейдем к определению коэффициента полезного действия тягового трансформатора ОНДЦЭ-4350/25 η_T при различной нагрузке [2.3]:

$$\eta_T = 1 - \frac{P_X + K_H^2 \cdot P_K}{S_{\text{ном}} \cdot K_H \cos \varphi + P_X + K_H^2 \cdot P_K}, \quad (2.23)$$

где $P_X = 3700$ Вт – потери холостого хода;

$P_K = 56800$ Вт – потери короткого замыкания;

$S_{\text{ном}} = 4350000$ ВА – мощность номинальной нагрузки;

$S_{\text{тр}}$ – мощность реальной нагрузки трансформатора;

K_H – коэффициент нагрузки трансформатора, который определяется следующим образом

$$K_H = \frac{S_{\text{тр}}}{S_{\text{ном}}}.$$

Тогда из (2.23) получаем расчетную формулу

$$\eta_T = 1 - \frac{3700 + K_H^2 \cdot 56800}{4350000 \cdot K_H \cos \varphi_2 + 3700 + K_H^2 \cdot 56800}. \quad (2.23^*)$$

Задаваясь значениями коэффициента нагрузки трансформатора K_H в пределах от 0 до 1,5, выполняем расчет КПД. При этом значение коэффициента мощности принимаем последовательно равным

$$\cos \varphi_2 = 0,2; 0,3; \dots, 1,0.$$

На рисунке 2.4 показана полученная зависимость КПД тягового трансформатора от нагрузки. Каждому значению $\cos \varphi_2$ соответствует отдельная кривая. Характер изменения КПД вдоль кривой следующий: по мере возрастания нагрузки, КПД возрастает, достигает максимума, а затем плавно убывает.

Например, для кривой $\cos \varphi_2 = 1$, максимальное значение КПД равно $\eta_{Tmax} = 0,9934$ при $K_H = 0,2552$, то есть максимальное значение КПД трансформатора достигается при 25,52% полной нагрузки.

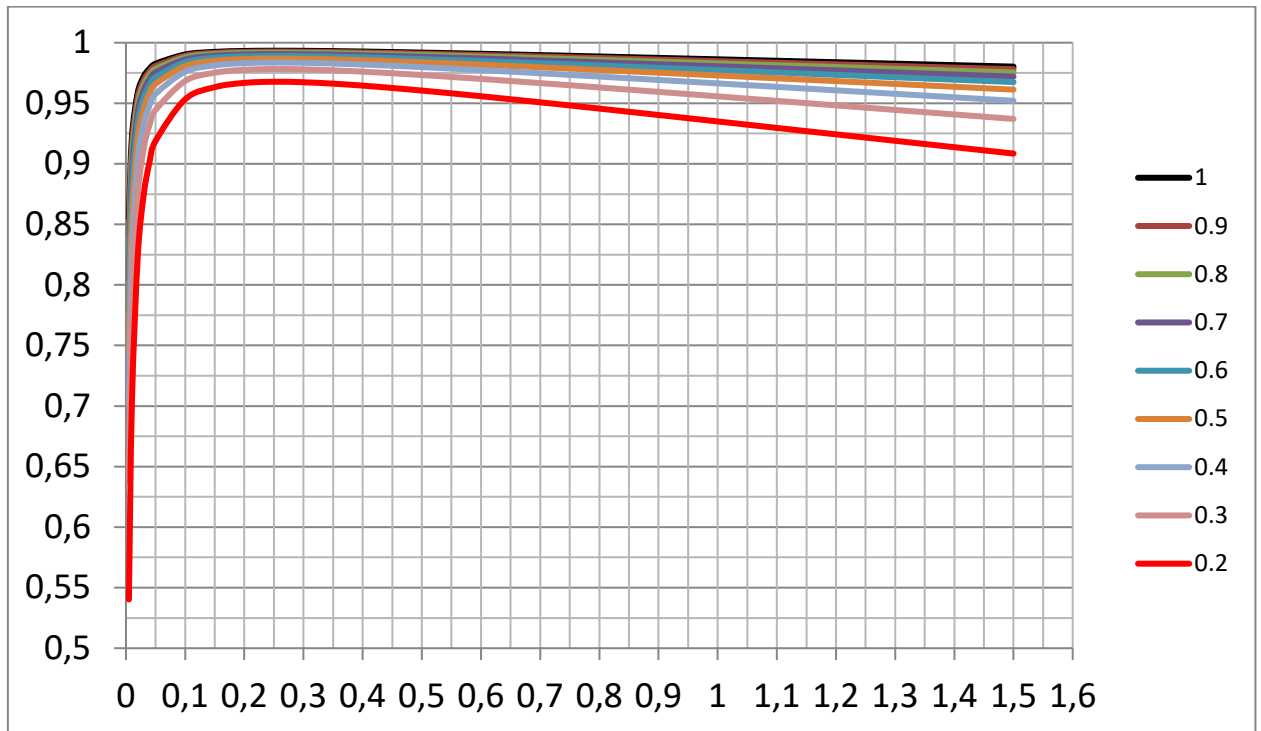


Рисунок 2.4 – Изменение КПД тягового трансформатора в зависимости от коэффициента нагрузки K_H (при $\cos \varphi_2 = 0,2; 0,3; \dots, 1,0$)

2.2 Энергетическая эффективность выпрямительно-инверторного преобразователя и сглаживающего реактора

Как было отмечено в главе 1, электровозы переменного тока первых поколений, серий ВЛ60 и ВЛ80, были оснащены неуправляемым выпрямителем на диодах и имели ступенчатое изменение напряжения на ТЭД, что вызывало толчки силы тяги при наборе позиций.

Этот недостаток удалось устранить за счет применения управляемого выпрямительно-инверторного преобразователя на тиристорах, что позволило реализовать в режиме тяги плавное регулирование напряжения на ТЭД (зонно-фазное регулирование) [2.4].

Начиная с 2004 года, серийно выпускаются грузовые электровозы 2(3,4)ЭС5К серии «Ермак» [2.5]. В качестве преобразовательной установки на локомотивах этой серии применяется выпрямительно-инверторный преобразователь (*ВИП*) на тиристорах. Функциональная схема питания ТЭД локомотива при потележечном регулировании силы тяги приведена на рисунках 1.12 и 1.13.

Конструкцией электровоза предусмотрено размещение на секции двух *ВИП*, каждый из которых через сглаживающие реакторы CP_1 и CP_2 питает два параллельно подключенных тяговых электродвигателя ($TЭД_1$ и $TЭД_2$), установленных на одной тележке локомотива (рисунок 2.5).

ВИП подключается ко вторичной обмотке трансформатора *ТР*, состоящей из трех секций (I – III). Силовая часть *ВИП* содержит восемь плеч (1 – 8). Для управления *ВИП* используется блок управления *БУ ВИП*, который входит в состав микропроцессорной системы управления и диагностики электровоза (*МСУД*). *МСУД* преобразует команды управляющего воздействия машиниста, заключающегося в отклонении рукоятки контроллера машиниста КМ-35 от вертикали, в сигналы управления тиристорами согласно заложенному алгоритму работы, что позволяет реализовать четыре зоны регулирования [2.5]. Напряжение на секциях I и II составляет 350 В, на секции III – 700 В.

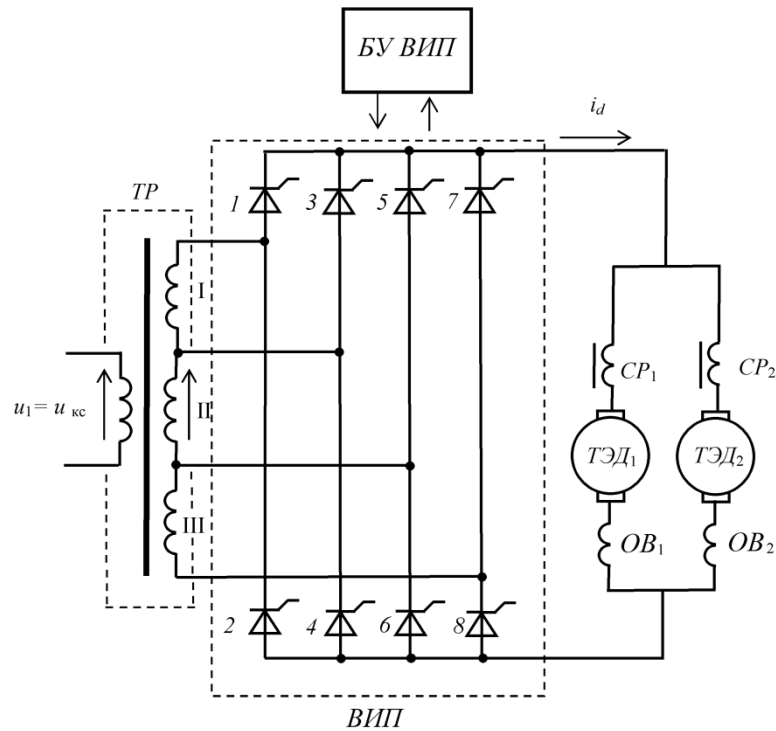


Рисунок 2.5 – Функциональная схема питания ТЭД одной тележки

Силовая часть *ВПП* содержит восемь плеч. На электровозах семейства «Ермак» плечи укомплектованы тиристорами Т353-800. Первое, второе, седьмое и восьмое плечи укомплектованы тиристорами 28 класса с неповторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии не менее 3600 В; третье, четвертое, пятое и шестое плечи – 28 класса с неповторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии не менее 3100 В.

Микропроцессорная система управления и диагностики для электровозов переменного тока *МСУД* предназначена для управления тяговым приводом электровоза переменного тока с коллекторными двигателями и аппаратами цепей управления электровоза.

В таблице 2.3 обозначены режимы работы тиристорov: «р» – регулируемый, «о» – открытый, «з» – открытый с задержкой) [2.5].

Таблица 2.3 – Плавное регулирование напряжения на тяговых электродвигателях

1	2	3	4	5	6	7
Зона регулирования и угла отклонения рукоятки КМ	Задающее напряжение, подаваемое от КМ в МСУД, В	Работающие секции трансформатора	Напряжение на выходе трансформатора, В	Номера работающих плеч	Угол отпирания тиристоров $\alpha_{\text{ф}}$, эл. град	Среднее значение выпрямленного напряжения, на выходе ВИП, В
1: 0° ... 22,5°	0 ... 2,5	II	350	↑(3о, 6р); ↓(5о, 4р)	0 ... 180	0 ... 315
2: 22,5° ... 45°	2,5 ... 5	I + II	700	↑(1р, 3з, 6о); ↓(5о, 2р, 4з)	0 ... 180	315 ... 630
3: 45° ... 67,5°	5 ... 7,5	II + III	1050	↑(3р, 5з, 8о); ↓(7о, 4р, 6з)	0 ... 180	630 ... 945
4: 67,5° ... 90°	7,5 ... 10	I + II + III	1400	↑(1р, 3з, 8о); ↓(7о, 2р, 4з)	0 ... 180	945 ... 1260

Между *ВИП* и тяговыми двигателями размещены сглаживающие реакторы CP_1 и CP_2 типа РС-19-01 [2.1], предназначенные для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи каждого ТЭД.

Покажем, каким образом можно плавно изменять напряжение на ТЭД в режиме тяги [2.6, 2.7]. Для этого, в упрощающих предположениях, было выполнено моделирование в каждой из четырех зон в зависимости от изменения угла отпирания тиристоров. В соответствии с рисунком 2.5, в пакете SimInTech [2.8] была разработана компьютерная модель. Результаты, представленные ниже на рисунках 2.6 – 2.9, носят демонстрационный характер.

2.2.1 Работа ВИП в 1-й зоне

Регулирование начинается в 1-й зоне, питание осуществляется от секции II (см. рисунок 2.5). При направлении ЭДС, показанном стрелкой на этом рисунке, ток идет через плечо 3 (тиристоры которого полностью открыты), через нагрузку и затем через регулируемые тиристоры плеча 6 возвращается на секцию II. При противоположном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 5, через нагрузку и затем возвращается через регулируемые тиристоры плеча 4. Угол отпирания регулируемых тиристоров плавно изменяется от $\alpha_{pmax} = 180^\circ - \alpha_0$ до $\alpha_{pmin} = \alpha_0$.

На рисунке 2.6 представлен фрагмент результатов компьютерного моделирования работы *ВИП* при отклонении рукоятки контроллера машиниста $\varphi_{KM} = 11,5^\circ$ при значении угла отпирания тиристоров $\alpha_p = 90^\circ$.

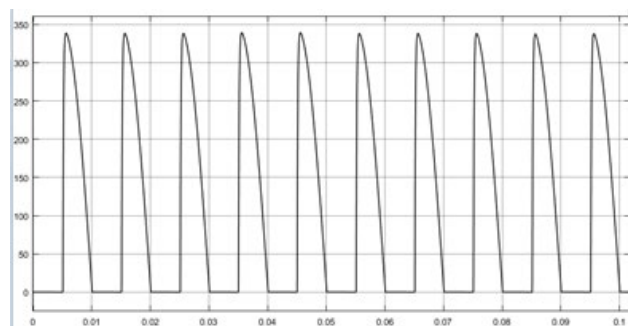


Рисунок 2.6 – Вид напряжения на выходе ВИП при работе в 1-ой зоне ($\alpha_p = 90^\circ$)

Среднее значение выпрямленного напряжения в 1-й зоне $U_{дсред}$ в зависимости от значения угла отпирания тиристоров α_p вычисляется как

$$U_{дсред} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_p}^{\pi} U_{M2} \sin \varphi d\varphi = \frac{U_{M2}}{\pi} (-\cos \varphi) \Big|_{\alpha_p}^{\pi} = \frac{U_{M2}}{\pi} (1 + \cos \alpha_p); \quad (2.24)$$

где U_{M2} – амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора; в 1-й зоне $U_{M2} = U_{M2(II)} = 350 \times \sqrt{2} = 495$ В.

Следовательно, среднее значение выпрямленного напряжения на входе ТЭД при работе в 1-й зоне $U_{дсред}$ плавно возрастает от 0 до 315,1 В.

2.2.2 Работа ВИП во 2-й зоне

Затем осуществляется переход на 2-ю зону, питание осуществляется от секций I (регулируется) и II (полностью открыта). При направлении ЭДС, показанном стрелкой, ток идет на нагрузку через регулируемое плечо 1 и от вывода между I и II секциями через плечо 3 (открытое с задержкой по фазе $\alpha_{03} = \alpha_0 + \gamma_0'$), и возвращается через открытое плечо 6. При обратном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 5, через нагрузку и затем возвращается через регулируемое плечо 2 и через плечо 4, имеющее задержку по фазе. На рисунке 2.7 представлен фрагмент результатов компьютерного моделирования работы ВИП при отклонении рукоятки контроллера машиниста $\varphi_{км} = 33,75^\circ$ при значении угла отпирания тиристоров $\alpha_p = 90^\circ$.

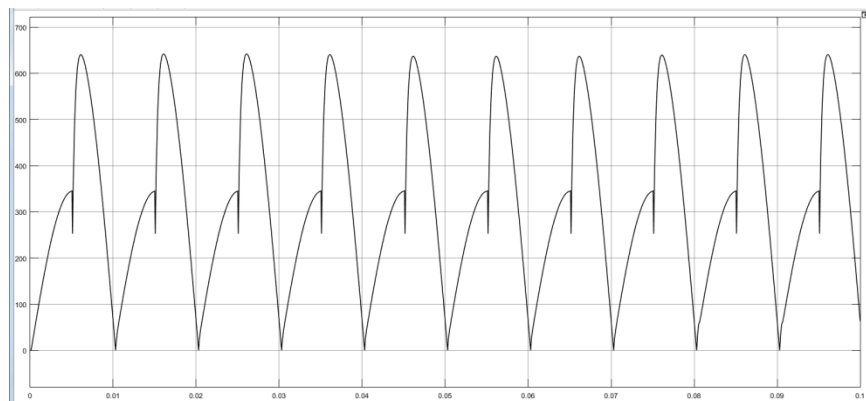


Рисунок 2.7 – Вид напряжения на выходе ВИП при работе во 2-й зоне ($\alpha_p = 90^\circ$)

Среднее значение выпрямленного напряжения во 2-й зоне имеет вид

$$U_{d\text{сред}} = U_{d\text{сред(I)}} + U_{d\text{сред(II)}}; \quad (2.25)$$

$$U_{d\text{сред(I)}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_p}^{\pi} U_{M2(I)} \sin \varphi d\varphi = \frac{U_{M2(I)}}{\pi} (-\cos \varphi) \Big|_{\alpha_p}^{\pi} = \frac{U_{M2(I)}}{\pi} (1 + \cos \alpha_p);$$

$$U_{d\text{сред(II)}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{M2(II)} \sin \varphi d\varphi = \frac{U_{M2(II)}}{\pi} (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi} = 2 \frac{U_{M2(II)}}{\pi};$$

где U_{M2} – амплитудное значение напряжения вторичной обмотки трансформатора; во 2-й зоне: $U_{M2(I)} = 495$ В, $U_{M2(II)} = 495$ В, то есть

$$U_{d\text{сред(I)}} = \frac{495}{\pi} (1 + \cos \alpha_p); \quad U_{d\text{сред(II)}} = 2 \frac{495}{\pi} \approx 315,12.$$

Среднее значение выпрямленного напряжения на ТЭД во второй зоне возрастает от 315,1 до 630,2 В.

2.2.3 Работа ВИП в 3-й зоне

В 3-й зоне регулирования, питание осуществляется от секций II и III. При направлении ЭДС, показанном стрелкой, ток идет на нагрузку через регулируемое плечо 3 и от вывода между II и III секциями через плечо 5 (открытое с задержкой по фазе α_{03}), и возвращается через открытое плечо 8. При обратном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 7, через нагрузку и затем возвращается через регулируемое плечо 4 и через плечо 6, имеющее задержку по фазе.

На рисунке 2.8 представлен фрагмент результатов компьютерного моделирования работы *ВИП* при отклонении рукоятки контроллера машиниста $\varphi_{\text{KM}} = 56,25^\circ$ и при значении угла отпирания тиристорov $\alpha_p = 90^\circ$.

Среднее значение выпрямленного напряжения в 3-й зоне имеет вид

$$U_{d\text{сред}} = U_{d\text{сред(II)}} + U_{d\text{сред(III)}}; \quad (2.26)$$

$$U_{d\text{сред(II)}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_p}^{\pi} U_{M2(\text{II})} \sin \varphi d\varphi = \frac{U_{M2(\text{II})}}{\pi} (-\cos \varphi) \Big|_{\alpha_p}^{\pi} = \frac{U_{M2(\text{II})}}{\pi} (1 + \cos \alpha_p);$$

$$U_{d\text{сред(III)}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{M2(\text{III})} \sin \varphi d\varphi = \frac{U_{M2(\text{III})}}{\pi} (-\cos \varphi) \Big|_0^{\pi} = 2 \frac{U_{M2(\text{III})}}{\pi}.$$

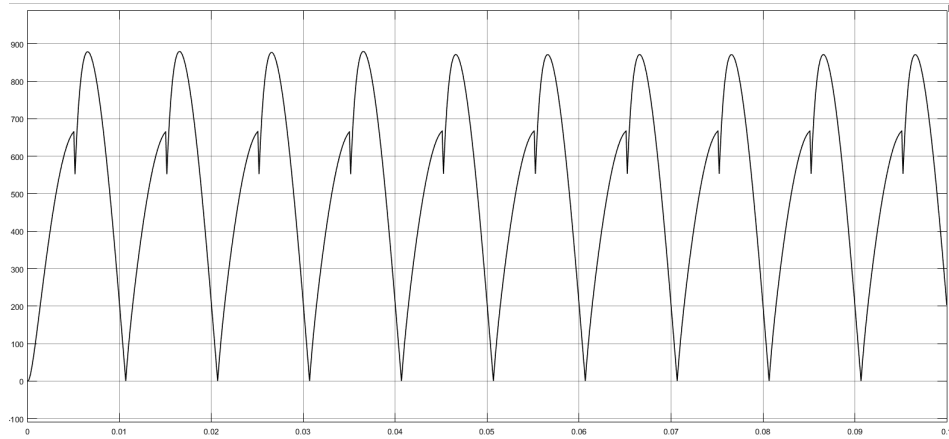


Рисунок 2.8 – Вид напряжения на выходе ВИП при работе в 3-й зоне ($\alpha_p = 90^\circ$)

Среднее значение выпрямленного напряжения на ТЭД при работе в третьей зоне возрастает от 630 до 945 В.

2.2.4 Работа ВИП в 4-й зоне

В 4-й зоне регулирования питание осуществляется от всех трех секций: I (регулируется) и II, III (полностью открыты). При направлении ЭДС, показанном стрелкой, ток идет на нагрузку через регулируемое плечо 1 и от отпайки между I и II секциями через плечо 3 (открытое с задержкой по фазе α_{03}), и возвращается через открытое плечо 8. При обратном направлении ЭДС ток проходит через открытое плечо 7, через нагрузку и затем возвращается через регулируемое плечо 2 и через плечо 4, имеющее задержку по фазе.

На рисунке 2.9 представлен фрагмент результатов компьютерного моделирования работы ВИП при отклонении рукоятки контроллера машиниста $\varphi_{\text{KM}} = 78,75^\circ$ и значении угла отпирания тиристорov $\alpha_p = 90^\circ$.

Среднее значение выпрямленного напряжения в 4-й зоне имеет вид

$$U_{d\text{сред}} = U_{d\text{сред(I)}} + U_{d\text{сред(II)}} + U_{d\text{сред(III)}}. \quad (2.27)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения на ТЭД при работе в 4-й зоне возрастает от 945 до 1260 В.

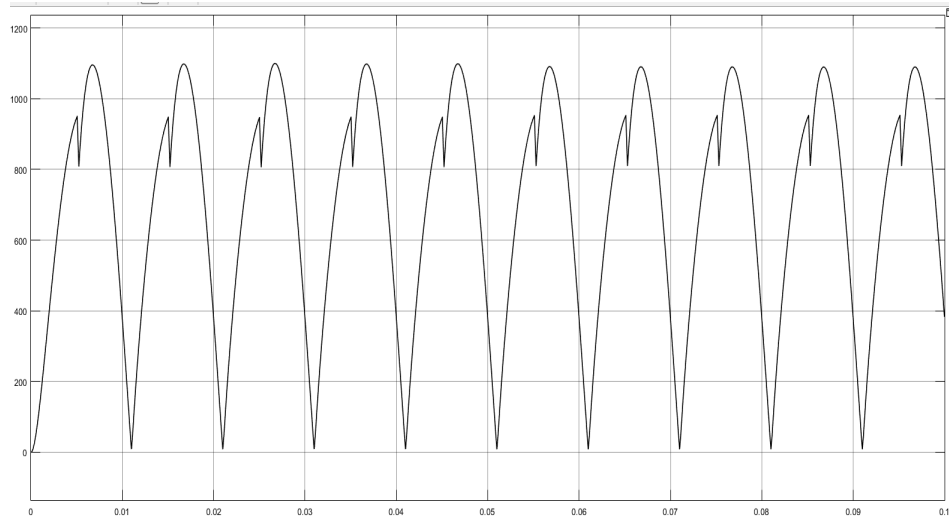


Рисунок 2.9 – Вид напряжения на выходе ВИП в 4-й зоне ($\alpha_p = 90^\circ$)

Результаты моделирования работы *ВИП* во всем диапазоне регулирования напряжения представлены ниже на рисунке 2.10. Видим, что напряжение $U \approx 1000$ В достигается при отклонении рукоятки КМ на угол $\varphi_{\text{км}} \approx 75^\circ$.

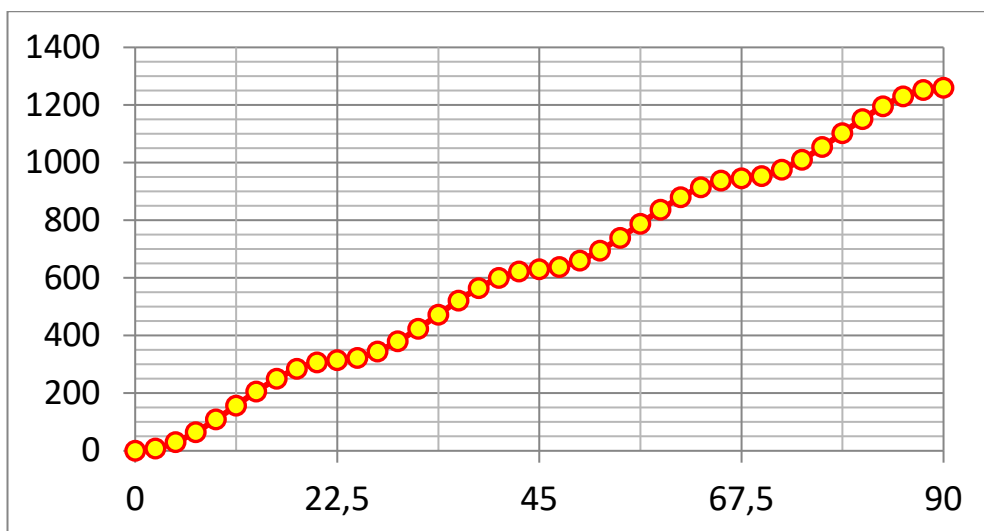


Рисунок 2.10 – Изменение среднего значения выпрямленного напряжения $U_{d\text{сред}}$, В, подаваемого на ТЭД, в зависимости от управляющего воздействия машиниста (от угла отклонения рукоятки КМ, градусов) при $\alpha_p = 180^\circ$

2.2.5 Энергетическая эффективность сглаживающего реактора

Сглаживающий реактор предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи тягового двигателя. Технические характеристики приведены в [2.1]. Потери в сглаживающем реакторе пропорциональны квадрату тока нагрузки I_d .

Общее качественное представление о характере изменения напряжения в цепи $ТТ - ВПП - СР$ дает рисунок 2.11.

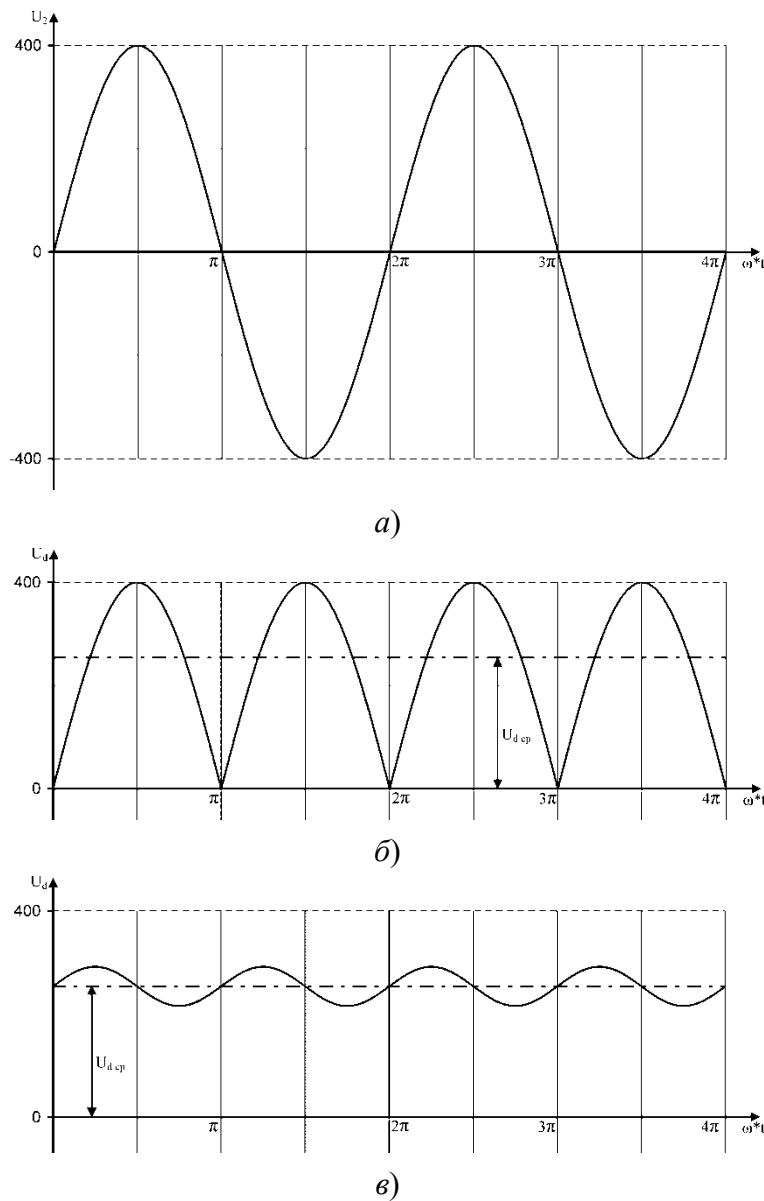


Рисунок 2.11 – Характер изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора (а), напряжения на выходе ВПП (б) и напряжения, подаваемого на ТЭД после сглаживающего реактора (в)

В [2.9] принят подход, заключающийся в том, что рассматривается совместный коэффициент полезного действия выпрямительной цепи «трансформатор – преобразователь на силовых полупроводниковых приборах – сглаживающий реактор» с учетом работы вспомогательных устройств (система охлаждения, устройства защиты и система управления).

На рисунке 2.12, взятом из [2.9], показан общий характер зависимости КПД выпрямительной цепи от тока нагрузки I_d (а) и зависимость КПД от уровня выпрямленного напряжения U_{d0} для диодных и тиристорных выпрямителей (б).

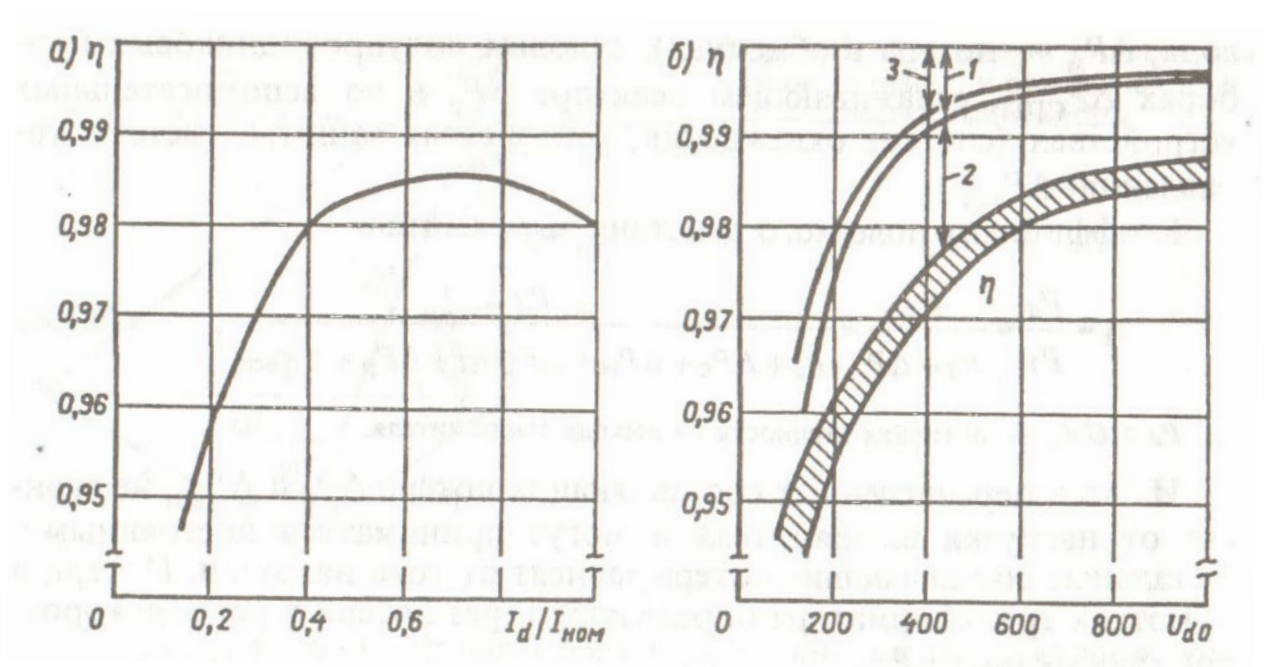


Рисунок 2.12 – Графики КПД выпрямительной цепи:

1 – потери в тиристорах; 2 – потери в трансформаторе; 3 – потери в диодах

Видим, что характер изменения КПД выпрямительной цепи в принципе такой же, как и для отдельно взятого трансформатора (смотри выше рисунок 2.4): по мере возрастания нагрузки, КПД также возрастает, достигает максимума, а затем плавно убывает.

2.3 Энергетическая эффективность тягового электродвигателя серии НБ-514 в зависимости от нагрузки

Тяговый электродвигатель является ключевым элементом тяговой системы. Он представляет собой электромеханический преобразователь, на вход которого поступает электрическая мощность $P_1 = P_{эл}$, тогда как на выходе получаем механическую мощность $P_2 = P_{мех}$, которая затем передается на колесную пару и приводит в движение электровоз и весь поезд. В процессе преобразования, часть потребляемой мощности ΔP (потери) расходуется непроизводительно, а именно, на нагрев проводников и других элементов конструкции двигателя, преодоление трения в подшипниках, и прочее. Изучению процессов, протекающих в тяговых электродвигателях, посвящено значительное количество публикаций [2.10 -2.20] и другие.

Поставим задачу расчетного определения КПД тягового электродвигателя в зависимости не только от значения его полезной мощности P_2 , как это принято в других публикациях, но и в зависимости от значения мощности потребляемой P_1 . Такая постановка вопроса связана с тем, что при реализации алгоритма дискретно-адаптивного управления [1.26] в процессе модернизации электровоза при заводском ремонте, получение мгновенного значения полезной мощности P_2 вызывает существенные затруднения, так как требует установки на электровоз дополнительного оборудования (датчики момента на каждом ТЭД). В то же время, определение мгновенного значения потребляемой двигателем электрической мощности P_1 не вызывает затруднений, так как значения тока и напряжения каждого ТЭД поступают в МСУД в штатном варианте комплектации электроники.

Всё это должно быть выполнено совместно с компьютерным моделированием динамических электромеханических процессов, протекающих в силовых цепях.

В настоящем разделе, опираясь на публикацию [2.21], представлено решение поставленной задачи применительно к коллекторному тяговому электродвигателю НБ-514, полученное путем компьютерного моделирования в программной среде SimInTech [2.8] с последующим сопоставлением с результатами квалификационных испытаний двигателя.

2.3.1 Конструкция и основные параметры тягового электродвигателя НБ-514

Тяговые двигатели пульсирующего тока серии НБ-514 представляют собой дальнейшее развитие конструкции двигателя НБ-418К, в разработке которого принимал участие член-корреспондент АН СССР А.Е. Алексеев, один из основоположников тягового электромашиностроения в нашей стране.

Двигатель НБ-514Е, в отличие от других модификаций, имеет моторно-осевые подшипники качения (рисунок 2.13). В настоящее время он устанавливается на грузовые электровозы семейства «Ермак».

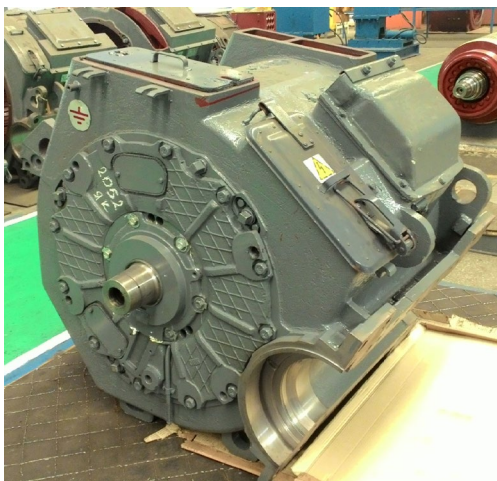


Рисунок 2.13 – Тяговый двигатель НБ-514Е (слева) и колесно-моторный блок с подшипниками качения (справа)

Тяговый двигатель выполнен для опорно-осевого подвешивания и представляет собой шестиполюсную компенсированную электрическую ма-

шину, работающую в режиме тяги как двигатель с последовательным возбуждением, а в режиме электрического рекуперативного торможения – как генератор с независимым регулируемым возбуждением, и независимой системой вентиляции. Основные технические характеристики тяговых двигателей НБ-514Е представлены в таблице 2.4.

Схема электрическая соединений полюсных катушек тяговых двигателей НБ-514Е приведена на рисунке 2.14.

Электромеханические характеристики двигателя НБ-514Е, построенные при питании постоянным напряжением 1000 В, показаны на рисунке 2.15, где приведены кривые:

- частоты вращения n , об/мин,
- вращающего момента M , Н·м ,
- КПД двигателя η ,

в зависимости от тока якоря I_a для различных значений степени возбуждения.

Здесь же даны кривые отношения напряжения к частоте вращения U/n , E/n в зависимости от тока возбуждения I_b для различных значений тока якоря I_a .

Таблица 2.4 – Технические характеристики ТЭД НБ-514Е

Наименование показателя	Значение	
	часовой	продолжительный
Номинальный режим работы		
Номинальная мощность, кВт	820	765
Номинальное напряжение, В	1000	
Номинальный ток якоря, А	870	810
Номинальная частота вращения, об/мин	920	940
КПД, %	94,25	94,7
Расход вентилирующего воздуха при полном напоре 620 Па, не менее, м ³ /мин	70	
Класс изоляции: якорь/остов	F/F	
Сопrotивление обмоток постоянному току при температуре плюс 20°С, Ом:		
- якоря	0,0112±0,000560	
- главных полюсов (без шунта)	0,0069±0,000345	
- компенсационной и добавочных полюсов	0,0125±0,000625	
Масса двигателя НБ-514Б (без зубчатой передачи), кг	4300	
Масса двигателя НБ-514Е (без зубчатой передачи), кг	4350	

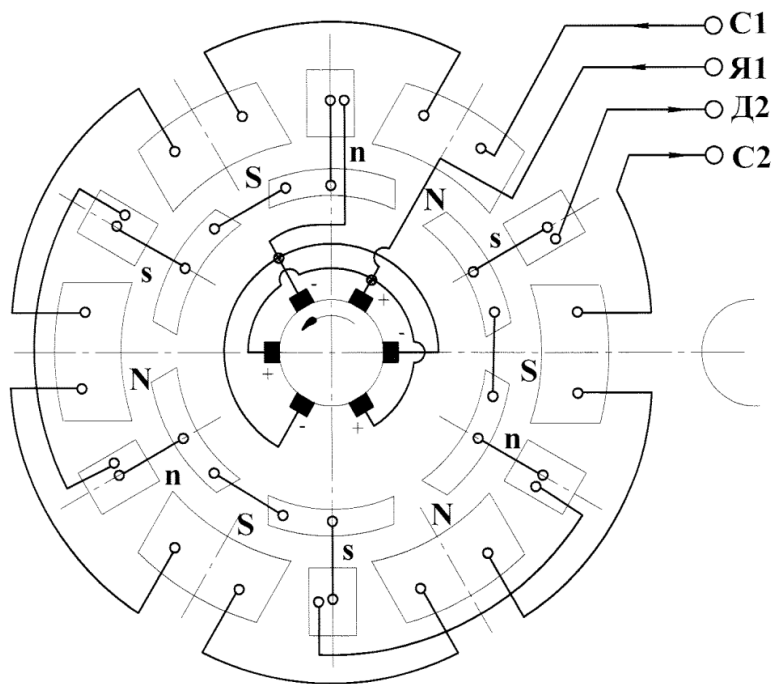


Рисунок 2.14 – Схема электрическая соединений полюсных катушек тягового двигателя НБ-514Е

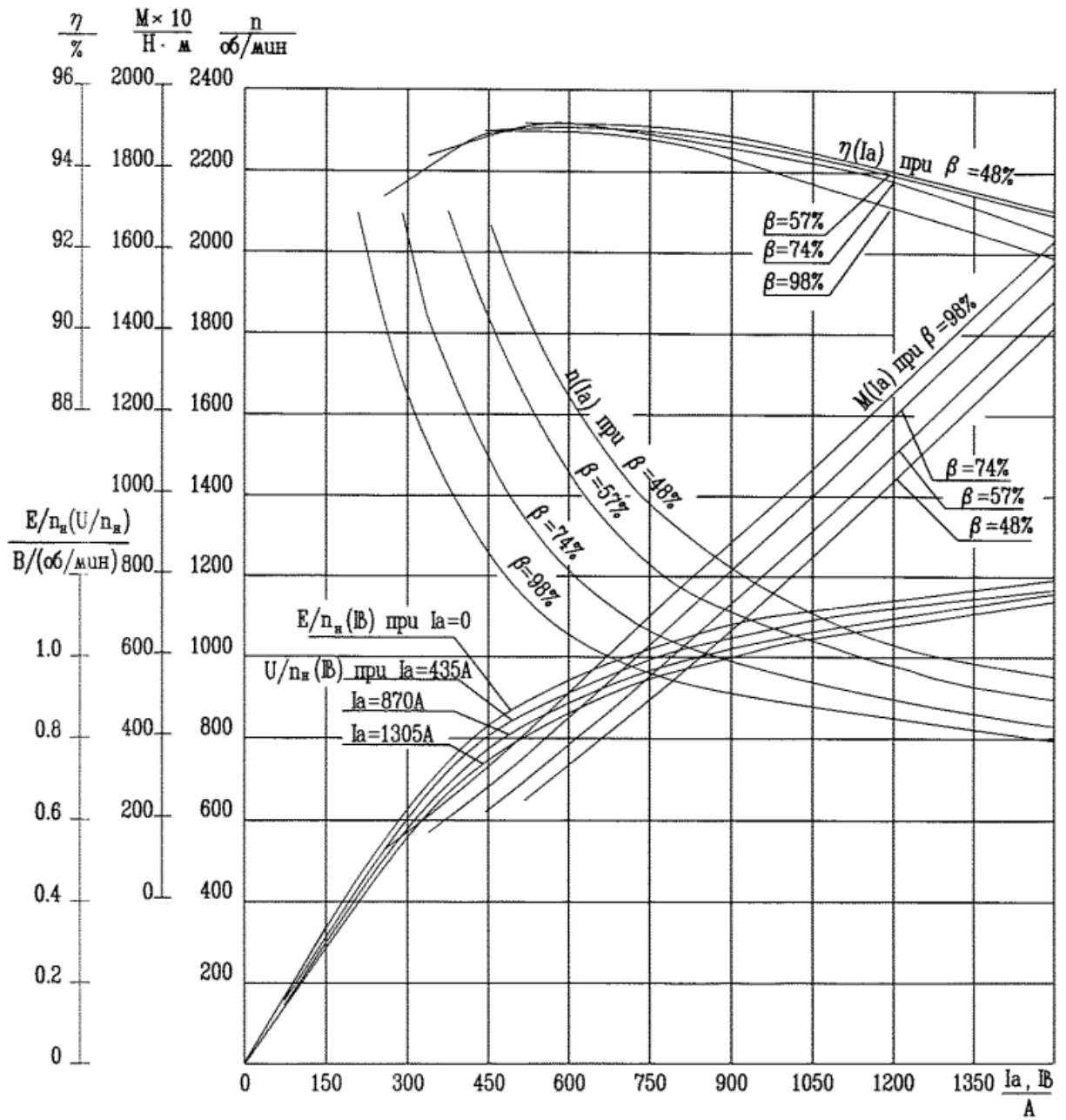


Рисунок 2.15 – Зависимость частоты вращения, вращающего момента, КПД на валу двигателя НБ-514Е от тока якоря и зависимость отношения напряжения якоря к частоте вращения от тока возбуждения

2.3.2 Уравнения процессов в электрических цепях

Схема замещения ТЭД НБ-514Е показана на рисунке 2.16. На схеме приняты следующие обозначения:

$L_{я}, R_{я}$ – индуктивность и сопротивление якорной цепи;

$L_{в}, R_{в}$ – индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения;

$L_{оп}, R_{оп}$ – индуктивность и сопротивление цепи ослабления поля;

$R_{пш}$ – сопротивление постоянной шунтировки;

u – питающее напряжение;

$i_{я}$ – ток в якорной цепи;

$i_{в}$ – ток в обмотке возбуждения;

$i_{пш}$ – ток в цепи резистора постоянной шунтировки;

$i_{оп}$ – ток в цепи ослабления поля;

E – противо-ЭДС якоря;

k – ключ (изменение степени ослабления поля).

Включение цепи ослабления поля учитывается логической переменной k , которая равна 1 или 0 соответственно для включенного и отключенного состояния.

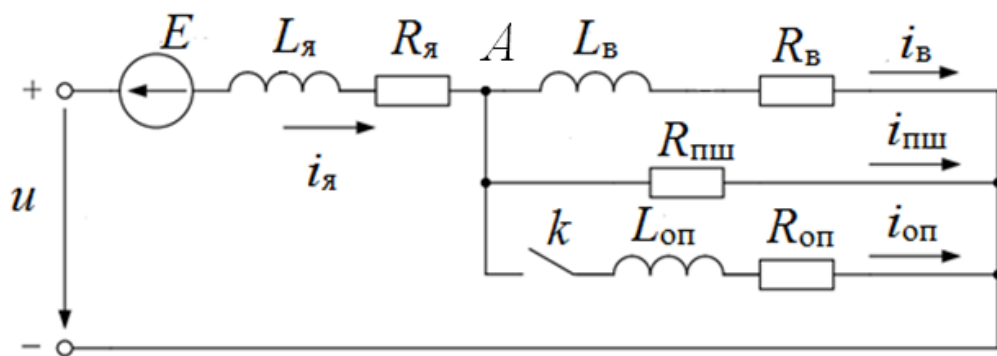


Рисунок 2.16 – Схема замещения тягового двигателя

Значения параметров, необходимые для дальнейшего, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Параметры расчета

Параметр	Выражение	Значение
Число пар главных полюсов	p	3
Число витков обмотки возбуждения	w_B	9
Число проводников обмотки якоря	N	696
Число параллельных ветвей обмотки якоря	$2a$	6
Машинная постоянная, Н·м/(Вб·А)	$C_m = \frac{pN}{2a\pi}$	110,77
Индуктивность якорной цепи, Гн	$L_я$	0,00052
Сопротивление якорной цепи, ДП и КО, Ом (+115°)	$R_я$	0,0331
Индуктивность обмотки возбуждения, Гн	$L_B = 2pw_B \frac{d\Phi(i_B)}{di_B}$	$54 \frac{d\Phi(i_B)}{di_B}$
Сопротивление обмотки возбуждения, Ом (+115°)	$R_в$	0,00992
Сопротивление постоянной шунтировки, Ом (+115°)	$R_{пш}$	0,474
Индуктивность цепи ослабления поля, Гн	$L_{оп}$	0,0022
Сопротивление цепи ослабления поля, Ом	$R_{оп}$	0,0039 0,017 0,058

Перейдем к получению системы уравнений, описывающих динамику электромеханических процессов. Она состоит из уравнений, вытекающих из первого и второго правил Кирхгофа, и дифференциального уравнения вращения якоря.

Из рассмотрения узла A на схеме рисунка 2.16, согласно первому правилу Кирхгофа (алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в каждом узле цепи, равна нулю), имеем при полном поле (когда ключ k разомкнут):

$$i_я = i_в + i_{пш}. \quad (2.28)$$

Применяя второе правило Кирхгофа (алгебраическая сумма падений напряжения на элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС, входящих в этот контур) для внешнего контура, получаем

$$u = E + L_я \frac{di_я}{dt} + R_я i_я + L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B. \quad (2.29)$$

Выражение для противо-ЭДС имеет вид

$$E = C_M \Phi(i_\phi) \omega, \quad (2.30)$$

где $\omega = 2\pi n / 60$ – угловая скорость вращения вала двигателя, рад/с;

n – частота вращения якоря, об/мин.

Тогда уравнение (2.29) примет вид

$$u = C_M \Phi(i_B) \omega + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B, \quad (2.31)$$

здесь $\Phi(i_\phi)$ – магнитный поток системы возбуждения, приходящийся на одно полюсное деление, Вб.

Интерполяционный многочлен для кривой намагничивания $\Phi = \Phi(i_B)$ имеет вид (здесь $x = i_B$):

$$\Phi(x) = -1.08481\text{E-}14x^4 + 8.83408\text{E-}11x^3 - 2.19621\text{E-}07x^2 + 2.35897\text{E-}04x. \quad (2.32)$$

Динамическая индуктивность обмотки возбуждения L_B записывается как

$$L_B = 2pw_B \frac{d\Phi(i_B)}{di_B}. \quad (2.33)$$

Интерполяционный многочлен для динамической индуктивности имеет вид (здесь $x = i_B$)

$$L_B(x) = 4.00124\text{E-}17x^5 - 1.56664\text{E-}13x^4 + 2.19272\text{E-}10x^3 - 1.21488\text{E-}07x^2 + 9.49205\text{E-}06x + 1.06627\text{E-}02. \quad (2.34)$$

В установившемся режиме, (2.31) приобретает вид

$$U = C_M \Phi(I_B) \omega + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + R_B I_B. \quad (2.35)$$

Применяя второе правило Кирхгофа для внутреннего замкнутого контура, см. рисунок 2.16, получаем уравнение

$$L_B \frac{di_B}{dt} = R_{\text{пш}} i_{\text{пш}} - R_B i_B. \quad (2.36)$$

Если исходить из (2.31), то потребляемая двигателем мощность будет равна

$$P_1 = ui_{\text{я}} = \left(L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + C_{\text{м}} \Phi(i_{\text{в}}) \omega + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + R_{\text{в}} i_{\text{в}} \right) i_{\text{я}}. \quad (2.37)$$

Для установившегося режима отсюда получаем мощность:

$$P_1 = UI_{\text{я}} = (C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) \omega + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + R_{\text{в}} I_{\text{в}}) I_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) \omega I_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 + R_{\text{в}} I_{\text{я}} I_{\text{в}}. \quad (2.38)$$

Резистор постоянной шунтировки $R_{\text{пш}} = 0,474$ Ом подобран таким образом, что в установившемся режиме $I_{\text{в}} = 0,98 \cdot I_{\text{я}}$; $I_{\text{пш}} = 0,02 \cdot I_{\text{я}}$.

2.3.3 Дифференциальное уравнение вращательного движения якоря

Перейдем к изучению вращательного движения якоря тягового электродвигателя. Случай, когда ТЭД работает в составе многодвигательного тягового электропривода локомотива, который ведет поезд, требует учета дополнительных факторов, которые в этом разделе не рассматриваются.

Кинетическая энергия вращательного движения якоря равна

$$T = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (2.39)$$

здесь ω – угловая скорость вращения якоря, 1/с.

К якорю приложены активный момент двигателя $M_{\text{д}}$ и момент полезной нагрузки $M_{\text{нагр}}$ (вычисляется согласно ПТР как функция скорости, массы и других параметров движения поезда), схема показана на рисунке 2.17.

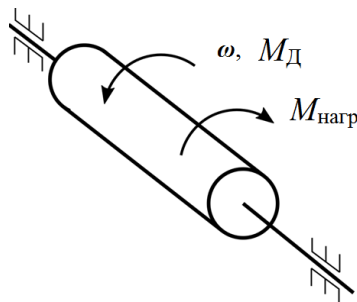


Рисунок 2.17 – Моменты сил, действующие на якорь двигателя

Вращающий момент на валу двигателя $M_{\text{д}}$ равен разности электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$ и момента потерь, приведенного к валу двигателя ΔM^* :

$$M_{\text{д}} = M_{\text{эм}} - \Delta M^*, \quad (2.40)$$

здесь электромагнитный момент на валу ТЭД, Н·м, равен

$$M_{\text{эм}} = C_M \Phi(I_B) I_{\text{я}}, \quad (2.41)$$

а момент потерь, приведенный к валу двигателя $\Delta M^* = \Delta P^*/\omega$ представляет собой уменьшение момента двигателя, обусловленное наличием всякого рода потерь мощности ΔP^* , что будет подробно рассмотрено ниже.

При вращательном движении, мощность момента, действующего на тело, равна произведению этого момента на угловую скорость тела. Согласно теореме об изменении кинетической энергии в дифференциальной форме, производная по времени кинетической энергии якоря равна алгебраической сумме мощностей P_2 и $P_{\text{нагр}}$ моментов $M_{\text{д}}$ и $M_{\text{нагр}}$, приложенных к якорю, то есть

$$\frac{dT}{dt} = P_2 - P_{\text{нагр}} = M_{\text{д}}\omega - M_{\text{нагр}}\omega. \quad (2.42)$$

Из (2.39) и (2.42) получаем

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{д}}\omega - M_{\text{нагр}}\omega,$$

отсюда, с учетом (2.40), получаем дифференциальное уравнение вращения якоря в виде

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{д}} - M_{\text{нагр}} = M_{\text{эм}} - \Delta M^* - M_{\text{нагр}}. \quad (2.43)$$

Из (2.43), согласно (2.41) получаем

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_M \Phi(i_B) i_{\text{я}} - \Delta M^* - M_{\text{нагр}}. \quad (2.44)$$

Полезная мощность двигателя P_2 допускает две формы записи. Во-первых,

$$P_2 = M_{\text{д}}\omega = (M_{\text{эм}} - \Delta M^*)\omega = C_M \Phi(i_B) i_{\text{я}} \omega - \Delta M^* \omega, \quad (2.45)$$

эта формула связывает полезную мощность P_2 с электромеханическими процессами и потерями в двигателе.

Во-вторых, из (2.43) имеем

$$\begin{aligned}
 P_2 &= M_{\text{д}}\omega = \\
 &= \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{нагр}} \right) \omega = J\omega \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{нагр}} \omega = \frac{1}{2} \frac{dT}{dt} + M_{\text{нагр}} \omega. \quad (2.46)
 \end{aligned}$$

2.3.4 Система уравнений электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь

Формула (2.46) связывает полезную мощность P_2 с изменением кинетической энергии вращения якоря и с мощностью внешней нагрузки. Таким образом, уравнения (2.28), (2.31), (2.36) и (2.44) образуют систему, которая описывает электромеханические процессы в динамике с учетом потерь. Напряжение u на клеммах ТЭД задается машинистом посредством КМ и является управляющим воздействием. Искомыми переменными являются угловая скорость ω и токи $i_{\text{я}}$ и $i_{\text{в}}$.

В установившемся режиме, уравнение (2.28) остается прежним, а уравнения (2.31), (2.36), (2.44) приобретают следующий вид

$$U = C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) \omega + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + R_{\text{в}} I_{\text{в}}, \quad (2.31^*)$$

$$R_{\text{в}} I_{\text{в}} = R_{\text{пш}} I_{\text{пш}}, \quad (2.36^*)$$

$$C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) I_{\text{я}} - \Delta M^* = M_{\text{нагр}}. \quad (2.44^*)$$

Полезная мощность двигателя в установившемся режиме согласно (2.45) будет равна

$$P_2 = M_{\text{д}} \omega = (M_{\text{эм}} - \Delta M^*) \omega = (C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) I_{\text{я}} - \Delta M^*) \omega. \quad (2.47)$$

2.3.5 Баланс мощностей тягового электродвигателя

Баланс мощностей может быть записан в следующем виде

$$P_1 = P_2 + \Delta P. \quad (2.48)$$

Для коллекторного тягового электродвигателя потребляемая мощность на входе равна

$$P_1 = u \cdot i_{\text{я}}, \quad (2.49)$$

где u – напряжение на клеммах двигателя,

$i_{\text{я}}$ – ток в цепи якоря (см. схему рисунок 2.16).

С использованием (2.31), представим (2.49) как

$$P_1 = u \cdot i_{\text{я}} = (C_{\text{м}} \Phi(i_{\text{в}}) \omega + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + R_{\text{в}} i_{\text{в}}) \cdot i_{\text{я}}. \quad (2.50)$$

Отсюда при работе в установившемся режиме получаем:

$$P_1 = (C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) \omega + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + R_{\text{в}} I_{\text{в}}) \cdot I_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi(I_{\text{в}}) \omega I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + \beta R_{\text{в}}), \quad (2.51)$$

где $I_{\text{в}} = \beta \cdot I_{\text{я}}$, здесь $\beta = 0,98$.

Выходную мощность P_2 (полезную механическую мощность на валу) в установившемся режиме принимаем согласно (2.47).

Полные потери $\Delta P = P_1 - P_2$ представляются в общем виде как:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}},$$

выражения для составляющих потерь $\Delta P_{\text{эл}}$, $\Delta P_{\text{щ}}$, $\Delta P_{\text{маг}}$, $\Delta P_{\text{мех}}$, $\Delta P_{\text{доб}}$ будут приведены далее в п. 2.3.6. Отметим, что при выполнении приближенных расчетов можно сделать ряд упрощающих предположений.

Исходя из (2.48), (2.51) и (2.47), получаем баланс мощностей в установившемся режиме

$$I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + \beta R_{\text{в}}) = - \Delta M^* \cdot \omega + \Delta P,$$

или же

$$I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + \beta R_{\text{в}}) = - \Delta M^* \cdot \omega + \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (2.52)$$

Выражение в левой части представляет собой электрические потери в меди цепей якоря и возбуждения:

$$\Delta P_{\text{эл}} = I_{\text{я}}^2 (R_{\text{я}} + \beta R_{\text{в}}),$$

поэтому, после приведения подобных слагаемых в (2.52), получаем:

$$\Delta M^* \cdot \omega = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{щ}}.$$

Суммарную мощность этих потерь (правую часть) обозначим как ΔP^* :

$$\Delta P^* = \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{щ}}, \quad (2.53)$$

таким образом, в (2.48) ΔP представим как (смотри также ¹):

$$\Delta P = \Delta P_{\text{эл}} + (\Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}) = \Delta P_{\text{эл}} + \Delta P^*.$$

Получаем момент потерь, приведенный к валу двигателя ΔM^* , который принимает во внимание наличие магнитных, механических и добавочных потерь, в следующем виде:

$$\Delta M^* = \frac{1}{\omega} \Delta P^* = \frac{1}{\omega} (\Delta P_{\text{маг}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{щ}}). \quad (2.54)$$

Для количественной оценки эффективности преобразования энергии используют два основных критерия:

1) коэффициент использования мощности (КИМ), равный

$$\gamma = P_2 / P_{\text{ном}} = (P_1 - \Delta P) / P_{\text{ном}}, \quad (2.55)$$

где $P_{\text{ном}}$ – мощность номинального режима. Будем далее полагать, что $P_{\text{ном}} = P_{\text{час}}$, для двигателя НБ-514Е имеем $P_{\text{час}} = 820$ кВт.

2) коэффициент полезного действия (КПД):

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Delta P) / P_1. \quad (2.56)$$

В работе [2.10] говорится: «кривая КПД электрической машины $\eta = f(P_2)$ сначала быстро растет с увеличением нагрузки, затем КПД достигает максимального значения (обычно при нагрузке, близкой к номинальной) и при больших нагрузках уменьшается. Последнее объясняется тем, что отдельные виды потерь растут быстрее, чем полезная мощность».

Таким образом, КПД тягового электродвигателя существенным образом изменяется в зависимости от величины мощности, реализуемой двигателем. Наша задача теперь состоит в установлении вида этой зависимости, опираясь на полученные выше соотношения.

¹ Вольдек, А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978, с. 147, формула (7-9).

2.3.6 Построение компьютерной модели в среде *SimInTech*

Среда *SimInTech* позволяет осуществить моделирование процессов, протекающих в управляемом динамическом объекте с возможностью одновременной корректировки системы управления, и позволяет повысить качество проектирования алгоритмов управления за счет проверки принимаемых решений на любой стадии проекта [2.8]. Среда *SimInTech* предназначена для детального исследования и анализа нестационарных процессов в электротехнических системах, описание динамики которых может быть представлено в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений и/или реализовано методами структурного моделирования.

На рисунке 2.18 показана компьютерная модель, разработанная согласно полученным выше уравнениям, при помощи которой выполнено исследование электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь. Адекватность модели должна быть подтверждена путем проведения расчетов в условиях, которые были приняты при проведении квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е, проведенных в 2007 году в Испытательном центре тягового электроподвижного состава и электротехнической продукции ОАО ВЭЛНИИ.

В процессе моделирования, в зависимости от напряжения, задаваемого с контроллера машиниста, рассчитываются и отображаются текущие значения тока, частоты вращения, активного момента, мощности и других параметров. Нагрузка определяется через число вагонов в составе поезда, условно приходящееся на один двигатель электровоза.

Модель состоит из следующих блоков:

- а) блок формирования напряжения;
- б) блок формирования момента полезной нагрузки;
- в) блок формирования выходных показателей (мощность, КПД и т.п.).
- г) блок ТЭД (субмодель, будет подробно описана далее).

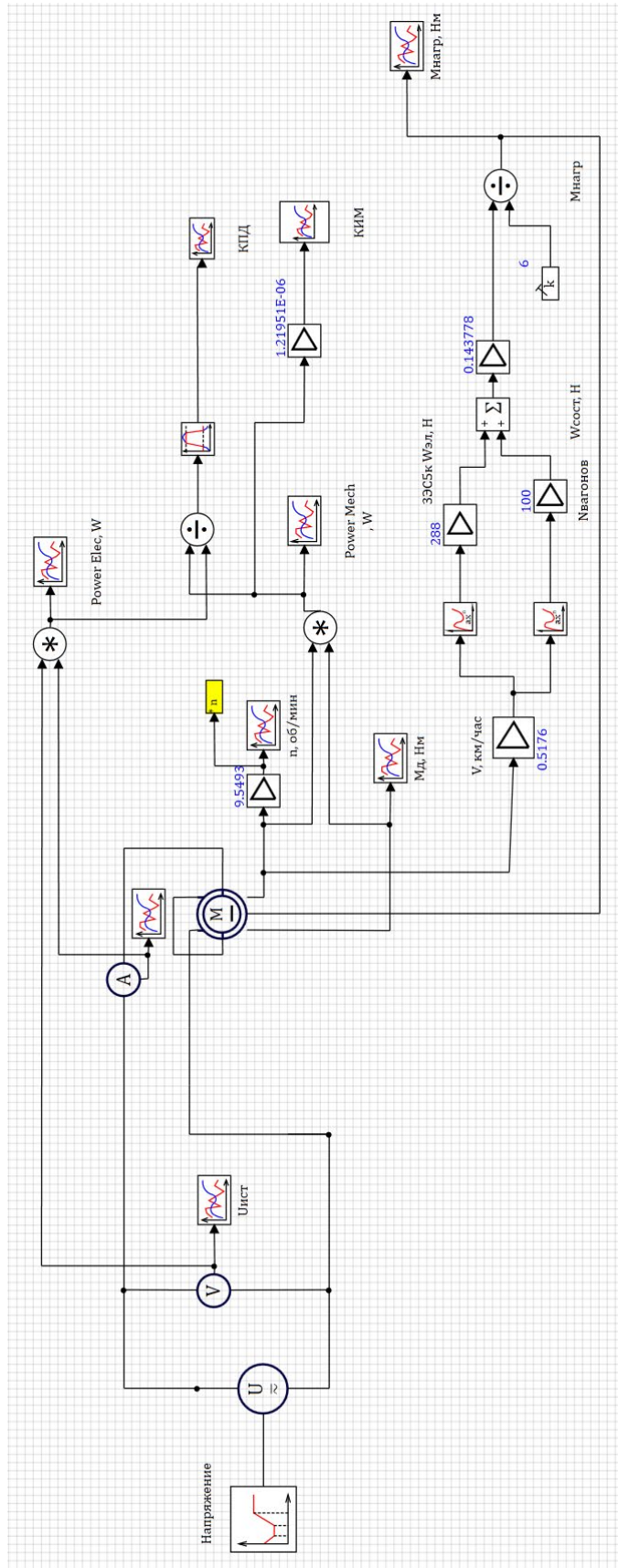


Рисунок 2.18 – Модель для исследования электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь

а) Блок формирования напряжения. Поскольку квалификационные испытания проводились при питании двигателя постоянным напряжением 1000 В, формируем блок из следующих элементов (рисунок 2.18 а):

- «Часы», где на выходе формируется сигнал, численно равный текущему значению модельного времени задачи;
- «Усилитель», где производится умножение (усиление) входной величины (время) на заданный коэффициент усиления $k = 200$;
- «Ограничитель», где реализуется ограничение значения выходной величины, в данном случае 1001 В.
- «Источник напряжения», с параметрами $U_{dc} = 1000$ В, $R = 0,001$ Ом;
- «Вольтметр идеальный», который измеряет мгновенное значение напряжения;
- «Временной график», который отображает текущее значение напряжения в виде графика.

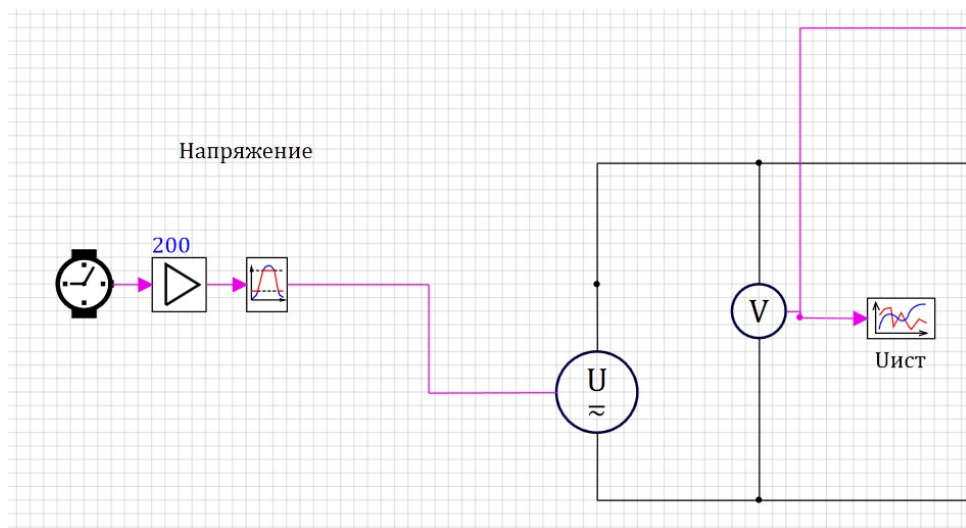


Рисунок 2.18 а – Блок формирования напряжения

В результате работы этого блока напряжение в течение первых 5 секунд моделирования линейно возрастает от 0 до 1000 В и затем остается по-

стоянным. В дальнейшем, этот блок будет видоизменен и позволит регулировать напряжение в режиме реального времени, в зависимости от положения рукоятки контроллера машиниста.

б) Блок формирования момента полезной нагрузки ТЭД. Полагаем, что поезд движется по горизонтальному прямолинейному участку пути. Этот блок состоит из следующих элементов (рисунок 2.18 б):

- «Усилитель», где производится вычисление скорости электровоза V , км/ч, путем умножения входной величины (угловой скорости вращения вала двигателя ω , 1/с, получаемой из субмодели ТЭД) на коэффициент $k = 0,5176$:

$$V = \frac{D_k}{2} \cdot \frac{z_{ш}}{z_k} \cdot 3,6 \cdot \omega = \frac{1,205}{2} \cdot \frac{21}{88} \cdot 3,6 \cdot \omega = 0,5176 \cdot \omega. \quad (2.57)$$

- «Полиномиальная функция» и «Усилитель» для вычисления силы основного сопротивления движению электровоза $W_{эл}$, Н. В соответствии с [2.22] имеем:

$$W_{эл} = m_{эл} \cdot w'_0, \text{ Н},$$

где $m_{эл}$ – масса электровоза в тоннах;

w'_0 , Н/т, – основное удельное сопротивление движению грузовых электровазов «Ермак» (на бесстыковом пути)

$$w'_0 = 6,4 + 0,089V + 0,0022V^2.$$

Получаем для электровоза 3ЭС5к массой 288 тонн

$$W_{эл} = m_{эл} \cdot w'_0 = 288 (6,4 + 0,089V + 0,0022V^2), \text{ Н}. \quad (2.58)$$

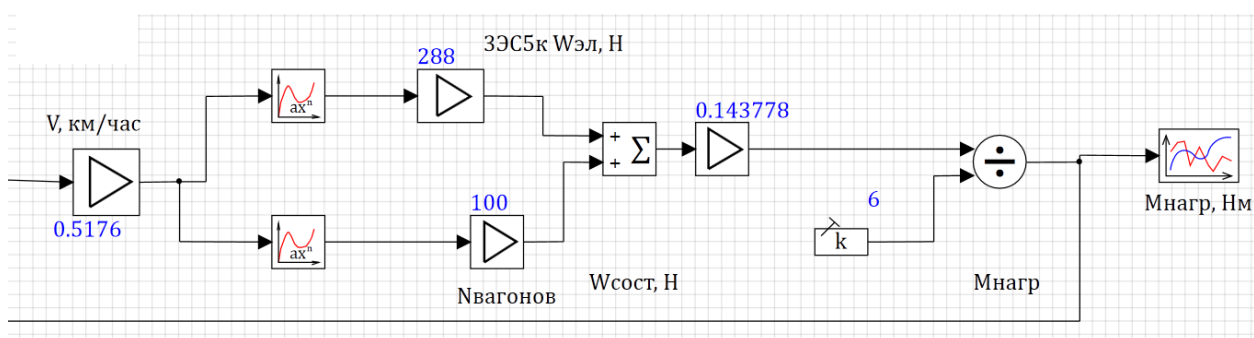


Рисунок 2.18 б – Блок формирования момента полезной нагрузки

- «Полиномиальная функция» и «Усилитель» для вычисления силы основного сопротивления движению состава из N вагонов: $W_{\text{сост}}$, Н. В соответствии с [2.22], запишем основное сопротивление движению четырехосных грузовых вагонов на роликовых подшипниках (в составе поезда) на бесстыковом пути. Основное удельное сопротивление движению вагона w_o'' , Н/т, равно

$$w_o'' = 5,2 + \frac{34,2 + 0,732V + 0,022V^2}{q_o}.$$

где q_o , т – масса, приходящаяся на ось колесной пары. Например, при $m_{\text{ваг}} = 90$ т; имеем $q_o = 22,5$ т.

Основное сопротивление движению одного вагона массой $m_{\text{ваг}}$, т, будет равно

$$W_{\text{ваг}} = m_{\text{ваг}} \cdot w_o'', \text{ Н}.$$

Основное сопротивление состава из N вагонов будет равно

$$W_{\text{сост}} = N \cdot W_{\text{ваг}} = N \cdot m_{\text{ваг}} \cdot w_o'', \text{ Н}.$$

Получаем силу основного сопротивления состава из N вагонов массой по $m_{\text{ваг}}$, т, в виде

$$W_{\text{сост}} = N \cdot m_{\text{ваг}} \cdot \left(5,2 + \frac{34,2 + 0,732V + 0,022V^2}{q_o} \right), \text{ Н}. \quad (2.59)$$

- «Сумматор» выполняет суммирование входных сигналов (2.58) и (2.59) и тем самым формирует основное сопротивление поезда $W_{\text{п}}$:

$$W_{\text{п}} = W_{\text{эл}} + W_{\text{сост}}. \quad (2.60)$$

- «Усилитель» и «Делитель» получают из сумматора значение $W_{\text{п}}$, Н, и формируют момент полезной нагрузки $M_{\text{нагр}}$, Нм, приведенный к оси одного двигателя, при движении со скоростью V , при равенстве силы тяги электроваза $F_{\text{т}}$, которая создается работающими ТЭД (количество которых $N_{\text{ТЭД}}$ определяется значением константы), и силы основного сопротивления $W_{\text{п}}$

$$F_{\text{т}} = N_{\text{ТЭД}} \cdot F_{\text{кп}} = 12 \cdot F_{\text{кп}} = W_{\text{п}},$$

откуда, с учетом соотношений $M_{\text{нагр}} / M_{\text{кп}} = z_{\text{ш}} / z_{\text{к}} = 21/88$ и $F_{\text{кп}} = 2M_{\text{кп}} / D_{\text{к}}$, находим, при $D_{\text{к}} = 1,205$ м:

$$M_{\text{нагр}} = 0,1437784 \cdot W_{\text{п}} / N_{\text{ТЭД}}, \text{ Нм}, \quad (2.61)$$

это значение передается в блок ТЭД (субмодель).

- «Временной график», который отображает текущее значение $M_{\text{нагр}}$ в виде временного графика.

в) Блок формирования выходных показателей. Выходными показателями являются: частота вращения ТЭД; момент на валу ТЭД; механическая мощность на валу ТЭД; коэффициент использования мощности (КИМ); коэффициент полезного действия (КПД).

Блок состоит из следующих элементов (рисунок 2.18 в):

- «Перемножитель», где путем перемножения входных сигналов по напряжению и току вычисляется входная электрическая мощность $P_1 = ui_{\text{я}}$ (2.37) на клеммах ТЭД;

- «Временной график», который отображает текущее значение мощности P_1 в виде временного графика (обозначен как Power Elec, W);

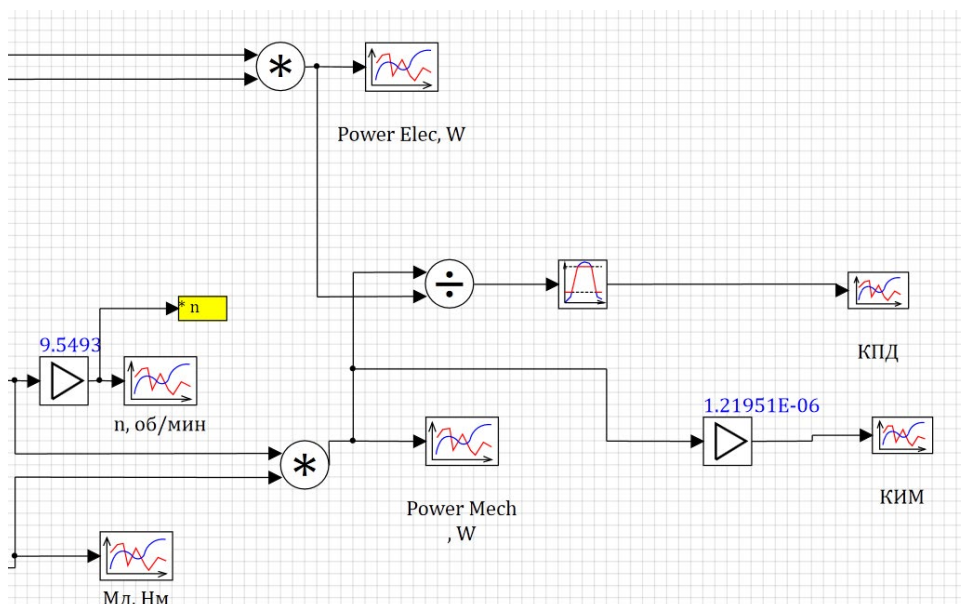


Рисунок 2.18 в – Блок формирования выходных показателей

- «Временной график», который отображает текущее значение момента M_d в виде временного графика (обозначен как M_d , Нм);

- «Перемножитель», где путем перемножения сигналов по угловой скорости вала и вращающего момента вычисляется выходная механическая мощность $P_2 = M_d \omega$ (2.45), на валу ТЭД;

- «Временной график», который отображает текущее значение мощности P_2 в виде временного графика (обозначен как Power Mech, W);

- «Усилитель» получает из субмодели значение угловой скорости ω , 1/с, и формирует частоту вращения $n = 9,5493 \omega$, об/мин;

- «Временной график», который отображает текущее значение n в виде временного графика (обозначен как n , об/мин);

- «Усилитель», который формирует значение КИМ согласно (2.55);

- «Временной график», который отображает текущее значение КИМ в виде временного графика (обозначен как КИМ);

- «Делитель», который формирует значение КПД согласно (2.56);

- «Ограничитель», который ограничивает выходной сигнал в пределах [0; 1];

- «Временной график», который отображает текущее значение КПД в виде временного графика (обозначен как КПД).

з) Блок ТЭД (субмодель) реализует модель двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (рисунок 2.18 з).

Входные порты

a+ – порт электрической связи;

a- – порт электрической связи;

f+ – порт электрической связи;

f- – порт электрической связи;

$M_{нагр}$, Н·м – момент полезной нагрузки.

Выходные порты

ω , 1/с – угловая скорость вращения вала двигателя;

M_d , Н·м – активный момент на валу двигателя.

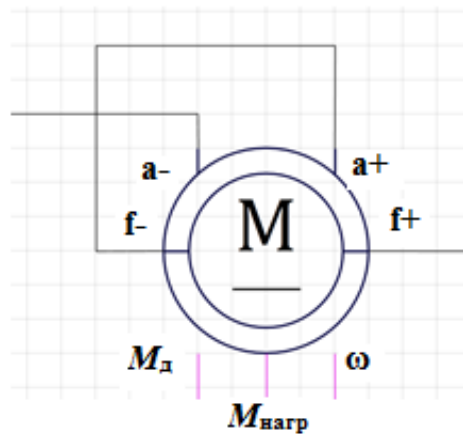


Рисунок 2.18 ε – Входные и выходные порты модели ТЭД при последовательном возбуждении

Субмодель ТЭД для исследования электромеханических процессов с учетом потерь показана на рисунке 2.19, она полностью соответствует схеме замещения, см. рисунок 2.16. Якорная цепь обозначена как (a–, a+), подведено напряжение u , ток i_a , цепь обмотки возбуждения – как (f–, f+), ток i_b .

Перейдем к поэлементному рассмотрению.

Якорная цепь (a–, a+) находится под напряжением u :

- «Идеальная ЭДС», где учитывается воздействие противо-ЭДС якоря;
- «Обобщенная цепь», где L_a и R_a берутся согласно таблице 2.5.

Цепь обмотки возбуждения (f–, f+) находится под напряжением u_b :

- Сопротивление постоянной шунтировки $R_{шш}$, согласно таблице 2.5;
- Сопротивление обмотки возбуждения R_b , согласно таблице 2.5;

- «Индуктивность нелинейная», «Абсолютное значение», «Полиномиальная функция», «Ограничитель», «Sign» и «Перемножение» формируют согласно (2.32) кривую намагничивания как функцию вида $\Phi = \Phi(i_b)$ по опорным точкам, представленным в таблице 2.6. График показан на рисунке 2.20.

Таблица 2.6 – Опорные точки для построения кривой намагничивания

i_b , А	0	200	400	600	800	1000	1200	1400
-----------	---	-----	-----	-----	-----	------	------	------

$\Phi(i_B), \text{Вб}$	0	0,03866	0,0654	0,08	0,0885	0,0938	0,0973	0,1
------------------------	---	---------	--------	------	--------	--------	--------	-----

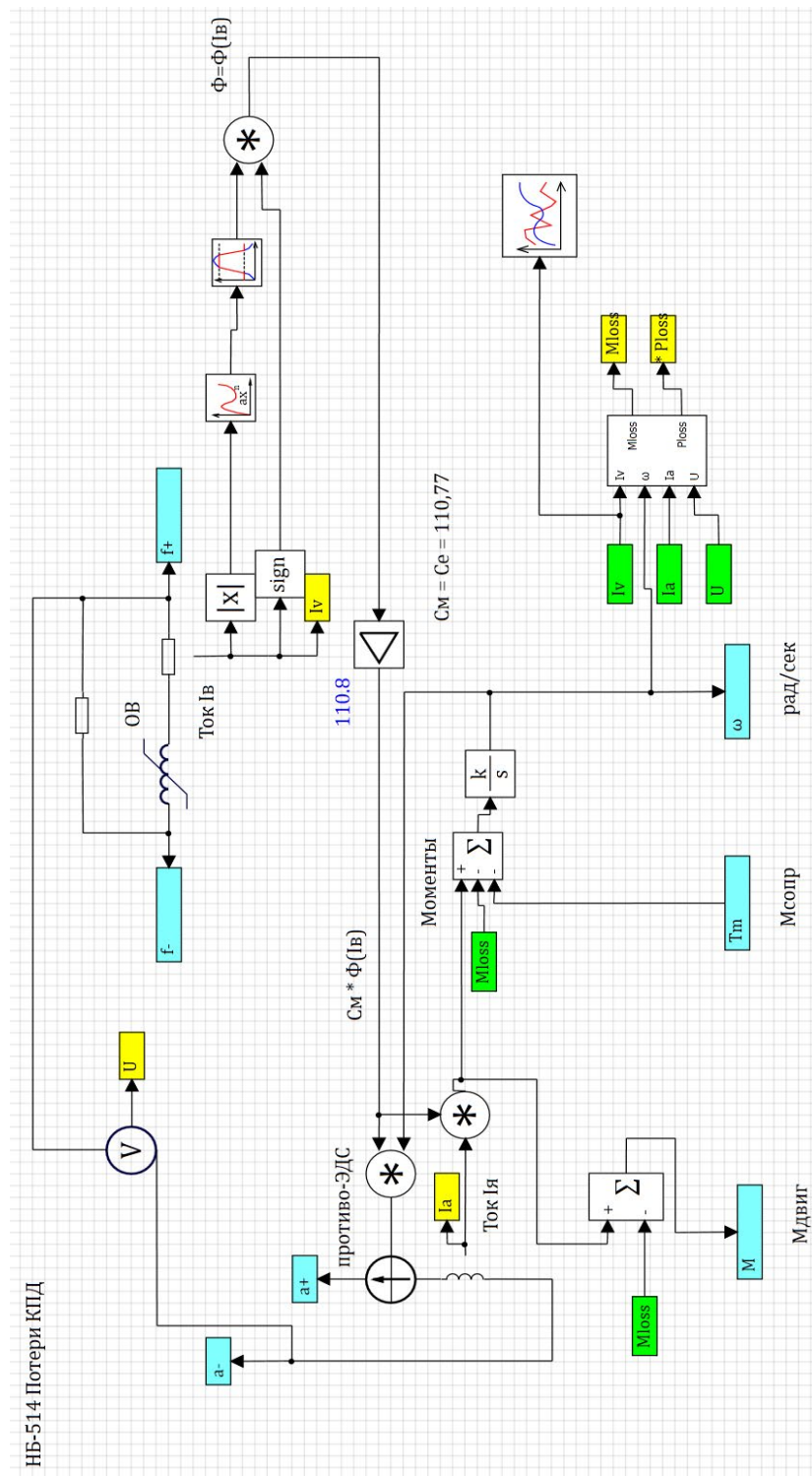


Рисунок 2.19 – Субмодель ТЭД для исследования электромеханических процессов с учетом потерь

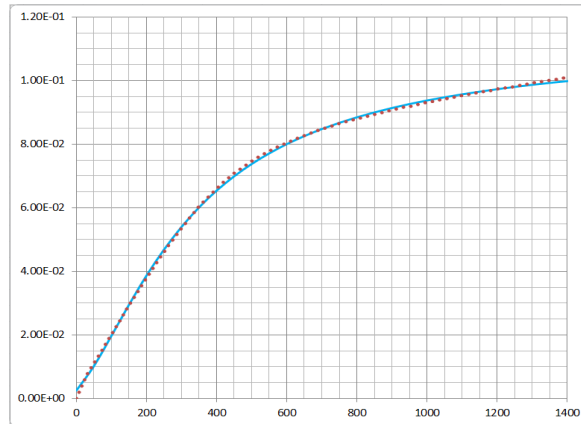


Рисунок 2.20 – Кривая намагничивания:
по горизонтальной оси ток i_B , А; по вертикальной магнитный поток $\Phi(i_B)$, Вб.

- Далее, блок «Усилитель» вычисляет произведение $C_M \cdot \Phi(i_B)$, где машинная постоянная берется из таблицы 2.5;
- Блок «Перемножитель» формирует выражение для противо-ЭДС согласно (2.30);
- Второй блок «Перемножитель» формирует выражение для электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ согласно (2.41).
- В блоке «Субмодель» по формулам (2.53) и (2.54) вычисляются ΔP^* и ΔM^* (обозначены на схеме как P_{loss} и M_{loss}). Расчетные соотношения приняты согласно [2.10 – 2.13] с учетом корректировок, учитывающих результаты квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е.

Магнитные потери ΔP_{mag} возникают в стали и зависят от частоты вращения якоря и величины тока возбуждения. В ходе квалификационных испытаний магнитные потери ΔP_{mag} определялись как разность между потерями холостого хода и механическими потерями для соответствующих значений тока возбуждения I_B и частоты вращения n .

Вычисление магнитных потерь проводилось по формуле

$$\Delta P_{mag}(n, I_B) = I_B \cdot (7 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,006 \cdot n). \quad (2.62)$$

В номинальном (часовом) режиме: $\Delta P_{mag} = 9700$ Вт. При увеличении тока якоря I_A от 255 А (при $n = 1820$ об/мин) до 1551 А (при $n = 780$ об/мин), магнитные потери ΔP_{mag} возрастают от 6000 до 13600 Вт.

Механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ происходят вследствие трения в моторно-якорных подшипниках, наличия в них достаточного количества смазки, правильности установки якоря в буксовых щитах тягового двигателя, трения щеток о коллектор, трения якоря о воздух и т.п. Механические потери с увеличением частоты вращения якоря возрастают.

Интерполяционный полином для нахождения механических потерь:

$$\Delta P_{\text{мех}} = 0,0007 n^2 + 2,1021n. \quad (2.63)$$

В номинальном (часовом) режиме, при $n = 920$ об/мин, $\Delta P_{\text{мех}} = 2526$ Вт. При увеличении частоты вращения от $n = 780$ об/мин до 1820 об/мин, механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ возрастают от 2100 до 6250 Вт.

В ходе испытаний, механические потери определяются при работе двигателя на холостом ходу. На клеммы двигателя подается некоторое постоянное напряжение U , затем после того, как частота вращения установится, измеряются ток якоря $I_{\text{я}}$ и частота вращения n , соответственно, механические потери на холостом ходу будут находиться из соотношения

$$\Delta P_{\text{мех}} = U \cdot I_{\text{я}}.$$

Добавочные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ возникают при работе двигателя под нагрузкой в проводниках обмотки якоря и металлических бандажах, в полюсных наконечниках и др., вследствие большого числа причин сложной физической природы.

При расчетах было принято, что $\Delta P_{\text{доб}}$ равно $0,5\%$ от потребляемой двигателем мощности, то есть

$$\Delta P_{\text{доб}} = 0,005 P_1 = 0,005 U \cdot I_{\text{я}}. \quad (2.64)$$

В номинальном (часовом) режиме: $\Delta P_{\text{доб}} = 4350$ Вт. При увеличении тока якоря $I_{\text{я}}$ от 255 А (при $n = 1820$ об/мин) до 1551 А (при $n = 780$ об/мин), магнитные потери $\Delta P_{\text{доб}}$ возрастают от 1275 до 7755 Вт.

Потери в щеточных контактах $\Delta P_{щ}$ – это произведение тока якоря и падения напряжения (относятся к электрическим потерям), они равны

$$\Delta P_{щ} = I_{я} \cdot \Delta U, \quad (2.65)$$

где $\Delta U = 2$ В согласно ГОСТ 2582-81.

В номинальном (часовом) режиме: $\Delta P_{щ} = 2200$ Вт. При увеличении тока якоря $I_{я}$ от 255 А (при $n = 1820$ об/мин) до 1551 А (при $n = 780$ об/мин), потери в щеточных контактах $\Delta P_{щ}$ возрастают от 510 до 3102 Вт.

- Блок «Сумматор» вычисляет разность электромагнитного момента $M_{эм}$ и момента потерь ΔM^* (2.54), что дает нам активный момент на валу двигателя M_d (2.40).

- Блок «Интегратор k/s» выполняет интегрирование дифференциального уравнения вращения якоря (2.44), в результате чего получаем зависимость $\omega = \omega(t)$. Правая часть дифференциального уравнения формируется в «Сумматоре», момент инерции якоря $J = 85$ кг·м².

Начальные условия следующие: при $t = 0$, $\omega = \omega_0$. Значение ω_0 находится через ожидаемую скорость движения в каждом конкретном случае.

2.3.7 Результаты компьютерного моделирования

Целью первой серии расчетов являлось подтверждение достоверности результатов, полученных путем компьютерного моделирования, путем сравнения с характеристиками, приведенными в технической документации.

На рисунке 2.21 показаны полученные при моделировании графики зависимости частоты вращения n , об/мин, и активного момента M_d , Нм, от тока якоря $I_{я}$, А, при напряжении $U = 1000$ В (полное поле). Сопоставляя данные таблицы 2.4 (техническая документация) и рисунка 2.15, с одной стороны, и результаты компьютерного моделирования с другой, видим их качественное и количественное совпадение. Так, при работе в часовом режиме, имеем практически полную идентичность (таблица 2.7). В частности, значения КПД различаются на 0,15%.

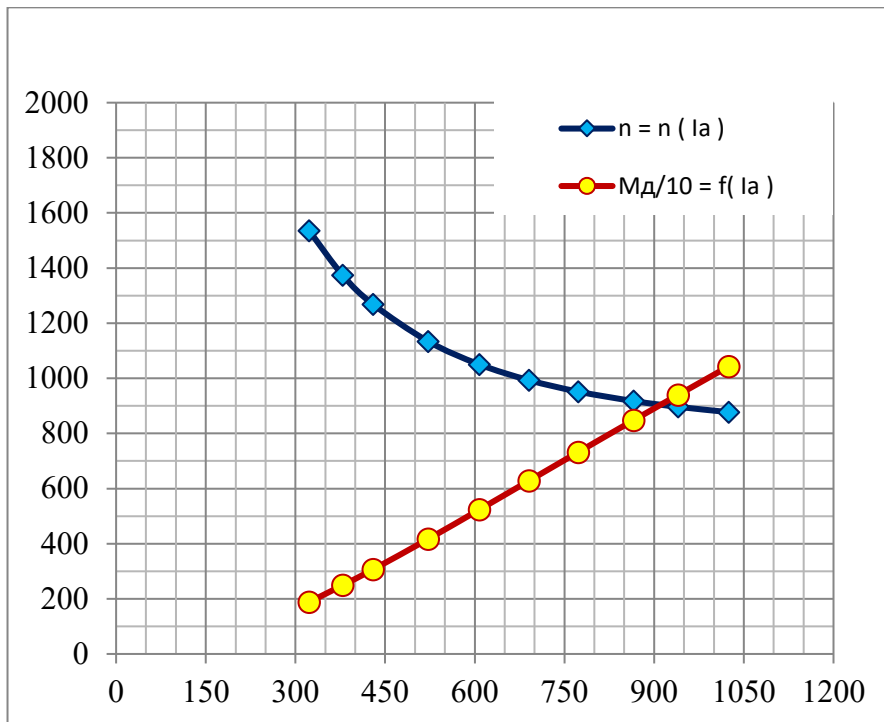


Рисунок 2.21 – Зависимость частоты вращения n и активного момента $M_{д}$ от тока якоря $I_{я}$

Таблица 2.7 – Сопоставление данных технической документации и результатов компьютерного моделирования

$U = 1000$ В	$I_{я}$, А	n , об/мин	ω , 1/с	$M_{д}$, Нм	P_1 , кВт	P_2 , кВт	КПД
Часовой режим (таблица 2.4)	870	920	96,342	8511	870	820	0,9425
Компьютерное моделирование	866	917,37	96,067	8484	866	815,03	0,9411
Относительная погрешность $\Delta_{отн}$, %	0,46	0,29	0,29	0,32	0,46	0,6	0,15

Зависимость КИМ от потребляемой мощности P_1 , кВт, и от полезной мощности P_2 , кВт, показана на рисунке 2.22. Эти зависимости можно представить в следующем виде:

$$\gamma(P_1) = 0,00958 + 0,0011445(P_1 - 11,5783), \quad (2.66)$$

$$\gamma(P_2) = 0,00958 + 0,0012198(P_2 - 7,8568). \quad (2.67)$$

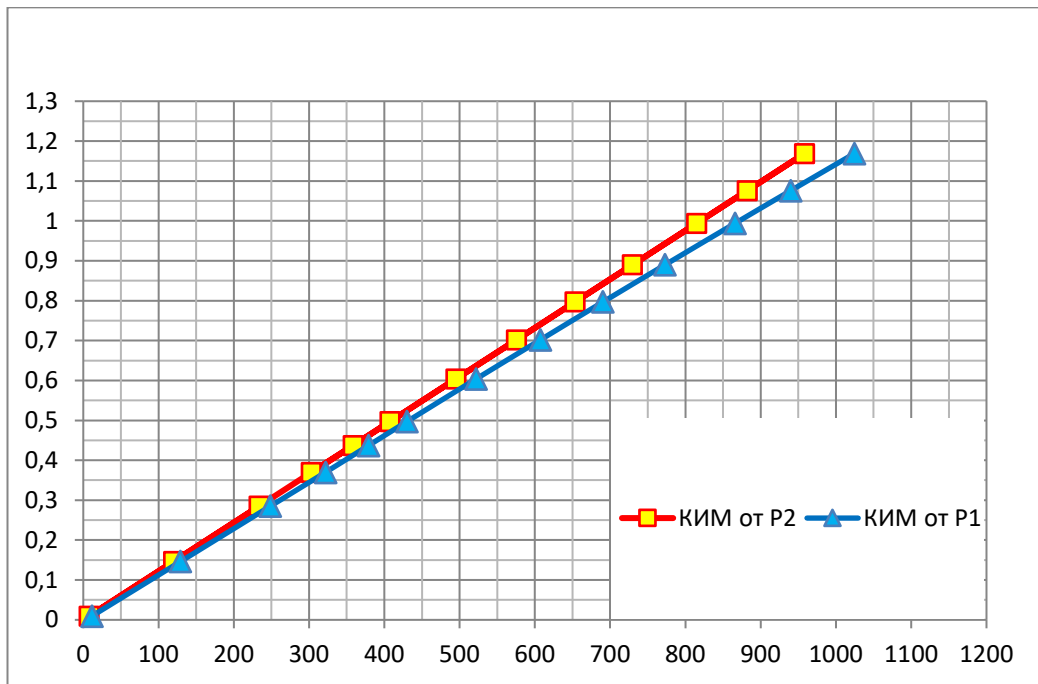


Рисунок 2.22 – Зависимость КИМ от потребляемой мощности P_1 , кВт, и от полезной мощности P_2 , кВт

Далее, были получены зависимости КПД тягового электродвигателя НБ-514Е от потребляемой мощности P_1 (рисунок 2.23) и от полезной мощности P_2 (рисунок 2.24).

Для целей настоящего исследования, основной интерес представляет характер изменения КПД от потребляемой мощности при частичной нагрузке. Поэтому кривая рисунка 2.23 показана на графике с применением логарифмической шкалы (смотри рисунок 2.25).

Обратим особое внимание на тот факт, что на рисунке 2.15 максимальное значение КПД имеет место при токе $I_{я} \approx 550$ А (то есть при мощности ≈ 550 кВт, что составляет 65...70% часовой мощности двигателя, равной 820 кВт), то же самое наблюдаем и на рисунке 2.25.

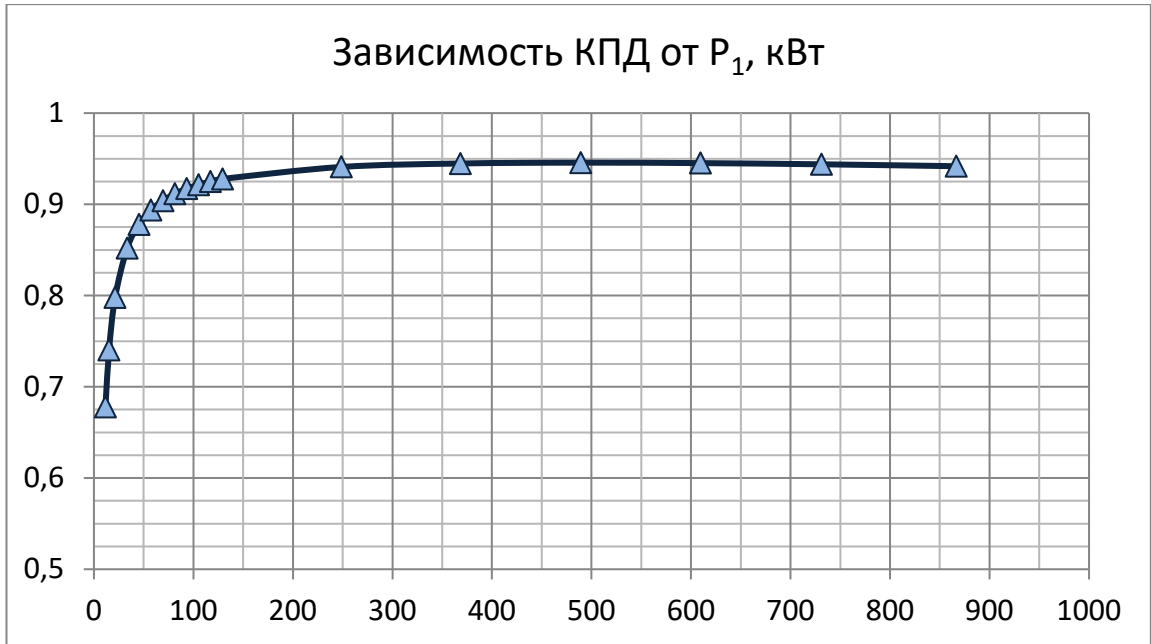


Рисунок 2.23 – Зависимость КПД от потребляемой мощности P_1 , кВт

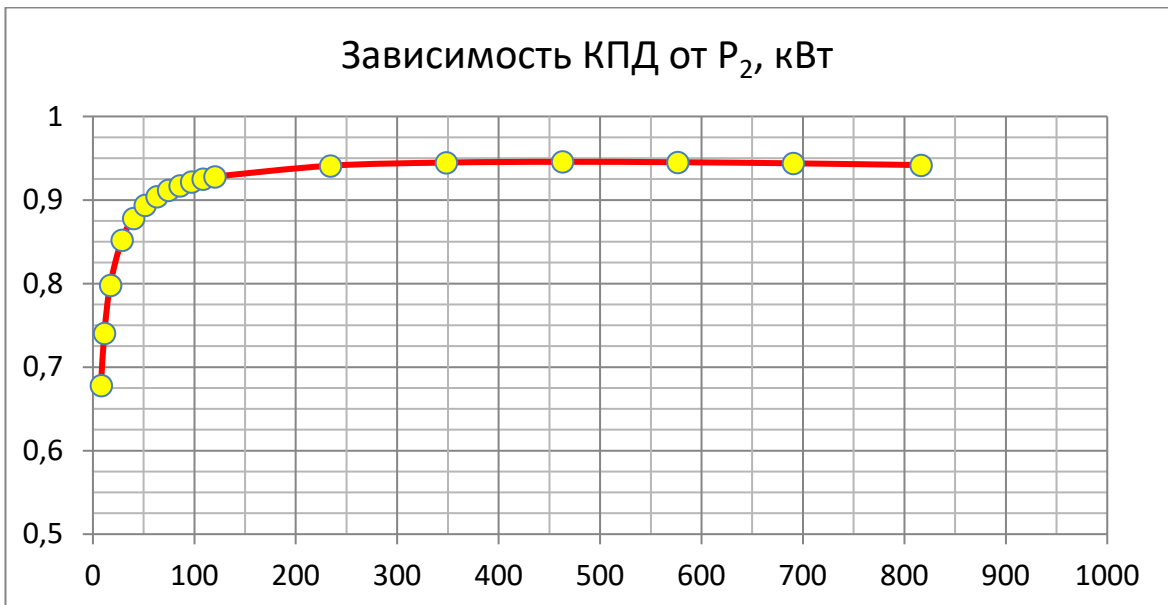


Рисунок 2.24 – Зависимость КПД от полезной мощности P_2 , кВт

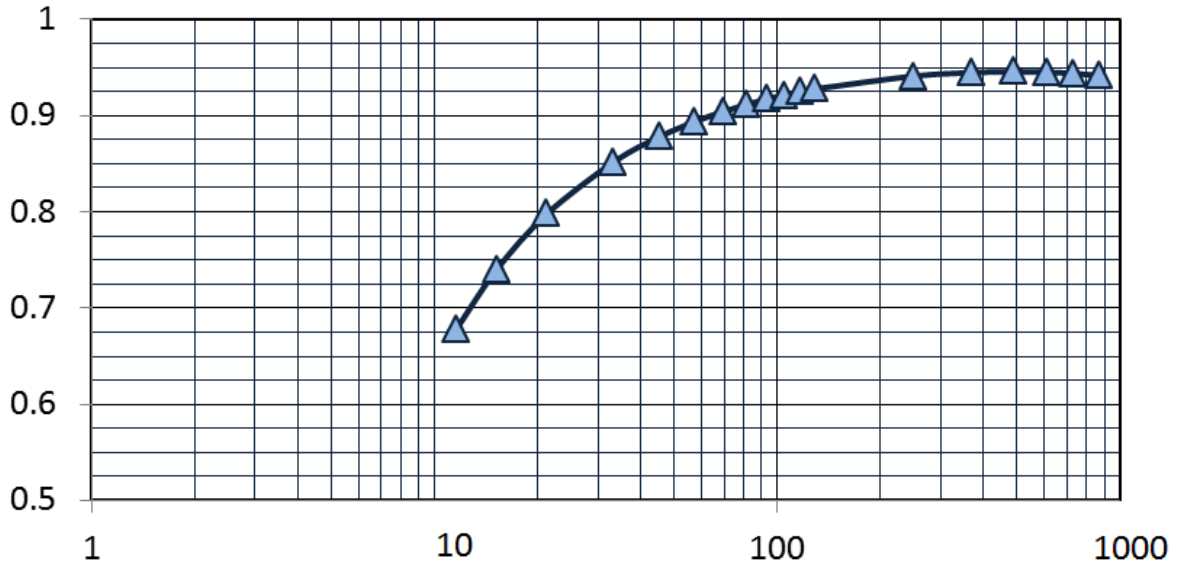


Рисунок 2.25 – Зависимость КПД от потребляемой мощности P_1 , кВт (логарифмическая шкала)

Компьютерное моделирование позволило получить зависимость КИМ двигателя НБ-514Е от величины тока при различных значениях напряжения (режим ПП, 98%), которая показана на рисунке 2.26 (по горизонтальной оси отложен ток, А, по вертикальной – значение КИМ).

Опираясь на рисунок 2.26, энергоэффективное управление многодвигательным тяговым приводом электровоза может быть реализовано следующим образом. В случае, если в данный момент времени значение КИМ электровоза, равное отношению мощности электровоза в данный момент к его номинальной мощности, оказывается меньше 0,45, избыточные ТЭД выводятся из тяги в соответствии с алгоритмом ДАУ [1.5]. В то же время, с точки зрения энергоэффективности, значение КИМ не должно превышать 1,0. Зелёными линиями на рисунке 2.26 отмечены границы КИМ, равные 0,45 и 1,0.

Здесь необходимо особо отметить, что получение исходной информации для вычисления мощности, потребляемой электровозом – значений тока и напряжения на каждом из его тяговых двигателей – не представляет каких-либо затруднений, поскольку они поступают в штатную бортовую систему управления в режиме реального времени (смотри далее главу 4).

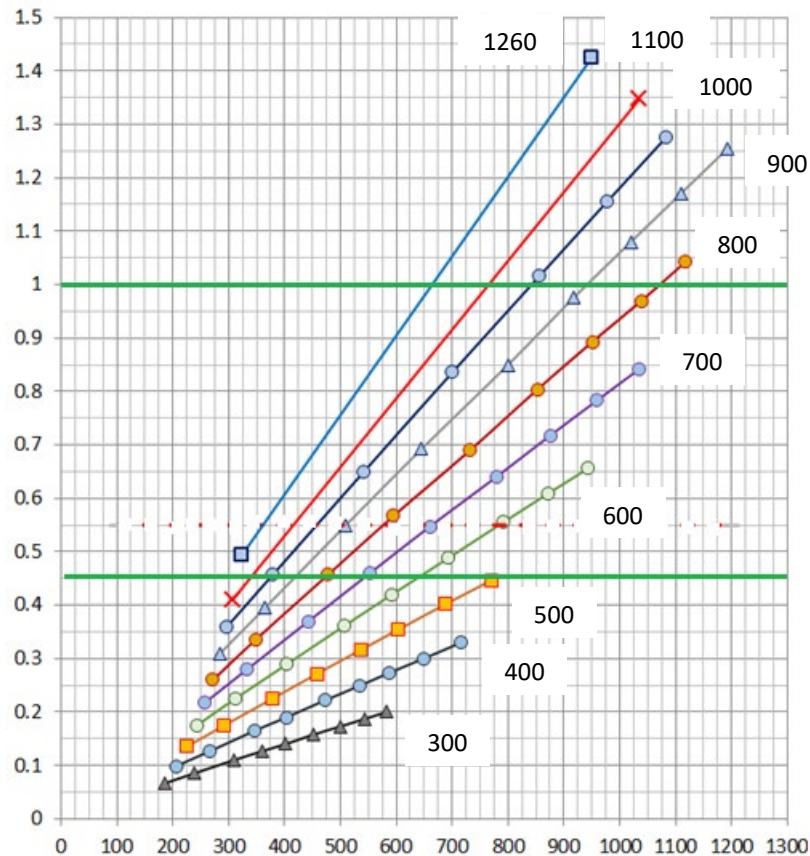


Рисунок 2.26 – Зависимость КИМ двигателя НБ-514Е от силы тока, А, при различных значениях напряжения (режим ПП, 98%):
снизу вверх: 300 – 400 – 500 – 600 – 700 – 800 – 900 – 1000 – 1100 – 1260 В

2.4 Выводы по главе

В настоящей главе выполнено подробное исследование процессов в основных элементах тяговой системы электровозов семейства «Ермак» и получены закономерности изменения энергетической эффективности этих элементов при работе электровоза в различных режимах. Эти закономерности имеют схожий характер. В результате, создана основа для применения алгоритма дискретно-адаптивного управления на электровозах семейства «Ермак». Полученные закономерности получают применение в главе 6.

1. Получена закономерность изменения энергетической эффективности тягового трансформатора в зависимости от нагрузки.

2. Исследованы процессы, протекающие в выпрямительно-инверторном преобразователе и сглаживающем реакторе.

3. Сформированы дифференциально-алгебраические уравнения электромеханических процессов в ТЭД, а также выведено дифференциальное уравнение вращательного движения якоря. Тем самым получена система уравнений электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь.

4. Построен баланс мощностей тягового электродвигателя в динамических и стационарных условиях работы.

5. В пакете программ Simintech, построена компьютерная модель электромеханических процессов, протекающих в ТЭД, с учетом потерь. Достоверность результатов моделирования подтверждена путем сопоставления с данными, приведенными в протоколах квалификационных испытаний ТЭД НБ-514Е.

6. В результате моделирования, найдены закономерности поведения коэффициента использования мощности (КИМ) и коэффициента полезного действия (КПД) двигателя при изменяющейся нагрузке. Важной особенностью является то, что эти закономерности представлены в виде зависимостей от потребляемой мощности, что значительно облегчает реализацию алгоритма ДАУ при модернизации электровозов, так как не потребует установки дополнительного оборудования.

7. Получено, что КПД двигателя достигает максимальных значений при коэффициенте использования мощности в пределах $0,45 \leq \gamma \leq 1,0$. КПД других элементов тягового электропривода также имеют экстремум в этом диапазоне.

3 ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ И СТЕПЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ

В последние годы реализован целый ряд ресурсосберегающих технологий для систем снабжения и преобразования электроэнергии на железнодорожном транспорте [3.1, 3.2]. В целях повышения энергетической эффективности и обеспечения экологической безопасности локомотивов, вопросы использования энергии на железнодорожном транспорте подвергаются всестороннему изучению, ведется поиск новых технологий, разрабатываются новые технические решения.

Тем не менее, все еще имеются значительные возможности для снижения потребления электроэнергии, особенно при работе локомотивов с неполной нагрузкой. Действительно, значительное число грузовых электровозов работают на кольцевых маршрутах. В прямом направлении («туда») локомотив ведет тяжелый поезд весом шесть-семь тысяч тонн и более, при этом используется практически вся его мощность; но в противоположном направлении («обратно») локомотив ведет порожний состав, который весит в три-четыре раза меньше, и поэтому его мощность используется лишь частично. Кроме того, имеет значение тип профиля пути – равнинный, холмистый или горный.

Сказанное выше имеет самое прямое отношение к условиям поездной работы на Северо-Кавказской железной дороге (СКЖД). Экспортные грузы направляются в порты Азово-Черноморского бассейна, а в обратном направлении специализированный подвижной состав, такой как нефтеналивные цистерны, платформы-лесовозы, платформы для перевозки металлопроката в рулонах и т.п., отправляется порожним.

В настоящее время разработаны новые технологии управления многодвигательным тяговым приводом локомотивов [1.26, 1.27], реализация кото-

рых позволяет существенно сократить удельный расход электроэнергии на тягу поездов.

В третьей главе представлен анализ использования установленной мощности и энергопотребления грузовых электровозов при работе в реальных условиях и дано обоснование возможности сокращения расхода электрической энергии на тягу поездов при работе с неполной нагрузкой за счет применения дискретно-адаптивного управления тягой [3.3 – 3.5].

3.1 Условия работы грузовых электровозов на Северо-Кавказской ж.д.

Рассмотрим работу грузовых электровозов на маршруте Лихая – Батаяск – Тимашевская – Крымская – Новороссийск, общая длина которого составляет $S = 568$ км. Схема маршрута показана на рисунке 3.1, спрямленный профиль пути и уклоны – на рисунке 3.2.

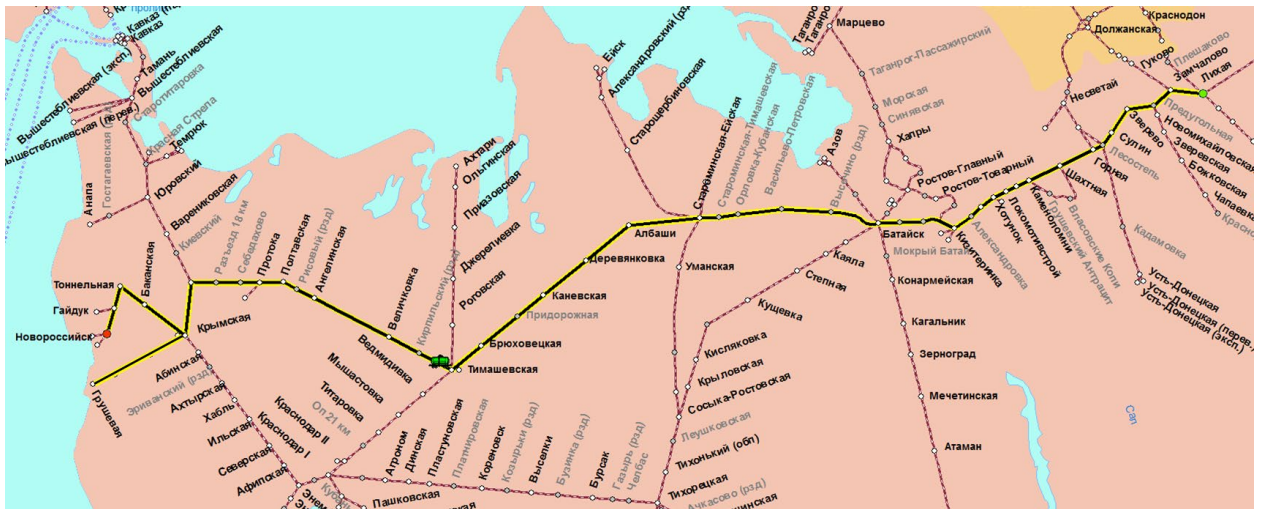


Рисунок 3.1 – Схема маршрута Лихая – Новороссийск

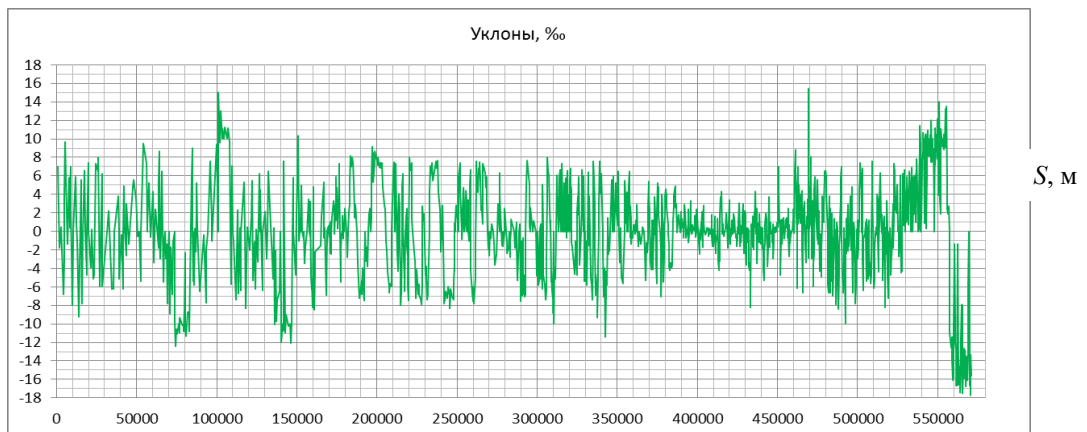
Согласно [3.6], при расчете показателей энергоэффективности электровоза, различают спрямленные профили следующих типов:

- I-II тип, равнинный, с уклонами не более 6 ‰;
- III тип, холмистый, с уклонами до 9 ‰;
- IV тип, горный, с уклонами до 11 ‰ и более.

Как следует из анализа уклонов (рисунок 3.2, б), спрямленный профиль от Лихой до Крымской может быть отнесен к I-II и III типам на протяжении 489 км, исключение составляют 30 км в отрогах Восточного Донбасса. Профиль участка Крымская – Новороссийск относится к IV типу.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Спрямленный профиль, м (а) и уклоны, ‰ (б) маршрута Лихая – Новороссийск

3.2 Оценка энергопотребления

грузовых электровозов при работе в штатном режиме тяги

Перейдем к рассмотрению вопросов, связанных с использованием доступной тяговой мощности электровоза в условиях эксплуатации на СКЖД. Под «штатным режимом» понимается режим, когда все ТЭД постоянно подключены и создают силу тяги. Как будет видно из дальнейшего, при работе

электровоза в реальных условиях эксплуатации его скорость, сила тяги и мощность постоянно изменяются.

3.2.1 Энергопотребление при работе в прямом направлении Батайск – Тимашевская (штатный режим, состав массой 6300 т)

Рассмотрим работу на участке Батайск – Тимашевская. Расстояние равно $S = 197,60$ км, время $\Delta t = 13440$ с = 3,73 ч, средняя скорость $V_{\text{ср}} = 14,7$ м/с = 52,93 км/ч. Макрогеометрия пути соответствует профилю со 157-го по 360-й км, см. рисунки 3.1 и 3.2. Изменение скорости, согласно записям тягово-энергетической лаборатории (ТЭЛ) производства РГУПС, показано на рисунке 3.3.

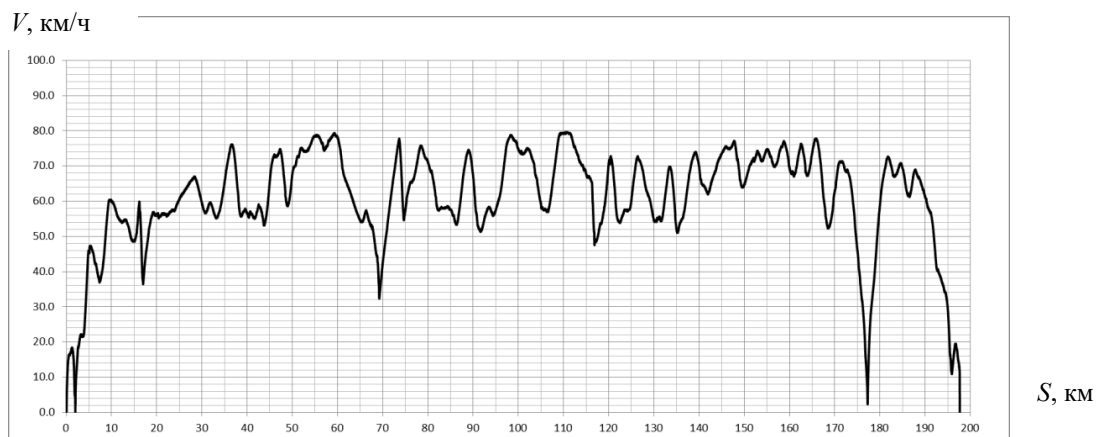


Рисунок 3.3 – Изменение скорости в направлении Батайск – Тимашевская

Компьютерная модель движения поезда была создана в программном комплексе «Универсальный Механизм», модуль «Train» [3.7]. Была разработана модель поезда с трехсекционным электровозом и грузовыми полувагонами, при массе составов 6300 т (груженный) и 1750 т (порожний). По итогам моделирования, исходя из записей скорости движения, полученных ТЭЛ, были определены законы изменения силы тяги F_T и мощности электровоза на

тягу P_T , (то есть была решена прямая задача динамики). Было получено, что основное время поездки электровоз работает в частичных режимах.

Приведём результаты расчетов. Полезную работу на тягу поезда на участке Батайск - Тимашевская получаем путем интегрирования мощности P_T по времени (учитывая только положительные значения P_T), имеем $A_T = 7938$ кВт·ч.

Мгновенное значение коэффициента использования мощности (КИМ) представляет собой отношение мощности P_T , реализуемой локомотивом в данный момент, к его часовой (номинальной) мощности $P_{ном}$:

$$\gamma = P_T / P_{ном} . \quad (3.1)$$

Отметим, что $P_{ном}$ в (3.1) равна произведению часовой мощности одного ТЭД на число работающих двигателей, в данном случае:

$$P_{ном} = P_{ТЭД} \times N_{ТЭД} = 820 \times 12 = 9840 \text{ кВт.}$$

Среднее значение КИМ за поездку $\gamma_{ср}$ представляет собой отношение полезной работы на тягу A_T , совершенной локомотивом за время поездки $\Delta t = 3,73$ ч, к полезной работе $A_{ном}$, которая была бы совершена на номинальной мощности :

$$\gamma_{ср} = A_T / A_{ном} = 0,22, \quad (3.2)$$

здесь $A_T = 7938$ кВт·ч; $A_{ном} = P_{ном} \times \Delta t = 9840 \times 3,73 = 36703$ кВт·ч.

Таким образом, среднее значение КИМ равно 0,22, то есть при работе в штатном режиме доступная мощность электровоза используется в среднем на 22%, что является неудовлетворительным показателем.

Дадим оценку энергопотребления при работе в штатном режиме (6300 т). Опираясь на материалы, приведенные в [3.8, 3.9], был построен график, показывающий зависимость КПД электровоза 1,5ВЛ80С, близкого по своим тяговым характеристикам к ЗЭС5К, от коэффициента использования мощности (КИМ) при работе на различных позициях КМЭ (см. рисунок 1.7).

Как видно из рисунка 1.8, при работе на 33-й позиции (напряжение 1218 В) значение КПД равно $\eta \approx 0,85$ при КИМ в диапазоне 0,55...0,90, тогда как при работе на 13-й позиции (напряжение 493 В) значение КПД достигает всего лишь $\eta \approx 0,68$ при КИМ $\approx 0,35$. Сопоставление напряжения на ТЭД при работе электровоза ВЛ80С на различных позициях КМЭ (ступенчатое регулирование) и при работе электровоза «Ермак» в различных зонах (плавное регулирование) приведено в таблице 1.1.

Согласно (3.2), среднее значение КИМ составляет $\gamma_{\text{ср}} = 0,22$, и по диаграмме рисунка 1.7, при таком $\gamma_{\text{ср}}$ находим среднее значение КПД, равное $\eta_{\text{ср}} \approx 0,7$.

Таким образом, энергия, потребленная из КС на участке Батайск – Тимашевская, составляет

$$E_{\text{потр}} = A_{\text{T}} / \eta_{\text{ср}} = 7938 / 0,7 = 11340 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Удельный расход электроэнергии на этом участке (усредненное значение)

$$a_{\text{ср}} = 11340 / (6300 \cdot 197,6) = 91 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{изм}. \quad (3.3)$$

Полагая, что такой же удельный расход имеет место на протяжении всех 489 км, имеем оценку энергопотребления, равную

$$E_{\text{потр}(489)} = 91 \cdot 6300 \cdot 489 / 10000 = 28034 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (3.4)$$

Сказанное выше справедливо, если все ТЭД электровоза работают в штатном режиме, то есть постоянно – независимо от нагрузки на локомотив в данный момент – находятся в режиме тяги.

3.2.2 Энергопотребление при работе в обратном направлении Тимашевская – Батайск (штатный режим, состав массой 1750 т)

Перейдём к рассмотрению движения порожнего поезда в обратном направлении, из Тимашевской в Батайск. Масса состава 1750 тонн.

Расстояние прежнее, $S = 197,60$ км, время хода $\Delta t = 14174$ с = 3,937 ч, средняя скорость $V_{\text{ср}} = 13,93$ м/с = 50,16 км/ч. На рисунке 3.4 показано изменение скорости электровоза согласно записям ТЭЛ.

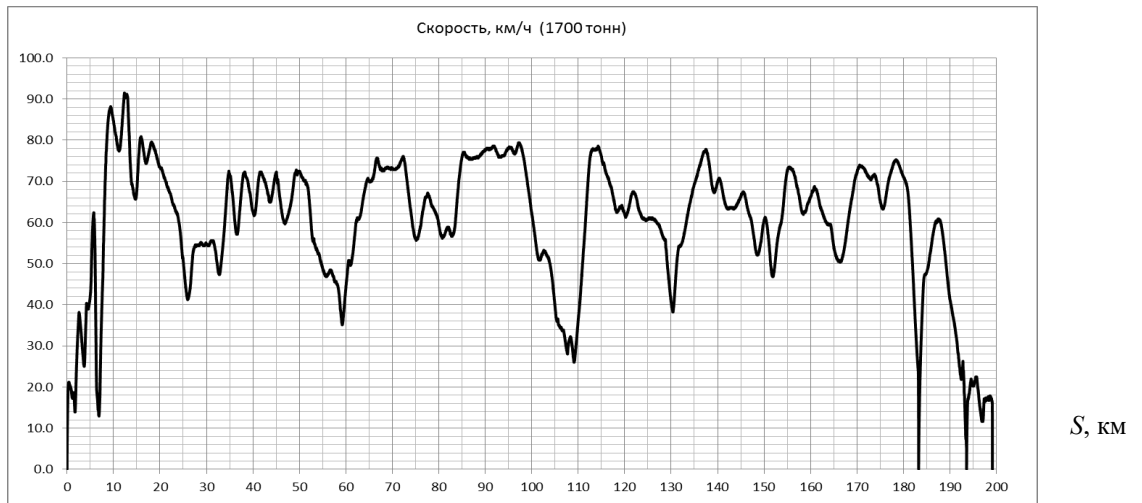


Рисунок 3.4 – Изменение скорости в обратном направлении Тимашевская – Батайск

В результате моделирования были получены законы изменения силы тяги F_T и мощности электровоза на тягу P_T . Полезную работу на тягу поезда на участке Тимашевская – Батайск получаем путем интегрирования мощности P_T по времени (учитывая только положительные значения P_T), имеем $A_T = 4374$ кВт·ч.

Дадим оценку энергопотребления при работе в штатном режиме. Среднее значение КИМ за поездку $\gamma_{\text{ср}}$ будет равно :

$$\gamma_{\text{ср}} = A_T / A_{\text{ном}} = 0,12, \quad (3.5)$$

здесь $A_T = 4374$ кВт·ч; $A_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \times \Delta t = 9840 \times 3,937 = 38740$ кВт·ч.

Видим, что среднее значение КИМ за поездку $\gamma_{\text{ср}}$ равно 0,12, что является крайне неудовлетворительным показателем.

Согласно рисунку 1.7, при $\gamma_{\text{ср}} = 0,12$ значение КПД составляет $\eta_{\text{ср}} \approx 0,56$. Таким образом, энергия, потребленная из КС на участке Тимашевская – Батайск в штатном режиме, составит

$$E_{\text{потр}} = A_T / \eta_{\text{ср}} = 4374 / 0,56 = 7810 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Удельный расход электроэнергии на этом участке

$$a_{\text{ср}} = 7810 / (1750 \cdot 197,6) = 223 \text{ кВт}\cdot\text{ч} / \text{изм.} \quad (3.6)$$

Полагая, что такой же удельный расход имеет место на протяжении 489 км, получаем оценку энергопотребления, равную

$$E_{\text{потр}(489)} = 223 \cdot 1750 \cdot 489 / 10000 = 19083 \text{ кВт}\cdot\text{ч.} \quad (3.7)$$

3.3 Оценка энергопотребления грузовых электровозов при работе в энергоэффективном режиме тяги

Одним из подходов, позволяющих обеспечить высокую энергетическую эффективность при частичных нагрузках, является адаптивное отключение избыточных ТЭД при уменьшении нагрузки, с последующим их возвращением в тягу при её возрастании, так называемое дискретно-адаптивное управление тягой [1.26, 1.27].

3.3.1 Энергопотребление при работе в прямом направлении Батайск – Тимашевская (энергоэффективный режим, состав массой 6300 т)

Исходя из изменения мощности электровоза на тягу в процессе движения, получаем диаграмму, которая показывает, какого количества работающих двигателей $N_{\text{ТЭД}}$ достаточно в каждый момент для тяги поезда в скоростном режиме согласно рисунка 3.3 по мере прохождения участка Батайск – Тимашевская (рисунок 3.5). Видим, что на данном участке количество двигателей $N_{\text{ТЭД}}$, достаточное для обеспечения указанного скоростного режима, изменяется от 1 до 12. Такая возможность изменения $N_{\text{ТЭД}}$ вполне обеспечивается при наличии поосного регулирования силы тяги электровоза.

Тогда доступная мощность электровоза $P_{\text{ном}} = P_{\text{ТЭД}} \times N_{\text{ТЭД}}$ в (3.1) становится переменной величиной, и коэффициент использования мощности увеличивается, что влечет за собой возрастание КПД.

Исходя из полезной работы на тягу $A_T = 7938$ кВт·ч, получаем в энергоэффективном режиме оценку энергопотребления в пересчете на 489 км, равную $E_{\text{потр}(489)\text{ЭЭФ}} = 25381$ кВт·ч, то есть сокращение на 9,5% по сравнению со штатным режимом.

Соответственно, удельный расход при работе в энергоэффективном режиме будет равен 82 кВт·ч / изм (вместо 91 кВт·ч / изм в штатном режиме).

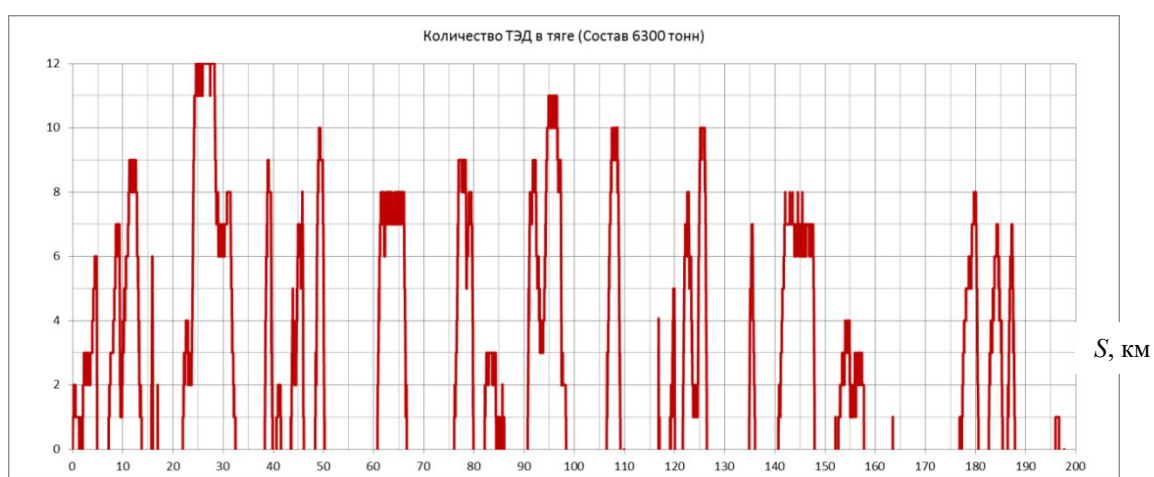


Рисунок 3.5 – Количество работающих двигателей $N_{\text{тэд}}$, достаточное для обеспечения скоростного режима в соответствии с рисунком 3.3

3.3.2 Энергопотребление при работе в обратном направлении Тимашевская – Батайск (энергоэффективный режим, состав массой 1750 т)

На рисунке 3.6 показано, какого количества работающих двигателей $N_{\text{тэд}}$ достаточно для тяги порожнего поезда в скоростном режиме согласно рисунку 3.4 по мере прохождения участка Тимашевская – Батайск.

Исходя из полезной работы на тягу $A_T = 4374$ кВт·ч на участке Тимашевская – Батайск, получаем оценку энергопотребления в энергоэффективном режиме $E_{\text{потр}(489)\text{ЭЭФ}} = 16423$ кВт·ч, то есть сокращение на 14% по сравнению со штатным режимом.

Соответственно, удельный расход при работе в энергоэффективном режиме будет равен 192 кВт·ч / изм (вместо 223 кВт·ч / изм при работе в штатном режиме).

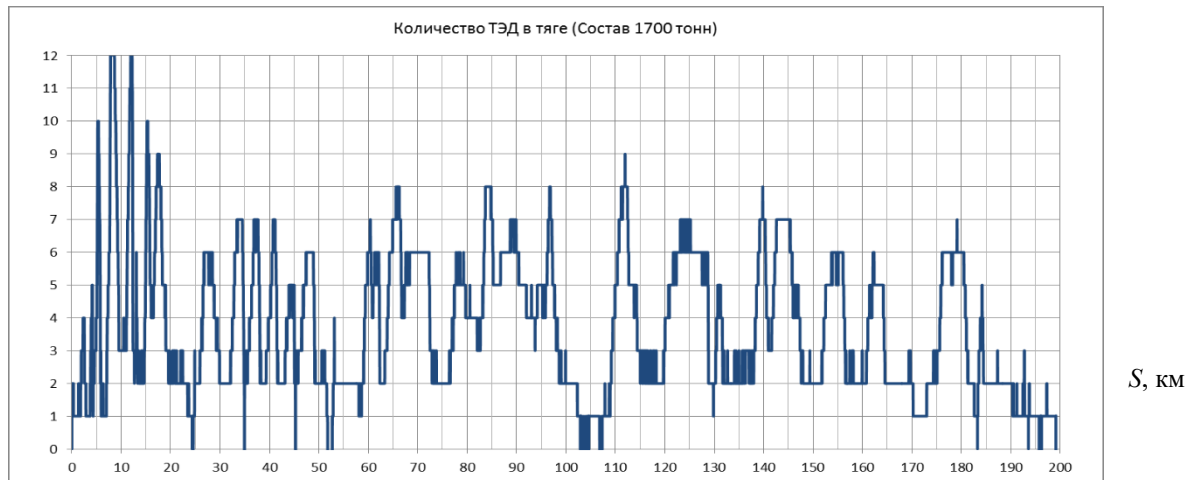


Рисунок 3.6 – Количество работающих двигателей $N_{ТЭД}$, достаточное для обеспечения скоростного режима в соответствии с рисунком 3.4

3.4 Оценка показателей потребления электроэнергии

Подведем итог вышеизложенному.

Прямое направление (6300 т). Для ведения груженого состава в прямом направлении Лихая – Крымская, на профилях I – II и III типа протяженностью 489 км, при работе электровоза в штатном режиме, расчетный удельный расход электроэнергии составил 91 кВт·ч/изм. Оценка полного расхода электроэнергии за поездку составила 28034 кВт·ч.

После модернизации, при работе в энергоэффективном режиме, расчетный удельный расход электроэнергии будет равен 82 кВт·ч / изм, то есть сократится на 9,5%, полный расход сократится до 25381 кВт·ч.

В пересчете на год работы (180 поездок) расход электроэнергии на один электровоз сократится на $(28034 - 25381) \cdot 180 = 477540$ кВт·ч.

Обратное направление (1750 т). Для ведения порожнего состава в обратном направлении Крымская – Лихая, на профилях I – II и III типа протяженностью 489 км, при работе электровоза в штатном режиме расчетный

удельный расход электроэнергии составил 223 кВт·ч/изм. Полный расход электроэнергии за поездку составляет 19083 кВт·ч.

После модернизации, при работе *в энергоэффективном режиме* расчетный удельный расход электроэнергии станет равным 192 кВт·ч / изм, то есть сократится на 14%, расход станет равным 16423 кВт·ч.

В пересчете на один год (180 оборотов локомотива) расход электроэнергии на один электровоз сократится на $(19083 - 16423) \cdot 180 = 478800$ кВт·ч.

В таблице 3.1 представлены полученные выше оценки основных параметров энергопотребления в штатном и энергоэффективном режимах (на один электровоз).

Таблица 3.1 – Оценки основных параметров энергопотребления

Прямое направление, 6300 т	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / изм	Расход электроэнергии за поездку, кВт·ч	Сокращение расхода электроэнергии за год, кВт·ч
Штатный режим	91	28034	477540
Энергоэффективный режим	82	25381	

Обратное направление, 1750 т	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч / изм	Расход электроэнергии за поездку, кВт·ч	Сокращение расхода электроэнергии за год, кВт·ч
Штатный режим	223	19083	478800
Энергоэффективный режим	192	16423	

Следовательно, при работе на линии Лихая – Крымская – Лихая потребление электрической энергии одним электровозом, при 180 оборотах локомотива за год, сократится суммарно на $477540 + 478800 = 956340$ кВт·ч, то

есть на 11,3% по сравнению с годовым расходом при работе электровоза в штатном варианте.

Окончательно получаем, что при работе на линии Лихая – Крымская – Лихая и отпускной цене на электроэнергию на уровне 5 руб/кВт·ч, годовая экономия составит 4,78 млн. руб. на один электровоз.

Соответствующие расчеты могут быть выполнены также для любых других полигонов эксплуатации электровоза.

3.5 Выводы по главе

Выполнено исследование степени использования установленной мощности и энергопотребление грузовых электровозов в реальных условиях эксплуатации. Показано, что степень использования установленной мощности грузовых электровозов на линии Лихая – Крымская (профиль I-II и III типа) является неудовлетворительной: в штатном режиме работы тягового электропривода она составляет, в среднем, $\gamma_{\text{ср}} = 0,22$ для поездов массой 6300 т, и $\gamma_{\text{ср}} = 0,12$ – для поездов массой 1750 т.

За счет применения алгоритма ДАУ (то есть отключения / подключения тяговых двигателей в зависимости от нагрузки), расчетным путем доказана возможность более полного использования доступной мощности электровоза и, соответственно, существенного повышения его энергетической эффективности.

Оценка годовой экономической эффективности составляет 4,78 млн. руб. на один электровоз при работе на линии Лихая – Крымская – Лихая (180 оборотов локомотива, при уровне цен 5 руб/кВт·ч).

Таким образом, модернизация грузовых электровозов семейства «Ермак» прежних лет выпуска, поступающих на заводской ремонт, является экономически целесообразной. Для подготовки программы модернизации и в ходе ее выполнения представляется необходимым выполнить следующее.

1. Привести силовое оборудование и систему управления электровозов прежних выпусков в соответствие с новым оборудованием, которое обеспечивает поосное регулирование силы тяги (ПоР).

2. При работе в энергоэффективном режиме, часть двигателей будет временно выводиться из режима тяги. Поэтому целесообразно на это время переводить мотор-вентиляторы на пониженную частоту питания, что даст дополнительную экономию энергии. Подробно этот вопрос будет рассмотрен в главе 4.

3. Электровозы семейства «Ермак» оснащены коллекторными тяговыми двигателями. По этой причине необходимо предусмотреть специальные меры, направленные на предотвращение повреждения коллекторно-щеточного узла на время выведения ТЭД из режима тяги, что будет рассмотрен в главе 5.

4. Разработать дополнительное программное обеспечение (ПО), которое реализует алгоритм дискретно-адаптивного управления. Это ПО должно быть испытано на стенде совместно с аппаратурой управления: контроллером машиниста электровоза, блоком индикации, МСУД-015 и компьютерной моделью силовой части электровоза (ТТ, ВИП, СР и ТЭД), позволяющей воспроизводить режимы работы электровоза, соответствующие реальным поездкам, что может быть выполнено методами программно-аппаратного моделирования. Вопрос будет рассмотрен далее в главе 6.

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

В п. 1.4 было отмечено, что поскольку при работе в энергоэффективном режиме часть двигателей временно выводится из режима тяги, целесообразно на это время переводить соответствующие мотор-вентиляторы на пониженную частоту питания, что даст дополнительную экономию энергии. Перевод на пониженную частоту должен производиться только после уменьшения температуры ниже допустимого предела. При этом, должно обеспечиваться необходимое давление воздуха в корпусах двигателей во избежание попадания пыли, влаги, и т.п.

Принудительная вентиляция на электровозе служит для отвода тепла, что обеспечивает ограничение перегрева оборудования в пределах допустимых температур. Контроль перегрева может осуществляться *прямыми измерениями* [4.1] либо *моделированием* [4.2 - 4.4] на основе информации о токе и расходе охлаждающего воздуха.

Система теплового контроля СТК-1 [4.1] контролирует температуру электрооборудования электровоза в процессе работы и передает полученные значения в бортовую микропроцессорную систему управления (см. рисунок 1.15). Получаемые данные прямых и косвенных измерений с достаточной точностью отражают фактическую температуру оборудования. Однако прямые измерения усложнены уровнями рабочих напряжений оборудования, необходимостью гальванической развязки измерительных цепей, а в ряде случаев практически невозможны для вращающихся узлов, например, якорей тяговых электродвигателей.

Производительность вентиляторов рассчитывается для номинальных нагрузок охлаждаемых электрических машин и аппаратов с условием непродолжительной перегрузки. При этом максимальный перегрев не превышает

допустимых значений. Фактический режим движения и электропотребления характеризуется неравномерным графиком, поэтому при токе ниже номинального для охлаждения достаточно меньшая производительность вентиляторов с их переключением на меньшую скорость вращения [4.5].

Возможность работы оборудования при уменьшенной производительности вентиляторов может быть оценена фактическими значениями токов в тяговой цепи и их продолжительностью для исключения перегрева. Вместе с тем, пониженный расход охлаждающего воздуха является фактором энергосбережения в общем потреблении электровоза [4.6, 4.7]. Поэтому вопрос моделирования теплового состояния тягового оборудования электровоза на основе информации о токе в якорной цепи и о производительности вентиляторов является весьма актуальной, здесь он будет рассмотрена согласно [4.11].

4.1 Расчет текущей температуры перегрева силового оборудования электровоза

Изложим методику расчета текущей температуры перегрева силового оборудования электровоза в реальном масштабе времени на основе информации о токе и о производительности вентиляторов без использования конструктивных размеров силовых элементов и свойств применяемых материалов. Принудительная вентиляция на электровозе служит для отвода тепла, что обеспечивает ограничение перегрева оборудования в пределах допустимых температур. Контроль перегрева может осуществляться *прямыми измерениями* либо *моделированием* на основе информации о токе и расходе охлаждающего воздуха.

Система теплового контроля [4.1], которая установлена на последней модификации электровоза, контролирует температуру электрооборудования в процессе работы и передает полученные значения в бортовую микропроцессорную систему управления. Получаемые данные прямых и

косвенных измерений с достаточной точностью отражают фактическую температуру оборудования.

На рисунке 4.1 представлена функциональная схема регулируемой системы вентиляции, предусматривающей двухскоростной режим: с номинальной скоростью и пониженной скоростью вращения вентиляторов. Схема содержит следующие основные устройства: переключающий вакуумный контактор, блок управления вентилятором, трансформатор преобразователя, контроллер мотор-вентилятора, мотор-вентилятор и элементы тяговой схемы.

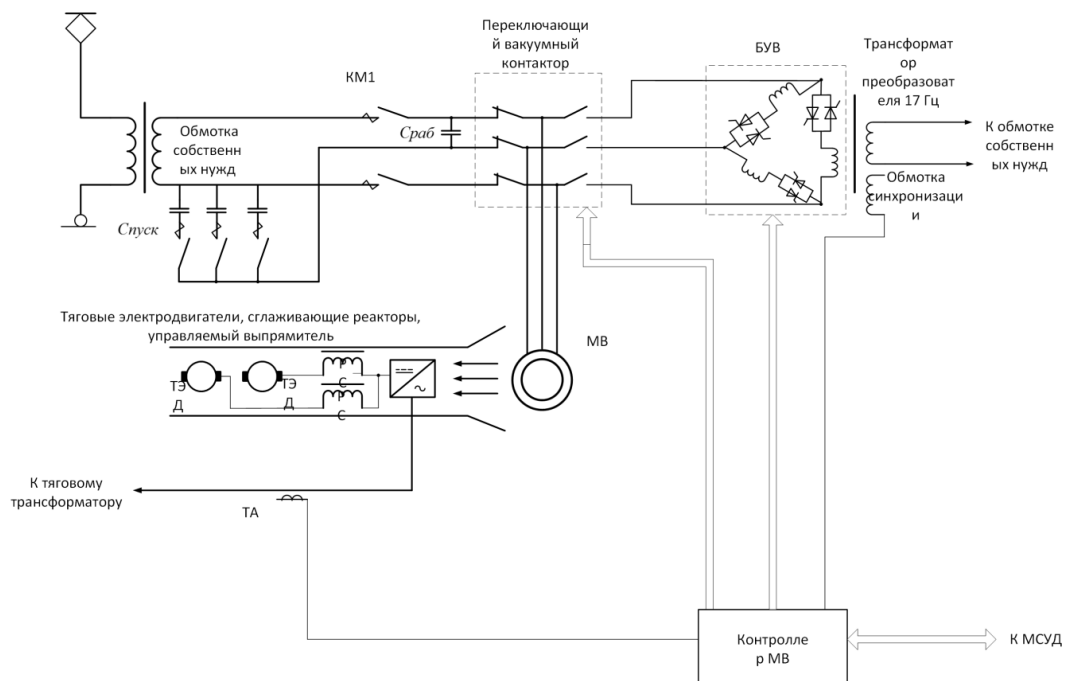


Рисунок 4.1 – Функциональная схема двухскоростного вспомогательного привода

В штатном режиме тяги мотор-вентилятор НВА-55С питается от обмотки собственных нужд тягового трансформатора. Переключающий вакуумный контактор находится в состоянии замкнутых размыкающихся контактов. При переходе ТЭД в отключенное состояние мотор-вентилятор получает питание от преобразователя частоты БУВ, выполненного на основе тиристорных ключей. Питание на схему БУВ подается от дополнительного

трансформатора преобразователя. Напряжение на его вторичных обмотках равно 60 В. По команде от контроллера переключающий вакуумный контактор подает питание на мотор-вентилятор от схемы БУВ. Вентилятор переходит на частоту вращения, соответствующую $16\frac{2}{3}$ Гц. Команду на переключение контроллер получает по интерфейсу от бортового МСУД.

Таким образом, схема обеспечивает режим работы вентилятора в зависимости от рабочего состояния ТЭД и выполняет следующие функции:

1. Формирование напряжения пониженной частоты $16\frac{2}{3}$ Гц для питания мотор-вентиляторов охлаждения тяговых двигателей, находящихся в обесточенном состоянии при работе в режиме ДАУ.

2. Отключение от штатной схемы питания (380 В, 50 Гц) мотор-вентиляторов, охлаждающих тяговые двигатели при снятии с них питания.

3. Подключение мотор-вентиляторов отключенных тяговых двигателей к источнику питания пониженной частоты $16\frac{2}{3}$ Гц при работе в режиме ДАУ.

4. Контроль состояния контакторов питания мотор-вентиляторов для исключения одновременной подачи питания от штатной схемы питания и источника питания пониженной частоты $16\frac{2}{3}$ Гц.

5. Моделирование температуры перегрева элементов силовой схемы для принятия решения о возможности перехода на пониженную частоту вращения мотор-вентиляторов.

6. Передача данных о текущей температуре силового оборудования схемы тяги в МСУД-Н.

7. Управление коммутационными аппаратами для переключения режимами вентиляции по командам от МСУД-Н.

8. Передача в МСУД-Н информации о режиме питания мотор-вентилятора.

При питании напряжением 50 Гц частота вращения мотор-вентиляторов НВА-55С составляет 1500 об/мин, при питании напряжением $16\frac{2}{3}$ Гц – 500 об/мин.

4.2 Моделирование перегрева оборудования

Производительность вентиляторов рассчитывается для номинальных нагрузок охлаждаемых электрических машин и аппаратов с условием непродолжительной перегрузки. При этом максимальный перегрев не превышает допустимых значений. Фактический режим движения и электропотребления характеризуется, как уже было отмечено выше, неравномерным графиком, поэтому при токе ниже номинального для охлаждения достаточно меньшая производительность вентиляторов с их переключением на меньшую скорость вращения. Возможность работы оборудования при уменьшенной производительности вентиляторов может быть оценена фактическими значениями токов в тяговой цепи и их продолжительностью для исключения перегрева. Вместе с тем, пониженный расход охлаждающего воздуха является фактором энергосбережения в общем потреблении электровоза. Поэтому задача моделирования теплового состояния тягового оборудования электровоза на основе информации о токе в цепи тяги и производительности вентиляторов является весьма актуальной и практически важной.

Структурная схема вентиляции силового электрооборудования представлена на рисунке 4.2.

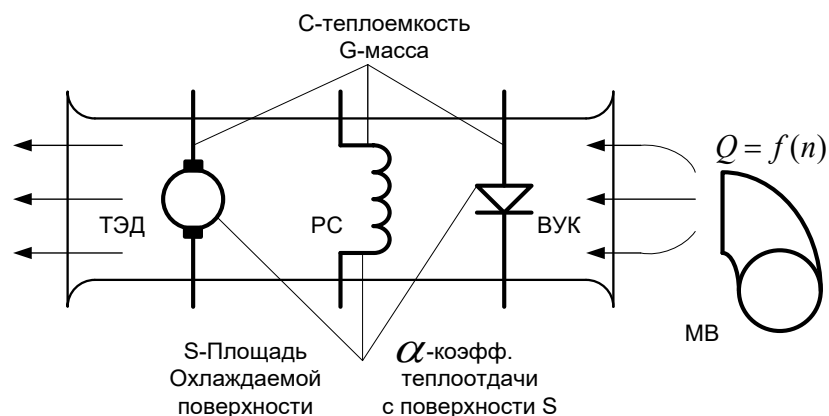


Рисунок 4.2 – Структурная схема вентиляции: МВ – мотор-вентилятор, ТЭД – тяговый электродвигатель, РС – реактор сглаживающий, ВУК – выпрямительная установка

Производительность мотор-вентилятора представляет собой функцию его частоты вращения $Q = f(n)$. Силовое оборудование массой G характеризуется площадью охлаждаемой поверхности S , коэффициентом теплоотдачи с этой поверхности α , усредненной теплоемкостью C .

Исходным выражением для моделирования перегрева оборудования является уравнение теплового баланса

$$\Theta = \Theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} + \Theta_\infty (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (4.1)$$

где Θ – текущая температура перегрева тягового оборудования;

Θ_0 – начальная температура перегрева тягового оборудования;

Θ_∞ – установившаяся температура нагрева оборудования;

t – текущее время;

T – термическая постоянная времени нагрева оборудования.

Первое слагаемое выражения (4.1) представляет процесс охлаждения от перегрева Θ_0 , а второе – нагрев за счет тепловыделения в оборудовании.

Установившаяся температура перегрева оборудования пропорциональна мощности потерь от тока P и обратно пропорциональна произведению коэффициента теплоотдачи с охлаждаемой поверхности α на площадь этой поверхности S :

$$\Theta_\infty = \frac{P}{\alpha \cdot S}. \quad (4.2)$$

Термическая постоянная времени пропорциональна произведению усредненной теплоемкости оборудования C на его массу G и обратно пропорциональна произведению коэффициента теплоотдачи с охлаждаемой поверхности α на площадь этой поверхности S :

$$T = \frac{C \cdot G}{\alpha \cdot S}. \quad (4.3)$$

Тепловой расчет оборудования затруднен и требует наличия подробных конструктивных параметров и характеристик теплопередачи отдельных деталей, составляющих единую конструкцию оборудования.

Поэтому используем данные, полученные экспериментальным путем. Для номинальных режимов работы – тока тяги I_N и производительности вентиляторов Q_N – параметры установившегося режима являются паспортными номинальными характеристиками электровоза и могут быть использованы при моделировании тепловых процессов. Значения установившейся температуры перегрева, термической постоянной времени, тока, мощности потерь также обозначим индексом N : $\Theta_{\infty N}$, T_N , P_N .

На основе номинальных значений Θ и T возможно определить их величины для промежуточных режимов при вариации тока тяги, потерь активной мощности и регулирования производительности вентиляторов, используя систему относительных единиц. Введем для относительных единиц следующие обозначения:

$$T^* = \frac{T}{T_N}, \quad \Theta_{\infty}^* = \frac{\Theta_{\infty}}{\Theta_{\infty N}}, \quad I^* = \frac{I}{I_N}, \quad P^* = \frac{P}{P_N}, \quad Q^* = \frac{Q}{Q_N}.$$

В соответствии с выражением (4.3), термическая постоянная времени каждого элемента схемы тяги зависит от конструктивных параметров, остающихся неизменными, и коэффициента теплоотдачи α , зависящего от скорости охлаждающего воздуха. Для номинальной термической постоянной времени коэффициент теплоотдачи примем обозначение α_N . Тогда относительная термическая постоянная времени будет равна

$$T^* = \frac{T}{T_N} = \frac{C \cdot G}{\alpha \cdot S} \cdot \frac{\alpha_N \cdot S}{C \cdot G} = \frac{\alpha_N}{\alpha}. \quad (4.4)$$

Коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения можно выразить через скорость охлаждающего воздуха:

$$\alpha = \alpha_0 (1 + k\sqrt{v}),$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи с поверхности, которая не обдувается;
 k – коэффициент теплорассеяния;
 v – скорость обдувающего воздуха.

При номинальной производительности вентиляторов скорость обдувающего воздуха обозначим v_N . Отношение коэффициентов теплоотдачи при номинальной производительности вентиляторов и в режиме промежуточных значений можно определить с учетом того, что произведение скорости движения воздушного потока на поперечное сечение канала s равно производительности вентилятора:

$$Q = v \cdot s, \quad \frac{\alpha_N}{\alpha} = \frac{\alpha_0(1+k\sqrt{v_N})}{\alpha_0(1+k\sqrt{v})} \approx \frac{\sqrt{v_N}}{\sqrt{v}} = \frac{\sqrt{\frac{Q_N}{s}}}{\sqrt{\frac{Q}{s}}} = \sqrt{\frac{Q_N}{Q}}.$$

В результате относительное значение термической постоянной времени (4.4) примет вид:

$$T^* = \frac{1}{\sqrt{\frac{Q}{Q_N}}} = \frac{1}{\sqrt{Q^*}}. \quad (4.4^*)$$

В соответствии с выражением (4.2), установившаяся температура перегрева оборудования зависит от двух переменных величин: мощности потерь, зависящей от тока, и коэффициента теплоотдачи α , зависящего от скорости охлаждающего воздуха.

Отсюда, относительное значение установившейся температуры перегрева будет равно:

$$\Theta_{\infty}^* = \frac{\Theta_{\infty}}{\Theta_{\infty N}} = \frac{P \cdot S}{\alpha} \cdot \frac{\alpha_N}{P_N \cdot S} = \frac{P^*}{\sqrt{Q^*}}. \quad (4.5)$$

Таким образом, относительная установившаяся температура перегрева зависит от двух параметров:

- 1) от относительного значения потерь мощности, и

2) от относительного значения производительности вентиляторов охлаждения.

4.3 Экспериментальные исследования

Для каждого элемента тяговой цепи электровоза на основе экспериментальных данных были определены зависимости потерь мощности от относительного тока:

$$P_{я}^* = 0,656 \cdot (I_{я}^*)^2 + 0,224 \cdot I_{я}^* + 0,12 \quad \text{— для якоря тягового двигателя НБ-514;}$$

$$P_{п}^* = (I^*)^2 \quad \text{— для полюсов (главных и дополнительных);}$$

$$P_{PC}^* = (I^*)^2 \quad \text{— для сглаживающих реакторов;}$$

$$P_{ВУК}^* = I^* \quad \text{— для выпрямительной установки.}$$

В таблице 4.1 приведены экспериментальные данные для элементов схемы тяги электровоза 2ЭС5К, характеризующие номинальную термическую постоянную времени и номинальную установившуюся температуру перегрева. Результаты получены при натурных стендовых испытаниях. Эти данные необходимы для проведения моделирования тепловых режимов при изменениях тока тяги и производительности вентиляторов.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные

Вид оборудования	Температура перегрева номинальная, $\Theta_{\infty N} \text{ } ^\circ\text{C}$	Термическая постоянная времени, номинальная T_N , мин
Якорь ТЭД	120	23
Главные полюса ТЭД	135	54
Дополнительные полюса ТЭД	100	36
РС	50	4,5
ВУК	40	3,5

4.4 Методика расчета текущей температуры перегрева силового оборудования

Для численных расчетов и моделирования, например в реальном масштабе времени средствами микроконтроллера, уравнение (4.1) можно записать с учетом расчетного шага времени Δt для определения текущей температуры $\Theta_{ТЕК}$ в конце шага:

$$\Theta_{ТЕК} = \Theta_{ТЕК-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{T}} + \Theta_{\infty} \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}). \quad (4.6)$$

Для численных расчетов в последнем уравнении целесообразно выполнить замену:

$$e^{-\frac{\Delta t}{T}} = 1 - \frac{\Delta t}{T},$$

тогда уравнение (4.6) примет вид:

$$\Theta_{ТЕК} = \Theta_{ТЕК-1} - \frac{\Delta t}{T} (\Theta_{ТЕК-1} - \Theta_{\infty}).$$

Таким образом, каждый шаг вычислений использует значение термической постоянной времени, определяемой выражением

$$T = T_N \cdot T^*.$$

Переменная T^* – это относительная тепловая постоянная времени нагрева, которая учитывает влияние производительности вентиляторов на процесс нагревания и охлаждения. Одновременно используется значение установившейся температуры перегрева

$$\Theta = \Theta_N \cdot \Theta_{\infty}^*.$$

Относительное значение установившейся температуры перегрева Θ_{∞}^* вычисляется с учетом тока в тяговой цепи на момент расчета и производительности вентиляторов по выражению (4.5).

Каждый текущий шаг расчета использует значение температуры перегрева на предыдущем шаге $\Theta_{ТЕК-1}$.

В качестве примера приведем результаты расчета температуры перегрева якоря ТЭД при значениях тока I_n в диапазоне 100...830А и различной производительности вентиляторов Q , м³/мин, на основе приведенных выше формул. Результаты расчетов сведены в таблицу 4.2, где также указаны термические постоянные времени при различной производительности вентиляторов с указанием их синхронных частот вращения.

Таблица 4.2 – Результаты расчета температуры перегрева якоря

Q м ³ /мин (частота)	T _{мин} расчет	T _{мин} опыт	$I_n = 100A$	$I_n = 200A$	$I_n = 400A$	$I_n = 500A$	$I_n = 600A$	$I_n = 700A$	$I_n = 830A$
			$\theta_{\infty}^{\circ}C$	$\theta_{\infty}^{\circ}C$	$\theta_{\infty}^{\circ}C$	$\theta_{\infty}^{\circ}C$	$\theta_{\infty}^{\circ}C$	$\theta_{\infty}^{\circ}C$	$\theta_{\infty}^{\circ}C$
105 (50 Гц)	23	23	19	25	46	59	75	94	120
52,5 (25 Гц)	32	30	27	36	65	84	106	132	170
35 (16,66 Гц)	39	36	33	44	79	102	130	161	208
17,5 (8,33 Гц)	54	48	46	62	112	145	184	228	294

На рисунке 4.3 представлены графики, построенные по результатам расчетов зависимости температуры перегрева от производительности вентиляторов. Горизонтальной линией «Доп» показана максимально допустимая температура перегрева, равная 120°С. Класс изоляции обмотки якоря «F» (+140°С). Из диаграммы следует, что при ступенчатом регулировании скорости вращения вентиляторов, при подаче воздуха равной например 40 м³/мин, ток якоря ТЭД не должен превышать 500 А в длительном режиме. Учитывая продолжительность процесса нагрева элементов тяговой цепи, можно допустить и значительно больший ток, но тогда следует моделировать в реальном времени текущую температуру перегрева и при необходимости переключать вентиляторы на работу с повышенной производительностью. Такой алгоритм был использован в энергосберегающей системе вентиляции САУВ для элек-

тровозов серии ВЛ80, и может быть рекомендован для применения при модернизации электровозов серии «Ермак».

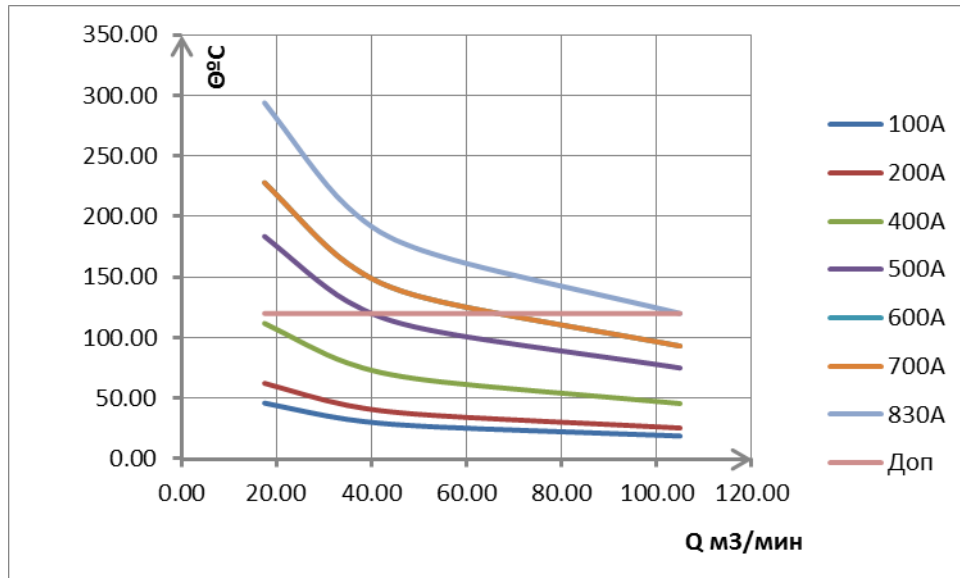


Рисунок 4.3 – Зависимость установившейся температуры перегрева якоря от производительности вентиляторов при различных токах ТЭД

Изменение термической постоянной времени нагрева от производительности вентиляторов показано на рисунке 4.4. По результатам, представленным на этом рисунке, можно определить значение термической постоянной времени для текущего режима вентиляции и использовать это значение в расчетах по уравнению (4.6).

Аналогичный подход к расчету тепловых режимов можно использовать и для других типов тяговых электродвигателей (например, асинхронных) и при использовании вспомогательного привода с регулируемой скоростью вращения, имеющего обратную связь.

В настоящее время изготовлена опытная установка, воспроизводящая функциональную схему, показанную на рисунке 4.1. Общий вид контроллера во время испытаний показан на рисунке 4.5.

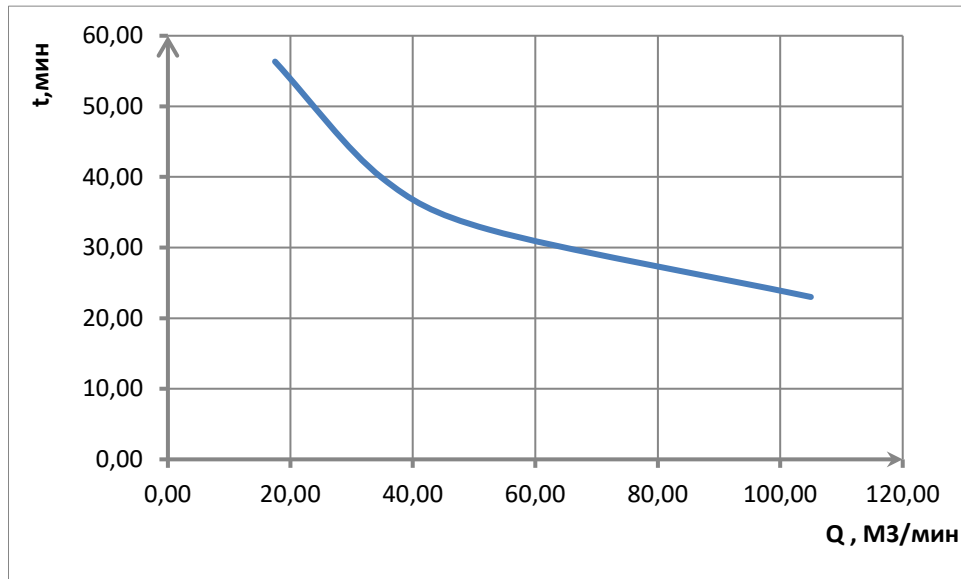


Рисунок 4.4 – Зависимость термической постоянной времени нагрева от производительности вентиляторов

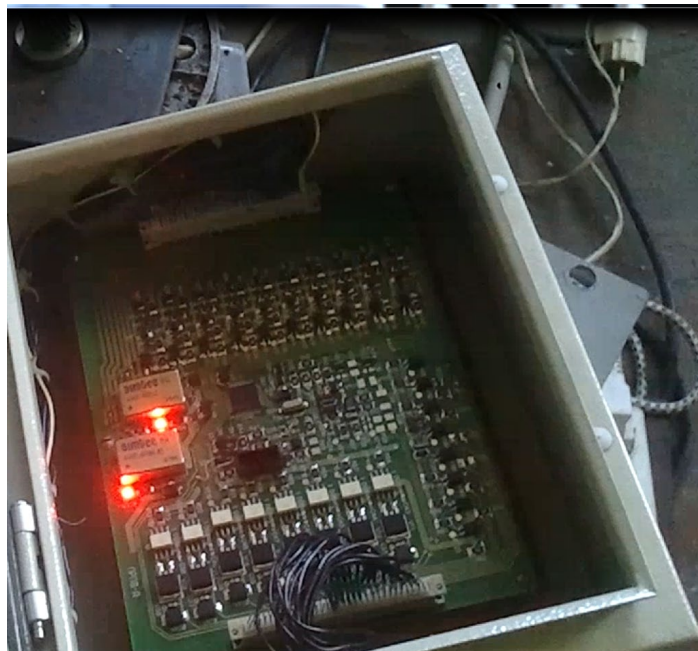


Рисунок 4.5 – Общий вид контроллера

4.5 Выводы по главе

Предложена функциональная схема регулируемой системы вентиляции, предусматривающая двухскоростной режим: с номинальной скоростью и с пониженной скоростью вращения вентилятора. При этом вентиляция работающих ТЭД осуществляется в полном объеме, а для отключенных обеспечивается около трети номинальной подачи, чтобы обеспечить необходимое давление воздуха в корпусах двигателей. Разработана методика определения текущей температуры перегрева силовых элементов тяговой цепи вследствие изменения тока якоря и производительности вентиляторов.

По результатам настоящей главы приходим к следующим выводам:

1. При моделировании тепловых режимов элементов тяговой цепи электровоза на основе уравнения теплового баланса целесообразно термическую постоянную времени нагрева рассчитывать с учетом фактической производительности вентиляторов охлаждения, а установившуюся температуру перегрева – с учетом мощности тепловыделения, зависящего от тока и потерь тепла, зависящих от производительности вентиляторов.

2. В расчетах рационально использовать относительные единицы установившейся температуры перегрева, тока, термической постоянной времени перегрева и производительности вентиляторов, полученные приведением к их номинальным значениям. Это устраняет необходимость проводить громоздкие тепловые и аэродинамические вычисления на базе конструктивных параметров оборудования.

3. Необходимым и достаточным расчетным условием являются номинальные значения установившейся температуры перегрева при номинальном токе и термической постоянной времени перегрева, а также производительность вентиляторов при номинальной скорости вращения.

4. Разработанная методика позволяет определять текущую температуру перегрева силовых элементов схемы вследствие изменения тока и производительности вентиляторов, используя для расчетов только термическую по-

стоянную времени нагрева и установившуюся температуру при номинальном режиме работы.

5. В случае перегрева тягового электрооборудования в допустимых пределах, целесообразно переходить на пониженную скорость вращения вентиляторов.

5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ КОЛЛЕКТОРНО-ЩЕТОЧНОГО УЗЛА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ СМАЗКИ

В силовой электрической цепи коллекторных ТЭД имеются электрические скользящие контакты (СК) коллекторно-щеточного узла (КЩУ). Пункт 1.5 содержит обзор литературных источников по вопросу улучшения условий работы КЩУ ТЭД за счет применения электропроводящей смазки. В настоящем разделе даны более подробные сведения о практически важных результатах, полученных в [1.51 – 1.61], а также в [5.1 – 5.8], имеющемся опыте применения и сформулированы перспективные практически важные рекомендации.

5.1 Опыт применения электропроводящей смазки

Согласно указанным выше источникам, правильно подобранный количественный и качественный состав смазочных композиций позволяет одновременно удовлетворить электрическим и механическим ограничениям, накладываемым на контакт как самой конструкцией ТЭД, так и чрезвычайно жесткими условиями эксплуатации, что в конечном итоге приводит к значительному повышению надежности работы тяговой электрической машины, т.е. снижению фрикционной нагрузки и улучшению условий токопрохождения в контакте.

Анализ информации, приведенной в указанных работах, показал, что применение смазочной композиции в коллекторно-щеточном узле:

1) способствует снижению износа щеточного материала на 20...25% (щетки ЭГ-61) и износа меди коллектора на 15...20% (рисунок 5.1), а также уменьшает возникновение перебросов и круговых огней на коллекторе на 25...30%;

2) способствует улучшению условий коммутации всей тяговой электрической машины в 5...6 раз (рисунок 5.2);

3) уровень искрения под щетками в зависимости от скорости движения локомотива снижается на 70%, что в конечном итоге приводит к экономии электроэнергии на тягу поезда, а также снижение числа неисправностей ТЭД и затрат времени и труда на проведение мероприятий по их устранению.

Результаты, приведенные в [1.53, 1.55 - 1.61], подтверждают точку зрения о реальной возможности применения электропроводящей смазочной композиции, как элемента, способствующего повышению надежности и работоспособности такого ответственного сопряжения, каковым является СК КЩУ ТЭД.

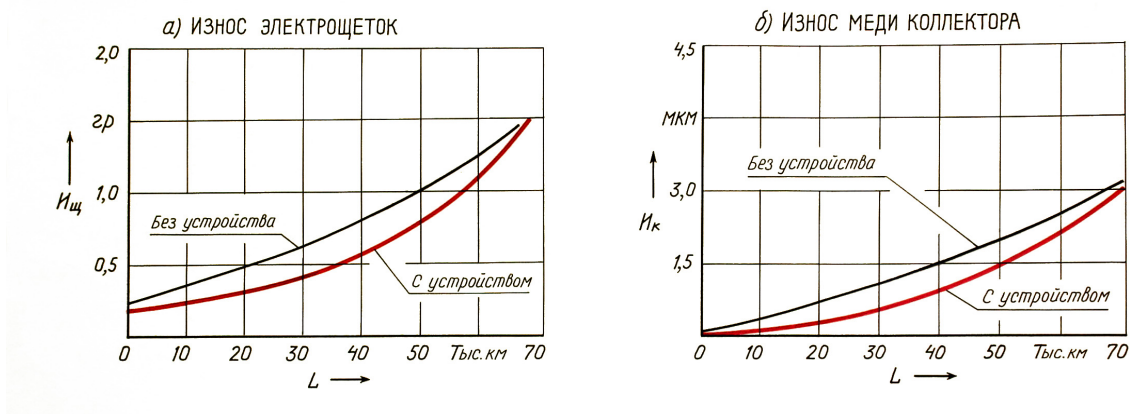


Рисунок 5.1 – Результаты эксплуатационных испытаний (а.с. 1403150)

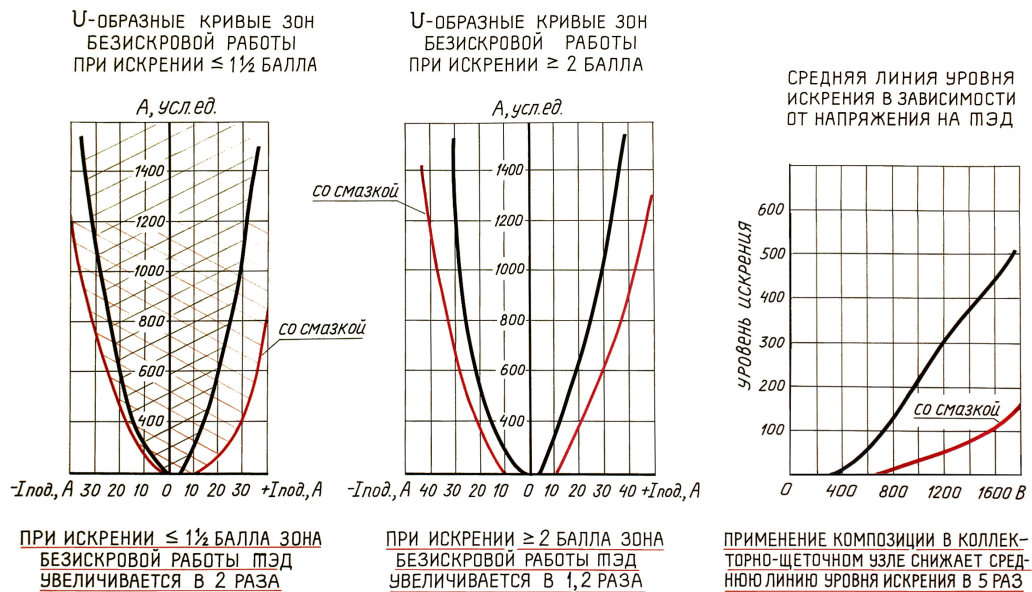


Рисунок 5.2 – Влияние электропроводящей смазки на качество коммутации (а.с. 1403150)

Была разработана методика применения смазки, имеются акты осмотра КЩУ в условиях депо, датированные 1986...87 гг. По итогам широкого внедрения в производство, была получена серебряная медаль ВДНХ СССР. После чего, в силу понятных причин, работы в этом направлении были свернуты.

5.2 Перспективы применения электропроводящей смазки в современных условиях

В настоящее время, применение электропроводящей смазки представляет интерес не только для улучшения условий работы КЩУ, но и как одно из основных требований, обеспечивающих возможность применения энергоэффективного алгоритма ДАУ на электровозах с коллекторными ТЭД. Совместно с В.М. Коротковым, доцентом кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», были составлены технические условия, и по ним в 2019 году изготовлена опытная партия электропроводящей смазки (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Электропроводящая смазка

Испытания проводились на нагрузочном стенде Ростовского электровозоремонтного завода (рисунок 5.4), по итогам испытаний составлен прото-

кол (Приложение 1). Согласно протоколу, на стенде был испытан ТЭД НБ-418К6 № 4320, якорь № 1250 (поступил на испытательную станцию после среднего ремонта якоря). Смазка была нанесена в разрез щеток тягового двигателя.

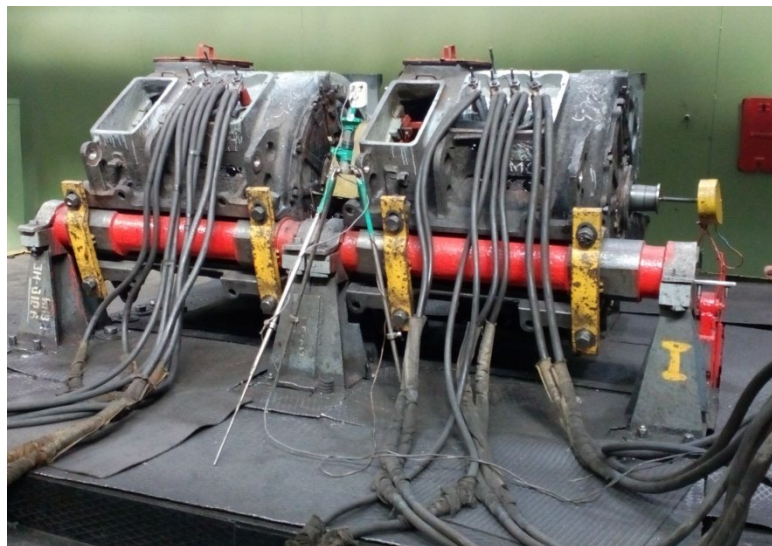


Рисунок 5.4 – Нагрузочный стенд РЭРЗ

Испытания состояли из двух этапов, были получены следующие результаты.

1) на первом этапе ТЭД испытывался на холостом ходу без нагрузки и без обдува в течение 40 минут. Было установлено, что на коллекторе образовалась политура светло-орехового цвета. Это свидетельствует о формировании на рабочей поверхности коллектора электропроводящего слоя с низким коэффициентом трения. Засорения межламельных промежутков не обнаружено. Следовательно, применение электропроводящей смазки обеспечивает надежность и работоспособность КЩУ тягового двигателя *без нагрузки* на время до 40 минут;

2) затем, на втором этапе, ТЭД испытывался под нагрузкой согласно заводской карте технологического процесса № РЭРЗ-07.50107.00006. Было установлено, что при номинальной силе тока 900 А и температуре якоря 85°C, замеренной пирометром TemPro 550 при температуре охлаждающего

воздуха 23°C, искрение при коммутационных режимах испытаний отсутствовало. Осмотр коллектора после остановки двигателя показал наличие пленки (политуры) светло-орехового цвета и отсутствие засорения межламельных промежутков. Таким образом, при работе *под полной нагрузкой* надежность и работоспособность КЩУ тягового двигателя со щётками с заложенной смазкой также обеспечены.

На рисунке 5.5 показан внешний вид поверхности коллектора ТЭД после испытаний.



Рисунок 5.5 – Поверхность коллектора ТЭД после испытаний

5.3 Выводы по главе

Имеется положительный опыт применения электропроводящей смазки в КЩУ тяговых двигателей электровозов, относящийся к периоду 1986-90 гг. (авторское свидетельство СССР 1403150 [1.53]). В результате существенно улучшились условия коммутации, повысились надежность и работоспособность коллекторных ТЭД.

Применение указанной смазки, в рамках предлагаемой модернизации, позволит избежать повреждений коллекторных ТЭД и тем самым обеспечить успешное применение энергоэффективного алгоритма ДАУ на электровозах семейства «Ермак». В настоящее время:

1. Изготовлена опытная партия электропроводящей смазки.

2. Проведены испытания на нагрузочном стенде РЭРЗ, по итогам которых можно сделать вывод о том, что предлагаемая смазка обеспечивает нормальные условия для КЩУ как под нагрузкой, так и на холостом ходу в обесточенном состоянии на время до 40 минут.

3. При наличии заинтересованности со стороны предприятий локомотивного хозяйства, возможна организация производства и поставка электропроводящей смазки в необходимом количестве. Полученный ранее опыт определил примерное годовое количество смазки в 800...1000 кг. При относительно небольших затратах, может быть развернут участок с оборудованием для производства электропроводящей смазки для удовлетворения потребностей Северо-Кавказской железной дороги и, в перспективе, других железных дорог. Кроме собственно производства смазки, на этом участке будут выполняться следующие операции:

- щётки типа ЭГ-61А (ТУ16-538.312–77), получаемые в картонной таре с завода-изготовителя, обтачиваются на барабане;

- в разрез щёток наносится тонкий слой смазки до линии, обозначающей предельно допустимый износ;

- каждая щётка с заложенной смазкой помещается в одноразовый футляр (кассету), внутренние размеры которого соответствуют размерам гнезд щёткодержателя;

- щётки упаковываются в ту же картонную тару и готовы к отправке.

При установке щёток в щёткодержатель тягового двигателя, щётка с заложенной смазкой извлекается из футляра и устанавливается в гнездо, то есть все технологические процессы остаются прежними, а объём работ, выполняемых слесарем-ремонтником, не возрастает.

4. Подана заявка на патент «Токосъемный элемент для электрической машины» Дата регистрации заявки: 26.09.2022. Регистрационный № заявки: 2022504183. Входящий № 054684.

6 ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОВОЗА В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ РЕЖИМЕ

В п. 1.6 дан обзор публикаций по программно-аппаратному (полуна-турному) моделированию работы электроприводов и электротехнических комплексов. В главе 2 получены закономерности изменения энергетической эффективности основных элементов тяговой системы электровоза при работе в различных режимах.

Перейдем к применению методов программно-аппаратного моделиро-вания (ПАМ) для исследования работы электровоза в энергоэффективном режиме, опираясь на [1.68]. Реализация технологии ПАМ осуществлена в па-кете отечественной разработки SimInTech [6.1].

6.1 Программно-аппаратный симулятор

Переход к программным принципам управления электровозом с ис-пользованием бортовых ЭВМ позволяет не только расширить функции си-стемы управления, но и увеличить степень автоматизации и повысить надеж-ность электронной аппаратуры, достичь высокой степени унификации техни-ческих средств систем управления различных типов электрического подвиж-ного состава. К настоящему времени создана система управления МСУД-015 [6.2], которая устанавливается на электровозы семейства «Ермак».

Такие локомотивы представляют собой управляемые динамические си-стемы с многодвигательным тяговым приводом, для которых характерны следующие особенности [6.3]:

- система имеет иерархическую многоуровневую структуру;
- элементы системы имеют разнородные физические принципы дей-ствия (электрические, механические и другие подсистемы);
- имеется множество связей, как информационных, так и физических, между элементами системы, а также с внешней средой;

- имеется множество различных режимов работы, часть из которых может требовать переключения режимов работы других подсистем;
- устройства управления, помимо задач регулирования динамики, решают также задачи логического управления, диагностики и др.;
- большая часть функций управления реализуется программно на бортовых компьютерах.

На рисунке 6.1 показан прототип стенда (программно-аппаратный симулятор), предназначенный для моделирования процессов в управляемой электромеханической системе электровозов семейства «Ермак». Программно-аппаратный симулятор выполнен на базе персонального компьютера. Блок управления (аналог контроллера машиниста электровоза) размещен в отдельном корпусе, на котором смонтированы рукоятка (джойстик) и кнопка сброса. В корпусе находится плата на базе микроконтроллера STM32F405RGT6. Отклонение рукоятки преобразуется в сигнал по напряжению, который передается в программу, описание которой дано в главе 2. Уменьшение / увеличение числа работающих ТЭД задается клавишами «←» и «→» на клавиатуре.

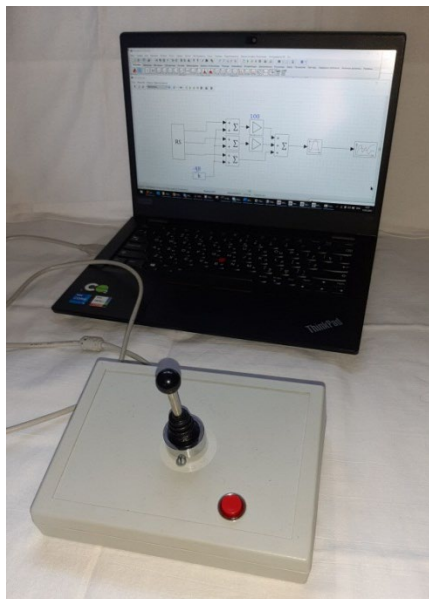


Рисунок 6.1 – Прототип стенда (программно-аппаратный симулятор)

6.2 Тестовый расчет

Целью тестового расчета являлась проверка адекватности результатов имитационного моделирования (напряжение, ток, частота вращения, моменты, мощности, и т.д.), которые получаются путем реализации управляющих воздействий со стороны оператора (машиниста). Изменение числа работающих тяговых двигателей $N_{тэд}$ задается клавишами согласно таблице 6.1, изменение напряжения задается углом наклона рукоятки.

Таблица 6.1 – Задание управляющих воздействий при тестовом расчете

t, c	0	50	100	150	200	250	300
U, B	40	783	783	850	850	927	927
$N_{тэд}$	12			10		8	

t, c	350	400	450	500	550	600
U, B	1038	1038	1198	1198	1038	1038
$N_{тэд}$	6		4		6	

На рисунке 6.2 показано изменение:

а) напряжения, В,

б) тока, А, и

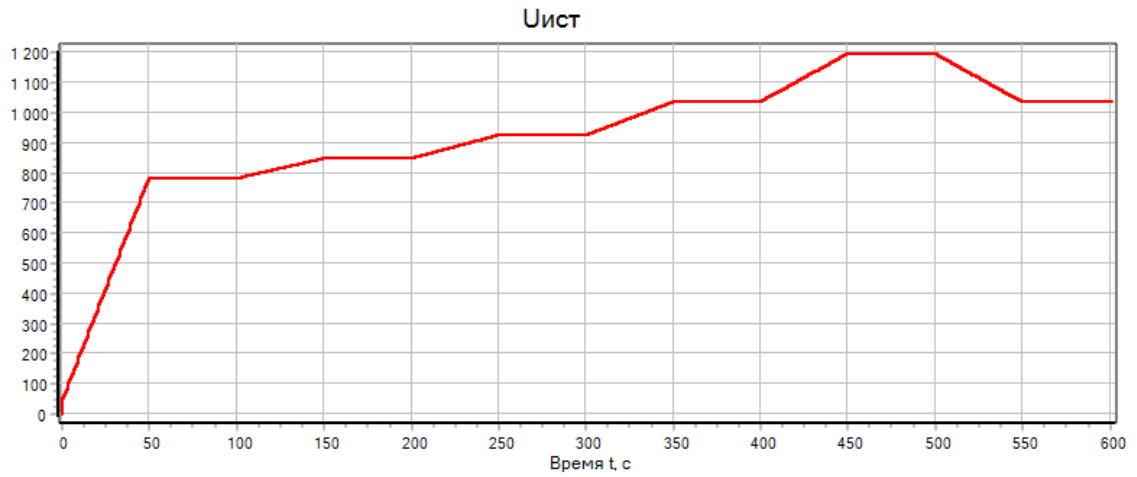
в) электрической мощности, Вт, потребляемой одним ТЭД, с течением времени.

На рисунке 6.3 показано изменение:

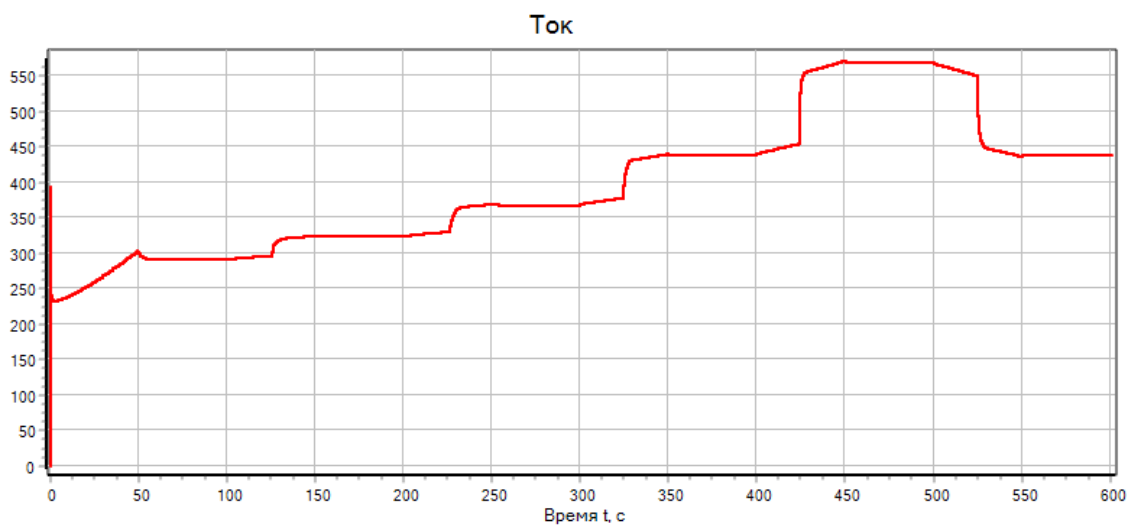
а) частоты вращения n , об/мин,

б) момента на валу M_d , Нм, и

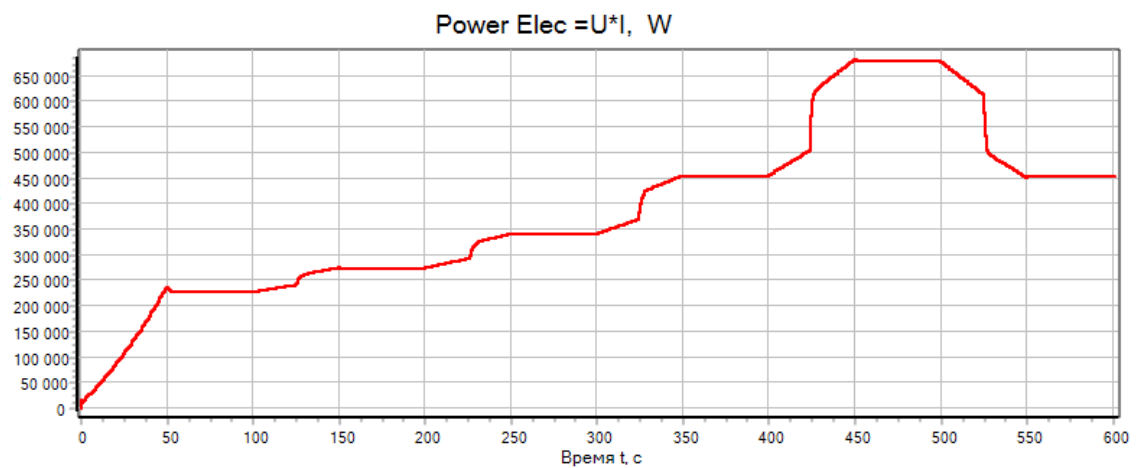
в) механической мощности, Вт, на валу одного ТЭД, с течением времени.



а)

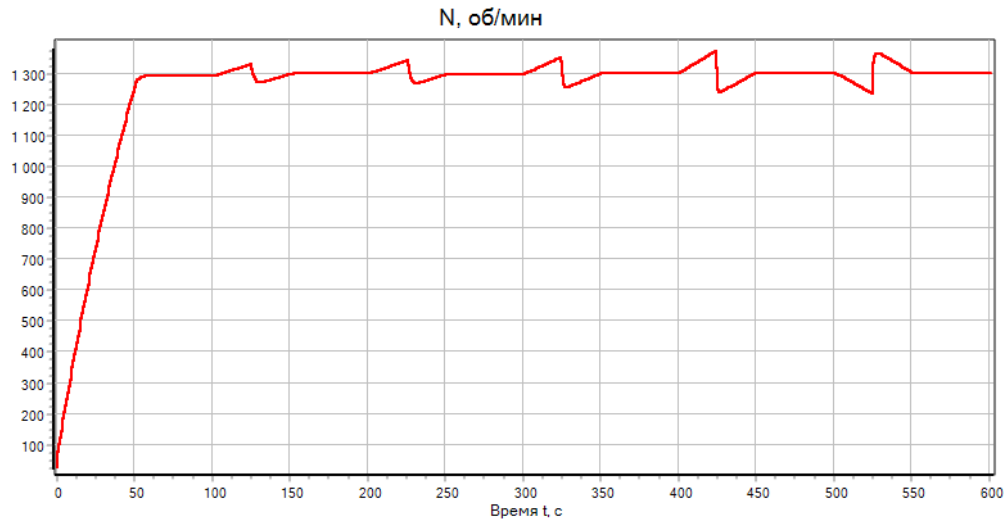


б)

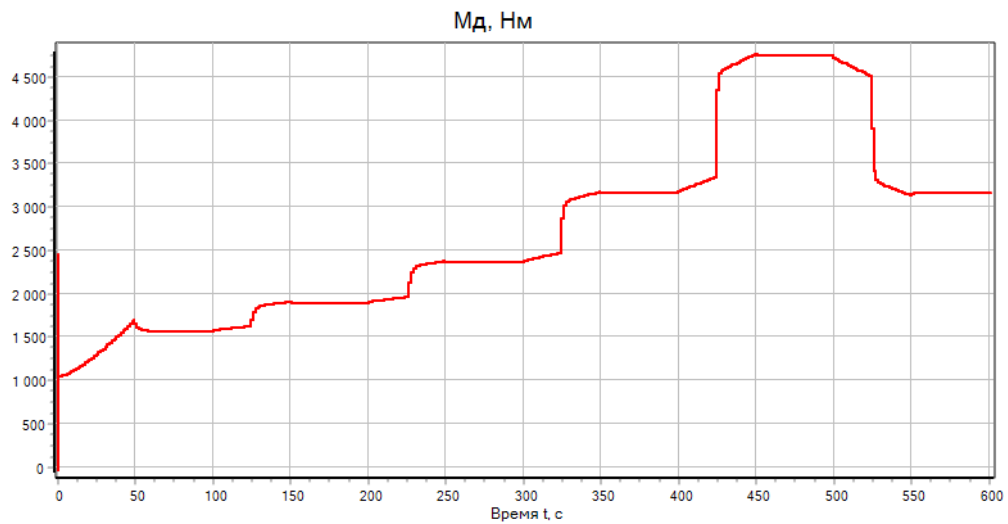


в)

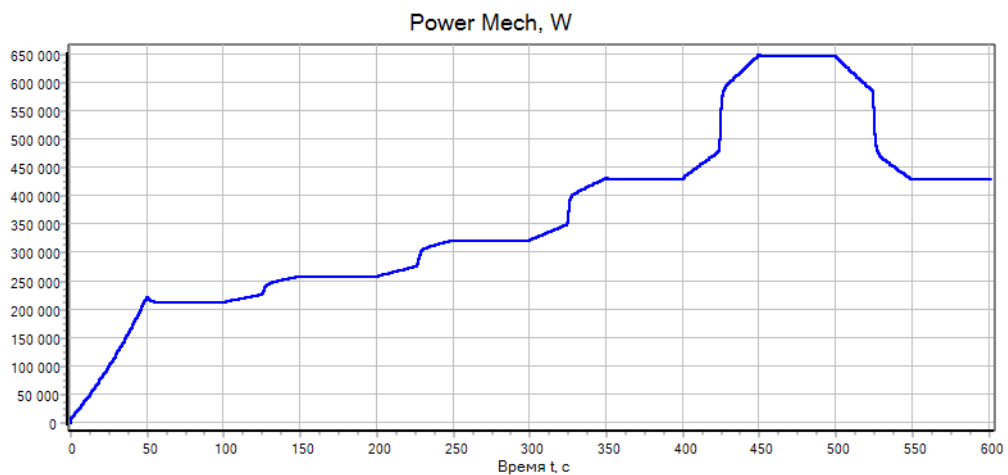
Рисунок 6.2 – Изменение: а) напряжения, В, б) тока, А, и в) электрической мощности, Вт, потребляемой одним ТЭД



а)



б)



в)

Рисунок 6.3 – Изменение: а) частоты вращения n , об/мин, б) момента на валу M_d , Нм, и в) механической мощности, Вт, на валу одного ТЭД, с течением времени.

Обратим внимание на тот факт, что при выбранном варианте управления частота вращения ТЭД остается постоянной (смотри рисунок 6.3 *a*), ей соответствует скорость электровоза 70,4 км/ч.

Суммарную мощность, потребляемую тяговым приводом электровоза, обозначим как

$$P_{1\Sigma} = N_{\text{ТЭД}} \cdot P_1, \quad (6.1)$$

где $N_{\text{ТЭД}}$ – число работающих ТЭД, P_1 – электрическая мощность, потребляемая одним ТЭД.

В случае, когда электровоз работает с неполной нагрузкой, алгоритм отключает один или несколько ТЭД (то есть уменьшает $N_{\text{ТЭД}}$), при этом P_1 возрастает, поскольку скорость и суммарная потребляемая мощность $P_{1\Sigma}$ должны оставаться постоянными во время переключения ТЭД. Процесс отключения продолжается до тех пор, пока значение КИМ каждого из оставшихся в тяге двигателей не превысит 0,45. Если же нагрузка растет, то отключенные ранее ТЭД возвращаются в тягу. В результате, независимо от величины нагрузки, тяговый привод электровоза будет работать с максимально возможной энергоэффективностью.

В данном расчете мощность $P_{1\Sigma}$ остается постоянной, равной 2730 кВт. На рисунке 6.4 показано изменение коэффициента использования мощности γ по мере реализации управляющих воздействий.

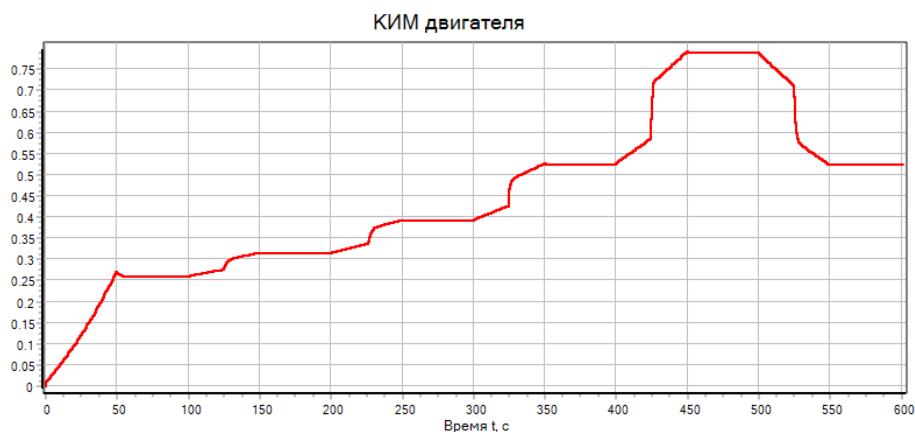


Рисунок 6.4 – Изменение коэффициента использования мощности ТЭД

Таким образом получаем, что:

- 1) при $t = 50 \dots 100$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 12$, $U = 783$ В, $\gamma = 0,259$;
- 2) при $t = 150 \dots 200$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 10$, $U = 850$ В, $\gamma = 0,314$;
- 3) при $t = 250 \dots 300$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 8$, $U = 927$ В, $\gamma = 0,392$;
- 4) при $t = 350 \dots 400$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 6$, $U = 1038$ В, $\gamma = 0,525$;
- 5) при $t = 450 \dots 500$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 4$, $U = 1198$ В, $\gamma = 0,790$;
- 6) при $t = 550 \dots 600$ с, $N_{\text{ТЭД}} = 6$, $U = 1038$ В, $\gamma = 0,525$.

Как видим, энергоэффективный режим ($0,45 \leq \gamma \leq 1,0$) имеет место в последних трех случаях.

6.3 Основные результаты компьютерного моделирования

Исходные параметры процесса моделирования были приняты следующим образом.

- 1) путь предполагаем горизонтальным, ровным и бесстыковым;
- 2) состав включает 100 полувагонов массой по 90 т каждый;
- 3) сила основного сопротивления движению состава при скорости V вычисляется по формуле (2.59);
- 4) электровоз 3ЭС5К имеет 12 тяговых осей, основное сопротивление движению электровоза находится согласно (2.58).

В этих условиях, плавно изменяя напряжение на ТЭД путём отклонения рукоятки, находим ток ТЭД, скорость электровоза и мощность P_{Σ} при работе в штатном режиме ($N_{\text{ТЭД}} = 12$), а также значение КИМ (таблица 6.2). Для справки, в первом столбце таблицы 6.2 приведены номера позиций контроллера машиниста электровоза ВЛ80С.

Изменение скорости согласно таблице 6.2 показано на рисунке 6.5 в графической форме. Чтобы облегчить восприятие, на рисунках 6.5 – 6.8 и в таблице 6.3 применена единая система цветных маркеров.

Таблица 6.2 – Изменение тока ТЭД, скорости электровоза и мощности P_{Σ} по мере увеличения напряжения ($N_{\text{ТЭД}} = 12$)

Позиция КМ	Напряжение на ТЭД, В	Ток ТЭД, А	Скорость, км/ч	Мощность P_{Σ} , кВт	КИМ
1	58	199.3	6	138	0,0109
5	203	211.8	22.5	515	0,0471
9	348	230.4	36.7	950	0,09
13	493	250	49.06	1480	0,139
17	638	270.5	60.3	2069	0,196
21	783	291	70.4	2730	0,259
25	928	310.5	79.6	3457	0,329
29	1073	330.25	88	4250	0,404
33	1218	350	96.2	5110	0,489

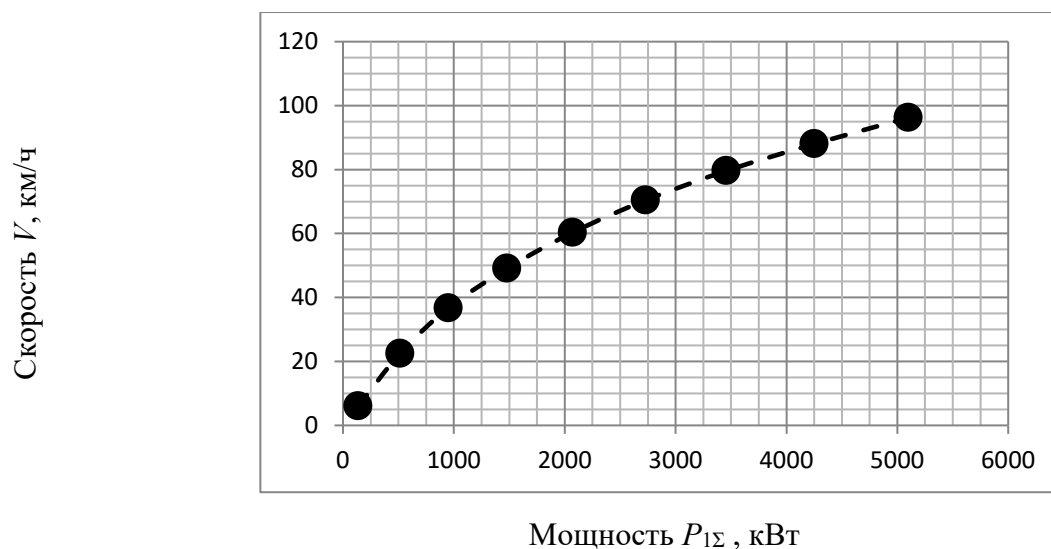


Рисунок 6.5 – Изменение скорости

по мере увеличения напряжения и мощности P_{Σ} (при $N_{\text{ТЭД}} = 12$)

При переключении на другое число работающих тяговых электродвигателей $N_{\text{ТЭД}}$, скорость электровоза должна оставаться прежней. Поэтому серия расчетов была проведена следующим образом: исходя из параметров, приведенных в таблице 6.2, последовательно уменьшали число работающих

тяговых электродвигателей $N_{\text{тэд}}$ (12, 10, 8, ..., и так далее), а путём отклонения джойстика плавно увеличивали напряжение так, чтобы скорость и мощность P_{Σ} оставались постоянными (таблица 6.3). В этой таблице показаны результаты для $N_{\text{тэд}} = 12$ (все три секции в тяге), 10, 8, 6, 4 и 2 (одна тележка). Аналогичные результаты получены и для поосного регулирования.

Видим, что имеет место возрастание КИМ. Однако, значение КИМ должно оставаться в пределах $0,45 \leq \gamma \leq 1,0$, чем обеспечивается максимальная энергетическая эффективность, смотри главу 2. Соответствующие режимы отмечены в таблице 6.3 светло-зеленой заливкой. Розовой заливкой отмечены режимы с чрезмерно высоким напряжением, превышающим 1260 В.

Результаты, приведенные в таблице 6.2, представим в виде графиков. На рисунке 6.6 показано, каким образом необходимо увеличивать напряжение для того, чтобы обеспечить постоянство скорости по мере изменения $N_{\text{тэд}}$ (при различных значениях мощности $P_{1\Sigma}$).

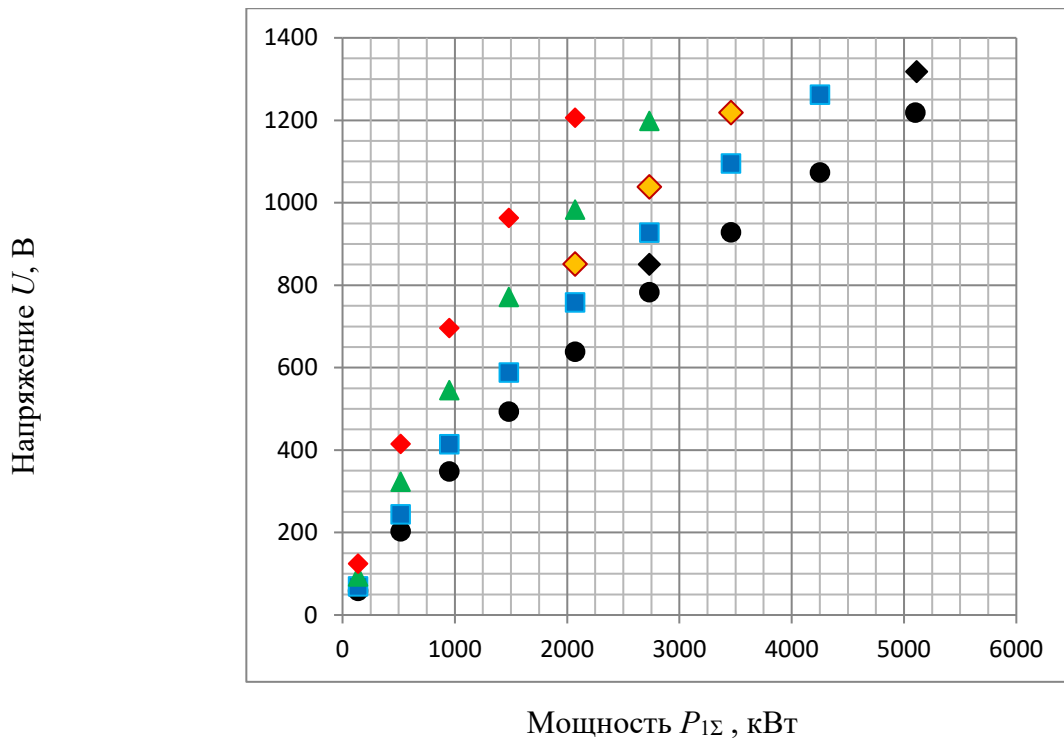


Рисунок 6.6 – Возрастание напряжения

по мере изменения мощности P_{Σ} при $N_{\text{тэд}} = 12, 10, 8, 6, 4, 2$

Таблица 6.3 – Изменение напряжения и тока ТЭД, скорости электровоза и мощности $P_{1\Sigma}$ при $N_{\text{ТЭД}} = \text{variable}$

$N_{\text{ТЭД}}$	Напряжение на ТЭД, В	Ток ТЭД, А	Скорость, км/ч	Мощность $P_{1\Sigma}$, кВт	КИМ
1	2	3	4	5	6
12 ●	1218	349,8	96,1	5111	0,489
10 ◆	1318	391	– “ –	– “ –	0,594
8 ■	1428	447	– “ –	– “ –	0,738
6 ◆	1577	536,7	– “ –	– “ –	0,982
4 ▲	1780	708,8	– “ –	– “ –	1,467

1	2	3	4	5	6
12 ●	1073	330,25	88	4250	0,404
8 ■	1262	420,8	– “ –	– “ –	0,613
6 ◆	1405	504,7	– “ –	– “ –	0,822
4 ▲	1594	662	– “ –	– “ –	1,227

1	2	3	4	5	6
12 ●	928	310,5	79,4	3457	0,329
8 ■	1095	394,3	– “ –	– “ –	0,498
6 ◆	1218	470,5	– “ –	– “ –	0,663
4 ▲	1395	614,3	– “ –	– “ –	0,995

1	2	3	4	5	6
12 ●	783	291	70,4	2730	0,259
10 ◆	850	323,5	– “ –	– “ –	0,314
8 ■	927	367,8	– “ –	– “ –	0,392
6 ◆	1038	438,2	– “ –	– “ –	0,525
4 ▲	1198	569,1	– “ –	– “ –	0,79
2 ◆	1440	949,4	– “ –	– “ –	1,581

Окончание таблицы 6.3

1	2	3	4	5	6
12 ●	638	270,5	60,1	2070	0,196
8 ■	757,5	341,1	– “ –	– “ –	0,296
6 ◆	851	405,25	– “ –	– “ –	0,397
4 ▲	983	521,9	– “ –	– “ –	0,593
2 ◆	1206	856,5	– “ –	– “ –	1,192

1	2	3	4	5	6
12 ●	493	250	49,06	1480	0,139
8 ■	588	314,7	– “ –	– “ –	0,211
4 ▲	771	477,6	– “ –	– “ –	0,407
2 ◆	963	770,5	– “ –	– “ –	0,853

1	2	3	4	5	6
12 ●	348	230,4	36,7	950	0,09
8 ■	413,5	288,25	– “ –	– “ –	0,135
4 ▲	545	433,2	– “ –	– “ –	0,270
2 ◆	696	688	– “ –	– “ –	0,546

1	2	3	4	5	6
12 ●	203	211,8	22,5	515	0,0471
8 ■	243,5	264,3	– “ –	– “ –	0,071
4 ▲	323,25	394,3	– “ –	– “ –	0,142
2 ◆	415	615	– “ –	– “ –	0,284

1	2	3	4	5	6
12 ●	58	199,3	6	138,6	0,011
8 ■	69	247,4	– “ –	– “ –	0,0163
4 ▲	93,2	366	– “ –	– “ –	0,0327
2 ◆	124	564,25	– “ –	– “ –	0,0657

На рисунке 6.7 показано, каким образом изменяется ток ТЭД по мере изменения $N_{\text{тэд}}$ при обеспечении постоянства скорости (при различных значениях напряжения и мощности $P_{1\Sigma}$).

На рисунке 6.8 показано, каким образом изменяется КИМ по мере изменения $N_{\text{тэд}}$ при обеспечении постоянства скорости (при различных значениях напряжения и мощности $P_{1\Sigma}$). Пунктирный прямоугольник показывает режимы работы, в которых обеспечивается наивысшая энергоэффективность.

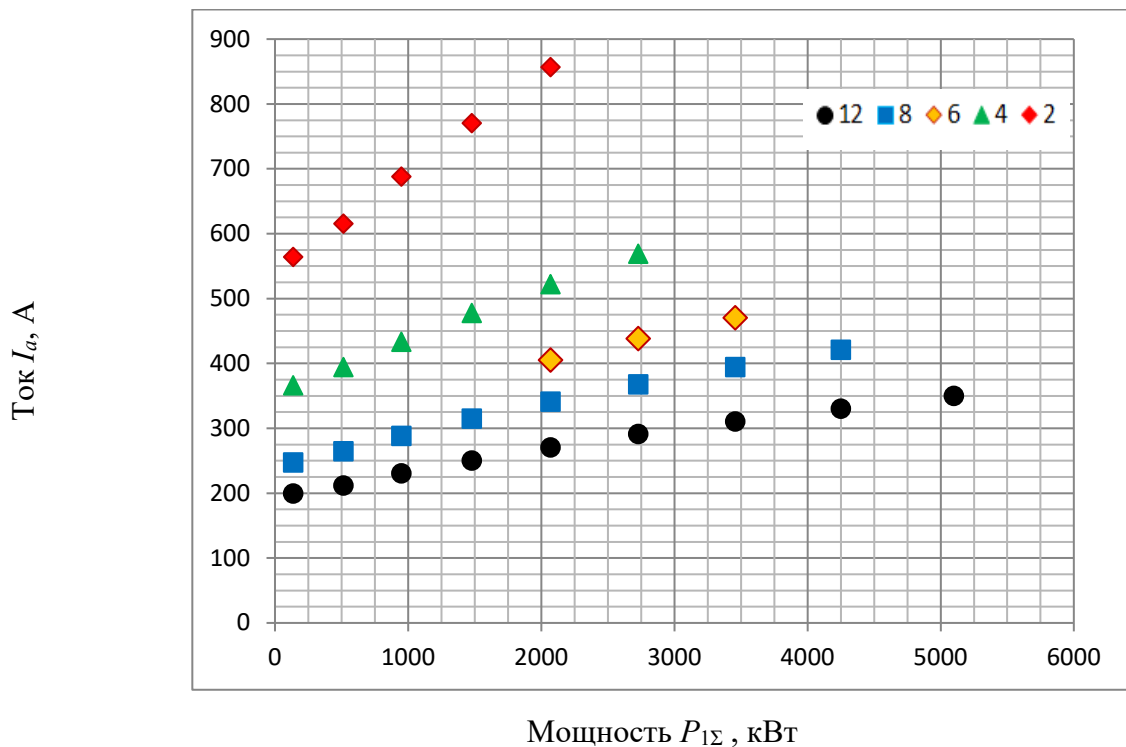


Рисунок 6.7 – Возрастание тока ТЭД по мере изменения мощности $P_{1\Sigma}$ при $N_{\text{тэд}} = 12, 8, 6, 4, 2$

6.4 Варианты подключения ТЭД и другого оборудования при работе в энергоэффективном режиме

Опираясь на представленные выше результаты, рассмотрим варианты подключения ТЭД и работы другого оборудования в энергоэффективном режиме (рисунок 6.9).

На рисунке 6.9 *a* представлен вариант работы тягового привода с полной нагрузкой, при $N_{\text{тэд}} = 12$ и мощности $P_{1\Sigma}$, превышающей 5111 кВт (см.

таблицу 6.3 и рисунок 6.8). Такие мощности имеют место при разгоне и при движении на подъём с высокой скоростью. Всё тяговое электрооборудование используется более чем на 45%, мотор-вентиляторы питаются напряжением с частотой 50 Гц.

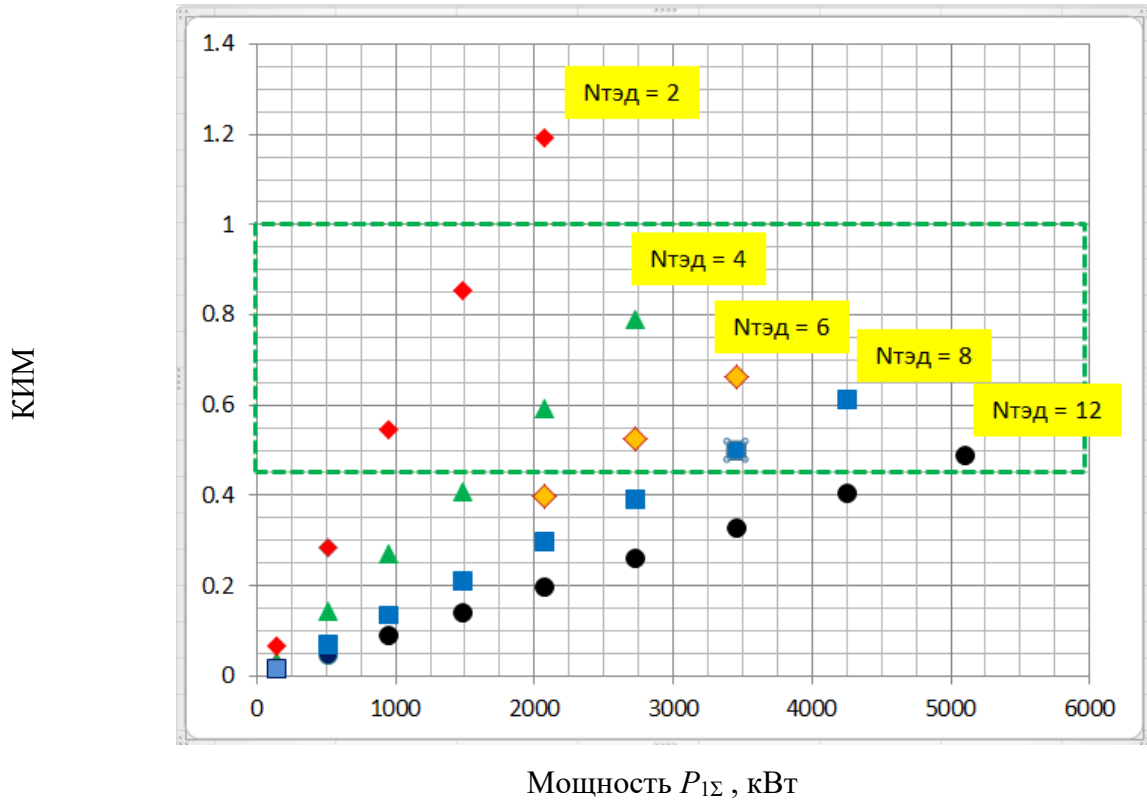


Рисунок 6.8 – Возрастание КИМ по мере изменения мощности $P_{1\Sigma}$ при $N_{тэд} = 12, 10, 8, 6, 4, 2$

На рисунке 6.9 б представлен вариант работы тягового привода при $N_{тэд} = 10$ и мощности $P_{1\Sigma}$ в пределах 4250...5111 кВт. В такой ситуации, работают тяговые двигатели тележек II – VI, но тяговые двигатели тележки I отключаются. Мотор-вентилятор этой тележки переводится на питание частотой $16\frac{2}{3}$ Гц (после того как температура ТЭД понизится до допустимых значений). Если тяговые двигатели тележки I остаются отключенными более чем на 20...25 минут, они возвращаются в тягу, вместо них отключается III или V тележка (резервный вариант отключения).

На рисунке 6.9 в представлен вариант работы тягового привода при $N_{тэд} = 8$ и мощности $P_{1\Sigma}$ в пределах 3400...4250 кВт. В данном случае, могут быть

отключены тележки I и III, а мотор-вентиляторы этих тележек переведены на питание частотой $16\frac{2}{3}$ Гц. Резервный вариант отключения – II и V тележки.

На рисунке 6.9 *з* представлен вариант работы тягового привода при $N_{\text{ТЭД}} = 6$ и мощности $P_{1\Sigma}$ в пределах 2550...3400 кВт. В данном случае, могут быть отключены тележки I, III и V, и мотор-вентиляторы этих тележек переведены на питание частотой $16\frac{2}{3}$ Гц. Резервный вариант отключения – II, IV и VI тележки.

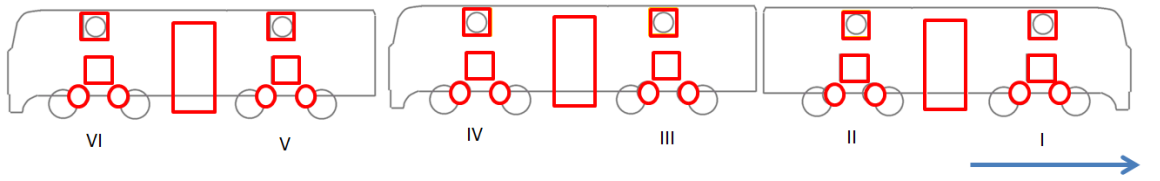
На рисунке 6.9 *д* представлен вариант работы тягового привода при $N_{\text{ТЭД}} = 4$ и мощности $P_{1\Sigma}$ в пределах 1700...2550 кВт. В данном случае, могут быть отключены тележки I, II, III и V, и мотор-вентиляторы этих тележек переведены на питание частотой $16\frac{2}{3}$ Гц. Резервный вариант работы – посекционное переключение.

Наконец, на рисунке 6.9 *е* представлен вариант работы тягового привода при $N_{\text{ТЭД}} = 2$ и мощности $P_{1\Sigma}$ в пределах 950...1700 кВт. В данном случае, остается в тяге только тележка VI, а другие ТЭД можно отключить, их мотор-вентиляторы перевести на питание частотой $16\frac{2}{3}$ Гц. Резервный вариант работы – потележечное переключение.

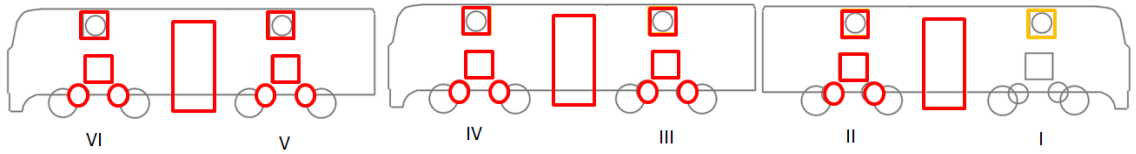
Что касается вариантов энергоэффективной работы двухсекционного электровоза 2ЭС5К, то их можно получить, если на схемах рисунка 6.9 убрать заднюю по ходу секцию, оставляя в рассмотрении только рисунки 6.9 *а* (теперь при $N_{\text{ТЭД}} = 8$), *б* (при $N_{\text{ТЭД}} = 6$), *в* (при $N_{\text{ТЭД}} = 4$) и *з*) *д* (при $N_{\text{ТЭД}} = 2$).

Описанный выше алгоритм приводится в действие только после того, как поезд разгонится до скорости не менее 40 км/ч при всех работающих ТЭД, электрическое торможение также производится всеми ТЭД.

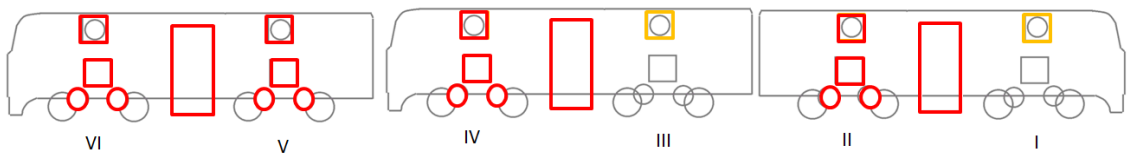
В заключение ещё раз отметим, что плавное отключение / подключение ТЭД производится путем управления тиристорными преобразователями, без установки каких-либо дополнительных контакторов.



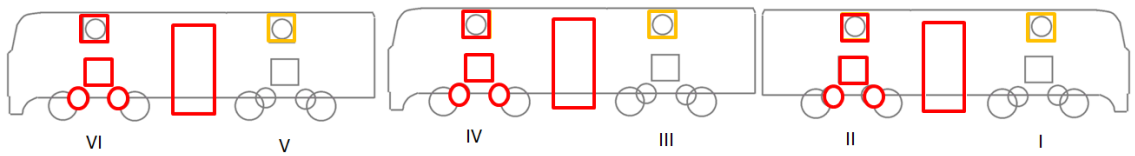
a) $N_{ТЭД} = 12$



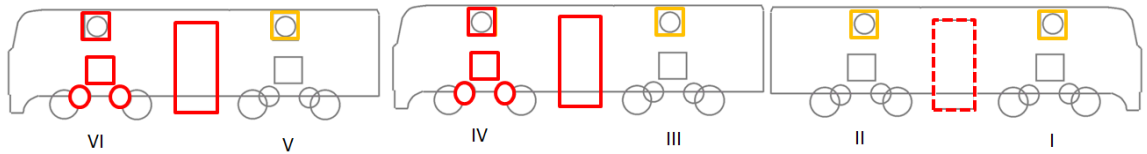
б) $N_{ТЭД} = 10$



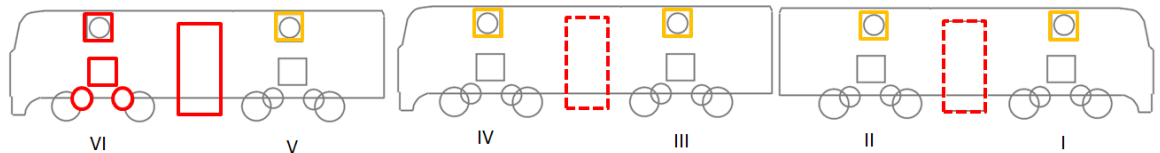
в) $N_{ТЭД} = 8$



г) $N_{ТЭД} = 6$



д) $N_{ТЭД} = 4$



е) $N_{ТЭД} = 2$

Мотор-вентиляторы	 50 Гц	 16 2/3 Гц	
Тяговый привод	 Полная нагрузка	 Частичная нагрузка	 Обесточено

Рисунок 6.9 – Варианты режимов работы тягового привода и мотор-вентиляторов в зависимости от нагрузки (потележечное регулирование)

6.5 Выводы по главе

Путем применения методов программно-аппаратного моделирования, предложены варианты подключения ТЭД и другого силового и вспомогательного оборудования при работе электровоза в энергоэффективном режиме. В том числе, программно ограничено время нахождения ТЭД в выключенном состоянии.

1. Для исследования работы электровоза в энергоэффективном режиме, опираясь на методы программно-аппаратного моделирования (ПАМ), в пакете отечественной разработки *SimInTech* создан прототип стенда (программно-аппаратный симулятор), предназначенного для моделирования процессов в управляемой электромеханической системе электровозов семейства «Ермак».

2. Выполнен тестовый расчет, по итогам которого подтверждена адекватность результатов имитационного моделирования (напряжение, ток, частота вращения, моменты, мощности, и т.д.), воспроизводящего управляющие воздействия оператора (машиниста).

3. В результате моделирования процессов, протекающих в тяговом приводе при работе с различным числом работающих ТЭД, получены диапазоны, в которых достигается минимум энергопотребления (КИМ находится в пределах $0,45 \leq \gamma \leq 1,0$).

4. Предложены варианты подключения ТЭД, при которых для работы с различной нагрузкой реализуется энергоэффективный режим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Разработан комплекс научно обоснованных технических решений по модернизации многодвигательного тягового привода грузовых электровозов семейства «Ермак» в ходе заводского ремонта, направленных на повышение энергетической эффективности. Сформулированы предложения по их реализации (смотри Приложение 2). В результате будет достигнуто сокращение удельного расхода электроэнергии в режиме тяги с обеспечением надежности и работоспособности коллекторных тяговых двигателей.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. На основании изучения литературных источников и накопленного практического опыта, сделан вывод о практической возможности повышения энергетической эффективности многодвигательного тягового привода путем отключения/подключения тяговых двигателей в зависимости от нагрузки. За основу принят алгоритм ДАУ – способ управления энергетической эффективностью электровоза при работе с неполной нагрузкой (патент RU 2617857).

2. Сформулированы условия, которые должны быть соблюдены при реализации алгоритма ДАУ на электровозах с коллекторными ТЭД.

3. Изучена энергетическая эффективность основных элементов тяговой системы электровоза (трансформатор, преобразователь, ТЭД и др.) в переменных режимах работы. Показано, что вид зависимости КПД этих элементов от нагрузки имеет сходный характер.

4. Получена система уравнений электромеханических процессов в ТЭД с учетом потерь, записан баланс мощностей. Построена компьютерная модель процессов в пакете SimInTech. Полученные расчетные значения основных параметров работы ТЭД практически совпадают с результатами квалификационных испытаний, что позволяет говорить об адекватности модели.

5. Получены закономерности изменения КПД и КИМ как от электрической мощности, потребляемой двигателем, так и от его полезной механической мощности. Найденные закономерности изменения КПД и КИМ от потребляемой мощности имеют принципиальное значение, так как позволяют вычислять текущее значение основного критерия, используемого алгоритмом ДАУ, при помощи штатных сигналов системы управления электровозом и не требует установки дополнительного оборудования в ходе модернизации.

6. Изучена степень использования установленной мощности грузовых электровозов в реальных условиях эксплуатации на Северо-Кавказской ж.д. Дана оценка энергопотребления при работе в штатном и энергоэффективном режимах груженных и порожних поездов на участке Лихая – Крымская в прямом и обратном направлении. После модернизации, для груженных поездов 6300 т, при работе в энергоэффективном режиме, расчетный удельный расход электроэнергии уменьшается в среднем на 9,5%. Для порожних поездов 1750 т, при работе в энергоэффективном режиме, расчетный удельный расход электроэнергии сократится на 14%,

7. Выполнено моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции. Этот вопрос изучен применительно к условиям работы ТЭД в энергоэффективном режиме.

8. Изучен вопрос обеспечения надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла ТЭД при работе в энергоэффективном режиме за счет применения электропроводящей смазки. Сформулированы практические рекомендации.

9. Путем применения методов программно-аппаратного моделирования, предложены варианты подключения ТЭД и другого силового и вспомогательного оборудования при работе электровоза в энергоэффективном режиме. В том числе, программно ограничено время нахождения ТЭД в выключенном состоянии, что обеспечивает надежность работы КЩУ.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации. Развитое в настоящей работе научное направление и комплекс инновационных технических решений по повышению энергетической эффективности являются перспективными и могут быть распространены на другие серии находящихся в эксплуатации магистральных электровозов с коллекторными тяговыми электродвигателями.

Наряду с этим, предложения по обеспечению надежности и работоспособности коллекторно-щеточного узла применимы и для тяговых двигателей и тяговых генераторов постоянного тока тепловозов.

Реализация предлагаемых мер может быть выполнена в ходе заводского ремонта.

Это обеспечит существенную экономию топливно-энергетических ресурсов и сокращение издержек ОАО «РЖД» на их приобретение.

Список литературы

К 1-й главе

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. Легостаев, В. А. Экономия электрической энергии на электроподвижном составе - М.: Транспорт, 1956. - 34 с.

1.3. Вольф А. М. Когда выгоден режим отключения части тяговых двигателей электровозов // ЭТТ, 1968, №1. – с. 4-6.

1.4. Варламов, А. А. Частичное отключение тяговых двигателей на электровозах переменного тока / А. А. Варламов, Н. Г. Тарасов // Электрическая и тепловозная тяга. – 1969. – № 12. – С. 8–9.

1.5. Бычковский А. В., Беспалов И. Б. Надо отключить часть тяговых двигателей на ВЛ80К. Как это лучше сделать? // ЭТТ, 1972, №11. – с. 35-37.

1.6. Классен, Г. Я. Анализ затрат электроэнергии на тягу электровозами со схемой дистанционного отключения части двигателей / Г. Я. Классен, Р. Я. Медлин, С. М. Рождественский, Ю. А. Усманов // Сб. науч. тр. ОмИИТа. – Омск, 1974. – Вып. 163 – С. 45–50.

1.7. Медлин, Р. Я. Экономия энергии при отключении части тяговых двигателей на электровозах постоянного тока и методика ее определения / Р. Я. Медлин, С. М. Рождественский, Ю. А. Усманов // Сб. науч. тр. ОмИИТа. – Омск, 1974. – Вып. 163. – С. 33–44.

1.8. Борцов, П. И. И все же двигатели отключать не следует / П. И. Борцов, З. М. Дубровский, А. С. Курбасов, Х. Я. Быстрицкий // Электрическая и тепловозная тяга. – 1978. – № 10 – С. 35–37.

1.9. Некрасов, О. А. Расчетные исследования отключения части тяговых двигателей электровоза постоянного тока с целью снижения расхода энергии на тягу / О. А. Некрасов, В. И. Рахманинов // Труды ВНИИЖТ. – 1982. – Вып. 642. – С. 43-54.

1.10. Пыров А.Е. Современные системы управления электровозами / Железнодорожный транспорт. - 2005. - № 2. - С. 64-66.

1.11. Гетьман, Г. К. О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава / Г.К. Гетьман, В.Е. Васильев // Залізн. трансп. України. – 2011. – № 4. – С. 51–54.

1.12. Г.К. Гетьман, В. Е.Васильев. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава. – Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2013. – Вип. 5 (47). – С. 47-55.

1.13. Г.К. Гетьман, В. Е.Васильев. О возможности снижения расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов за счет частичного отключения части тяговых двигателей // Електрифікація транспорту. – 2015 № 10. с. 50-58. ISSN 2307-4221

1.14. Бабич В.М., Крыгин А.Н. Оптимальное регулирование мощности электровоза переменного тока в режимах тяги и рекуперативного торможения. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.- Омск, 1990. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 31.01.91, № 5371.

1.15. Бабич, В.М. Оптимальное регулирование мощности многоосного сцепа в тяге / В.М. Бабич, А.Н. Крыгин // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 12-13.

1.16. Бабич В. М., Крыгин А. Н . Математическая модель оптимизации мощности тягового электропривода // Повышение тягово-энергетических показателей и эффективности эксплуатационно-ремонтного обслуживания магистральных электровозов / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп.- Омск, 1993.-С. 27-37.

1.17. Бабич В. М., Крыгин А. Н. Энергетическая эффективность сцепа электровозов при оптимальном числе движущих осей / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. - Омск, 1994. - Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 27.02.95, № 5963.

1.18. Бабич, В.М. Повышение энергетической эффективности электровозов / Омская гос. акад. путей сообщения, 1995. – 112 с.

1.19. Плаксин. А.В. Об использовании мощности пассажирских электровозов на участке Исилькуль – Инская. / Повышение тягово-энергетической эффективности и надежности электроподвижного состава // Омский гос. ун-т путей сообщения. - Омск, 1999. С. 57 - 61.

1.20. Крыгин А.Н. Математическая модель тягово-энергетической установки электровоза переменного тока / Повышение тягово-энергетической эффективности и надежности электроподвижного состава. - Омский гос. ун-т путей сообщения. - Омск, 1999. - С.44-53.

1.21. Крыгин А.Н. Математическая модель оптимизации числа движущих осей электровоза / Математическое моделирование и расчет узлов и устройств объектов железнодорожного транспорта - Омск : ОМГУПС, 2000. - 66 с.

1.22. В.М. Бабич, А.М. Крыгин. Автоматическое регулирование мощности электровоза с оптимизацией энергопотребления на тягу поездов / Ресурсосберегающие технологии на предприятиях Западно-Сибирской железной дороги - Омск: ОМГУПС, 2001. - С. 226-230.

1.23. Крыгин А.Н. Аналитические зависимости оптимальных параметров регулирования мощности тягового привода магистральных электровозов переменного тока / Математическое моделирование и расчет узлов и устройств объектов железнодорожного транспорта // Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2008. С. 24 - 27.

1.24. Сорокин, С.В. Анализ потерь электроэнергии в электровозе ВЛ80С и экономия энергозатрат при посекционном регулировании / С.В. Сорокин,

В.В. Ширяев // Тезисы докладов конференции «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 13-14.

1.25. Саблин, О.И. Снижение избыточной мощности тягового средства в процессе движения / О.И. Саблин, В.В. Артемчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 6/8 (60). – С. 34-37.

1.26. Способ управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой / А.А. Андрющенко, А.А. Зарифьян, Ю.А. Орлов, К.П. Солтус // Патент RU 2617857; приоритет от 15.09.2015 - Бюлл. №13 - Опубликовано 28.04.2017

1.27. Электровозы 2ЭС5С и 3ЭС5С: асинхронная тяга под флагом России // Техника железных дорог, 2020, № 1(49). – С. 10-13.

1.28. Зарифьян, А.А. О возможности повышения энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак» / А.А. Зарифьян, О.С. Веригин, А.Ш. Мустафин, Т.З. Талахадзе // Всероссийская национальная научно-практическая конференция «Современное развитие науки и техники» («Наука-2020»). Ростов н/Д, 01 - 03 декабря 2020 г. (*в печати*)

1.29. Коротков, В.М. Электропроводящая смазочная композиция для коллекторных электромашин большой мощности // Вестник РГУПС – 2016, №2. – С. 12-18.

1.30. Зарифьян, А.А. Моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции / А.А. Зарифьян, В.В. Михайлов, А.Ш. Мустафин, Н.Р. Тептиков // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019, №3. – с. 17-21.

1.31. Сенаторов В.А. Отключение части тяговых двигателей электровоза с целью экономии электроэнергии на тягу при ведении легковесного поезда // Вестник ВНИИЖТ. 2003. №1. С. 17-22.

1.32. Заручейский, А.В. Анализ научных подходов к повышению эффективности использования грузовых электровозов / А.В. Заручейский, Р.В.

Мурзин, В.А. Кучумов, Н.Б. Никифорова // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2014. – №1 – С. 37-41.

1.33. Сорокин, С.В. Повышение экономичности многосекционных электровозов переменного тока при вождении грузовых поездов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03, 05.09.01 / Сорокин Сергей Викторович. – М.: МИИТ, 1991. – 24 с.

1.34. Крыгин, А.Н. Способы повышения эксплуатационной энергетической эффективности магистральных электровозов переменного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Крыгин Анатолий Николаевич. – Омск, ОмГУПС, 1998. – 22 с.

1.35. Мурзин, Д.В. Пути и средства расширения функциональных возможностей и повышения эффективности эксплуатируемых магистральных электровозов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Мурзин Дмитрий Владимирович. – Омск, ОмГУПС, 2000. – 21 с.

1.36. Фадеев, С.В. Повышение экономичности электровозов переменного тока за счет применения новых электронных систем управления : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Фадеев Сергей Владимирович. – М.: МИИТ, 2003. – 23 с.

1.37. Плаксин, А. В. Пути снижения расхода электрической энергии при эксплуатации пассажирских электровозов на равнинных участках железных дорог / А.В. Плаксин, С.В. Швецов // Известия Транссиба/ Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – №1 (29). – С. 35 – 47.

1.38. Плаксин, А. В. Пути повышения энергетической эффективности пассажирских электровозов при эксплуатации на равнинных участках железных дорог / А. В. Плаксин, С. В. Швецов // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 3 (31). – С. 43 – 54.

1.39. Никончук, И.Н. К вопросу повышения эксплуатационной энергетической эффективности работы восьмиосных пассажирских электровозов постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 373 – 382.

1.40. Бахвалов, Ю.А. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Ю.А. Бахвалов, А.А. Зарифьян, В.Н. Кашников [и др.]; под ред. Е.М. Плохова. – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.

1.41. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Technical reports / A. Brecher, J. Sposato, and B. Kennedy // Office of Research and Development. Washington, DC 20590. – Report number: DOT/FRA/ORD-14/02. – 28 jan. 2014.

1.42. Feng, Xuesong & Zhang, Hanxiao & Ding, Yong & Liu, Zhili & Peng, Hongqin & Xu, Bin. (2013). A Review Study on Traction Energy Saving of Rail Transport. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2013. 10.1155/2013/156548.

1.43. Электроподвижной состав отечественных железных дорог - электронный ресурс: https://vk.com/doc-155711_437259467

1.44. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) "Ермак" - Руководство по эксплуатации. - электронный ресурс: <http://scbist.com/tyagovyi-podvizhnoi-sostav/6666-elektrovoz-magistralnyi-2es5k-3es5k-ermak-rukovodstvo-po-ekspluatacii.html>

1.45. Зарифьян, А. А. Анализ использования мощности грузовых электровозов и возможность сокращения энергопотребления за счет модернизации при заводском ремонте / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник РГУПС. – 2021. – № 1(81). – С. 20-29. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_20.

1.46. Capacity utilization level of freight electric locomotives and evaluation of expenses reduction on consumed energy due to modernization (Уровень использования доступной мощности грузовых электровозов и оценка сокращения расходов на энергоресурсы за счет модернизации) / А.А. Зарифьян, А.Ш. Мустафин, Валенцева Е.В., Шапшал А.С. // *Transport problems* – 2021, №4 – с. 5 – 14. DOI: 10.21307/tp-2021-055 – https://www.exeley.com/transport_problems/pdf/10.21307/tp-2021-055

1.47. Алексеев, А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи. – Л.: Энергия, 1977. – 444 с.

1.48. Костенко, М.П., Пиотровский, Л.М. Электрические машины. Часть 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. – Л.: Энергия, 1972. – 544 с.

1.49. Тяговые электродвигатели электровозов. Под ред. В.Г. Щербакова. – Новочеркасск: Агентство "Наутилус", 1998. – 672 с.

1.50. Лившиц, П.С. Щетки для электрических машин. – М. - Л.: Госэнергоиздат, 1961. - 270 с.

1.51. Хольм, Р. Электрические контакты. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. - 464 с.

1.52. Мышкин, Н.К. Трибологические аспекты применения электрических контактов / Н.К. Мышкин // Трение и износ. - 1984. - Т. 5 (31). - С. 34-42.

1.53. Устройство токосъёма для электрической машины / Ю.А. Евдокимов, Н.К. Мышкин, В.Г. Козубенко, В.М. Коротков // А.с. СССР SU 1403150. Приоритет от 24.02.1986. <https://patents.su/1988/page/846>

1.54. Устройство токосъёма для электрической машины / Колесников В.И., Соломин В.А., Чернявская Н.А. // Патент РФ RU 2178225/ Приоритет от 20.01.1999. https://yandex.ru/patents/doc/RU2178225C2_20020110

1.55. Коротков, В.М. Математическая модель и оптимизация процесса изнашивания материалов электрического скользящего контакта коллекторно-щеточного узла тяговой электрической машины / В.М. Коротков // Деп. в ЦНИИТЭИ МПС. 17.10.1988. № 4675.

1.56. Коротков, В.М. Исследование трения, изнашивания и электропроводимости в электрическом скользящем контакте коллекторно-щеточного узла / В.М. Коротков // Трение и смазка машин и механизмов. — 2008. - № 11. - С. 33—35.

1.57. Коротков, В.М. Влияние коллекторной пленки на процессы токопрохождения в электрическом скользящем контакте // Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Транспорт-2011». — Ч. 2. - Ростов н/Д: РГУПС, 2011. - 450 с.

1.58. Коротков, В.М. Влияние коллекторной пленки на процессы трения и изнашивания в электрическом скользящем контакте / В.М. Коротков // Труды Междунар. науч. конф. «Механика и трибология транспортных систем» (МехТрибоТранс-2011). - Ростов н/Д : РГУПС, 2011. – 410 с.

1.59. Коротков, В.М. Исследование возможности применения смазочных композиций в электрическом скользящем контакте / В.М. Коротков // Труды РГУПС. -2010. -№ 2 (13). —С. 38-43.

1.60. Коротков, В.М. Электропроводящая смазочная композиция для коллекторных электромашин большой мощности / Вестник РГУПС. 2016, № 2 – С. 12-18.

1.61. Коротков, В.М. Физическое моделирование процессов трения и изнашивания в электрическом скользящем контакте / Образование и право, 2020, №11, с. 312-318.

1.62. Зюзев, А.М. Программно-аппаратный комплекс для моделирования электроприводов в реальном времени / А.М. Зюзев, К.Е. Нестеров, М.В. Мудров // Электротехника. – 2014, № 9. – С. 56-62.

1.63. Костыгов, А.М. Состояние и перспективы использования аппаратно-программных симуляторов электротехнических комплексов / А.М. Костыгов [и др.] // Электротехника. – 2015, № 6. – С. 8-12.

1.64. Аппаратно-программные симуляторы электротехнических комплексов / А.М. Зюзев, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров [и др.] // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока", [г. Екатеринбург], 05-09 октября 2015 г. — Екатеринбург: [УрФУ], 2015. – С. 159-162.

1.65. Зюзев, А.М. Аппаратно-программные симуляторы электротехнических комплексов / А.М. Зюзев, М.В. Мудров, К.Е. Нестеров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016, №2. – С. 58-62.

1.66. Вынгра, А.В. Использование программно-аппаратного моделирования при проектировании системы управления судовой холодильной установкой / А.В. Вынгра, Б.А. Авдеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017, Т. 9, № 4. – С. 806-813.

1.67. [Электронный ресурс] <http://www.3v-services.com/#simintech>

1.68. Зарифьян, А.А. Программно-аппаратное моделирование электро-механических процессов в тяговом приводе электровоза при поосном регулировании силы тяги / А.А. Зарифьян, А.Ш. Мустафин, Т.З. Талахадзе // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4(53). – С. 48-52.

Ко 2-й главе

2.1. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. – Новочеркасск, 2004.

2.2. Вопросы теории и расчета трансформаторов / под ред. С.Б. Васютинского - Л.: Энергия, 1970. - 432 с.

2.3. Соломин, В.А., Замшина, Л.Л., Соломин А.В. Проектирование мощных силовых трансформаторов: Методические указания к курсовому проектированию. - Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2004. - 31 с.

2.4. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.

2.5. Электровоз магистральный 2ЭС5К (ЗЭС5К). Руководство по эксплуатации. – Книга 1 – Новочеркасск, 2004.

2.6. Компьютерное моделирование взаимодействия МСУД и ВИП в режиме тяги / О.С. Веригин, А.А. Зарифьян, А.Ш. Мустафин, Н.В. Романченко // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование,

производство», том 3. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – с. 289-293

2.7. Зарифьян, А. А. Компьютерное моделирование процессов, протекающих в выпрямительно-инверторном преобразователе в режиме тяги / А.А. Зарифьян, А.Ш. Мустафин, Т.З. Талахадзе // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство», Том 2. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2020. – С. 99 – 103

2.8. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: <https://simintech.ru/>

2.9. Бурков, А. Т. Электроника и преобразовательная техника. – Т. 2: Электронная преобразовательная техника. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. — 307 с.

2.10. Алексеев, А.Е. Тяговые электродвигатели. – М.: Трансжелдориздат МПС, 1951. – 484 с.

2.11. Проектирование тяговых электрических машин. Под ред. М.Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.

2.12. Курбасов, А.С., Седов, В.И., Сорин, Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

2.13. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочаров, Г.В. Василенко, В.Г. Щербаков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.

2.14. Математическое моделирование динамики электровозов / А.Г. Никитенко, Е.М. Плохов, А.А. Зарифьян, Б.И. Хоменко. – М.: Высшая школа, 1998. – 274 с.

2.15. Тяговые двигатели электровозов / В.И. Бочаров, В.И. Захаров, Л.Ф. Коломейцев и др. – Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998. – 672 с.

2.16. Литовченко В.В., Кокорин Д.В., Назаров Д.В. Математическая модель коллекторного тягового электродвигателя. // Электротехника, 2014, № 8. – С. 22 – 29.

2.17. Ягуп В.Г., Краснов А.А. Математическое моделирование электропривода электровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2017, вип. 170. – С. 20 – 31.

2.18. Литовченко В.В., Назаров Д.В., Шаров В.А. Имитационная модель электровоза постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями // Электротехника, 2019, № 9. – С. 60 – 66.

2.19. Кулинич Ю.М., Шухарев С.А., Дроглов Д.Ю. Моделирование работы тягового двигателя пульсирующего тока. // Вестник ВНИИЖТ, 2019. Т. 78. № 5. – С. 313–319.

2.20. Кузнецов, А. И. Особенности описания переходных процессов в силовых цепях электровозов постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями / А. И. Кузнецов // Наука и образование транспорту. – 2019. – № 1. – С. 42-46.

2.21. Зарифьян, А. А. Изучение электромеханических процессов в коллекторном тяговом двигателе с учетом потерь / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник РГУПС. – № 3. – 2021. – С. 81-89. DOI 10.46973/0201727X_2021_3_81.

2.22. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016 г. №867р.

К 3-й главе

3.1. Энергетическая стратегия ОАО "РЖД" на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года – Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 15 декабря 2011 г. № 2718р.

3.2 Энергосбережение на железнодорожном транспорте / Под ред. В.А. Гапановича. – М.: Изд. дом МИСиС, 2012.

3.3. Зарифьян, А. А. Анализ использования мощности грузовых электровозов и возможность сокращения энергопотребления за счет модернизации при заводском ремонте / А. А. Зарифьян, А. Ш. Мустафин // Вестник РГУПС. – 2021. – № 1(81). – С. 20-29. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_20.

3.4. Capacity utilization level of freight electric locomotives and evaluation of expenses reduction on consumed energy due to modernization / А.А. Зарифьян, А.Ш. Мустафин, Е.В. Валенцева, А.С. Шапшал // Transport problems – 2021, №4 – с. 5 – 14. DOI: 10.21307/tp-2021-055

3.5. Using the capacity of freight mainline electric locomotives and possibility to reduce energy consumption due to modernization / А. Zarifyan, А. Mustafin, Е. Valentseva, А. Shapshal // Proceedings of XIII International Scientific Conference «Transport Problems-2021» – Silesian University of Technology - Katowice (Poland), 28-30.06.2021. – P. 855-865 – ISBN 978-83-959742-1-2

3.6. Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждено ОАО «РЖД» 26.12.2014, №519 – 29 с.

3.7. Модуль моделирования продольной динамики поезда (UM TRAIN) [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.universalmecanism.com>

3.8. Бабич, В.М. Оптимальное регулирование мощности многоосного сцепа в тяге / В.М. Бабич, А.Н. Крыгин // Тезисы докладов «Состояние и перспективы развития электровозостроения в стране». – Новочеркасск, 1991. – С. 12-13.

3.9. Бабич, В.М. Повышение энергетической эффективности электровозов / Омская гос. акад. путей сообщения, 1995. – 112 с.

К 4-й главе

4.1. Система температурного контроля силового оборудования электровозов "СТК-1". Руководство по эксплуатации. – Ростов-на-Дону, НПП «Сармат», 2009. - 56 с.

4.2. Чернохлебов В.Е. Контроль теплового состояния силового электрооборудования магистральных электровозов / В.Е. Чернохлебов, В.А. Завалко, В.Н. Памалюк // Изв. вузов. Электромеханика.- 1986.-№ 5. – С.87-93.

4.3. Аганов Р.А. Методика теплового расчета обмотки якоря тягового электродвигателя электропоездов и непрерывный контроль температуры якоря с помощью контактного датчика / Р.А. Аганов, В.В. Михайлов // Вестник РГУПС.-2012.-№2.-С. 48-52.

4.4. Платов Н.А. Разработка эквивалентной тепловой схемы замещения якоря тягового электродвигателя на основе блочной структуры // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2008. №2. - с.6-8.

4.5. Орленко А.И. Энергосбережение в цепях вспомогательных машин электровозов переменного тока на основе ступенчатого управления производительностью вентиляторов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук// Иркутск, ИрГУПС, 2004. – 189 с.

4.6. Скогорев И.В. Повышение надежности и экономической эффективности электровозов за счет рационализации систем охлаждения / И. В. Скогорев // Изв. вузов. Электромеханика.- 1986.-№ 5. – С.94-99.

4.7. Ребрик Б.Н. Снижать расход энергии на вентиляцию оборудования электровозов / Ребрик Б.Н., Нестеров А.М. // Локомотив. 1996. - №3. - С. 23-25.

4.8. Михайловский В.Н. Система САУВ для электровоза ВЛ80С / В.Н. Михайловский, В.Ф. Исаев и др. // Локомотив.-2003.-№10.-С. 25-29.

4.9. Михайловский В.Н. Автоматизированное регулирование скорости мотор-вентиляторов / В.Н. Михайловский, В.Е. Чернохлебов, Б.Я. Кожевников и др. // Железнодорожный транспорт. –2005. – № 9. – С. 25–29.

4.10. Система автоматизированного регулирования частоты вращения вентилятора электровоза переменного тока: патент 2295461 от 09.09.2005 г. / М.Д. Рабинович, Б.Я. Кожевников, В.Н. Михайловский, В.Е. Чернохлебов; опубл. 20.03.2007. Бюл. № 8.

4.11. Моделирование теплового режима тягового электрооборудования электровозов при наличии регулируемой принудительной вентиляции / А. А. Зарифьян, В. В. Михайлов, А. Ш. Мустафин, Н. Р. Тептиков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2019. – № 3. – С. 17-21. eLIBRARY ID: 38583544.

К 5-й главе

5.1. A. Izotov, V. Timoshenko and S. Izotov, "Study of Feasibility of Controlling Tribological Situation in Sliding Current Collection Assembly of Electric Machines," 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5, DOI: 10.1109/ICIEAM 48468.2020.9112029.

5.2. Способ контроля износа щеток и работы щеточно-коллекторного узла электрической машины: пат. Рос. Федерация, № 2548020 С2, заявл. 05.07.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10. – 10 с.

5.3. Качин, О.С. Увеличение ресурса скользящего контакта электрических машин: монография / О.С. Качин, С.И. Качин – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 165 с.

5.4. Кончиц, В.В. Триботехника электрических контактов / В.В. Кончиц, В. В. Мешков, Н.К. Мышкин. – Минск : Наука и техника, 1986. – 255 с.

5.5. Патент на полезную модель № 206379 Российская Федерация, МПК H02K11/20 (2016.01) G01R31/34 (2006.01). Устройство регистрации интенсивности искрения тяговых двигателей в условиях эксплуатации: №[2021101748](#) : заявлено 26.01.2021 : опубликовано 08.09.2021. – 3 с. : ил.

5.6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664616 Российская Федерация. DCMotorCommutation: № 2019664616: заявлено 31.10.2019: опубликовано (зарегистрировано) 11.11.2019. – 1 с.

5.7. Харламов, В. В. Методика определения допустимых режимов работы тягового двигателя постоянного тока карьерного самосвала для обеспечения удовлетворительной коммутации / В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, С. Н. Найден // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 36–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176- 36-40.

5.8. В.В. Харламов, М.Ф. Байсадыков, С.Н. Найден. Методика снижения износа электрических щеток тяговых электродвигателей с учетом условий эксплуатации - Транспорт -2022, Ростов-на-Дону

К 6-й главе

6.1. [Электронный ресурс] <http://www.3v-services.com/#simintech>

6.2. [Электронный ресурс] <https://www.zaoles.ru/msud-015.html>

6.3. Никонов, А.Н. Создание расчетных схем сложных объектов с использованием SimInTech [Электронный ресурс] // help.simintech.ru: Справочная система SimInTech. URL: http://help.simintech.ru/#nacha-lo_raboti/teplovoz/sozдание_raschetnyh_modeley_slozhnyh_sistem.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

УТВЕРЖДАЮ
 Технический директор
 Ростовского на Дону ЭРЗ –
 филиала АО «Железнодорожный машиностроительный завод»
 Воронов Г.Н.

ПРОТОКОЛ
 испытаний ТЭД НВ-418К6 № 4320, якорь № 1250

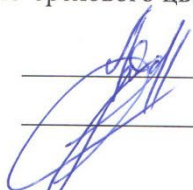
Мы, нижеподписавшиеся:


- Перепелица К.В., начальник электромашинного производства РЭРЗ;
 - Янушка А.С., начальник испытательной станции РЭРЗ;
 - Коротков В.М., к.т.н., доцент каф. «Тяговый подвижной состав» РГУПС;
 - Зарифьян А.А., д.т.н., профессор каф. «Тяговый подвижной состав» РГУПС;
 - Мустафин А.Ш., соискатель каф. «Тяговый подвижной состав» РГУПС;
- составили настоящий протокол по итогам стендовых испытаний тягового двигателя НВ-418К6 № 4320, якорь № 1250 (поступил на испытательную станцию после среднего ремонта якоря) при наличии электропроводящей смазочной композиции, разработанной РГУПС.

Смазочная композиция была нанесена в разрез щеток тягового двигателя по методике РГУПСа.

Испытания проводились в два этапа:

- на первом этапе ТЭД испытывался на холостом ходу без нагрузки и без обдува в течение 40 минут. Было установлено, что на коллекторе образовалась политура светло-орехового цвета. Это свидетельствует о формировании на рабочей поверхности коллектора электропроводящего слоя с низким коэффициентом трения. Засорения межламельных промежутков не обнаружено.
- на втором этапе ТЭД испытывался под нагрузкой согласно заводской карте технологического процесса № РЭРЗ-07.50107.00006. Было установлено, что при номинальной силе тока 900 А и температуре якоря 85°C, замеренной пирометром TemPro 550 (при температуре охлаждающего воздуха 23°C) искрение при коммутационных режимах испытаний отсутствовало. Осмотр коллектора после остановки двигателя показан наличие плёнки (политуры) светло-орехового цвета и отсутствие засорения межламельных промежутков.


 _____ Перепелица К.В.
 _____ Янушка А.С.


 _____ Коротков В.М.
 _____ Зарифьян А.А.
 _____ Мустафин А.Ш.

16.05.2018

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ДИРЕКЦИЯ ТЯГИ

Басманный тупик, 6а, строение 1, г. Москва, 105064
Тел.: (499)262-50-90, Факс: (499)262-13-56, E-mail: info-ct@center.rzd.ru, www.rzd.ru

№ _____



АКТ

рассмотрения результатов диссертационной работы
Мустафина Аделя Шамильевича

на тему «Повышение энергетической эффективности грузовых электровозов семейства «Ермак»
за счёт комплекса инновационных технических решений при заводском ремонте»

Комиссия в составе:

Председатель – О.В. Чикиркин – Главный инженер Дирекции тяги – филиала ОАО «РЖД».

Члены комиссии – Ю.И. Попов – Директор ПКБ ЦТ – филиала ОАО «РЖД»; А.Ю. Кулагин – Начальник Северо-Кавказской Дирекции тяги – филиала Дирекции тяги ОАО «РЖД»; А.Н. Гуда – проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

составила настоящий акт о том, что предложенные Мустафиным Аделем Шамильевичем в диссертационной работе на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.9.3 технические решения, прошли апробацию в ходе проведения опытных работ на полигоне Северо-Кавказской железной дороги и позволяют сократить удельный расход электрической энергии электровозами серии 2(3, 4)ЭС5К на 3...5% в режиме тяги за счёт:

1. Разработки и реализации алгоритма энергоэффективного управления тягой в результате выведения из тяги (отключения) одного или нескольких электродвигателей путём изменения программного обеспечения системы МСУД. В разработанном алгоритме предусмотрен учёт работы каждого ТЭД и отключения первыми тех, у которых время работы наибольшее, что позволяет осуществить выравнивание ресурса ТЭД.

2. Применения токосъёмных элементов коллекторно-щёточного узла тяговых электродвигателей, представляющих собой электрощёпки ЭГ-61А с заложенной смазочной композицией ЭПС РГУПС, обладающей электропроводностью, что позволяет существенно улучшить условия коммутации и уменьшить износ коллектора ТЭД.

3. Применения двухскоростной вентиляции тяговых электродвигателей в зависимости от режима их работы.

В результате рассмотрения результатов диссертационной работы комиссия рекомендует вышеуказанные технические решения к применению в производственной деятельности ОАО «РЖД» для формирования технических требований к проекту модернизации грузовых электровозов семейства «Ермак» при выполнении заводского ремонта с целью повышения их энергетической эффективности на 3...5% при минимальном уровне требуемых затрат, что, в конечном итоге, приведёт к существенному снижению затрат на тягу поездов в масштабах ОАО «РЖД».

Начальник ПКБ ЦТ – филиала ОАО «РЖД»

Ю.И. Попов

Начальник Северо-Кавказской Дирекции тяги –
Филиала Дирекции тяги ОАО «РЖД»

А.Ю. Кулагин

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО «РГУПС»

А.Н. Гуда