

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»**

На правах рукописи



ЛЕ СУАН ХОНГ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОЕЗДОВ
МЕТРОПОЛИТЕНА ДЛЯ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ВЬЕТНАМ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Научный руководитель —
доктор технических наук,
профессор, лауреат Государственной премии СССР,
ТУЛУПОВ ВИКТОР ДМИТРИЕВИЧ

Москва – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ И АКТУАЛЬНОСТИ ВЫБОРА СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ.....	11
1.1. Состояние и планы строительства линий метрополитена в крупных городах Социалистической Республики Вьетнам (СРВ).....	11
1.2. Обоснование выбора класса напряжения для метровагонов СРВ	18
1.3. Постановка задачи выбора систем тягового электропривода (ТЭП) для вагонов метрополитена СРВ	20
Выводы по главе 1.....	22
ГЛАВА 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	24
2.1. Аналитический обзор существующих систем управления ТЭП электроподвижного состава (ЭПС)	24
2.2. Анализ преимуществ и недостатков систем управления ТЭП с дискретным релейным управлением (ДРУ) и тяговыми машинами постоянного тока (ТМ ПТ).....	28
2.2.1. Преимущества систем ТЭП с ДРУ и ТМ ПТ	29
2.2.2. Недостатки систем ТЭП с ДРУ и ТМ ПТ	30
2.3. Сравнительный анализ систем ТЭП вагонов метрополитена постоянного тока с тиристорным импульсным управлением (ТИУ) и ДРУ	31
2.3.1. Предполагаемые преимущества ТЭП с ТИУ	32
2.3.2. Сравнительная оценка эффективности систем ТЭП с ДРУ и ТИУ	35
2.4. Анализ преимуществ и недостатков систем управления ТЭП с асинхронными тяговыми машинами (АТМ).....	50
2.4.1. Преимущества систем ТЭП с АТМ.....	51
2.4.3. Недостатки систем ТЭП с АТМ	53
2.5. Сравнительный анализ систем ТЭП с АТМ и ТМ ПТ	56
2.5.1. Системы управления и комплект электрооборудования	56
2.5.2. Эксплуатационные расходы на обслуживание ТЭП	61
2.5.3. Проблемы улучшения тяговых свойств ТЭП.....	62
2.5.4. Сравнение надежности и КПД систем ТЭП с АТМ и ТМ ПТ.....	63
Выводы по главе 2.....	70
ГЛАВА 3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА	72

3.1. Возможности улучшения показателей ТЭП вагонов метрополитена	72
3.2. ОСОБЕННОСТЬ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМЫ ТЭП ДЛЯ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	76
3.2.1. Работа принципиальной силовой схемы предлагаемой системы ТЭП для вагонов метрополитена с НВ ТМ и ТРК.....	77
3.2.2. Достоинства предлагаемой системы ТЭП	79
3.2.3. Электромагнитные, электромеханические и механические процессы в ТЭП с НВТМ.....	80
3.2.4. Сравнительный анализ тягово-энергетических характеристик предлагаемой системы ТЭП на опытных вагонах метрополитена	86
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	96
ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАГОНОВ МЕТРО С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	98
4.1. МЕТОДИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ (ТЭР)98	
4.2. ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВАГОНОВ МЕТРО С ТМ ПТ.....	100
4.2.1. Кривые удельного основного сопротивления движению	100
4.2.2. Расчет электромеханических характеристик	101
4.2.3. Определение пускового тока. Режим пуска	108
4.2.4. Расчет тяговых характеристик и построение кривой потребляемого поездом тока.....	109
4.2.5. Расчет тормозных характеристик	110
4.2.6. Определение допустимой скорости движения расчетным методом	112
4.2.7. Построение характеристик удельных действующих сил.....	112
4.2.8. Построение кривых движения	113
4.2.9. Определение расхода энергии на движение поезда	116
4.3. ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВАГОНА МЕТРО С АСИНХРОННЫМИ ТЯГОВЫМИ МАШИНАМИ ДАТЭ-170-4У2	119
4.3.1. Кривые удельного основного сопротивления движению	120
4.3.2. Построение тягово-тормозных характеристик и кривых мощности и момента.....	120
4.3.3. Расчет и построение кривой движения поезда с АТМ.....	122
4.3.4. Расход энергии на тягу	123
4.3.5. Расход энергии рекуперации	127
4.3.6. Суммарный расход энергии (с рекуперативным торможением).....	127
4.4. ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВАГОНА МЕТРО С ПРЕДЛАГАЕМОЙ СИСТЕМОЙ ТЭП (НА ОСНОВЕ ТМ ПТ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ)	128
4.5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ТЭП ПО ДАННЫМ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПО РАСЧЕТНЫМ РЕЗУЛЬТАТАМ	129

4.5.1. Сравнительный анализ тягово-энергетических показателей вагонов метрополитена по данным эксплуатации	129
4.5.2. Сравнительный анализ тягово-энергетических показателей вагонов метрополитена по результатам расчетов	132
4.6. ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЭП.....	135
4.6.1. Сравнение цен эксплуатируемых вагонов метро с различными типами ТЭП	135
4.6.2. Сравнительный анализ цен на комплектующие различных типов ТЭП...	136
4.6.3. Расчет затрат на потребление электроэнергии поездов метро.....	138
4.6.4. Балансовая стоимость вагонов метро с разными системами ТЭП	138
4.6.5. Расчет затрат на амортизацию	139
4.6.6. Годовые затраты на монтаж, ремонт и обслуживание (запчасти и в основном машинист).....	139
4.6.7. Общие годовые эксплуатационные затраты поездов метро с различными системами ТЭП.....	140
4.6.8. Расчет сроков окупаемости при замене ТЭП с ПВ ТМ новыми типами ТЭП с НВ ТМ, АТМ.....	140
Выводы по главе 4.....	142
ГЛАВА 5. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	144
5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТРОПОЕЗДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЭП.....	144
5.2. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЭП.....	148
Выводы по главе 5.....	154
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЯ	

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АТМ	Асинхронная тяговая машина
ВМ	Вагон метрополитена
ДРУ	Дискретное реостное управление
КТМ	Коллекторная тяговая машина
НВ	Независимое возбуждение
ПВ	Последовательное возбуждение
ПТР	Пуско-тормозные резисторы
РУТ	Реле ускорения торможения
ТИУ	Тиристорное импульсное управление
ТМ ПТ	Тяговая машина постоянного тока
ТРК	Тиристорный реостатный контроллер
ТЭП	Тяговый электропривод
ТЭР	Тягово-энергетический расчет
ТЭЭ	Технико-экономическая эффективность
ЭПС	Электроподвижный состав
ЭС ТЭП	Энергосберегающая система тягового электропривода

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одним из способов решения транспортных проблем в мегаполисах, какими являются города Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) Хошимин и Ханой (с населением в каждом более 7,5 миллионов человек), является метрополитен. Вопросы строительства метрополитена, в настоящее время, во Вьетнаме стоят достаточно остро.

Эффективность и надежность работы метрополитена в решающей степени определяются эксплуатационными характеристиками поездов, которые, в свою очередь, определяются их соответствующими показателями (стоимость изготовления, затраты на ремонты и обслуживание, срок службы, удельный расход энергии и надежность работы и т.д.). Наибольшее влияние на эти показатели оказывает используемая система тягового электропривода (ТЭП).

Важность и актуальность проблем связанных с повышением эффективности работы ТЭП отражены в исследованиях ученых и специалистов: В.И. Киселева, В.Д. Кузьмича, Е.Ю. Логиновой, В.И. Бочарова, В.С. Хвостова, И.П. Бородулина, В.В.Литовченко, В.А. Мнацаканова, С.В. Фадеева, В.В. Чащина, И.С. Станкевича, Н.А. Трубициной и других [32-41].

Вопросам оценки влияния на тягово-энергетические показатели эксплуатационных режимов работы ЭПС посвящены ряд работ Л.В. Гуткина, З.М. Рубчинского, Л.Д. Капустина, Н.И. Бещевой [30], Г.В. Фаминского [28], В.Д. Тулупова [31], а в последнее время Д.Е. Кирюшина [29], Д.А. Солдатенко [68].

На сегодняшний день ТЭП для вагонов метрополитенов СРВ окончательно еще не выбрана, поэтому, разработка подходов к обоснованию выбора типа вагонов с оптимальным типом ТЭП для строящихся и проектируемых линий метрополитена Вьетнама по тягово-энергетическим и экономическим показателям представляется актуальной задачей, имеющей практическое значение.

Цель и основные задачи работы. Целью выполненных в диссертации исследований является оценка технико-экономической эффективности различных систем ТЭП для использования на электропоездах метрополитенов в крупных городах Вьетнама.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Комплексный анализ преимуществ и недостатков альтернативных систем ТЭП эксплуатируемых вагонов метрополитена;
2. Оценка эффективности предлагаемой системы ТЭП по данным испытаний на опытных вагонах метрополитена;
3. Проведение тягово-энергетических и экономических расчетов (ТЭР) для вагонов метрополитена с различными системами ТЭП; выявление технических и стоимостных показателей для сравнительной оценки их эффективности;
4. Сопоставление технико-экономической эффективности альтернативных систем ТЭП вагонов метрополитена по результатам расчетов и по данным их эксплуатации;
5. Выбор перспективного ТЭП для поездов метрополитена Вьетнама на основе комплексной оценки их технико-экономической эффективности.

Методы исследования и достоверность. Диссертационные исследования проводились с использованием теории электрической тяги, теории ТЭП, теории автоматического управления и методов обработки данных эксплуатации. Для выполнения всех ТЭР использовались компьютерные программы.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчетов, полученных на компьютерных моделях с результатами испытаний и в известных работах, посвященных подобной теме, в частности, результатов расчета и испытаний, выполненных ВНИИЖТом и ООО «ТОМАК ЛТД».

Научная новизна. На основании сформулированных и реализованных целей и задач исследования получены новые научные результаты:

1. Предложены методики развивающие подход к комплексной оценке тягово-энергетических и экономических показателей ТЭП вагонов метрополитена позволяющие анализировать системы с различными типами тяговых электрических машин и схем их питания;

2. Выполнена углубленная комплексная оценка эффективности различных систем ТЭП вагонов метрополитена на основе анализа полученных результатов технико-экономических расчетов и обработки данных эксплуатации; показаны достоинства ТЭП с независимым возбуждением тяговых машин (НВ ТМ) для электропоездов метрополитена;

3. Показана неоправданность замены в Московском метрополитене ТЭП с НВ ТМ на асинхронный электропривод, хотя эксплуатация опытных вагонов метро не была завершена в необходимом объеме;

4. Показано, что применение систем ТЭП с асинхронными тяговыми машинами не дает существенных преимуществ при их эксплуатации на проектируемых линиях метрополитена во Вьетнаме;

5. Обоснована целесообразность выбора наиболее эффективного типа вагонов для метрополитена Вьетнама по тягово-энергетическим и ценовым показателям с использованием понятия «технико-экономический рейтинг»;

6. Предложена система ТЭП на основе коллекторных тяговых машин (КТМ) постоянного тока независимого возбуждения и энергосберегающего алгоритма управления с улучшенными характеристиками и существенными преимуществами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сравнительный анализ эффективности систем ТЭП эксплуатируемых вагонов метрополитена с различными видами тяговых машин;

2. Предлагаемая система ТЭП на основе КТМ постоянного тока независимого возбуждения для электропоездов метрополитена;
3. Результаты тягово-энергетических и экономических расчетов для вагонов метрополитена с различными системами ТЭП;
4. Методика комплексной оценки под понятием «технико-экономический рейтинг», обосновывающая целесообразность выбора наиболее эффективного типа ТЭП для электропоездов метрополитена Вьетнама.

Практическая ценность и реализация работы.

1. Достижение поставленной в диссертации цели и полученные результаты имеют важное значение для выбора наиболее рационального типа ТЭП и успешного создания метрополитена в крупных городах Вьетнама в будущем;
2. Обосновано применение схемы ТЭП на основе КТМ постоянного тока независимого возбуждения и энергосберегающего ТЭП обеспечивающее наилучшее сочетание тягово-энергетических и экономических показателей при эксплуатации на строящихся и планируемых к постройке линий метрополитена городов Вьетнама;
3. Предложенный метод комплексной оценки тягово-энергетических и экономических показателей эксплуатации вагонов метрополитена с различными типами ТЭП может быть использован не только для анализа ЭПС метрополитена, но и для моторвагонного подвижного состава железных дорог.

Личный вклад автора в работу заключается в:

1. Обосновании необходимости и актуальности выбора системы ТЭП для электропоездов СРВ;
2. Разработке и обосновании системы показателей и характеристик ТЭП для комплексной оценки их эффективности;
3. Сравнительном анализе преимуществ и недостатков систем управления ТЭП моторвагонов с различными видами тяговых машин;
4. Проведении тягово-энергетических и экономических расчетов различных систем ТЭП вагонов метро с использованием компьютерных моделей;

5. Обработке и сопоставлении технико-экономических показателей метровагонов по результатам расчетов и по данным их эксплуатации;

6. Разработке и обосновании целесообразности выбора наиболее эффективного типа вагонов для метropоездов СРВ по тягово-энергетическим и ценовым показателям под понятием «технико-экономический рейтинг».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт» НИУ «МЭИ» и на ряде международных, всероссийских и региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов, в том числе: XVIII-XXI международных научно-технических конференциях (МНТК) «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»; МЭИ, Москва, 2012 – 2015 г.; Девятой МНТК студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия-2014», ИГЭУ, г. Иваново; X юбилейной международной научно-практической конференции (МНПК) студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem», МИИТ, Москва 2014; Международной конференции «Инновационные подходы к решению технико-экономических проблем. – М.: МИЭТ, 2014; Второй МНТК «Современные проблемы электроэнергетики» - Барнаул, 2014 г.; Пятой и шестой МНТК «Электроэнергетика глазами молодежи». Томский политехнический университет. – Томск, 2014–2015; X международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 2014; Пятой МНПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». – Иркутск, 2014; XIII и XV Международных конференциях (МКЭЭЭ-2012 и 2014) «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» = 13-th and 15-th International conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components (ICEEE – 2012 and 2014 Abstracts). – Алушта, Крым; VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2015; XIV Международной конференции «Будущее технической науки». – Нижний Новгород,

2015; Восемнадцатой МНТК «XVIII Бенардосовские чтения». - г. Иваново, 2015; Международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию ОГУ «Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации». – г. Оренбург, 2015; Международной научно-технической конференции «Научно-технический прогресс: актуальные и перспективные направления будущего». - Кемерово, 2015; Международных научно-технических конференциях «Перспективные информационные технологии (ПИТ 2014-2015)». – Самара, 2014-2015; Международных научно-практических конференциях «Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования» – Воронеж, 2014, 2015 и 2017г;

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 печатных работ, в том числе 7 статей в изданиях перечня ВАК РФ, 15 статей и тезисов докладов на международных научно-технических конференциях в городах Москва, Тула, Иваново, Самара, Барнаул, Воронеж, Томск и т.д.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований и 22 приложения. Её содержание изложено на 184 страницах, включая 26 таблиц и 52 иллюстрации.

ГЛАВА 1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ И АКТУАЛЬНОСТИ ВЫБОРА СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ

1.1. Состояние и планы строительства линий метрополитена в крупных городах Социалистической Республики Вьетнам (СРВ)

1.1.1. Необходимость усиления строительства линий метрополитена в крупных городах СРВ

Решение транспортной проблемы является постоянным и актуальным во многих больших городах мира, в том числе и во Вьетнаме. До 1990 года Вьетнам прошел через длительную отечественную войну и дотационно-распределительную систему, при которой потребность населения в передвижениях была небольшой, и фактически удовлетворялась личными транспортными средствами (велосипедами и мотоциклами). После 1990 года Вьетнам осуществляет открытую политику и широкое экономическое сотрудничество. В результате чего экономика государства начинает стремительно развиваться, и соответственно уровень жизни населения значительно повышается. Это приводит к развитию потребности населения в передвижении, резкому увеличению количества мотоциклов, дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и т.д. [1].

Во Вьетнаме Хошимин и Ханой являются крупнейшими городами с большой численностью населения и высоким ростом экономики. В последние годы потребности населения в передвижениях и транспортная подвижность населения города непрерывно увеличиваются. Однако, у транспортной системы в крупнейших городах Вьетнама существуют много недостатков:

- устаревшая транспортная инфраструктура: структура транспортной сети не соответствуют стандартам уровня в жилых районах (смешивается с неразвитой связью). В новых районах города, очень мало дорог с узкими ширинами, так что движение сосредоточено в основном в центральном городе. В нескольких областях

из-за узкой ширины дорог используются только мотоциклы и велосипеды. Они также наблюдается ограниченное использование общественного транспорта, в результате чего много пробок [2]. Более того, улично-дорожная сеть больших городов размещается неравномерно. Средняя плотность улиц города составляет $0,463 \text{ км}^2/1000 \text{ чел.}$ Эта плотность очень мала для большого города, она в 7-10 раз ниже, чем рациональная плотность улиц мира. В городе площадь земли для использования транспорта недостаточна. Она составляет меньше 6,5 % площади города, тогда как средняя доля в мире от 20 до 25%. Более того, на таких улицах здания расположены по красным линиям, т.е. на законном основании, в связи с чем очень трудно расширить улицы. Технические показатели улично-дорожной сети различны: высокие в центре и низкие в пригородных районах. В г. Хошимин имеется большое число перекрёстков (1350), большинство которых находится на одном уровне. Также 5-6 направлений движения пересекаются на одном уровне. Расстояния между перекрестками улиц незначительные (обычно меньше 300 м) [3-4]. Часто железные дороги проходят через город, пересекаясь с городскими улицами на одном уровне. В результате чего снижается скорость движения, увеличивается расход горючего и затраты времени пассажиров, поэтому средняя скорость движения потоков составляет только 23 км/час, и в связи с этим возникают заторы.

– беспорядочный рост числа и типов транспортных средств при росте развития экономики и населения (например, в г.Ханой за каждый месяц регистрируют еще 18-22 тыс. мотоциклов и 6-8 тыс. автомобилей) [5].

– за последнее время дорожное движение стало проблемой и наминает хаос (рис. 1.1). Такой беспорядок на улицах города из-за многих причин, в том числе основными причинами являются слаборазвитая инфраструктура и сознание людей, участвующих в дорожном движении)



Рис. 1.1. Состав потока движения на улицах больших городов Вьетнама

- плохое самосознание людей, участвующие в транспорте (нарушение правил дорожного движения мотоциклистов и пешеходов).
- за каждый год количество транспортных средств увеличивается на 13%, а площадь улиц увеличивается только на 0,3%.
- до сих пор автобус является единственным видом общественного транспорта в крупнейших городах Вьетнама но он удовлетворяет ниже 10% потребности в передвижении населения. Кроме этого, у городского автобусного транспорта существует много проблем: убыточность автобусных перевозок; непродуманность сети автобусных маршрутов; недостаточность парка подвижного состава; трудность выполнения по расписанию движения автобусов на маршрутах, так как существует сложность маршрутов движения (средняя эксплуатационная скорость, количество перекрестков, светофоров, интенсивность и организация движения транспортного потока); несоответствие тарифа на городские автобусные перевозки реальной величине расходов на перевозки и т.д. [6].

Таким образом, решение указанных проблем только одно – развивать улично-дорожную сеть транспорта больших городов и внедрять новые виды городского

транспорта (метрополитен, скоростной поезд, легкий рельсовый поезд и т.д.). Из них самый надежный способ передвижения по городу – поезда метрополитена. Метрополитен, в свою очередь, является в настоящее время наиболее совершенным и комфортабельным видом массового пассажирского транспорта.

Известные экономические и экологические преимущества метрополитена обуславливают рост доли пассажирских перевозок в крупных городах. В настоящее время во многих городах мира метро играет большую роль в функционировании и развитии в удовлетворении потребности населения в передвижении.

В целом же изложенные в выполненном анализе факты и соображения показывают актуальность и значимость усиления строительства линий метрополитена в крупных городах Вьетнама.

1.1.2. Схема строящихся и проектируемых линий метрополитена в крупных городах Вьетнама

В городе Хошимин

По общему плану развития транспорта города, Мэр г.Хошимина планировал построить всего 6 линий метрополитена (рис. 1.2) [7].

- Линия 1 БенТхань - СуойТиен (длина 19,7 км, время прохода маршрута - 30 минут);
- Линия 2 (Тху Тхием - автовокзал Таи Нинь) составляет около 20 км;
- Линия 3, составляющая около 23 км, была разделена на 2 маршрута:
3А (БенТхань - Тан Киен).
3В (шестое транспортное кольцо КонгХоа – ХиепБинФыок);
- Линия 4 (НгуенВанЛинь - мост БенКат) составляет 24 км;
- Линия 5 (мост Шайгон - автовокзал Канзуок) составляет около 17 км;
- Линия 6 (БаКео - круговое движение ФуЛам) длиной 6 км.

28 августа 2012г. было положено начало строительства первой линии метро в Хошимине по маршруту БенТхань – СуойТиен (рис. 1.3).

По плану строительство данной линии завершится в 2017 г., а в эксплуатацию вступит в 2019-2020 г. На начальном этапе линия №1 сможет провозить 185 000 пассажиров каждый день. Уже с 2025 г. будет 481700 пассажиров в день (в час пик 21400 чел./час/одно напр.) , а с 2035г. – 679500 пассажиров (табл. 1.1) [8].

Таблица 1.1. Потребности в передвижении первой строящейся линии метрополитена г. Хошимина (Вьетнам)

Потребности в передвижении	2020	2025	2035
Ежедневный пассажиропоток (чел./день)	185 000	481700	679500
Пассажиропоток в час пик (чел./час/одно направление)	7850	21400	30200



Рис. 1.2. Схема строящихся и проектируемых линий метрополитена города
Хошимин (6 линий)

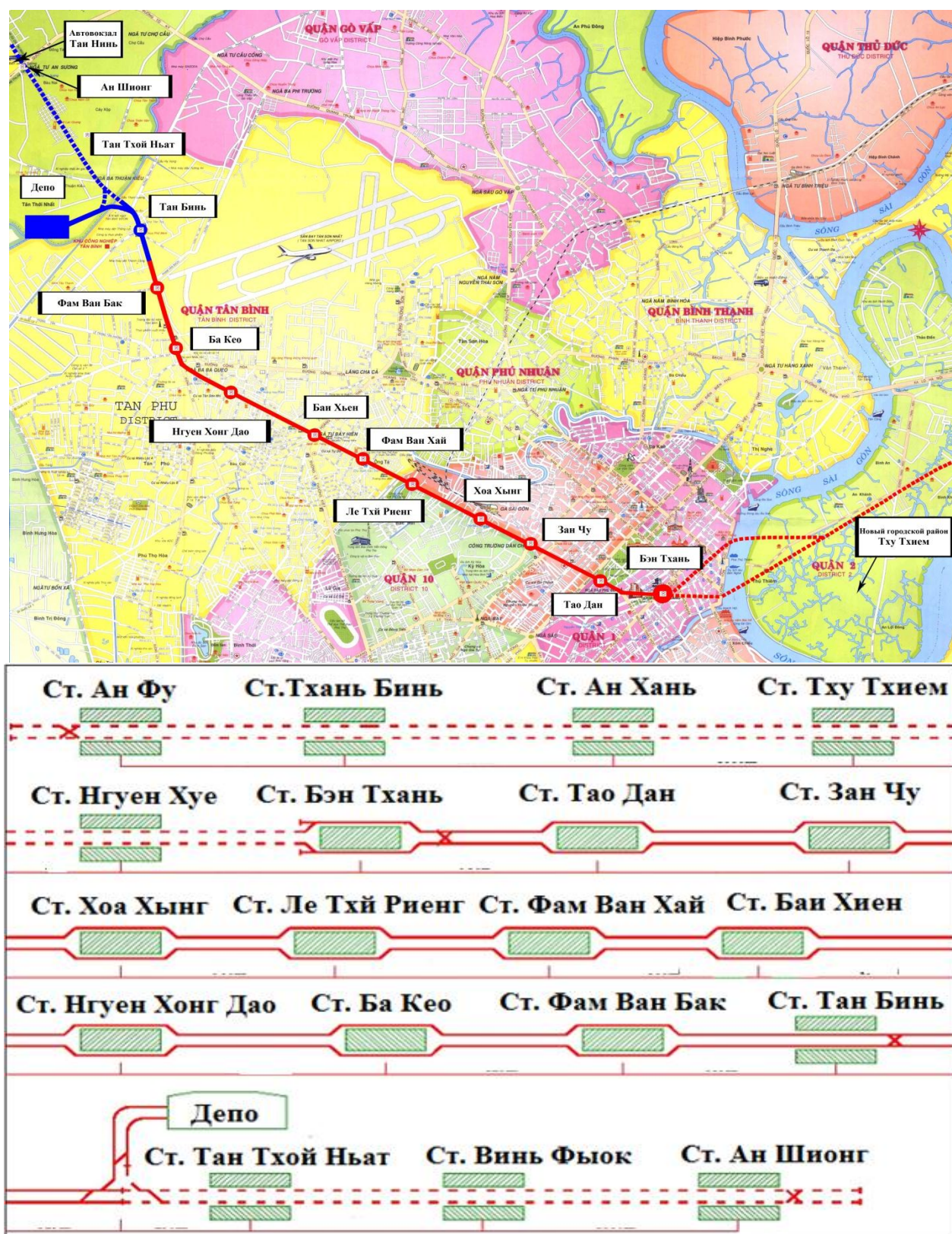


Рис. 1.3. Схема первой строящейся линии метрополитена г. Хошимина

В городе Ханой

По общему проекту плана развития городского пассажирского транспорта, в частности, системы метрополитена до 2030г. и в перспективе на 2050 год., в г. Ханой тоже будут строить всего 8 линий метрополитена (рис. 1.4.), общая протяженность которых составляет 318 км (табл. 1.2.) [9].

Таблица 1.2. Состояние и план строительства линий метрополитена г. Ханой

Линии метро	Длина, км. (Количество станций)	Характеристика	Состояние строительства
Линия 1: Нгок Хой – Уен Вьен	36 (23)	Над землей	Планируется
Линия 2А: Кач Линь – Ха Донг	14 (12)	Над землей	Строится
Линия 2В: Ха Донг – Ной Бай	42 (32)	Под землей и над землей	Планируется
Линия 3: Чой – Ньон – Уен Шо	26 (26)	Под землей и над землей	Строится
Линия 4: Лиен Ха – Северный Тханг Лонг	54 (41)	Под землей и над землей	Планируется
Линия 5: Ко Лоа – Ань Хань	39 (17)	Под землей и над землей	Планируется
Линия 6: Ной Бай – Нгок Хой	43 (29)	Над землей	Планируется
Линия 7: Ме Линь – Нгок Хой	28 (23)	Под землей и над землей	Планируется
Линия 8: Ко Ньуе – Чау Куй	37 (26)	Над землей	Планируется

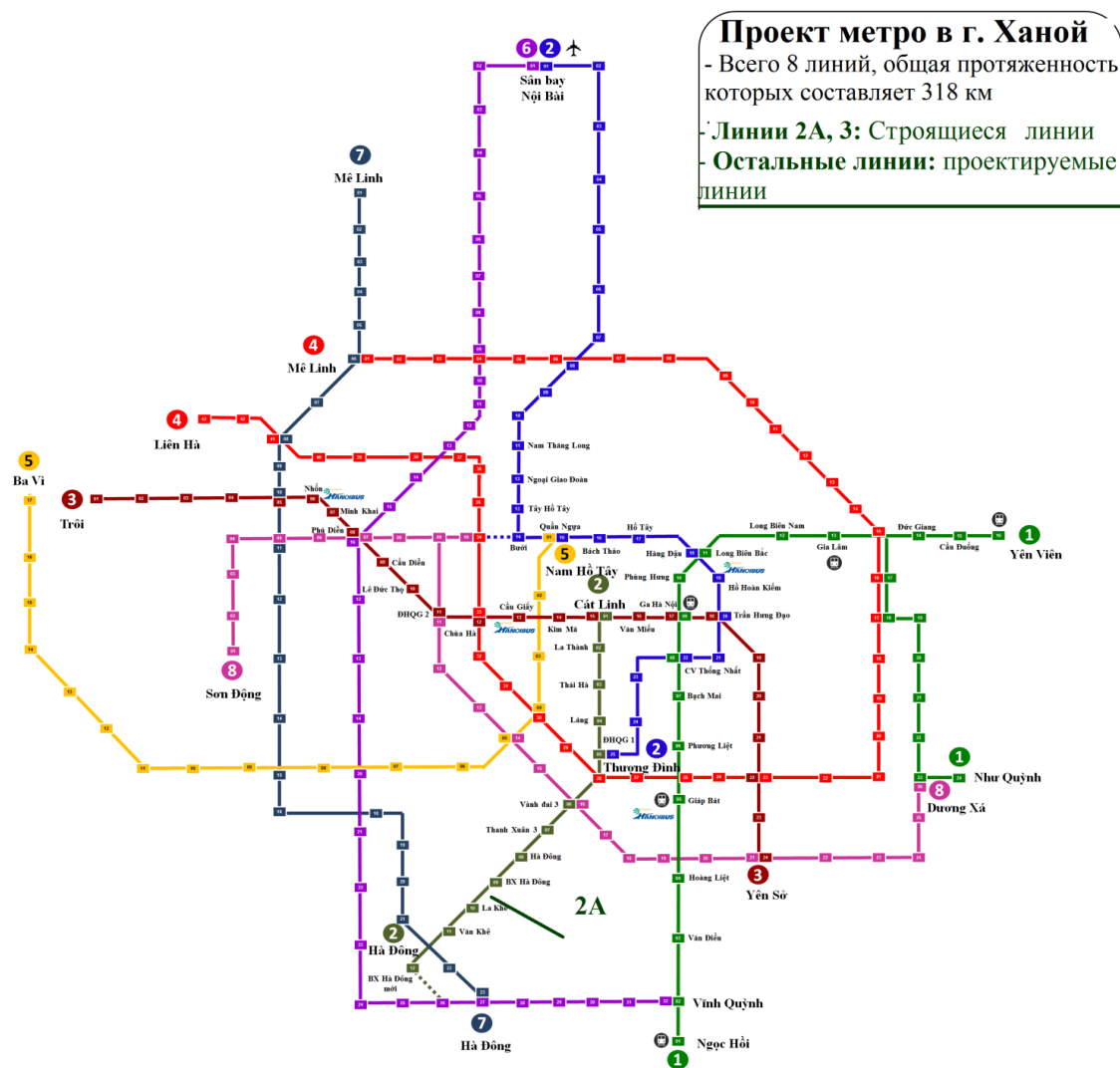


Рис. 1.4. Схема строящихся и проектируемых линий метрополитена города Ханой

1.2. Обоснование выбора класса напряжения для метровагонов СРВ

Выбор напряжения для метрополитена зависит от многих обстоятельств и факторов. Их перечень занял бы много места и в общем не имеет смысла, так как они достаточно подробно перечислены и рассмотрены в специальной литературе [10, 11]. Рассмотрим выбор напряжения для тяговой сети метрополитена. Высокое напряжение может быть реализовано лишь при верхнем токоосъеме, что потребует увеличения габаритов туннеля. Низкое напряжение может быть применено при использовании контактного рельса, т.е. при мелком заложении и малых габаритах

туннеля. Для Вьетнама этот фактор будет, в силу указанной причины, определяющим.

Используемое номинальное напряжение в тяговой сети метрополитенов различно. В России оно составляет 750В на токоприемнике вагона и 825В на шинах тяговой подстанции. На зарубежных метрополитенах при использовании контактного рельса номинальное напряжение на токоприемнике вагона различно: 600—650В (Афины, Лондон, Нью-Йорк, Чикаго), 750В (для преобладающего числа городов), 1000 В (Сан-Франциско, линия BART). В случае применения контактного провода оно более высокое: 1200В (Барселона, Буэнос-Айрес) и 1500В (Париж, Рим, Гонконг, Токио). К вопросу повышения напряжения, когда токопроводом является контактный рельс, подходят достаточно осторожно. Например, на сравнительно недавно введенном в эксплуатацию метрополитене Вашингтона (1976 г.) принято напряжение 750В, хотя его прообразом в технических решениях является линия BART, где номинальное напряжение в тяговой сети равно 1000 В [12].

На Российских метрополитенах непосредственно для токосъема используется нижняя поверхность контактного рельса.

Так как линии метрополитенов проложены в туннелях и на огражденных наземных участках, снимаются требования обеспечения электробезопасности, которые обусловлены расположением контактной сети (КС) магистральных и пригородных железных дорог.

На ряде зарубежных метрополитенов КС крепят к своду тоннелей или подвешивают на стальных либо железобетонных опорах на наземных участках. Существенным фактором, определяющим такое расположение КС, является более высокое напряжение в ней: 1200 — 1500 В. В отдельных городах (Кливленд, Мадрид) подобное решение сложилось исторически, по аналогии с железными дорогами. На новых линиях за рубежом стремятся применять для токосъема контактный рельс. На некоторых метрополитенах на одних линиях используется контактный провод (номинальное напряжение 1500 В), на других — контактный

рельс (Милан, Токио, Осака, Рим). Применение контактного провода приводит к увеличению габаритов тоннелей, особенно высоты, и соответственно капитальных затрат на сооружение линий. Возрастают также расходы и усложняется выполнение работ по текущему содержанию и ремонту сети. На некоторых зарубежных метрополитенах, например в Лондоне, в качестве магистралей для возврата тягового тока используют не ходовые рельсы, а отдельный контактный токопровод, выполненный в виде четвертого рельса, размещаемого в пределах верхнего строения пути — так называемая «система с двумя токопроводящими брусками». Такое конструктивное решение исключает необходимость защиты сооружений и устройств от электрокоррозии блуждающими токами. Указанный способ является вынужденным на метрополитенах, где вагоны оборудованы пневматическими колесами (Лион, Мехико, Монреаль, Париже, Сантьяго, Саппоро).

Таким образом, исходя из мирового опыта и опыта стран бывшего СССР, наиболее подходящей системой тяги для метрополитена во Вьетнаме следует выбрать систему тяги постоянного тока напряжением 750В на токоприемнике вагона и 825В на шинах тяговой подстанции с контактным токосъемом, с использованием для токосъема нижней поверхности контактного рельса.

1.3. Постановка задачи выбора систем тягового электропривода (ТЭП) для вагонов метрополитена СРВ

Исходя из вышесказанного, из-за роста населения современных мегаполисов, в частности, городов Хошимин и Ханой (Вьетнам) увеличивается объем городских пассажирских перевозок. При этом необходимо в полном объеме учитывать требования комфортности перевозок, а так же прорабатывать вопросы рационального использования материальных и топливно-энергетических ресурсов страны. Наиболее совершенным видом городского транспорта является электрический транспорт (метрополитен, троллейбус, трамвай и т.д.), который использует для тяги электрическую энергию и не оказывает вредного воздействия на окружающую среду. Известно, что городской электрический транспорт является

одним из крупных потребителей электрической энергии. Поэтому очень важен правильный выбор рациональной конструкции ТЭП электроподвижного состава (ЭПС) с высокой энергетической эффективностью.

В настоящее время в связи с развитием полупроводниковой преобразовательной техники появилось много возможностей совершенствования ТЭП. Среди них: использование на ЭПС с традиционными тяговыми машинами (ТМ) при электроснабжении постоянным током импульсного управления (ИУ) , плавного регулирования напряжения питания ТМ и рекуперативного торможения и на типах ЭПС с коллекторными тяговыми машинами (КТМ) независимого возбуждения (НВ), а также - применение бесколлекторных ТМ - асинхронных, вентильных (ВТМ), индукторных (ИТМ) и т.д. [42-43]. На рис. 1.5. представлены существующие системы ТЭП на вагонах метрополитена в СССР и России

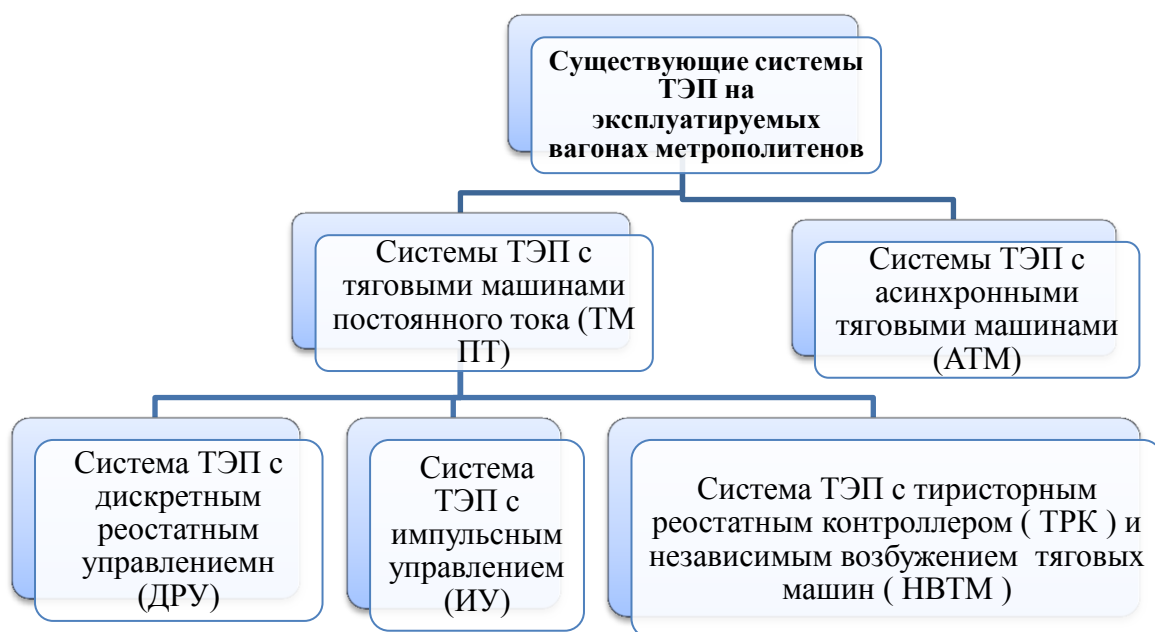


Рис. 1.5. Существующие системы ТЭП на эксплуатируемых вагонах метрополитена

Практика и опыт эксплуатации показывают, что сторонников и противников той или иной системы ТЭП немало, и каждого найдутся свои веские основания в защиту своей идеи. Конечно, в каждой системе есть свои плюсы и минусы. При этом для выбора действительно перспективной и рациональной системы ТЭП

необходимы анализ и оценка эффективности систем ТЭП эксплуатируемых метровагонов [13-25]. Их результаты могут быть полезны при разработке и модернизации эксплуатируемых и разрабатываемых систем ТЭП.

Важность и актуальность проблем связанных с повышением эффективности работы тяговых электродвигателей отражена в исследованиях ученых и специалистов: В.И. Захарова, В.Д. Тулупова, Г.В. Фаминского, Д.Е. Кирюшина, С.В. Покровского, Н.И. Бещевой, В.И. Киселева, В.Д. Кузьмича, Е.Ю. Логиновой, В.И. Бочарова, В.С. Хвостова, И.П. Бородулина, В.В. Литовченко, В.А. Мнацаканова, С.В. Фадеева, В.В. Чашина, И.С. Станкевича, Н.А. Трубициной и других [26-42].

Касается принципов построения ТЭП для вагонов метрополитена, в частности, для крупных городов Вьетнама, которые не имеют в настоящее время однозначного решения. При этом, если задача выбора класса напряжения, является стандартной и легко разрешимой, то задача выбора систем ТЭП носит дискуссионный характер.

Преимущества приводов с использованием АТМ перед другими, присущие в некоторых областях электротехники, многими специалистами проецируются на всю сферу применения электроприводов, без учета какой-либо специфики. Поэтому, представленная работа посвящена как раз оценке эффективности различных систем тягового привода, что в будущем может использоваться для метрополитенов в крупных городах Вьетнама. Постановка задачи и определяет актуальность и значимость работы.

Выводы по главе 1

1. Изложенные в выполненном анализе факты и соображения показывают актуальность и значимость усиления строительства линий метрополитена в крупных городах Вьетнама. Метрополитен является самым надежным и наиболее совершенным способом для решения всех их транспортных проблем.

В связи с этим, в настоящее время в гг. Хошимин и Ханой (2 крупнейших города Вьетнама с населением в каждом более 8 миллионов человек) одновременно ускоряют проектирование и строительства линий метро но система ТЭП их поездов

окончательно еще не выбрана. Поэтому, вопросы выбора систем ТЭП метрополитена сегодня во Вьетнаме стоят достаточно остро.

2. Исходя из мирового опыта и опыта стран бывшего СССР и РФ, наиболее подходящей системой тяги для метрополитена во Вьетнаме следует выбрать систему тяги постоянного тока напряжением 750В на токоприемнике вагона и 825В на шинах тяговой подстанции с контактным токосъемом, с использованием для токосъема нижней поверхности контактного рельса.

3. В настоящее время при решении вопроса о выборе типа ТЭП для метропоездов необходимо использовать критерии, которые позволяют наиболее полно оценивать эффективность работы ТЭП на ЭПС в конкретных эксплуатационных условиях. Такой подход позволит наиболее рационально использовать ТЭП и, как следствие, приведет к повышению эффективности эксплуатации ЭПС.

При этом при выборе более рационального типа системы ТЭП метropоездов Вьетнама необходимы разработка и обоснование системы показателей и характеристик для комплексной оценки их эффективности. Для этого необходимо проведение комплексного исследования, включающего:

- комплексный анализ преимуществ и недостатков систем управления ТЭП вагонов метро с различными видами тяговых двигателей;
- проведены тягово-энергетические и экономические расчеты для вагонов метрополитена с различными системами ТЭП
- сопоставление технико-экономической эффективности альтернативных систем ТЭП вагонов метрополитена по результатам расчетов и по данным их эксплуатации;
- обоснована целесообразность выбора наиболее эффективного типа вагонов для метрополитена Вьетнама по тягово-энергетическим и ценовым показателям с использованием понятия «технико-экономический рейтинг».

ГЛАВА 2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Аналитический обзор существующих систем управления ТЭП электроподвижного состава (ЭПС)

Многолетняя история развития ТЭП электроподвижного состава всегда происходила на фоне конкуренции между двумя системами – приводом с тяговыми электродвигателями (ТЭД) постоянного и переменного тока [44-45].

Системы управления ТЭП электроподвижного состава неоднократно менялись, совершенствовались, сохраняя, при этом преемственность и общие конструктивные решения. Например, система реостатного пуска с коллекторными тяговыми машинами (КТМ) постоянного тока применялась на первых вагонах метрополитена, в частности, в Советский период работы Мосметрополитена (1935–1991 гг.) было разработано и запущено в серийное производство семь типов вагонов метро (А, Г, Д, Е, модели 81-717/714, 81-715/716 и 81-718/719) и несколько модификаций вагонов типа Е и мод. 81-717/714 (табл. 2.1) [46]. При пуске последовательно подключенный в цепь питания тяговых машин (ТМ) реостат постепенно выводится при поддержании постоянного тока и, соответственно, ускорения ЭПС, после чего разгон продолжается по естественным характеристикам двигателей, а затем происходит ослабление магнитного потока обмоток возбуждения. Это происходит при помощи специальных электромеханических устройств – группового реостатного контроллера (или ускорителя) с серводвигателем, реле ускорения-торможения, контакторов. Некоторые схемы также предусматривают перегруппировку схем соединения ТМ, с последовательной на последовательно-параллельную – для снижения реостатных потерь.

Развитие полупроводниковой техники сделало возможным применение импульсного регулирования напряжения на ТМ, в частности на метропоездах из

вагонов типа Еи (с тиристорно-импульсными системами управления ТИСУ) и вагонов типа Еир (в ней наряду с безреостатным пуском было применено рекуперативно-реостатное торможение ТМ с отдачей электрической энергии торможения в контактную сеть) (табл. 2.1) [46]. В этом случае исключаются из схемы пусковые реостаты, а напряжение на двигателях регулируется при помощи импульсного преобразователя напряжения, изготовленного с применением силовых тириستоров или транзисторов.

Таблица 2.1. Вагоны метрополитенов с тяговым приводам постоянного тока (ТП ПТ) по данным эксплуатации

Модель вагонов/поставщик тягового оборудования	Год выпуска	Средняя масса тары вагона, т	Тип двигателя постоянного тока	Номинальная мощность двигателя, кВт	Масса тягового двигателя, кг	Удельная пусковая мощность, кВт/т
А, мот/безм.	1935	51,7/36,3	ДМП-151	151	2340	7,2
Г	1946	43,7	ДК-102Г	83	1490	9,3
Д	1955	36,2	ДК-104Д	73	700	8,9
Е, Е _{чс} (81-710)	1963, 1973	32,5	ДК-108А, ДК-116А	68/72	630	8,8
Еи, Еир (81-710)	1 972, 1975	32,5	ДК-108А	68	630	8,8
81-717, 81-540	1977, 1997	33,8	ДК-117А	110	740	9,9
81-717М/714М	1979	33,8	ДК-117А	110	740	9,9
Е _{нв} (81-710)	1980	32,5	ДК-108А	68	630	8,8
И 81-715/716	1982	31	ДК-117А	90	740	8,7
81-718/719	1983, 1991	33,8	ДК-117А	110	740	10
81-720/721 3-д Динамо	1996	35	ДК-120	115	740 3-д Динамо	7,3

Первые разработки системы тиристорного импульсного управления (ТИУ) гипотетически считалось, что переход с реостатно-контакторного на

бесконтакторное тиристорное управление коренным образом изменяет условия работы электрооборудования и управление ЭПС постоянного тока, значительно улучшая его тягово-эксплуатационные качества и повышая экономическую эффективность электрической тяги.

Однако, практическое использование импульсного управления не дает тех результатов, которые ожидалось теоретически.

При использовании на моторных вагонах ТИУ уступает ДРУ по многим показателям (тяговые и тормозные свойства, потребление энергии, эффективность рекуперации и т.д.) и замена ДРУ на ТИУ приводит к удорожанию и увеличению массы электрооборудования и не повышает его надежность.

Следующей ступенью развития систем управления ТЭП стало применение асинхронных тяговых машин (АТМ), с питанием от преобразователей, инверторов, преобразующих постоянное напряжение в трехфазное синусоидальное с регулируемой частотой и величиной напряжения. Применение АТМ позволяет отказаться от коллекторных ТЭД, требующих больших объемов обслуживания, однако применена сложная электронная система управления.

На железные дороги многих развитых стран мира поставляется ЭПС с АТМ. Более 80% мирового рынка ЭПС обеспечивают четыре крупных фирмы-поставщика: Bombardier, Siemens, Alstom и Hitachi. За последние годы с их участием было создано большое количество тягового подвижного состава для различных систем электрической тяги [23].

В течение последних 30 лет в России проведено большое число испытаний по определению тягово-энергетических показателей различных систем ТЭП электроподвижного состава (табл. 2.2) [46]. Накоплен опыт создания привода с АТМ и применением инверторов напряжения, который можно использовать при оценке целесообразности создания ЭПС.

Основным декларируемым преимуществом систем привода с АТМ считается отказ от коллекторных двигателей, требующих постоянного обслуживания щеточно-

коллекторного узла, а также более сложных в производстве и капитальном ремонте. Также преимуществом считается отказ от пуска при помощи реостатов, когда часть энергии бесполезно рассеивается на них в виде тепла. Однако стоит учесть, что система управления АТМ более сложная и требует квалифицированного персонала для обслуживания, а также оборудования специальных участков с диагностическими стендами. Нужно принимать во внимание и высокую стоимость силовых преобразователей, в особенности силовых ключей (как правило, это транзисторы с изолированным затвором IGBT) [47].

Таблица 2.2. Вагоны метрополитенов с асинхронным тяговым приводам (АТП) по данным эксплуатации

Модель вагонов/поставщик тягового оборудования	Год выпуска	Средняя масса тары вагон, т	Тип асинхр. тягового двигателя	Номинальная мощность двигателя, кВт	Масса одного тягового двигателя, кг	Удельная пусковая мощность, кВт/т
81-720А/721А Альстом	1999	35,5	4ЕРА 1832В	160	801 Альстом	9,2
81-720Х/721Х Хитачи	2000	35	ЕР0-К60	160	700 Хитачи	10,8
81-740/741 Альстом	2003	48,2	4ЕРА 1832В	160	801 Альстом	7,5
81-720/721 Метровагонмаш	2003	35,2	ТАД 280 М4У2	170	800 з-д Динамо	10,8
81-553/554/555 Шкода (Казань)	2005	32,7	М1_ 3844 К/4	170	660 Шкода	10
81-760/761 Метровагонмаш (Ока)	2010	37	ДАТЭ-170-4У2	170	805 Лысьва	10
81-556/557/558 Шкода (НеВа)	2012	26,7	МШ 3839 К/4	167	577 Шкода	11,3
81-760А/761А/763А Метровагонмаш	2014	34,3	ДАТЭ-170-4У2	170	805 Лысьва	9
81-760/761/763 Хитачи (Охта)	2015	33,4	ЕР0-К60	170	700 Хитачи	10,3

Целесообразность применения на ЭПС того или иного типа ТЭП определяется эксплуатационными требованиями.

Для ЭПС со скоростями движения более 180 км/ч практически безальтернативным является бесколлекторный тяговый привод, так как высокие скорости недоступны для ЭПС с коллекторными тяговыми машинами (КТМ), поскольку окружная скорость якоря у них не может превышать 65 – 70 м/с или 50 – 60 м/с по поверхности коллектора. Важным преимуществом при использовании бесколлекторных тяговых в скоростном движении является и их высокая удельная мощность. Для ЭПС со скоростями менее 180 км/ч (т.е. для метро) необходимые эксплуатационные показатели могут быть обеспечены ЭПС с КТМ [23].

В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о том, какой тип ТЭП лучше использовать на ЭПС. В каждой системе ТЭП есть свои плюсы и минусы. Поэтому ниже наиболее целесообразным представляется провести подробное сравнение систем управления ТЭП с различными видами ТД. Сравнение выполнено на основе опыта эксплуатации данных видов ЭПС эксплуатирующими предприятиями городского электротранспорта.

2.2. Анализ преимуществ и недостатков систем управления ТЭП с дискретным реостатным управлением (ДРУ) и тяговыми машинами постоянного тока (ТМ ПТ)

Рассмотрим схему силовых цепей вагона метрополитена 81-717/714, представленную на рис. П.1.

Основными аппаратами системы являются групповые контроллеры, один из которых называется переключателем положений (ПП), а другой реостатным контроллером (РК). С помощью первого производится переключение схемы на режим хода и тормоза, а также с последовательного на параллельное соединение ТМ, а с второго – регулирование сопротивлений в цепи ТМ при пуске и торможении.

Пуск вагона производится путём постепенного выведения пусковых сопротивлений.

При установке контроллера машиниста на тормозные позиции включаются линейные контакторы ЛК3, ЛК4 и ЛК2.

Работа схемы силовых цепей вагонов метро с ДРУ в тяговом и тормозном режимах подробно рассматривается в [48-51]

2.2.1. Преимущества систем ТЭП с ДРУ и ТМ ПТ

В последнее время среди части специалистов утвердилось недостаточно обоснованное убеждение о безальтернативности использования на ЭПМ только АТМ, что обеспечивает им решающие и бесспорные преимущества перед ТЭП с ДРУ и ТМ ПТ. При этом основным и на первый взгляд бесспорным аргументом является сопоставление полученных в эксплуатации энергетических показателей действительно, архаичной системы ТЭП с ДРУ и без рекуперативного торможения, используемой в Мосметрополитене с 1935 г. практически без принципиальных изменений, с созданной с использованием последних достижений преобразовательной техники системой ТЭП с АТМ [16].

Некорректность такого подхода к оценке перспективности альтернативных систем ТЭП была показана в [24]. Между тем, имеющиеся экспериментальные данные и результаты теоретических исследований показывают, что ТЭП с ТМ ПТ имеет большие резервы улучшений всех его показателей [99].

В настоящее время во всем мире широко внедряется ЭПС с бесколлекторными ТМ, преимущественно АТМ, так как они обладают многими преимуществами:

- Простота передачи энергии и управления режимами его работы при помощи изменения напряжения на ТЭД и потока возбуждения, не требуется сложный преобразователь;
- Простота схемных решений: система управления не содержит сложных в диагностике электронных компонентов и не требует дорогостоящих диагностических стендов для поиска неисправностей и очень высокой квалификации обслуживающего персонала;
- Высокая общая надежность системы при условии своевременного технического обслуживания. Достигается благодаря простоте схем, минимизации элементов и их унификации между собой;

- Широкий и бесступенчатый диапазон регулирования частоты вращения
- Низкая стоимость комплекта электрооборудования (табл. 4.14 и 4.16 в четвертой главе). Благодаря отсутствию дорогостоящей электроники стоимость ЭПС оказывается ниже аналогичного, но с асинхронными двигателями или импульсным управлением. Также значительно ниже стоимость запасных частей к системе ТЭП.

2.2.2. Недостатки систем ТЭП с ДРУ и ТМ ПТ

Система управления ТЭП с ДРУ и ТМ ПТ имеет и недостатки:

- Повышенный расход энергии, затрачиваемый на пуск ЭПС, поскольку часть энергии выделяется в виде тепла на пусковых реостатах. Выделение энергии на реостатах можно уменьшить вдвое, применив перегруппировку ТМ, но это дополнительно усложняет силовую схему и требует увеличения контакторов;
- Силовые электромеханические аппараты требуют регулярного обслуживания, зачистки контактов от нагара, своевременного обновления контактных пар и т.д.;
- Большое количество механических узлов, требующих внимания. Например, групповой реостатный контроллер, его привод, которые должны свободно вращаться, без заеданий;
- Возможен разброс тяговых усилий между ТМ и, соответственно, разность токов между ними из-за группового питания всех ТМ от одного источника. Характеристики ТМ разнятся между собой, в зависимости от свойств активных материалов, разности активных сопротивлений обмоток, особенностей сборки на заводе-изготовителе и при прохождении ремонтов, а также из-за разности диаметров бандажей колес на разных осях. В результате некоторые машины могут оказаться недогруженными, а другие, наоборот, перегруженными машинами на каждый вагон должны подбираться по характеристикам с использованием специального диагностического стенда, что усложняет технологию ремонта;

- Существует ограничение по максимальной частоте вращения КТМ, связанное с условиями выполнения коммутации в щеточно-коллекторном узле, нагреве коллектора в результате трения, износа щеток и механической прочностью;
- Коллекторным тяговым машинам необходимо регулярно проводить замену изнашивающихся щеток, реже - шлифовку и продорожку коллектора;
- Коллекторные тяговые машины чувствительны к влаге, особенно к ее попаданию на коллектор, что может вызвать межламельные замыкания и круговой огонь на коллекторе, снижение электрической прочности изоляции. Влага в ТМ может попасть с путей во время атмосферных осадков и в процессе мойки подвижного состава. Более всего этому подвержены двигатели с самовентиляцией.

2.3. Сравнительный анализ систем ТЭП вагонов метрополитена постоянного тока с тиристорным импульсным управлением (ТИУ) и ДРУ

Схема силовых цепей вагона метро с ТИУ представлена на рис П.2 (см. приложение)

Работа схемы силовых цепей вагонов метро с ТИУ в тяговом и тормозном режимах подробно рассматривается в [52].

Рассмотрим вначале принцип действия тиристорно-импульсного без реостатного пуска. Устройство, с помощью которого осуществляется импульсное регулирование напряжения, обычно называют тиристорно-импульсным регулятором (ТИР). Оно состоит из тиристорно-импульсного прерывателя (преобразователя) (ТИП), входного L_{ϕ} , C_{ϕ} и выходного L_d , D_o фильтров (рис. 2.1а).

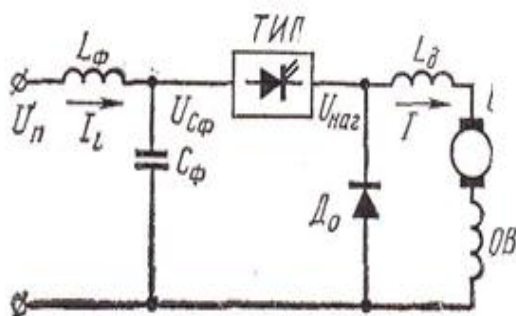


Рис. 2.1(а)

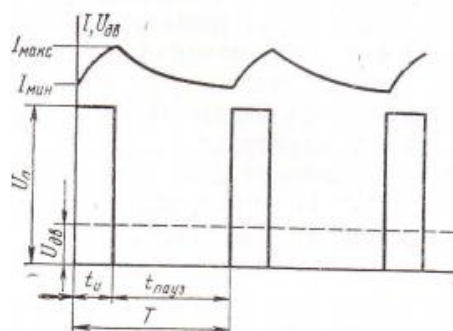


Рис. 2.1(б)

При помощи ТИП непрерывное напряжение контактной сети и преобразовывается в последовательные импульсы. Входной фильтр обычно Г-образного типа, состоит из индуктивности L_ϕ и емкости C_ϕ и служит для ограничения перенапряжения на ТИП при его запитании, а также для сглаживания пульсаций тока в контактной сети.

При отсутствии C_ϕ и имеющейся индуктивности в контактной сети было бы невозможно прерывание тока с помощью тиристоров, так как эта индуктивность задерживала бы спадание тока и вызвала бы не допустимые перенапряжения на зажимах ТИП. Выходной фильтр состоит из дополнительной индуктивности (дроселя) L_d и обратного вентиля (диодов) D_o , через которые замыкается ток двигателя после запитания ТИП.

Напряжение на двигателях изменяется переодическим отпиранием и запираанием ТИП (рис. 2.1б). Среднее напряжение на двигателях, если пренебречь относительно малым падением напряжения на дросселе L_d , равно среднему напряжению на нагрузке за период регулирования

$$U_{дв} = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^{t_{и}} U_{п} dt = U_{п} \left(\frac{t_{и}}{T}\right) = U_{п} \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Где $t_{и}$ — ширина импульса ; λ — коэффициент заполнения:

$$\lambda = \frac{t_{и}}{T} = t_{и} \cdot f = \frac{U_{дв}}{U_{п}} \quad (2.2)$$

($f=1/T$ — частота регулирования)

Ток, потребляемый от источника питания I_L можно определить из уравнения баланса подводимой и используемой электроэнергии

$$U_{п} \cdot I_L \cdot \eta_{сх} = U_{дв} \cdot I \quad (2.3)$$

$$\text{Откуда } I_L = (U_{дв}/U_{п}) \cdot (U_{дв}/U_{п}) = I \cdot \lambda / \eta_{сх} \quad (2.4)$$

Легко показать, что при заданном значении тока регулирования цепи двигателя между скоростью ЭПС v и λ имеет место прямолинейная зависимость,

т.е. для получения $I=\text{const}$ требуется увеличивать λ пропорционально повышению скорости ЭПС. Действительно,

$$\lambda = U_{\text{дв}}/U_{\Pi} = (E + I \cdot r_{\text{дв}})/U_{\Pi} = C\Phi v + I \cdot r_{\text{дв}}/U_{\Pi} = \lambda_{v0} + kv \quad (2.5)$$

λ_{v0} — коэффициент заполнения при $v=0$.

По способу изменения коэффициента заполнения системы импульсного регулирования разделяются на частотно—импульсные ($t_{\text{и}}=\text{const}$), широтно-импульсные ($f = \text{const}$) и комбинированные (меняются $t_{\text{и}}$ и f).

Электромагнитные процессы в цепи двигателя при пуске (см. рис. 2.1.а) описываются следующими уравнениями:

$$\text{при открытом ТИ:} \quad U_{\text{сф}} - E = L \left(\frac{di}{dt} \right) + ri \quad (2.6)$$

$$\text{при запертом ТИП} \quad E = L \left(\frac{di}{dt} \right) + ri \quad (2.7)$$

где, где $L = L_{\text{я}} + L_{\text{д}}$ — индуктивность цепи двигателя ; $r = r_{\text{я}} + r_{\text{д}}$ — активное сопротивление цепи двигателя.

При решении нелинейной системы дифференциальных уравнений (2.1)-(2.7) ниже подробно рассмотрены принцип работы системы силовых цепей ЭПС с ТИУ и построены графики.

2.3.1. Предполагавшиеся преимущества ТЭП с ТИУ

Основные прогнозируемые преимущества системы постоянного тока с ТИУ по сравнению с существующей системой постоянного тока с ДРУ следующие:

- повышение надежности электрооборудования благодаря устранению контактной коммутационной аппаратуры;
- безреостатный плавный пуск, позволяющий наряду с устранением потерь в пусковых сопротивлениях повысить пусковое ускорение;
- плавное регулирование скорости во всем диапазоне ее изменения;
- плавное рекуперативное торможение в широком диапазоне скоростей без специальных возбудителей или обмоток параллельного возбуждения ТМ;
- устранение переключений ТМ для регулирования скорости;

- возможность применения постоянного параллельного соединения ТМ, улучшающего использование сцепного веса;
- возможность повышения на 10-20% среднего напряжения, подводимого к двигателям, и соответствующее повышение их мощности, а, следовательно, и скорости движения;
- защита ТМ от воздействия колебаний напряжения и перенапряжений в тяговой сети (подразумевалось постоянное включение импульсного преобразователя);
- простота автоматизации операций по управлению ЭПС [53].

Исключительно важным прогнозировавшееся преимуществом ЭПС постоянного тока со статическими преобразователями является возможность повышения напряжения в КС. Повышение напряжения значительно снижает стоимость системы электроснабжения, а также потери электроэнергии, на вновь электрифицируемых линиях уменьшает необходимое количество тяговых подстанций и общий расход цветных металлов на оборудование ЭПС [54].

Степень экономической эффективности тиристорного управления ЭПС определяется соотношением между увеличением стоимости ЭПС и уменьшением эксплуатационных расходов, обусловленным повышением скорости и уменьшением расхода электроэнергии вследствие устранения потерь в пусковых сопротивлениях и сокращения тормозных потерь. Кроме того, благодаря увеличению надежности электрооборудования ЭПС должны снизиться расходы на его ремонт [53]. Если же применять более высокое напряжение в контактной сети, то резко сократится также стоимость сооружения и эксплуатации системы электроснабжения. На существующих участках, электрифицированных на постоянном токе, повышение напряжения в тяговой сети приводит к увеличению пропускной способности по условиям электроснабжения и тем самым позволяет отказаться от других, более дорогих способов увеличения пропускной способности, как, например, сооружение промежуточных тяговых подстанций [55].

2.3.2. Сравнительная оценка эффективности систем ТЭП с ДРУ и ТИУ

2.3.2.1. Принципы работы системы силовых цепей ЭПС с ДРУ и ТИУ

Практически на всем эксплуатируемом ЭПС постоянного тока сегодня используется реостатный пуск со ступенчатым регулированием сопротивления $R_{пр}$ пускового резистора (рис. 2.1в)).

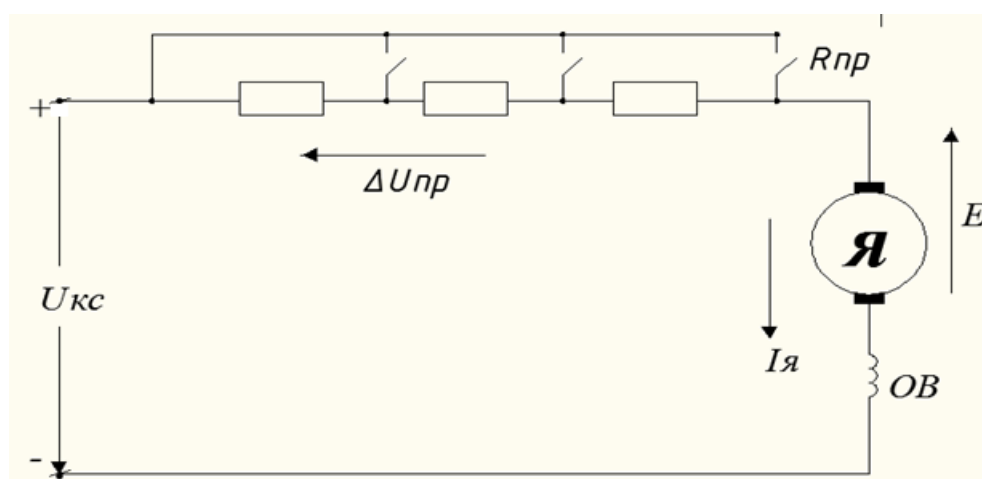


Рис. 2.1(в). Ступенчатое регулирование сопротивления $R_{пр}$

В процессе увеличения при разгоне поезда приложенного к ТМ напряжения U_k от минимума до напряжения контактной сети $U_{кс}$ сопротивление $R_{пр}$ ступенями уменьшается от максимума до нуля. В конце этого процесса при одноступенчатом пуске (без перегруппировок ТМ) потери в пусковом резисторе превышают полезно использованную энергию.

Для уменьшения ущерба от реостатных потерь на большинстве типов ЭПС в процессе пуска производят перегруппировки ТМ. Благодаря этому потери снижаются в 2 раза и более, но все же они остаются существенными и могут составлять заметную часть общего расхода энергии на тягу поездов. Это обстоятельство обусловило стремление улучшить энергетические показатели ЭПС в первую очередь именно за счет исключения реостатных потерь.

Наиболее простым способом устранения реостатных потерь является использование импульсного управления, практическая реализация которого стала возможной после создания управляемых полупроводниковых вентилей. Для этого

(рис. 2.2) к шунтированной диодом D_o цепи из последовательно включенных якоря Я и обмотки возбуждения ОВ тяговой машины нужно кратковременно с помощью коммутатора К подключать напряжение контактной сети $U_{кс}$.

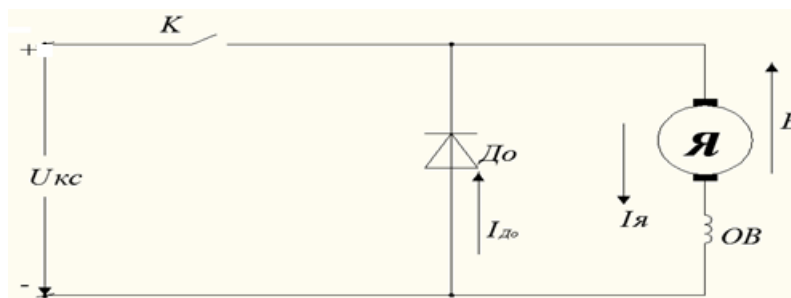


Рис. 2.2. Принципиальная схема привода с импульсным преобразователем в режиме тяги

При этом (рис. 2.3) в течение части периода времени T от 0 до t_1 когда К замкнут, $I_я = I_{кс}$ и растет, а в остальной части периода $I_я = I_{до}$ и падает.

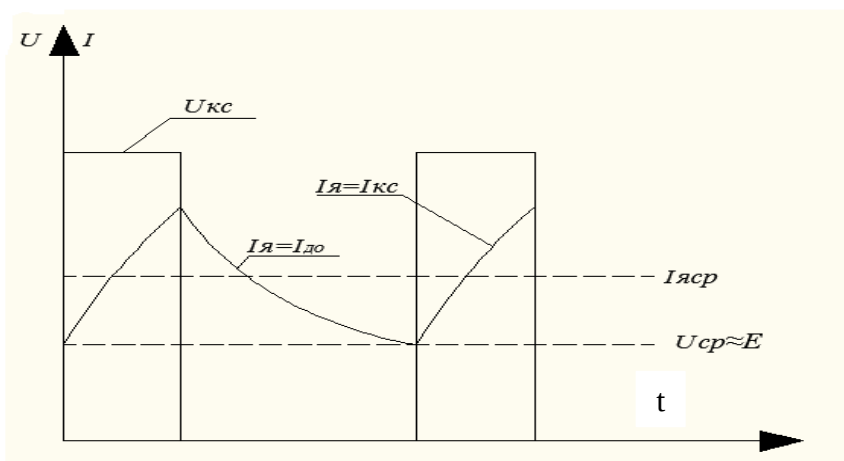


Рис. 2.3. Осциллограммы при импульсном регулировании

Очевидно, что такое управление возможно только при высокой частоте работы коммутатора К, т.е при малом времени T . Практически коммутатор К может быть выполнен тоже только на базе полупроводниковых приборов – тиристоров или транзисторов. В такой схеме среднее значение тока якоря $I_{я,ср}$ регулируется путем изменения среднего значения напряжения $U_{ср}$ за счет изменения так называемого коэффициента заполнения $\lambda = t_1/T$. Таким способом исключаются реостатные потери

и достигается плавное регулирование $I_{я.ср}$. Однако практическое использование импульсного управления в подобном, простейшем исполнении невозможно.

Во первых, пульсации тока в цепи ТМ резко ухудшают условия их работы: растут потери и нагрев, ухудшается коммутация. В частности, в самом начале работ по созданию системы ТИУ для метровагонов, было установлено, что при частоте работы преобразователя менее 150 Гц двигатели метровагонов типов ДК-104Г и ДК-108А-1 не могут работать без дополнительной сглаживающей индуктивности, так как в противном случае в течение 2 – 3 мин они нагреваются до 100 – 150 град., а их коммутация крайне неудовлетворительна. Поэтому при ТИУ в цепь ТМ обязательно должна быть включена индуктивность L_ϕ , и, кроме того, для снижения пульсаций потока возбуждения его обмотка ОВ должна быть шунтирована резистором $R_{ш}$ (рис. 2.4).

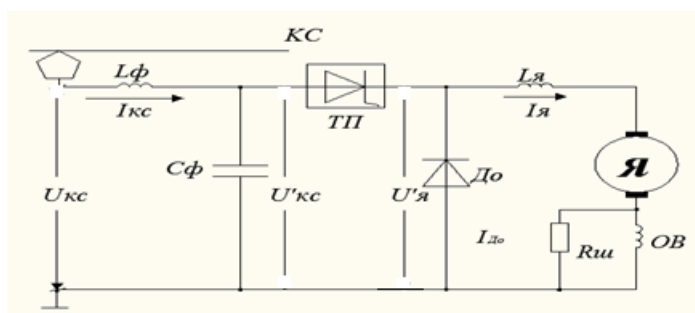


Рис. 2.4. Силовая схема с ТИУ, включающая индуктивность L_ϕ и резистор $R_{ш}$

Во вторых, на железнодорожном транспорте из-за отрицательного влияния на передаваемые по рельсовым цепям кодовые сигналы, обеспечивающие безопасность движения поездов, недопустимы сколько-нибудь значительные пульсации тока в контактной сети. Поэтому напряжение к тиристорному прерывателю-преобразователю (ТП) должно подводиться через эффективный фильтр. Сегодня практически всегда используется Г-образный LC-фильтр.

Следовательно, схема рис. 2.2 должна быть дополнена двумя фильтрами и преобразуется в схему рис. 2.4. Благодаря включению фильтров пульсации I_ϕ резко снижаются, а пульсации $I_{кc}$ практически исключаются, так как при токе измеряемом

сотнями или тысячами ампер, пульсации $I_{\text{кc}}$ ограничиваются десятками или сотнями мА, в результате снижаются дополнительные потери энергии в тяговых машинах и уменьшаются до допустимого уровня мешающие токи в рельсовых цепях. Однако все это достигается за счет использования электрического оборудования, в котором, естественно, тоже возникают потери энергии. Показатели ТИУ в режиме тяги характеризуются представленными на рис. 2.5 и 2.6 диаграммами изменения мгновенных и средних значений токов и напряжений.

В течение первой части периода λT (см. рис. 2.5) открыт ТП и к цепи последовательно включенных $L_{\text{я}}$ и тяговых машин подведено напряжение $U'_{\text{я}} = U'_{\text{кc}}$ (напряжению на емкости фильтра $C_{\text{ф}}$). При этом $I_{\text{я}}$ растет, а $U'_{\text{я}}$ падает из-за разряда $C_{\text{ф}}$. Во второй части периода $(1-\lambda)T$, тогда ТП закрыт, $I_{\text{я}}$ замыкается через D_0 и падает, а $U'_{\text{кc}}$ растет благодаря подзаряду $C_{\text{ф}}$ от контактной сети КС через индуктивность фильтра $L_{\text{ф}}$.

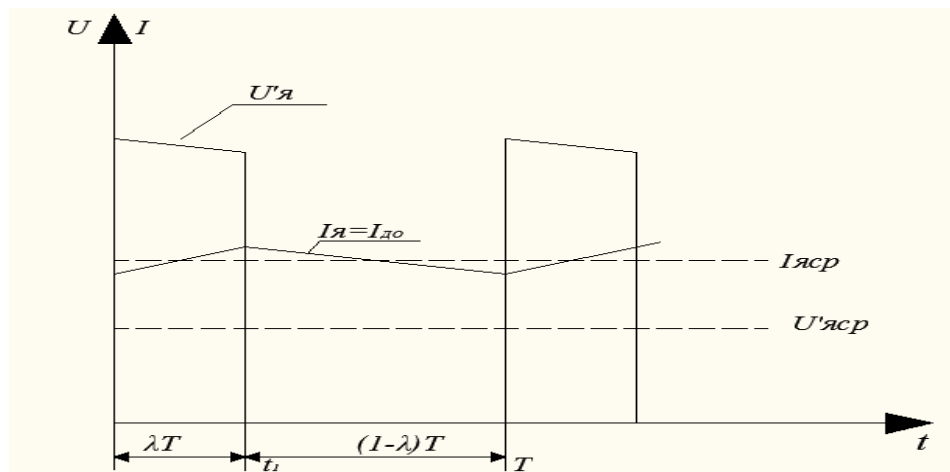


Рис. 2.5. Диаграмма изменения мгновенных и средних значений тока и напряжения

В результате в процессе пуска (с учетом отмеченных выше допущений) по мере роста λ от 0 до 1 среднее значение тока $I_{\text{я.ср}}$ поддерживается на заданном уровне (см. рис. 2.6) а среднее значение приложенного к ТМ напряжения линейно растет от 0 до 1, т.е. до $U'_{\text{кc}}$. Аналогично для потребляемого из контактной сети тока $I_{\text{кc}}$. Следовательно, $U'_{\text{яср}} = \lambda \cdot U'_{\text{кc}}$; $I_{\text{кc}} = \lambda \cdot I_{\text{я}}$ и $I_{\text{кc}} \cdot U_{\text{кc}} = U_{\text{яср}} \cdot I_{\text{яср}}$, т.е. пуск происходит якобы

без потерь энергии в устройствах регулирования напряжения. В этом и состоит одно из главных преимуществ ТИУ.

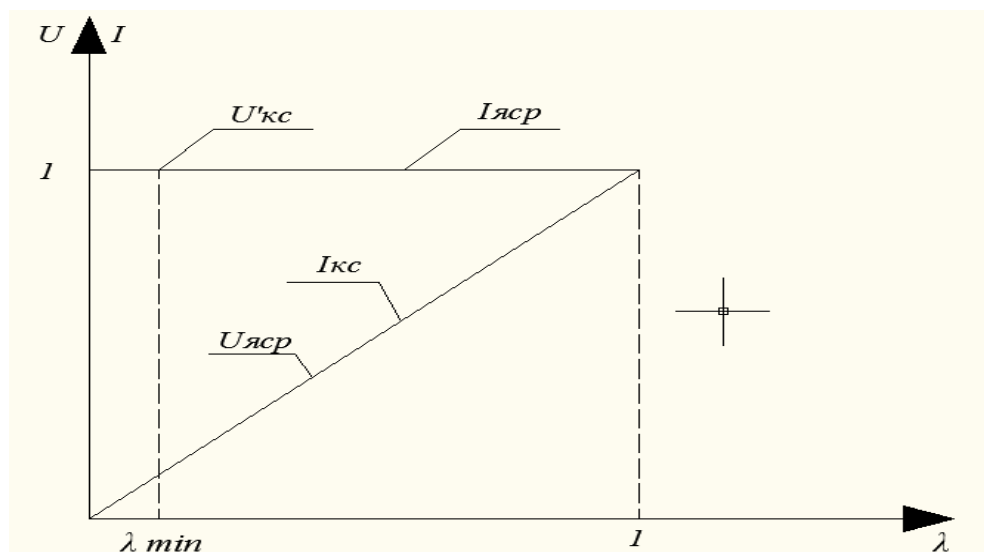


Рис. 2.6. Диаграмма изменения тока и напряжения

2.3.2.2. Контактная аппаратура и показатели электрооборудования

При использовании тиристорно-реостатного контроллера (ТРК) регулирование сопротивления пуско-тормозных резисторов осуществляется, как обычно, — выключением их ступеней, но путем включения очередного тиристора, заменяющего контактор. Такое техническое решение обладает рядом очевидных преимуществ. Важнейшее из них — резкое повышение быстродействия и возможность увеличения числа ступеней регулирования сопротивления пуско-тормозных резисторов, т.е. уменьшение колебаний силы тяги и торможения. Кроме того, упрощается решение задачи и повышается точность обеспечения заданной зависимости ускорения поезда от времени в начальной стадии пуска, что необходимо, в частности, на ВМ.

Естественным возражением против ТРК является необходимость применения, как и при ТИУ, большого количества тиристоров с соответствующими устройствами управления. В то же время в ТРК можно использовать тиристоры низкого класса с большим временем восстановления запирающих свойств и с предельно простыми устройствами управления и защиты от опасных режимов. Тем не менее и в этом

случае, как показали предварительные оценки, ТРК дороже КРК, хотя его применение окупается в короткий срок за счет снижения затрат на эксплуатацию.

Таким образом, при ТИУ контактные аппараты не только не устраняются, как это предполагалось вначале, но их количество уменьшается не столь кардинально и уж во всяком случае не на порядок, как это еще утверждали некоторые специалисты.

Тем не менее количество контактной аппаратуры в схемах с ДРУ несколько больше, чем при ТИУ. Однако данное обстоятельство не может бездоказательно рассматриваться как существенный недостаток ДРУ, а может быть даже отнесено к его преимуществам. Дело в том, что за счет увеличения количества контакторных одноступенчатых аппаратов, которые необходимы и при ТИУ, решаются те же задачи, которые при ТИУ требуют использования сложных, дорогих и энергоемких тиристорных преобразователей. При замене же привода с ДРУ на ТИУ остается необходимость производить и организовать эксплуатацию всех типов контакторных аппаратов, за исключением реостатного контроллера (хотя и последнее не безусловно). Следовательно, при внедрении ТИУ необходима организация производства и эксплуатации всего сложного и дорогого комплекса элементов, комплектующих систему ТИУ, при сохранении производства и эксплуатации практически всей номенклатуры аппаратов. При меньшем количестве последних, естественно, возрастут удельные затраты и на производство, и на эксплуатацию каждого отдельного аппарата.

Наличие на ЭПС с ТИУ большого количества контакторных аппаратов и специфического для ТИУ электрооборудования обуславливает рост массы и стоимости комплекта электрооборудования и, естественно, влияет на его надежность. Однако, как показал опыт, знак изменения надежности далеко не очевиден, хотя в начале создания привода с ТИУ повышение надежности считалось бесспорным и рассматривалось как одно из преимуществ ТИУ.

Что касается массы электрооборудования, то масса электрооборудования вагонов метрополитена типа И (без учета ТМ) на 23% больше, чем у серийного

вагона 81.717 с ДРУ, а у следующего по времени разработки вагона метро с ТИУ типа И_м масса специфического для ТИУ электрооборудования на 14% больше, чем у вагона типа И. Фактическое увеличение массы и стоимости электрооборудования вагонов с ТИУ должно быть больше, так как на вагонах электропоездов ЭР24 в ЭР30 предполагалось использовать, а на вагонах метрополитена использованы те же ТМ, что и при ДРУ. Между тем, как показано выше, применение ТИУ требует увеличения массы машин при сохранении одной и той же напряженности их работы.

Таким образом, как зарубежный опыт, как и отечественные данные показывают, что замена ДРУ на ТИУ приводит к удорожанию и увеличению массы электрооборудования и не повышает его надежность.

2.3.2.3. Тяговые и тормозные характеристики

В числе предполагавшихся преимуществ ТИУ была возможность плавного регулирования сил тяги к торможения во всем диапазоне изменения скорости движения. Это имеет существенное значение для пассажирского ЭПС, особенно для метрополитена. Однако из-за ограничения минимума напряжения на выходе тиристорного прерывателя (ТП) практическая реализация данного теоретического преимущества в режиме тяги оказалась невозможной.

В то же время в приводе с ДРУ при НВ ТМ плавное регулирование силы тяги от нуля до максимума достигается естественным путем – за счет увеличения в процессе пуска тока возбуждения от нуля до номинала. Следовательно, и по этому показателю ТИУ уступает ДРУ с НВ ТМ.

Не имеет ТИУ реальных преимуществ и в плавности регулирования тормозной силы, особенно на метровагонах. Здесь для повышения эффективности тормозного процесса при высокой скорости движения в цепи якорей включают балластные резисторы с целью увеличения мощности тяговых машин за счет увеличения напряжения на их коллекторах. При использовании балластного резистора возникает проблема регулирования его сопротивления. Естественно, что увеличение

сопротивления выключаемой ступени балластного резистора ведет к росту скачка тормозной силы. Поэтому желательно применить максимально мелкие ступени. Однако это приводит к увеличению числа контакторов в схеме, что противоречит основной идее ТИУ –бесконтактности управления. Поэтому и здесь нужно искать компромисс. На вагонах И_М отдано предпочтение уменьшению контакторов в схеме, и поэтому балластный резистор выключается целиком. Это приводит к существенным колебаниям тормозной силы, а также к снижению энергетической эффективности рекуперации.

Импульсная рекуперация имеет недостатки и в зоне малых скоростей движения, при остановке поезда. О перечислении преимуществ ТИУ обычно указывается возможность рекуперативного торможения «практически до полной остановки». Но это утверждение не соответствует действительности. Фактически на вагонах метрополитена ток рекуперации уменьшается до нуля при скорости движения порядка 8-10 км/ч [56]. После этого наблюдается резкое снижение тормозной силы в режиме «реостатного» торможения с самовозбуждением при открытом ТП. Это обстоятельство создает хорошо известные (по аналогичному явлению на серийных вагонах) затруднения с механическим дотормаживанием.

В системе с ДРУ и НВ ТМ обеспечивается большая плавность регулирования тормозной силы. В зоне высоких скоростей она достигается за счет использования в качестве балластного резистора пусковых с имеющимися устройствами ступенчатого регулирования их сопротивления, а в зоне низких скоростей – за счет поддержания максимальной тормозной силы до скорости около 2км/ч. Затем она линейно уменьшается до нуля в режиме «реостатного- торможения с замкнутой накоротко цепью якорей машин при максимальном токе возбуждения». Это практически снимает проблему механического дотормаживания. Кроме того, при НВ ТМ имеется возможность снизить разброс нагрузок параллельных групп ТМ за счет соответствующей коррекции токов возбуждения. Это дополнительно улучшает тяговые и тормозные характеристики системы с ДРУ и НВ ТМ.

Таким образом, ТИУ уступает приводу с ДРУ с НВ ТМ и в тяговых и тормозных свойствах.

2.3.2.4. Влияние на тяговые свойства

При обосновании необходимости замены ДРУ на ТИУ предполагалось, что последнее обеспечит существенное улучшение тяговых свойств за счет увеличения силы тяги в зоне ограничений по условиям сцепления благодаря исключению ее колебаний, присущих системе ТЭП с ДРУ; повышения силы тяги в зоне ослабления поля благодаря замене ступенчатого его регулирования плавным.

Применение невыключаемого ТП оказалось невозможным из-за потерь энергии как в нем самом, так и в ТМ. Более того, было признано необходимым и практически реализуется закорачивание ТП вместе с Ля после окончания процесса регулирования напряжения. Но и в этом случае в цепи якорей остается $L\phi$, и поэтому напряжение на коллекторах ТМ, а следовательно, и сила тяги при ТИУ меньше, чем при ДРУ

Не имеет реальных преимуществ по тяговым свойствам ТИУ и в той зоне регулирования напряжения на коллекторах ТМ, в которой сила тяги ограничена условиями сцепления.

Тяговые свойства ЭПС с ТИУ в зоне ограничения силы тяги по сцеплению ухудшаются действием еще двух факторов: вынужденным ослаблением поля из-за шунтирования ОВ и большой величиной минимального напряжения при работе широтного ТП с номинальной длительностью рабочего цикла.

Кроме этого, для ограничения пульсации потока обмотки возбуждения ТМ при ТИУ постоянно шунтированы резистором, что приводит к некоторому снижению силы тяги при том же пусковом токе. Этот недостаток усугубляется в случае совмещенного регулирования напряжения и поля, которое значительно ослабляет поле в зоне регулирования напряжения на коллекторах ТМ.

2.3.2.5. Потребление энергии на тягу поездов

Потребление энергии из энергосистем на продвижение поездов определяется разностью между ее расходом в тяге и возвратом при наличии рекуперативного торможения.

За прошедшее время и в России, и за рубежом созданы системы привода с ДРУ, обеспечивающие эффективное непрерывное рекуперативное торможение до низких скоростей движения за счет использования перегруппировок ТМ. Например, в системе МЭИ на ВМ рекуперация заканчивается при скорости около 15 км/ч, тогда как на вагонах с ТИУ она заканчивается при скорости движения не менее 8 км/ч. Очевидно, что такая малая разница скоростей мало влияет на сравнительную энергетическую эффективность рекуперации сопоставляемых систем привода.

Количественно различие энергетических показателей ТЭП с РУ и ТИУ, выполненных по схемам рис. 2.7 и 2.8 [56], характеризуется кривыми на рис. 2.9. построенными по приведенным в [57] данным о возврате в сеть энергии при рекуперации вагонами с ТИУ типов Им и И и вагона с РУ и НВ ТМ.

Как следует из данных рис. 2.9, возврат энергии в сеть вагоном с ДРУ в расчетном для метро режиме движения (скорость сообщения 48 км/ч, длина перегона 1,7 км) ориентировочно в 1,6 раза больше, чем при ТИУ со схемой вагона И_м, имеющей нерегулируемый балластный резистор. При этом с учетом потерь энергии в устройствах электроснабжения система ДРУ (кривая НВ на рис. 2.9) при полном полезном использовании энергии рекуперации обеспечивает уменьшение потребления энергии на движение поездов на 8-9 % по сравнению с ТИУ [58].

Таким образом, именно в том показателе, по которому предполагалось самое большое преимущество ТИУ, оно в наибольшей степени уступает современным системам ДРУ с НВ ТМ. Энергетические показатели рекуперации при ТИУ могут быть улучшены за счет регулирования сопротивления балластного резистора и применения в зоне работы с ослаблением поля классической рекуперации с НВ ТМ. Используя оба эти решения, можно достичь эффективности рекуперации на ВМ с

ТИУ, равной этому показателю при ДРУ с НВ ТМ. Но для этого необходимо электрооборудование вагона с ТИУ дополнить почти полным комплектом электрооборудования с ДРУ, что явно нецелесообразно, да и неосуществимо по массогабаритным показателям. Но даже в этом весьма проблематичном случае будет достигнуто только равенство энергетической эффективности рекуперации при ТИУ и ДРУ, но никак не преимущество первого.

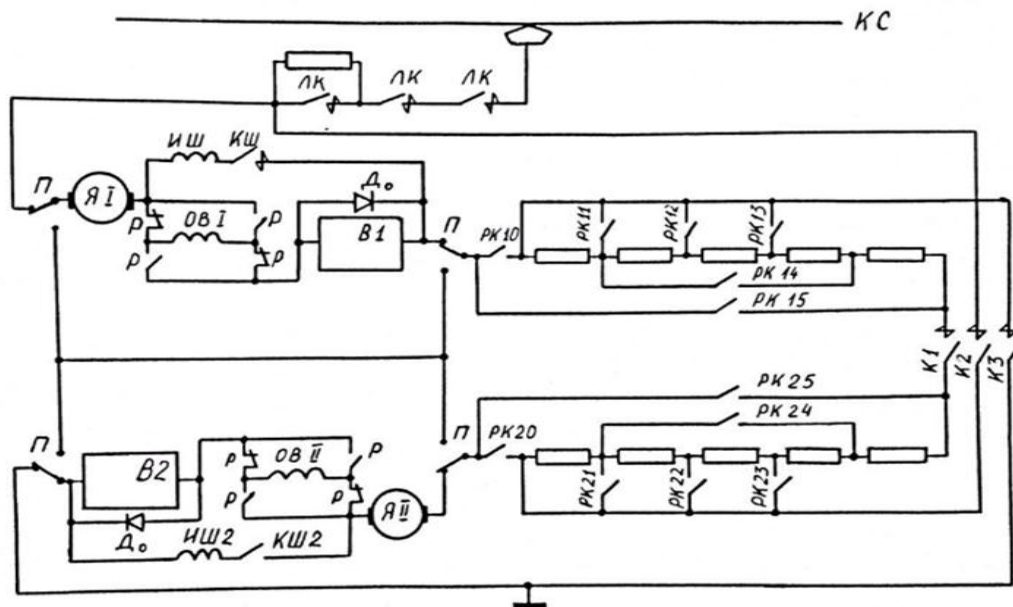


Рис. 2.7. Упрощенная схема силовых цепей ТЭП с РУ и НВ ТМ

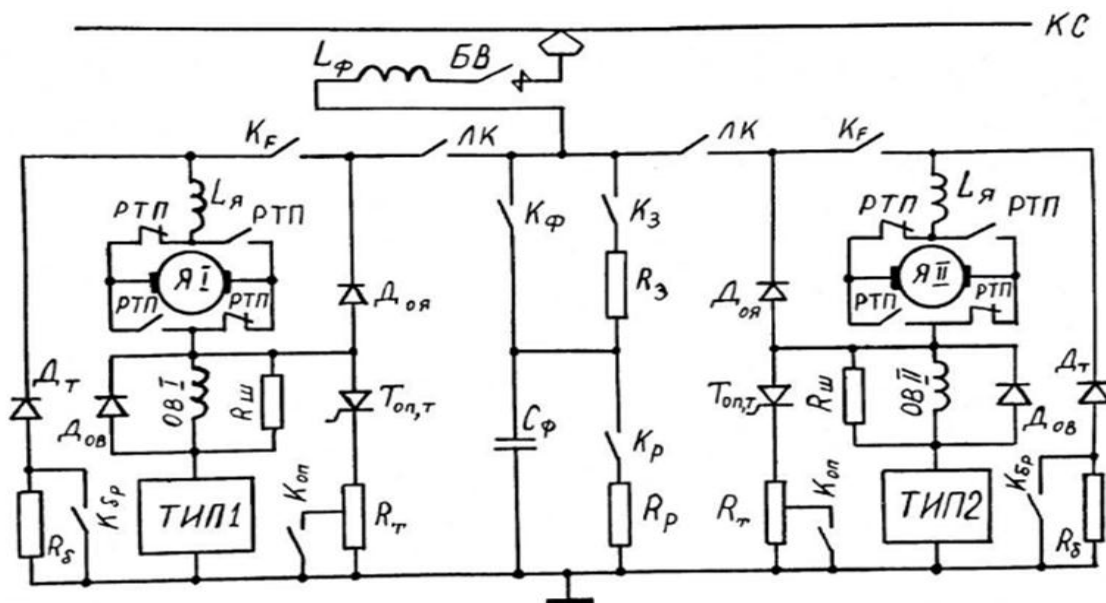


Рис. 2.8. Упрощенная схема силовых цепей ТЭП с ТИУ

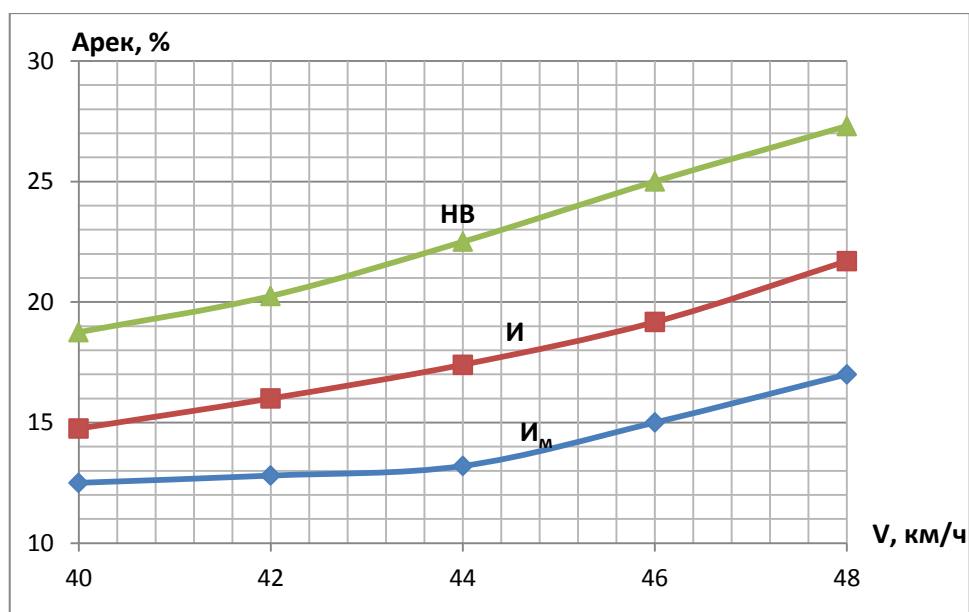


Рис. 2.9. Зависимость от скорости сообщения возврата энергии при рекуперации $A_{рек}$, выраженные в процентах от потребленной на тягу энергии

Следовательно, ТИУ с реальными параметрами существенно уступает по энергетической эффективности рекуперации системе ДРУ с НВ ТМ. При этом общую энергетическую эффективность замены ДРУ на ТИУ можно обеспечить только за счет сокращения потерь энергии в тяге. Эта цель на моторных вагонах в принципе может быть достигнута за счет улучшения динамических показателей поезда и исключения реостатных потерь. Но в связи с ухудшением тяговых и тормозных характеристик динамические показатели вагонов с ТИУ также должны быть хуже. Поэтому остается единственный резерв улучшения энергетических показателей – исключение реостатных потерь.

Таким образом, применение на моторных вагонах ТИУ вместо ДРУ с НВ ТМ и рекуперативным торможением не только не дает экономии энергии, но и ведет к существенному увеличению ее потребления. Особенно это относится к случаю полного полезного использования энергии рекуперации, которое ввиду его высокой эффективности при серьезном отношении к проблеме снижения расхода энергии на тягу поездов должно быть безусловно обеспечено.

2.3.2.6. Проблема ослабления поля

Во времена, когда система с ТИУ разрабатывалась, предполагалось отсутствие существующих потерь энергии в процессе регулирования напряжения при ТИУ, что послужило основанием для предположения о возможности использования в этой системе ТМ с высоколежащими характеристиками - вплоть до полного отказа от ослабления поля. Однако при этом расширяется диапазон работы ТП с коэффициентом заполнения $\lambda < 1$ и увеличиваются потери энергии как в самом ТП, так и в ТМ. Поэтому и при ТИУ целесообразно использовать машины с низколежащими характеристиками, что делает необходимым применение ослабления поля. В связи с этим необходимо дополнить устройствами ослабления поля.

При ТИУ можно использовать одну из трех систем ослабления поля:

1. Шунтированием обмотки возбуждения резистором с переменным сопротивлением;
2. Совмещенное регулирование, при котором регулятор напряжения обеспечивает и ослабление поля;
3. Применение для ослабления поля специального дополнительного тиристорного прерывателя.

Каждая из них обладает своими недостатками. При классической системе сохраняется контакторное регулирование, увеличивается масса электрооборудования и затрудняется использование рекуперации. Совмещенное регулирование позволяет минимизировать массу и стоимость электрооборудования, но вынуждает использовать невыключаемый ТП. Это приводит к росту потерь, включая пульсационные в ТМ, а также ухудшает тяговые характеристики из-за ослабления поля и в зоне регулирования напряжения на коллекторах этих машин. Применение специального ТП для ослабления поля также увеличивает массу, стоимость и сложность электрооборудования (вследствие наличия на ЭПС двух ТП).

2.3.2.7. Влияние на эффективность рекуперации

Одним из реальных преимуществ ТИУ перед ДРУ является возможность рекуперации при сохранении последовательного возбуждения ТМ, т.е. без оборудования ЭПС специальным источником питания обмоток возбуждения, необходимым при классической рекуперации. Однако при этом, как следует из принципа работы импульсной рекуперации, напряжение на коллекторах ТМ должно быть меньше напряжения в контактной сети, что является существенным недостатком импульсной рекуперации по сравнению с классической. Кроме того, при импульсной рекуперации практически исключается возможность ограничения аварийного роста тока якорей ТМ при провалах напряжения в контактной сети.

Если же учесть еще потери в ТП и особенно вследствие пульсационных потерь в ТМ, то вывод о необходимости отказаться от импульсной рекуперации в зоне высоких скоростей движения станет более весомым.

2.3.2.8. Оценка технико-энергетической эффективности

Очевидно, что оценка эффективности ТИУ, полученная в эксплуатации для одного типа ЭПС, не может быть распространена на ТИУ в целом. Ведь она существенно зависит именно от типа ЭПС и условий его эксплуатации. В частности, энергетическая эффективность ТИУ во многом определяется величиной реостатных потерь и частотой пусков, она не может быть одинаковой, скажем, на электровозе и трамвае. Это диктует необходимость выбора типа ЭПС, на базе которого следует оценивать показатели ТИУ.

Представляется очевидным, что из трех типов железнодорожного ЭПС – вагонов метрополитена, моторных вагонов наземных электропоездов и электровозов – наибольшая эффективность ТИУ может быть получена на вагонах метрополитена. Это связано с большой частотой пусков и торможений при четком графике и высокой интенсивности движения. Кроме того, полученные для метрополитена результаты легко использовать для оценки эффективности применения ТИУ на моторных вагонах наземных электропоездов. Поэтому оценку эффективности ТИУ

на основе реальных показателей ТЭП, опробованных хотя бы в опытной эксплуатации, целесообразно выполнить в первую очередь для метро.

Естественно, что корректные и объективные результаты принципиальной оценки эффективности вагонов метро с ТИУ и ДРУ могли бы быть получены на основании опыта разработки и эксплуатации вагонов с наиболее совершенными приводами обеих систем. Однако практика не представляет такой возможности. Дело в том, что в результате проводившейся в жизнь в течение последней четверти века технической политики наша промышленность практически не вела работ по совершенствованию привода с ДРУ. В то же время многократные попытки создания вагонов с ТИУ также не дали необходимых результатов. Сегодня не только нет достаточного опыта эксплуатации, вагонов с ТИУ, но и отсутствует окончательное решение о перспективной системе ТИУ, поскольку на каждом новом вагоне применяется принципиально другая система. Так, на вагонах типа E_{np} использовано совмещенное регулирование напряжения на коллекторах ТМ и тока в обмотках возбуждения, на вагонах типа И для регулирования напряжения и тока возбуждения предусмотрены отдельные ТП, а на вагонах типа I_m для этих целей применена частично совмещенная структура.

В подобной обстановке наиболее достоверные данные для сравнения систем с ТИУ и ДРУ можно получить, опираясь на зарубежный опыт и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Представляется бесспорной целесообразность использовать в первую очередь практический опыт Японии – единственной страны, превосходящей Россию как по объему производства, так и по масштабам эксплуатации моторных вагонов. Кроме того, Япония отличается высоким уровнем развития техники вообще и электроники в особенности. Последнее обстоятельство позволяет создавать ТЭП с наиболее совершенными системами ТИУ.

Тем не менее японцы отказались от применения на моторных вагонах ТИУ и в конечном итоге создали типовую схему привода с ДРУ и оригинальной системой НВ ТМ. Поэтому для сравнительной оценки в качестве базового образца системы

привода с ДРУ целесообразно использовать японскую типовую схему, которая реализована на всех последних электропоездах, в публикациях называемых энергосберегающими. Важно и то, что эта система привода по основным показателям, таким, как наличие перегруппировок ТМ в режимах тяги и рекуперативного торможения, практически идентична системе, разработанной в МЭИ. Как отмечалось, в Японии были разработаны и применены на электропоездах и ряд систем с ТИУ. Однако использовать какую-либо из них в качестве базовой некорректно, поскольку японские специалисты пришли к выводу, что все они уступают по эффективности системе с ДРУ. Зная это, трудно ожидать, что результат сравнения будет иным. Хотя это и маловероятно, но можно предположить, что японские специалисты не нашли самого эффективного решения для ТИУ и что только этим объясняется отданное ими предпочтение системе с ДРУ.

2.4. Анализ преимуществ и недостатков систем управления ТЭП с асинхронными тяговыми машинами (АТМ)

В парке железных дорог в настоящее время преобладают ЭПС с электрическими передачами постоянного и переменного-постоянного тока. Основным элементом энергетической цепи в таких ЭПС является КТМ постоянного тока, электромеханическая характеристика которого в наилучшей степени удовлетворяет условиям тяги. Однако КТМ обладают некоторыми вышеуказанных недостатками. Поэтому в научных организациях и в промышленности интенсивно ведутся работы по использованию бесколлекторных электродвигателей, в том числе АТМ в различных видах ЭПС.

В состав тягового электрооборудования вагонов входят комплекты асинхронного тягового привода КАТП-2 с автономным инвертором напряжения на IGBT-модулях и отдельные силовые блоки (Таблица 2.3).

Комплект электрооборудования получает питание от контактной сети постоянного тока (750В) при нижнем токосъеме с контактного рельса через токоприемник и обеспечивает разные режимы работы поезда метро [48, 59, 60].

Таблица 2.3. Состав комплекта асинхронного тягового привода КАТП-2

Наименование оборудования	Количество, шт.	Масса за 1 шт., кг	Масса всего вагона, кг
Двигатель асинхронный тяговый ДАТЭ-170-4 или Двигатель асинхронный тяговый ТА280М4	4	805	3220
Контейнер тягового инвертора КТИ-2	1	1300	1300
Тормозной резистор	1	255	255
Дроссель сетевого фильтр ДСФ-1Л или Дроссель сетевого фильтра ДСФ-1Н	1	1500	1500
Датчик частоты вращения двигателя	4	0,5	2
Суммарная масса комплекта	6277 (кг)		

Схема силовых цепей комплекта электрооборудования АТМ приведена на рис П.3. В режиме тяги компоненты силовой цепи преобразуют напряжение сети постоянного тока, снимаемое с контактного рельса, в 3-фазное напряжение с регулируемой амплитудой и частотой для питания АТМ. Также компоненты силовой цепи используются для обеспечения режима реостатного торможения. Работа схемы силовых цепей вагонов с АТМ рассматривается в [48, 59, 60].

2.4.1. Преимущества систем ТЭП с АТМ

Практически с первых этапов электрификации железных дорог непрерывно ведется создание ЭПС с АТМ [61]. Основными достоинствами этих машин по сравнению с ДРУ и ТМ ПТ считаются:

- Простота конструкции: АТМ проще в изготовлении, поскольку отсутствует щеточно-коллекторный узел, технологически сложный для производства. Однако АТМ дороже коллекторных сопоставимой по стоимости реализации, поэтому для изготовителя подвижного состава данное достоинство не является существенным;
- Уменьшение затрат на эксплуатацию, поскольку не требует периодической замены угольных щеток, механической обработки (шлифовка, продорожка).

Соответственно, меньшие затраты требуются на оснащение моторного участка эксплуатирующего предприятия в случае, если весь инвентарь оснащен АТМ (не требуются станки для продорожки коллектора, сокращено количество токарных станков). При этом остается необходимость обслуживания подшипниковых узлов: своевременной замены смазки и замены подшипников;

- Снижение расхода энергии за счет отсутствия реостатного пуска и более эффективного использования рекуперативного торможения (однако, значительно существует потерь в преобразователях). Расход энергии на тягу при использовании различных ТЭП рассмотрен более подробно в отдельной главе;

- АТМ рассчитан на более высокую частоту вращения и может обладать более высокой мощностью на единицу объема, чем КТМ (для ЭПС со скоростью более 180 км/ч). Однако, для передачи более высокой частоты вращения на колеса требуется более массивный 2-ступенчатый редуктор с большим передаточным отношением.

- Уменьшение количества контактной (коммутационной) аппаратуры при отсутствии переключения в схеме соединения двигателей, т.к. в этом нет необходимости из-за отсутствия реостатного пуска;

- Улучшение условий работы силового коммутационного оборудования, поскольку переключения силовых контакторов выполняются без тока. Данное преимущество позволяет уменьшить количество ремонтных воздействий на вагон при прохождении планового обслуживания, поскольку отпадает необходимость в зачистке контактных пар контакторов. Соответственно, уменьшается время технического обслуживания, что позволяет экономить трудовые ресурсы (сокращение количества низкоквалифицированного обслуживающего персонала);

- Повышение тяговых свойств за счет более жестких динамических характеристик АТМ по отношению к КТМ с последовательным возбуждением;

- Можно реализовать более высокое пусковое ускорение, чем у привода с ДРУ в связи с отсутствием колебаний силы тяги при пуске, что влияет на комфорт пассажиров и снижает расход энергии;

- Возможность получения наиболее благоприятной тяговой характеристики, в зависимости от заданных условий движения при помощи комбинаций частоты питания ТМ и величины питающего напряжения (работа в области максимального К.П.Д. тягового двигателя, с максимальной реализацией сцепления и т.п.);

- Возможность реализации автоматической противобоксовочной системы. В случае потери сцепления колеса с рельсом, начинается процесс боксования, при этом микропроцессорный блок получает с датчика частоты вращения, установленного на соответствующем тяговом двигателе, информацию о частоте вращения колесной пары и, сравнивая ее с данными с датчиков других тяговых двигателей, делает вывод о боксовании и дает команду на уменьшение тягового усилия на питающем данный двигатель преобразователе до тех пор, пока частота вращения вала двигателя не восстановится, что соответствует прекращению боксования;

- АТМ более устойчивы к попаданию влаги и последующему снижению электрической прочности изоляции, чем коллекторные. Это преимущество довольно существенное для трамвая, поскольку тяговые двигатели подвешены низко и подвержены воздействию влаги во время атмосферных осадков, а просушка двигателя является трудоемкой операцией и как правило требует его демонтажа. Также влага может проникнуть в тяговые двигатели при проведении моечных работ. Однако, данное достоинство незначительно для метрополитена.

2.4.3. Недостатки систем ТЭП с АТМ

- Сложное устройство тягового преобразователя по сравнению с реостатно-контакторной системой управления. В связи с этим необходимость дополнительных капиталовложений на переподготовку персонала (увеличение размера заработной платы) и оборудование специальных диагностических стендов для проверки работоспособности электронного оборудования (они изготавливаются под конкретной модификацией тягового преобразователя);

■ ЭПС с передачей переменного тока, как правило, тяжелее, чем ЭПС с передачей постоянного тока. Меньшая масса ТМ не компенсирует дополнительной массы инверторов;

■ высокая стоимость тягового преобразователя, превышающая в несколько раз стоимость тягового двигателя. Основной вклад в стоимость преобразователя вносят силовые ключи (транзисторы IGBT) зарубежного производства, цена которых доходит до 100 тыс. руб. за штуку (табл. П4.) За счет применения дорогостоящего преобразователя подвижной состав получается в целом дороже, чем аналогичный с реостатно-контакторной системой управления. Также высокая стоимость тяговых преобразователей затрудняет их приобретение для обеспечения оборотного фонда, необходимого для оперативной замены выбывшего по неисправности агрегата;

■ необходимость применения шихтованного статора и ротора, что усложняет производство двигателя и ведет к его удорожанию. Ротор и статор изготавливают шихтованными для предотвращения возникновения вихревых токов, замыкающихся в магнитопроводах статора и ротора и ведущих к увеличению потерь мощности;

■ высокие требования к точности изготовления и ремонта деталей ТМ, подшипников для соблюдения равномерного воздушного зазора между статором и ротором (около 1 мм для большинства ТМ) и недопущения их соприкосновения;

■ необходимость регулярной очистки электронных плат преобразователя от пыли при помощи продувки, поскольку токопроводящая пыль может вызвать замыкания между токоведущими дорожками плат, пробой полупроводниковых элементов, привести к ложным срабатываниям и порче электрооборудования;

■ необходимость системы охлаждения тягового преобразователя. В связи со строго ограниченной температурой кристалла транзистора, возникает потребность в эффективном отводе от него тепла. Преобразователь собран в закрытом корпусе, и естественное охлаждение не позволяет отвести выделяющиеся потоки мощности. Поэтому применяют обдув силовых транзисторов вентиляторами. Они становятся дополнительным усложнением системы тягового привода и требуют особенного

внимания при проведении технического обслуживания, поскольку являются ответственным узлом, при неисправности которого управляющая электроника не даст команду на запуск преобразователя;

- возможный разброс нагрузок по ТМ в случае группового питания нескольких ТМ от одного преобразователя. Поскольку электромеханические характеристики каждой ТМ несколько отличаются друг от друга, а также могут незначительно отличаться диаметры колес у разных колесных пар, то в случае питания одинаковым напряжением с определенной частотой и амплитудой, разные ТМ могут работать в разных точках характеристики, а также на разных характеристиках, что вызывает неравномерность распределения тяговых токов между ТМ. То есть, одна ТМ может оказаться перегруженным, а другой недогруженным. Это явление особенно выражено при жестких тяговых характеристиках. Для решения данной проблемы используют индивидуальное питание ТМ, но это решение увеличивает стоимость подвижного состава. Для справедливости стоит отметить, что аналогичная проблема встречается и на подвижном составе с ДРУ, но там она усугублена тем, что ТМ вагона получают питание от одного источника;

- невысокая надежность датчиков частоты вращения, расположенных на валах ТМ и их разъемов. Данные датчики подвержены динамическим и колебательным нагрузкам (при нарушении динамического баланса сборки хвостовик редуктора - карданный вал – муфта ТМ), а также воздействию влаги и частиц пыли и грязи, в результате чего они выходят из строя. При неработающем датчике частоты вращения невозможно функционирование системы ТЭП, поэтому многие производители резервируют их, устанавливая по 2 датчика на один вал ТМ;

- необходимость применения емкостного фильтра (с внушительными массо-габаритными параметрами) для фильтрации напряжения контактной сети.

- АТМ по сравнению с ТМ ПТ при равных мощности и частоте вращения имеют меньший КПД. Это обусловлено рядом их особенностей, в частности низким

коэффициентом мощности. При мощности привода до 300 кВт, ТМ ПТ эффективнее АТМ, так как имеет более высокие значения КПД [68].

- недостатком АТМ как электромеханического объекта является передача мощности, необходимая для создания магнитного потока. За счет намагничивающего тока увеличивается ток статорной обмотки, повышая ее тепловую нагрузку. В результате снижается КПД и коэффициент мощности.

- экономия на эксплуатационных расходах ЭПС с АТМ недостаточна для окупаемости их большей первоначальной стоимости.

- потери на ключевых элементах. Поскольку в режиме тяги тяговый преобразователь постоянно находится в работе, то и потери будут происходить в нем все время, за которое вагон разгоняется.

2.5. Сравнительный анализ систем ТЭП с АТМ и ТМ ПТ

2.5.1. Системы управления и комплект электрооборудования

Известно, что АТМ подвижного состава отличается от серийного коллекторного сложного высокотехнологичного и наукоемкого оборудования. Перспективным его вариантом привод на основе преобразователя с инверторами напряжения, в конструкции которых применены транзисторы. Но их стоимость достаточно высока.

Неизбежным вопросом при разработке АТМ является выбор системы охлаждения. Наиболее привлекательно традиционное воздушное охлаждение, но оценка возможности его реализации применительно к IGBT показывает невозможность его реализации, преобразователей должна быть рассчитана из IGBT – транзисторы имеют в 2 – 3 раза больше потерь энергии по сравнению с обычными тиристорами (до 3 – 5 кВт на один прибор, у тириستоров эта составляет порядка 1,5 кВт). Такую тепловую сложно отвести только за счет обдува металлических охладителей, поэтому практически неизбежно использовани жидкостного

охлаждения (масляного или антифриза), что принципиально усложняет построение преобразователя, его стоимость и увеличивает расходы на обслуживание.

Как показывает анализ зарубежного опыта, во многих случаях номинальную мощность ТМ принимают равной соответствующей максимальной мощности преобразователя, т.е. двигатель не может работать с перегрузкой без повреждения преобразователя.

В России традиционно КТМ имеют мощность ниже максимально допустимой по преобразователю и существует возможность их работы с перегрузкой касается не только кратковременных режимов пуска и разгона, но и движения на расчетном подъеме. Поэтому тяговые свойства российских пассажирских ЭПС превосходят зарубежные с АТМ на участках со сложным планом и профилем пути.

Конструкция ТЭП обладает одной специфической особенностью, первые годы внедрения создавала большие проблемы. Известны случаи замены ТМ на первых сериях ЭПС. Суть проблемы сводится к тому, что для каждого проекта ТЭП требуется пространственный расчет возможного механического резонанса в области крепления короткозамыкающего кольца обмотки к стержням. Механическим резонансом называют явление резкого возрастания амплитуды колебаний, когда круговая частота вынужденных колебаний ω совпадает с собственной круговой частотой ω_0 физической системы. Дифференциальное уравнение получится:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -2\beta \frac{dx}{dt} - \omega_0^2 x + f \quad (2.8)$$

f – внешняя сила, изменяющаяся по гармоническому закону

Из математики известно, если некоторая функция имеет минимум, то ее производная равна нулю, т.е.

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (2.9)$$

Генератором этого резонанса являются пульсации момента, включая высшие гармоники. Если этот фактор не учитывать, то в течение первых лет эксплуатации

возможно появление массовых изломов в обмотках ротора. Методика резонансных расчетов стала неотъемлемой частью проектирования АТМ [23].

АТМ можно включать только параллельно. Следовательно на одном моторном вагоне с четырьмя параллельно включенными АТМ нужно не менее двух независимо работающих тяговых инверторов. Каждый из них должен получать сигналы от своих датчиков напряжения и тока, а также датчиков частоты вращения.

Одной из серьезных проблем, возникающих при внедрении ЭПС нового поколения, является электромагнитная совместимость с рельсовыми цепями СЦБ и АЛС, в которых используются альные токи с частотами 25, 50, 175 Гц и т.д.

Известные проблемы обеспечения электромагнитной совместимости должны решаться как программными методами, так и специальными конструкторскими решениями: входными индуктивно-емкостными фильтрами, различными фильтрами радиопомех, особой компоновкой оборудования с минимальными индуктивностями шин и др.

Например, на вагонах метрополитена с АТМ приходится устанавливать фильтры массой от 1 до 1,5 т, чтобы ограничивать мешающее влияние пульсаций на работу систем сигнализации и связи метрополитена. Непроизводительные потери электроэнергии в фильтрах складываются с электроэнергией, затрачиваемой их «перевозку» в вагонах, с их собственной стоимостью и стоимостью их обслуживания. Это снижает технико-экономические показатели вагонов.

Каждый вагон с дискретно-реостатным регулированием ДРУ за счет отсутствия тяжелых фильтров и меньшей, чем у вагонов с АТМ, массы электрооборудования дополнительно перевозит 10 – 20 пассажиров. Это значит, что метropоезд из 5 – 8 вагонов «бесплатно» перевозит от 50 до 150 человек [62].

Для создания надежного бесколлекторного электропривода, применительно к условиям работы ЭПС, требуется провести большой объем исследовательских и конструкторских работ, связанных с разработкой узлов и макетированием преобразователя.

Внедрение ЭПС с АТМ не ограничивается только решением перечисленных проблем. Нужно учитывать и ряд других аспектов. Один из них — необходимость создания специализированной ремонтной базы [62]. За рубежом параллельно с выпуском современного ЭПС специально для него создаются ремонтные предприятия с новейшим компьютеризированным технологическим оборудованием и системами диагностики, органически дополняющими бортовые диагностические комплексы. При этом персонал депо и заводов практически не занимается ремонтом электроники, контракты предусматривают поставку переходного комплекта оборудования для замены вышедших из строя блоков, а их ремонт осуществляется производителем или фирменным сервисным центром. Затраты в электродепо на ремонт и обслуживание электрооборудования с инверторными системами управления (ИНСУ) в несколько раз превышают затраты на эксплуатацию электрооборудования серийных реостатных вагонов. А само обслуживание не под силу обычному персоналу.

Ведущие иностранные фирмы пошли на разработку дорогостоящего АТМ с целью использовать его, в первую очередь, на мощных высокоскоростных электропоездах. Это позволило им не только решать некоторые технические проблемы высокоскоростного движения, но и вывести конкурентную борьбу на этом рынке на новый, техно-логически недостижимый уровень, а затем скомпенсировать понесенные затраты за счет монопольных цен на вагоны с АТМ [62].

Тяге средних мощностей и средних скоростей привод переменного тока не обязателен и зачастую убыточен. Обширнейшие возможности для повышения надежности имеются у ТМ ПТ тока при оснащении ею силовой электроникой. Этот путь требует гораздо меньших капиталовложений, но он не был основательно проработан фирмами, поскольку не подходил им по конъюнктурным соображениям. По этим же соображениям асинхронный привод стали внедрять даже там, где его появление ни технически, ни экономически не оправдано, убеждая потенциальных заказчиков и конкурентов в единственности асинхронного пути.

Возможность достижения заметных эксплуатационных преимуществ у КТМ связана с использованием бесконтактных элементов в силовых цепях ТЭП, что позволяет упростить схему силовой кабельной разводки и исключить практически всю контакторную аппаратуру (кроме быстродействующих выключателей), на долю которой в эксплуатации приходится немало порч и заходов на неплановые ремонты. При этом появляется возможность оснащения поездов хотя и сложной, но эффективной системой контроля, диагностики и защиты электрических цепей, что существенно повышает надежность и ремонтпригодность ЭПС.

Основной недостаток сегодняшней тяги постоянного тока не в коллекторных ТМ, а в контакторном управлении их работой. Оно существенно снижает конкурентоспособность тяги постоянного тока. Более половины повреждений можно полностью исключить из практики эксплуатации электропоездов, если перейти на современные бесконтактные схемы управления тягой.

Среди неисправностей электроаппаратуры, работающей при каждом пуске и торможении, большую часть составляют отказы силовых контроллеров, электропневматических и электромагнитных контакторов, блокировок и реле (62 % — 1600 неиспр./год) [44, 63, 64].

Наиболее часто ТМ повреждаются во время переходных процессов, вызванных нестабильной работой силовой контакторной аппаратуры и ее блокировок. Поэтому можно считать, что почти 2/3 всех неисправностей поездов в той или иной степени связано с неудовлетворительной работой контакторной аппаратуры [44].

Современный уровень развития силовой электроники позволяет усовершенствовать тяговое электрооборудование моторных вагонов, построить все элементы и системы ТЭП подобно объектам цифровой электроники.

Известно, что тяговый инвертор АТМ нуждается в принудительном воздушном охлаждении импортных силовых транзисторов со скоростью обдува не менее 12 м/с. Он автоматически выключается из работы при их перегреве.

2.5.2. Эксплуатационные расходы на обслуживание ТЭП

- Одним из основных преимуществ замены ТМ ПТ на АТМ декларируется резкое снижение затрат труда на их обслуживание в эксплуатации благодаря упразднению коллекторно-щёточного аппарата. Однако, по известным данным [66, 73] затраты на обслуживание ЭПС составляют 8,1% от всех эксплуатационных затрат, из которых только 0,8% приходится на долю ТМ, то есть затраты на обслуживание ТМ составляет менее 10% от всех затрат на обслуживание ЭПС. Даже при полном исключении затрат на обслуживание ТМ уменьшение общих эксплуатационных затрат будет невелико, но большая их часть сохраняется, а некоторые и возрастают;
- у АТМ затрудняется проблема их охлаждения и утяжеляются условия работы подшипников. По этим причинам применяется специальная смазка подшипников, а в последнее время используется и жидкостное охлаждение АТМ [65-66]. Очевидно, что эти обстоятельства ведут к росту эксплуатационных расходов на обслуживание ТМ. При оценке значимости последнего обстоятельства нельзя не учитывать что именно подшипниковые узлы ТМ, доставляют в последнее время наибольшие неприятности как на вагонах метрополитена, так и на электровозах;
- как показал выполненный МЭИ и ВНИИВ [55,87], анализ расходов на обслуживание вагонов Мосметро доля ТМ в этих расходах составляла 10÷20%, а доля коллекторно-щёточного аппарата в последних невелика. При оценке этих данных нужно учитывать, что в то время в эксплуатации было ещё мало новых ТМ ДК-117 с лучшими показателями работы именно коллекторно-щеточного аппарата;
- Опыт эксплуатации ЭПС на железных дорогах Северной Америки с различным типом ТЭП показывает, что экономия на эксплуатационных расходах ЭПС с передачей переменного тока недостаточна для окупаемости их большей первоначальной стоимости [67-68].

Изложенные выше фактические данные позволяют утверждать, что экономия расходов на обслуживание ТМ при внедрении привода с АТМ если и будет, то её влияние на общие эксплуатационные расходы будет незначительным [19, 69, 70].

2.5.3. Проблемы улучшения тяговых свойств ТЭП

В последнее время ряд специалистов на первое место в эффективности применения АТМ выдвигает возможность увеличения силы тяги за счёт большой динамической жёсткости тяговых характеристик, например, в [71] утверждается что применение АТМ позволит увеличить расчётный коэффициент сцепления на 40% и этим обосновывается технико-экономическая целесообразность применения АТМ.

Это предположение о преимуществах АТМ перед ТМ ПТ очевидно ошибочно, так как последние при независимом возбуждении (НВ) имеют динамическую жёсткость тяговых характеристик вполне достаточную для полной реализации преимуществ жёстких характеристик по повышению противобоксовочных свойств локомотивов и моторных вагонов. В то же время известно, что при замене последовательного возбуждения (ПВ) на независимое на ЭПС с ТМ ПТ сила тяги на участке её ограничения условиями сцепления может быть увеличена ориентировочно на 20% [19, 69, 70].

Более того, есть основания полагать, что на ЭПС с АТМ достигаемое увеличение силы тяги по сравнению с ЭПС с ТМ ПТ с ПВ будет меньше, чем соответствующий показатель ЭПС с ТМ ПТ с НВ. Это объясняется большим разбросом нагрузок АТМ при их питании от общего источника, применение которого признано практически неизбежным из-за большой сложности оборудования ЭПС индивидуальными инверторами для каждой АТМ. В частности, и при индивидуальном регулировании непросто достичь равенства нагрузок АТМ. В частности, в упомянутой статье Ф.Каспарека [72] сообщается, что при разнице диаметров бандажей колёсных пар в 5 мм разброс вращающих моментов АТМ при совместном регулировании составляет 19%, а при индивидуальном - 26% .

Большой разброс нагрузок АТМ при их питании от общего источника напряжения подтверждают и отечественные исследования [73].

Таким образом, нет оснований ожидать, что применение АТМ позволит увеличить расчётное значение коэффициента сцепления до величины, большей, чем она может быть реализована при использовании независимого возбуждения ТМ ПТ. Больше оснований предположить обратное соотношение, то есть предположить, что ЭПС с НВ ТМ будет иметь лучшие тяговые свойства, чем ЭПС с АТМ.

2.5.4. Сравнение надежности и КПД систем ТЭП с АТМ и ТМ ПТ

2.5.4.1. Надежность

Важнейшим в эксплуатации является вопрос надежности ТЭП. Как известно, для объективной оценки этого показателя требуется выполнение ряда условий, в частности одинаковое качество изготовления, эквивалентные условия эксплуатации и т.д., но главное – требуется время. Предположение о повышенной надежности самих АТМ обычно обосновывается простотой их конструкции. Однако опыт общепромышленного привода показывает, что из трёх известных типов электрических машин – асинхронных, синхронных и постоянного тока, наименее надежны первые.

При прогнозировании изменения надежности ТМ при замене машин постоянного тока на АТМ необходимо учитывать влияние на этот показатель АТМ уменьшения воздушного зазора, ухудшения возможностей охлаждения и утяжеления работы подшипников. В общем можно заключить, что пока нет опытного подтверждения предположения о сколь-нибудь существенном повышении надежности ТМ при использовании АТМ.

Вместе с тем замена ТМ ПТ на АТМ требует резкого усложнения как устройств управления, так и силовых преобразователей энергии с обязательным использованием в последних принудительной коммутации токов. И то, и другое неизбежно ведет к снижению надежности электрического оборудования ЭПС. Таким образом, обеспечение приемлемой надёжности работы ЭПС с АТМ является трудной

проблемой, решение которой потребует много времени. Можно предполагать, что из-за усложнения системы управления и силовых преобразователей ЭПС с АТМ всегда будет менее надежен, чем ЭПС с ТМ ПТ.

Если развитие тяги на метрополитене пойдет по пути замены на вагонах реостатно-контактных контроллеров тиристорными реостатными контроллерами (ТРК), то надежность работы вагонов с ТРК по сравнению с тиристорно-импульсным управления (ТИУ) повысится в 5–6 раз, а по сравнению с вагонами с инверторными системами управления (ИНСУ) асинхронными тяговыми двигателями – в 1,5 раза. Предварительный вывод о том, что ТРК по надежности превзойдут системы ИНСУ, также основан на статистике эксплуатации, представленной в Сертификате аккредитации фирмы «Хитачи».

Анализ табл. 2.4. показывает, что надежность тяговых двигателей постоянного тока ТДМ-1Э (взаимозаменяемы с двигателями ДК-117 ДМ и ДК-117 ВМ) превосходит тяговые инверторы фирмы «Хитачи» в 3,6 раза. И это несмотря на то, что интенсивность их эксплуатации в 1,5 раза превышает интенсивность инверторов. Поэтому заменять более надежные ТМ ПТ менее надежными инверторами не следует [62, 64].

Таблица 2.4. Надежность ТМ постоянного тока с ТРК и АТМ с ИНСУ

Наименование линии	Пробег вагонов, км/мес.	Количество отказов за 480 тыс. км пробега
Hibiya	7800	1,71
Yurakucho	8800	0,65
Nanboku	8200	0,81
Среднее 3-х линий	8250	1,26
Сокольническая, двигатель постоянного тока ТДМ-1Э	12500	0,35
Превосходство ТДМ-1Э над инверторами «Хитачи»	по интенсивности:	по надежности:
	12500/8250 = 1,5 раза	1,26/0,35 = 3,6 раза
Примечание: 1,26 - среднее число отказов с учетом пробегов на каждой линии; ТДМ-1Э - коллекторный тяговый двигатель постоянного тока производства ОАО «Электросила»		

Характерные для вагонов метро 81-717/714 (с ТЭП постоянного тока) цифры отказов основных узлов электрооборудования за 3 года эксплуатации (480 тыс. км пробега) приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Количество отказов основных узлов электрооборудования ТЭП с ТМ постоянного тока за 3 года эксплуатации

Наименование	Аппараты управления (переключатели, контроллеры и т.д.)	Тяговые двигатели постоянного тока	Силовая цепь	Вспомогат. высокие цепи
Доля неисправностей основных узлов электрооборудования (за 3 года), (%)	92,7	1,7	2,3	3,3

В таблице 2.6. представлена сравнительная справка по отказам вагонов метро с АТМ за 2017 г. и в периоде 2014-2016 гг [74] .

Таблица 2.6. Сравнительная справка по отказам вагонов метро с АТМ

Оборудование (доля, %)	Количество отказов, шт. (%)	
	в 14-16 гг.	2017 г.
Электрическое оборудование	935 (63,2%)	364 (50,9%)
Механическое оборудование	373 (25,2%)	111 (15,53%)
Пневматическое оборудование	80 (5,4%)	12 (1,68%)
Эксплуатации	36 (2,4%)	14 (1,96%)
Прочее	56 (3,8%)	214 (29,93%)
Итого	1480 (100%)	715 (100%)

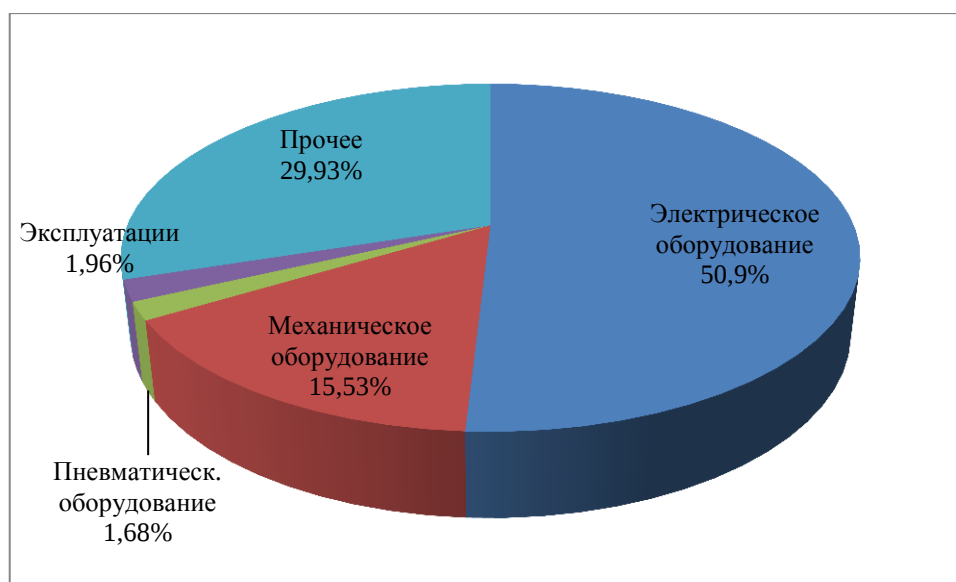


Рис. 2.11. Диаграмма процентного распределения отказов по видам с начала эксплуатации за 2017г.

Таблица 2.7. Сравнительная справка по отказам электрического оборудования вагонов метро с АТМ

Оборудование	Количество отказов, шт. (%)	
	в 14-16 гг.	2017 г.
Электрическое оборудование	935 (100%)	364(100%)
1. Комплект электрооборудования КАТП	44 (4,7%)	20 (5,5%)
2.Тяговые двигатели	25 (2,67%)	12 (3,3%)
3. Прочие (система управления, вспомогательные оборудования и т.д.)	866 (92,63%)	332 (91,2%)

Анализ табл. 2.5 показывает, что доля 4-х тяговых двигателей ТДМ-1Э в числе отказов электрооборудования одного вагона составляет 1,7% и что коллекторный тяговый двигатель является самым надежным среди тяговых аппаратов вагона. Для повышения надежности электрооборудования отечественных вагонов метро в

первую очередь следует снижать отказы аппаратов управления: их доля в числе отказов составляет более 90% [62].

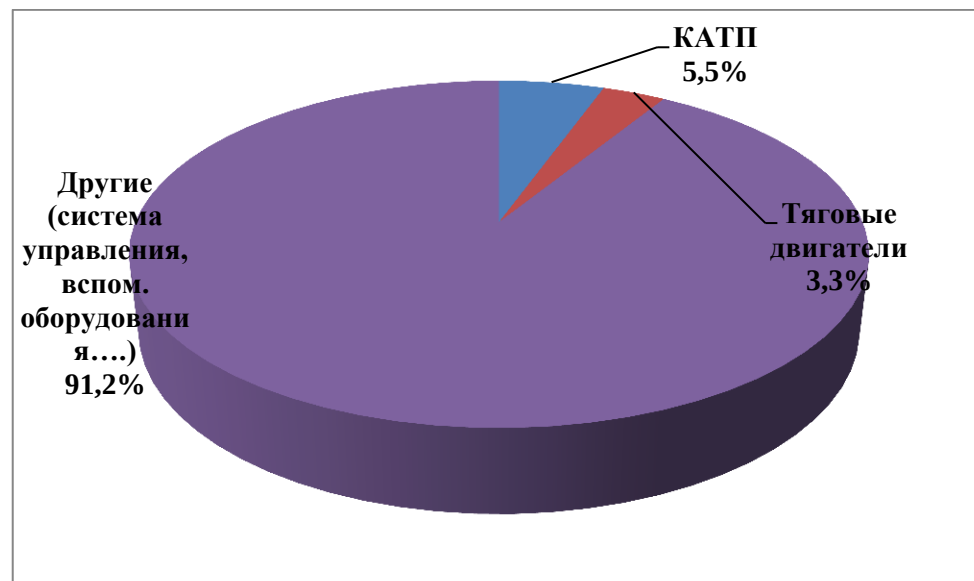


Рис. 2.12. Диаграмма процентного распределения отказов электрического оборудования с начала эксплуатации за 2017г.

Анализ таблиц 2.6 и 2.7, рис. 2.11 и 2.12 показывают, что

- за период 2014 г. по 2016 г. было допущено 1480 повреждений. Из них, относящихся к электрическому оборудованию – 935 (63,2%); к механическому – 373(25,2%); к пневматическому – 80 (5,4%); к прочему – 56 (3,8%); к неправильным действиям машиниста (эксплуатация) – 36 (2,4%).

- за 2017 г. было допущено 715 повреждений. Из них, относящихся к электрическому оборудованию – 364 (50,9%); к механическому – 111 (15,53%); к пневматическому – 12 (1,68%); к прочему – 214 (29,93%); к неправильным действиям машиниста (эксплуатация) – 14 (1,96%).

- доля тяговых двигателей АТМ в числе отказов электрооборудования составляет 2,67% (2014г. – 2016г.) и 3,3% (2017г.) и что больше по сравнению с двигателем постоянного тока (1,7%) [62].

2.5.4.2. Сравнительный анализ КПД систем ТЭП с различными видами тяговых двигателей

В ряде публикаций утверждается, что применение АТМ позволит снизить потребление энергии на тягу, но в зарубежных публикациях делается оговорка, что это достигается за счёт лучшего использования рекуперации. Однако на ЭПС с ТМ ПТ показатели рекуперации принципиально могут быть лучше, чем на ЭПС с АТМ из-за отсутствия потерь в преобразователе на ЭПС постоянного тока и возможности создания системы рекуперации ЭПС переменного тока с меньшими потерями. При этом энергетические показатели ЭПС с АТМ будут существенно хуже, чем у ЭПС с ТМ ПТ. Это подтверждается следующими фактами [19, 69, 70].

– АТМ по сравнению с ТМ ПТ при равных мощности и частоте вращения имеют меньший КПД. Это обусловлено рядом их особенностей, в частности низким коэффициентом мощности. В частности, по данным [68], применение АТМ оправдано лишь при мощности привода более 430 кВт и использовании для его питания источника синусоидального напряжения. Только в этом случае КПД АТМ будет на 2% выше КПД ТМ ПТ, что увеличит силу тяги примерно на 3 процента при движении ЭПС со скоростью в интервале от 20 до 40 км/ч [68, 75]. Оценка эффективности ТМ по значениям их КПД на номинальных режимах работы показала, что при мощности привода до 300 кВт, ТМ ПТ эффективнее АТМ, так как имеет более высокие значения КПД. АТМ плохо охлаждаются из-за малого зазора ($\delta < 2\text{ мм}$), что говорит о необходимости использовать вентиляторы большей мощности. Потребление энергии вентиляторами такой мощности, как известно, в процентном отношении значительно выше процентного значения их мощности в общей мощности ЭПС в номинальном режиме.

– публикациях о вагонах Нюрнбергского метрополитена с АТМ в качестве одного из преимуществ АТМ сообщается, что потери в преобразователе покрывают 75% потребности энергии для их отопления и только 21% покрывается за счёт

энергии торможения, а остальные 4% потребляются из сети. Эти данные косвенно показывают малый КПД преобразователя [76];

– по Японским данным применение АТМ на скоростном электропоезде переменного тока привело к снижению КПД вагона до 0,81 против 0,87 и 0,86 у вагона с ТМ ПТ последовательного и независимого возбуждения. Снижение КПД моторного вагона на 5÷6% обусловлено снижением КПД преобразователя до 0,9 против 0,97 и 0,95 у вагона с ТМПТ соответственного последовательного и независимого возбуждения [77];

– Недостатком АТМ как электромеханического объекта является передача мощности, необходимая для создания магнитного потока. За счет намагничивающего тока увеличивается ток статорной обмотки, повышая ее тепловую нагрузку [78]. В результате снижается КПД и коэффициент мощности. Так как расчетная мощность, определяющая размеры машины, обратно пропорциональна коэффициенту мощности, масса и размеры АТМ снижаются не в той мере, в какой можно было бы ожидать. Удовлетворительная величина коэффициента мощности (0,8...0,85) может быть получена лишь при малом воздушном зазоре, что снижает эффективность охлаждения обмоток и предъявляет повышенные требования к точности изготовления и технологии ремонта ТМ.

Таким образом, замена ТЭП с ТМ ПТ на привод с АТМ неизбежно приведёт к снижению К.П.Д. ЭПС на величину порядка 4-6%, но расход энергии на тягу при этом возрастёт в большей мере, так КПД ЭПС с АТМ при частичных нагрузках будет снижаться в большей мере, чем у ЭПС с ТМ ПТ, из-за специфики зависимости потерь в преобразователях от их нагрузки. Кроме того, из-за увеличения потерь на ЭПС с АТМ должна возрасти мощность двигателей вентиляторов, потребление энергии которыми, как известно, в процентном отношении значительно выше процентного значения их мощности в общей мощности единицы ЭПС в номинальном режиме [19, 69, 70].

Выводы по главе 2

1. В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о том, какой тип ТЭП лучше использовать на ЭПС. В каждой системе ТЭП есть свои плюсы и минусы. По аналитическому обзору показывает, что целесообразность применения на ЭПС того или иного типа ТЭП определяется эксплуатационными требованиями.

2. Выполнен сравнительный анализ преимуществ и недостатков систем ТЭП вагонов метро с различными видами тяговых двигателей и в результате выявлены следующие выводы:

2.1. показано, что при использовании на моторных вагонах ТИУ уступает ДРУ по многим показателям (тяговые и тормозные свойства, потребление энергии, эффективность рекуперации и т.д.) и замена ДРУ на ТИУ приводит к удорожанию и увеличению массы электрооборудования и не повышает его надежность.

2.2. показано, что для создания надежного бесколлекторного ТЭП, применительно к условиям работы ЭПС, требуется провести большой объем исследовательских и конструкторских работ, связанных с разработкой узлов и макетированием преобразователя. Кроме этого, для внедрения ЭПС с АТМ необходимость создания специализированной ремонтной базы, затраты на которую в несколько раз превышают затраты на эксплуатацию электрооборудования серийных реостатных вагонов.

2.3. приведено сравнение надежности приводов, основывающееся на статистике эксплуатации и показано, что привод на основании АТМ не будет обладать преимуществами по надежности, поэтому предложено модернизировать силовую схему управления двигателем постоянного тока заменой контакторного оборудования бесконтактным. Это требует гораздо меньши капиталовложений, но при этом появляется возможность оснащения поездов хотя и сложной, но эффективной системой контроля, диагностики и защиты электрических цепей, что существенно повышает надежность и ремонтпригодность ЭПС.

2.4. установлено, что в тяге средних мощностей и средних скоростей (в том числе для метропоездов) привод переменного тока не обязателен. Оценка эффективности ТМ по значениям их КПД на номинальных режимах работы показала, что при мощности привода до 300 кВт, ТМ ПТ эффективнее АТМ, так как имеет более высокие значения КПД.

2.5. сделан вывод, что применение ЭПС с АТМ целесообразно, если ЭПС с ТМ ПТ не может обеспечить требуемые технические характеристики, например, ведущие иностранные фирмы пошли на разработку дорогостоящего АТМ с целью использовать его, в первую очередь, на мощных высокоскоростных электропоездах.

2.6. показано, что резервы улучшения технико-экономических показателей ЭПС с коллекторными тяговыми машинами постоянного тока (КТМ) далеко не исчерпаны и при их использовании применение ЭПС с ТМ ПТ экономически более целесообразно.

ЭПС с КТМ могут быть существенно улучшены при замене последовательного возбуждения ТМ независимым и при оснащении ею силовой электроникой [100]. Это техническое решение не требует больших затрат и может быть реализовано при модернизации эксплуатируемого парка.

ГЛАВА 3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

3.1. Возможности улучшения показателей ТЭП вагонов метрополитена

В специфических условиях работы и строительства метрополитенов одним из основных направлений увеличения пропускной способности является улучшение динамических качеств подвижного состава: повышение величин ускорений в процессе разгона и замедлений при торможении. Главным средством достижения этой цели является увеличение мощности ТЭП, дополнительным — снижение массы вагонов.

Метрополитены становятся крупными потребителями электроэнергии. например, по известным данным в 2007 г. длина линий Мосметрополитена составляла около 305 км, а потребление энергии из внешнего электроснабжения около 1,6 млрд. кВт.ч в год (по плановым цифрам, общее потребление энергии в контрольном – 2020 г. достигнет 2,5 млрд. кВт.ч) [15, 79, 80].

Поэтому одновременно с повышением динамики ЭПС должна решаться и проблема обеспечения более экономичной его работы. Резервами улучшения энергетических показателей поездов метрополитена являются снижение потерь в пусковых резисторах, которые составляют от 5 до 8%, повышение К.П.Д. тягового привода, потери в котором превышают 10%, и рациональное использование энергии торможения, которая составляет до 45% общих затрат энергии на движение поезда. Эти цифры показывают, что наибольший эффект в области улучшения энергетических показателей поездов метрополитена в принципе может дать применение рекуперативного торможения.

Однако практическая реализация этого резерва на метрополитене также имеет свои особенности. Основное затруднение состоит в необходимости сохранения тормозных сил на уровне реализуемых при реостатном торможении. Эта задача может быть решена несколькими путями: двойным увеличением токов по

отношению к режиму реостатного торможения, параллельным включением ТМ на высоких скоростях движения и включением в цепи якорей балластных резисторов. Каждое из этих решений обладает своими очевидными недостатками. Практическое применение пока находит только использование балластных резисторов. Другим затруднением является использование возвращенной в контактную сеть энергии. С учетом всего этого при подвижном составе с ТМ ПТ за счет рекуперации можно экономить до 15–20 % энергии. Необходимо также учитывать влияние новых технических решений на массо-габаритные характеристики, стоимость и надежность работы электрооборудования вагонов.

Таким образом, проблема повышения пропускной способности линий метрополитена требует решения непростых взаимосвязанных задач в области совершенствования ЭПС. Задача дополнительно осложняется необходимостью учета параметров системы электроснабжения и других устройств, обеспечивающих движение поездов, в частности, автоблокировки и автоведения.

В последние годы в России и за рубежом ведутся интенсивные работы в области улучшения динамических показателей и других эксплуатационных параметров вагонов метрополитена. Основными направлениями этих работ являются: повышение мощности ТМ ПТ в традиционной системе ТЭП, с контакторно-реостатным управлением; совершенствование тиристорно-импульсного управления при сохранении ТМ ПТ последовательного возбуждения; оборудование вагонов с контакторно-реостатным и тиристорно-импульсным регулированием напряжения на ТМ системой автоматически регулируемого независимого их возбуждения; создание тягового привода с бесколлекторными машинами переменного тока. Каждое из этих направлений имеет свои преимущества и недостатки.

Эффективность увеличения мощности ТМ подтверждена опытом создания вагонов типа 81-717 с ТМ типа ДК-117 110 кВт. По сравнению с вагонами типа Е (мощность ТМ типа ДК-108 66 кВт) при той же скорости доставки пассажиров вагоны типа 81-717 по данным завода «Динамо», потребляют энергии на 7% меньше,

несмотря на то что потери в их пусковых реостатах на 4% больше (вследствие роста скорости, при которой заканчивается резисторное регулирование) [81].

Определенным резервом снижения пусковых потерь и некоторого улучшения динамики за счет устранения колебаний силы тяги является использование ТИУ. Однако при этом возникают дополнительные потери в тиристорном преобразователе и его фильтре, значительно увеличивается стоимость и растет вес электрооборудования (по сравнению со схемой контакторно-реостатного управления). Поэтому при относительно небольших потерях в пусковых реостатах ВМ применение на них ТИУ экономически оправдано лишь при условии обеспечения эффективного использования рекуперативного торможения, что может потребовать оборудования тяговых подстанций инверторами. Последнее обстоятельство может оказать существенное влияние на технико-экономическую эффективность внедрения ТИУ на ВМ.

В последнее время широко исследуются возможность и эффективность применения на ВМ тягового привода с бесколлекторными, в первую очередь АТМ. В качестве основных доводов в пользу асинхронного привода называют имеющуюся возможность некоторого уменьшения расхода энергии за счет снижения массы ротора и сокращения расходов на эксплуатацию ТМ. Устранение коллекторно-щеточного аппарата действительно может существенно упростить и удешевить эксплуатацию, хотя в общих расходах на обслуживание вагона доля ТМ составляет не более 10–20 %, а доля коллекторно-щеточного аппарата в последних невелика. Однако это преимущество и возможное незначительное уменьшение массы ротора машины получают за счет ухудшения ряда других показателей ТЭП.

Дело в том, что в этом случае по сравнению с тиристорно-импульсным регулятором постоянного напряжения существенно усложняется преобразователь, растут его масса и стоимость, значительно уменьшается КПД. Общие потери в приводе дополнительно увеличиваются в связи с более низким КПД самих АТМ (по сравнению с ТМ ПТ) и их повышенной чувствительностью к пульсации и

несимметрии токов и напряжений. При питании всех ТМ или машин одной тележки вагона от одного преобразователя возникают трудности с ограничением разброса их нагрузок. При питании каждой машины от своего индивидуального преобразователя, которое позволяет регулировать распределение нагрузок ТМ, дополнительно усложняются сами преобразователи и их системы управления, а также возникают трудности с обеспечением противобоксовочной защиты.

Существенные затруднения нужно преодолеть и для обеспечения процессов пуска и рекуперативно-реостатного торможения вагонов с АТМ. Отечественный опыт создания ТЭП а с АТМ показал, что решение возникающих при этом технических задач требует значительных усилий.

Более простая система ТИУ намного ближе к реальному внедрению. Однако и она после многих лет исследований на опытных вагонах и поездах все еще нуждается в доработке, в частности, в повышении эксплуатационной надежности. Несомненно, что технические трудности, возникающие при создании работоспособных систем ТЭП с импульсным, со временем будут преодолены. Вопрос состоит только в длительности этого времени.

Не менее серьезной является проблема обеспечения экономической эффективности новых систем. Известно, что и на вагонах наземных электропоездов, и на ВМ с ТИУ сокращение расхода энергии на тягу по сравнению с контакторно-резисторным пуском пока не достигнуто.

Очевидно, что внедрение усовершенствованных систем ТЭП нельзя начинать до того, как они покажут решающие преимущества перед уже освоенными. Еще более весомыми технико-экономическими преимуществами должны обладать новые вагоны, если ставить вопрос о замене ими эксплуатируемого ЭПС, не выработавшего расчетного ресурса. Такая мера, требуя больших материальных и трудовых затрат, не может быть экономически эффективной при использовании всех рассмотренных направлений совершенствования ТЭП, включая увеличение мощности ТМ, реализованное на вагонах 81-717. Следовательно, в эксплуатации еще

долго будут находиться не выработавшие свой ресурс вагоны старых типов.

Сегодня назрела необходимость модернизации эксплуатируемых вагонов, которую, естественно, следует осуществлять с максимальным использованием имеющегося электрооборудования. В наибольшей мере этому требованию удовлетворяет применение на вагонах системы независимого возбуждения тяговых машин (НВ ТМ).

3.2. Особенность целесообразности и эффективности предлагаемой системы ТЭП для вагонов метрополитена

Для повышения надежности электрооборудования эксплуатируемых вагонов, в первую очередь, следует снижать отказы аппаратов управления. Их доля в отказах составляет более 90%.

Реостатно-бесконтактные контроллеры наилучшим образом решают именно эту задачу. Они на порядок проще по управлению, алгоритму работы, схемно и конструктивно, чем ИНСУ асинхронным двигателем и работают в гораздо менее напряженных тепловых режимах. Поэтому интенсивность их отказов будет, как минимум, вдвое ниже интенсивности отказов инверторов [62].

Целесообразность замены в схемах силовых цепей ЭПС механических контакторов тиристорными коммутаторами была обоснована в исследованиях МЭИ.

В 1984 г была запатентована схема силовых ц транспортного средства с ее использованием применительно к моторному вагону. Впоследствии схема с тиристорным реостатным контроллером (ТРК) была реализована на макетном вагоне метрополитена и на партии построенных Ленинградским вагоностроительным заводом (ЛВЗ) опытных вагонов метро. Их испытания в эксплуатации подтвердили надежность работы и высокие энергетические показатели [82, 83].

Это техническое решение имеет преимущество перед использованием на вагонах АТМ, в особенности по стоимости, что и определяет целесообразность использования как на новых вагонах, так и для модернизации эксплуатируемых.

3.2.1. Работа принципиальной силовой схемы предлагаемой системы ТЭП для вагонов метрополитена с НВ ТМ и ТРК

Принципиальная силовая схема вагона метрополитена с НВ ТМ и ТРК разработанная кафедрой ЭКАОиЭТ (МЭИ) представлена в рис. 3.1.

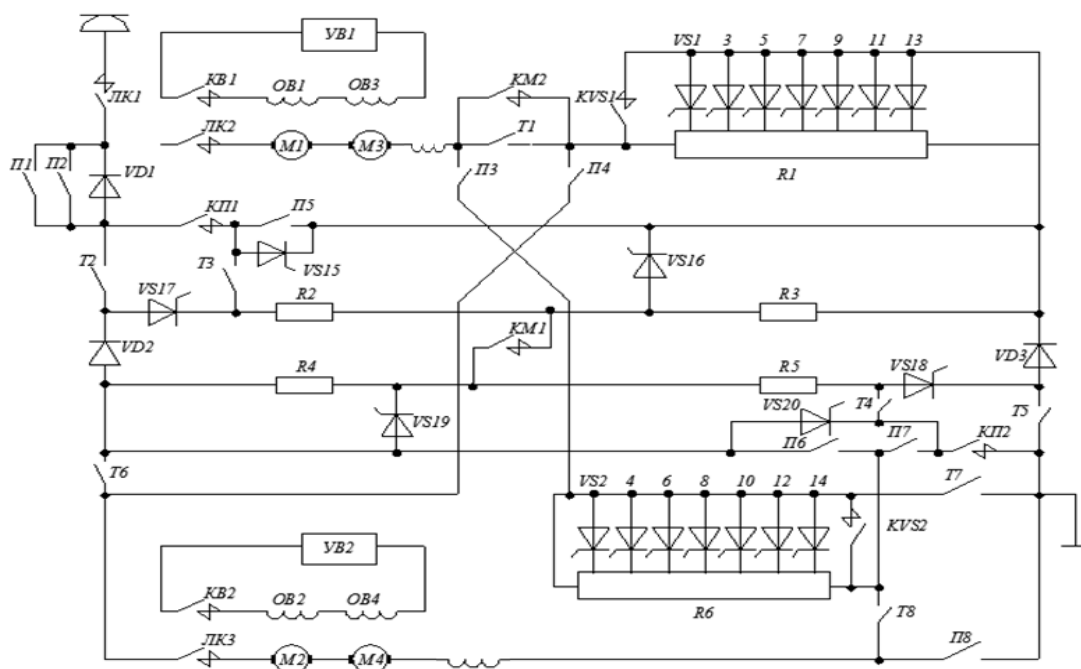


Рис. 3.1. Принципиальная силовая схема вагона метрополитена с НВ ТМ и ТРК разработанной ЭКАОиЭТ (МЭИ)

Схема обеспечивает следующие режимы работы:

- реостатный пуск вагона с перегруппировкой групп ТМ и плавным ослаблением поля после выхода на безреостатную характеристику параллельного соединения ТМ в соответствии с ограничениями тяговой области;
- электрическое рекуперативно-реостатное торможение в диапазоне скоростей от конструкционной до близкой к нулю с сохранением максимальной тормозной силы до скоростей 2-3 км/ч, при сохранении рекуперативного торможения до скоростей порядка 20км/ч и замещении рекуперативного торможения реостатным без потери тормозной силы в случаях срыва рекуперации или снижения скорости движения до величины, при которой нельзя обеспечить требуемую для рекуперации э.д.с. ТМ.

Одной из особенностей схемы является замена группового кулачкового реостатного контроллера тиристорным коммутатором (ТК). Применение ТК обусловлено низкой надежностью серийных реостатных контроллеров для ВМ (частые выходы из строя серводвигателей группового привода, подгар контактов и т.д.); их недостаточным быстродействием, которое не позволяет реализовать более совершенные алгоритмы управления ТМ и без существенного ограничения числом ступеней регулирования сопротивлений пуско-тормозных резисторов (ПТР).

С другой стороны благоприятный режим работы тиристоров ТК, отсутствие жестких требований к их временным характеристикам, отсутствие коммутационных перенапряжений при выведении ступеней ПТР позволяет применить тиристоры низкой стоимости по одному на каждую ступень регулируемых секций ПТР.

Для уменьшения количества тиристоров ТК в силовой схеме привода только две секции ПТР являются регулируемыми. В результате при 48 ступенях реостатного пуска ТК включает в себя всего 18 тиристоров (VS1-V514, VS15, VS16, VS12, VS20).

Увеличение числа пусковых ступеней позволяет осуществить практически плавный выход на заданную уставку тока якоря, что в значительной степени определяет комфортные условия при пуске.

Быстродействие ТК обеспечивает улучшение динамических показателей при повторных пусках и в торможении за счет возможности включения режима тяги (торможения) сразу на нужной группировке ТМ и любой позиции ТК в зависимости от скорости движения.

Помимо ТК в состав полупроводникового силового электрооборудования входит диодно-тиристорный блок рекуперативного торможения, включающий в себя диоды VDI-VD3 и тиристоры VS17, VS18.

Обмотки возбуждения ТМ ОБ1-ОБ4 подключены попарно последовательно к управляемым выпрямителям УВ1,УВ2, которые получают питание от статического преобразователя (СТП), на данной схеме не показанного. От этого же

преобразователя осуществляется питание собственных нужд вагона, поэтому отпадает необходимость установки специального блока питания собственных нужд (БПСН), который входит в состав электрооборудования серийного вагона. Не используется также серийный регулятор тока возбуждения ТМ (РТ-300), функции которого выполняют управляемые выпрямители УВ1-УВ2.

Управляемые выпрямители помимо функций регулирования тока возбуждения ТМ осуществляют реверсирование его направления в обмотках возбуждения.

На серийном вагоне функцию реверсирования направления движения осуществляет специальный электропневматический групповой аппарат, необходимость в котором на вагоне с НВ ТМ отпадает.

Из электрооборудования серийного вагона не используется также электропневматический групповой аппарат, который обеспечивает переключение схемы силовых цепей с последовательного соединения ТМ на параллельное и обратно (переключатель положений ПС-ПП).

Функции ПС-ПП в схеме с НВ ТМ выполняют индивидуальные контакторы КП1, КП2 и М1, М2, которые совместно с диодно-тиристорным блоком рекуперации обеспечивают также включение рекуперативного торможения и замещение его реостатным.

3.2.2. Достоинства предлагаемой системы ТЭП

Ввиду таких особенностей метрополитенов, как высокая стоимость капитального строительства и ограниченность длины поезда, основные резервы повышения их провозной способности связаны с нарастанием частоты и скорости движения. Однако в условиях метрополитена даже небольшое увеличение скорости сообщения сверх достигнутого в эксплуатации ведет к резкому росту расхода энергии на тягу.

Таким образом, при разработке перспективных метровагонов необходимо решить две основных задачи:

- улучшение динамических показателей ЭПС;

- снижение расхода энергии на тягу поездов.

Для решения вышеуказанных задач вагоны с ДРУ рекомендуется оборудовать автоматически регулируемым независимым возбуждением тяговых машин (АР НВ ТМ) [80, 82, 83]. При этом реализуются:

- улучшение тяговых свойств в зоне ограничения силы тяги условиями сцепления в зоне ослабления поля ТМ соответственно за счет повышения динамической жесткости тяговых характеристик и регулирования силы тяги согласно с фактически действующим ограничением при уменьшении разброса нагрузок параллельно включенных групп ТМ;

- повышение эффективности тормозного процесса за счет более плавного регулирования тормозной силы в зоне высоких скоростей движения и сохранения максимальной тормозной силы до существенно меньшей скорости движения;

- рекуперативное торможение, являющееся основным резервом повышения энергетической эффективности ВМ, с осуществлением в этом режиме перегруппировки ТМ;

- возможность использования более эффективных энергосберегающих алгоритмов управления в пусковых режимах.

3.2.3. Электромагнитные, электромеханические и механические процессы в ТЭП с НВ ТМ

Рассмотрим систему уравнений, описывающих переходный процесс в тяговом двигателе, представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений

Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением имеет обмотку якоря и обмотку возбуждения, которые в общем случае получают питание от независимых источников постоянного тока. Необходимым условием непрерывного процесса электромеханического преобразования энергии является протекание переменных токов хотя бы по части обмоток машины. Выполнение этого условия в машине постоянного тока обеспечивается работой коллектора, коммутирующего

постоянный ток, поступающий в якорную обмотку со стороны источника питания, с частотой $\omega_{эл}$, равной электрической скорости ротора.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения можно описать следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} U_{\epsilon} = I_{\epsilon} R_{\epsilon} + L_{\epsilon} dI_{\epsilon}/dt, \\ U_{я} = I_{я} R_{я} + L_{я} dI_{я}/dt + k\Phi\omega, \\ M_{\partial\epsilon} = k\Phi I_{я}, \\ M_{\partial\epsilon} - M_{н} = J_{\Sigma} d\omega/dt, \end{cases} \quad (3.1)$$

Нетрудно видеть, что первые два уравнения полученной системы представляют собой уравнения Кирхгофа для цепей возбуждения и якоря машины, причем последний член уравнения для цепи якоря есть ЭДС двигателя:

$$e = \omega_{эл} L_{12} i_{\epsilon} = p_n L_{12} i_{\epsilon} \omega = k\Phi\omega \quad (3.2)$$

Момент двигателя определяется соотношением

$$M_{\partial\epsilon} = p_n L_{12} i_{\epsilon} i_{я} = k\Phi I_{я} \quad (3.3)$$

где U_{ϵ} , I_{ϵ} , $U_{я}$, $I_{я}$ - напряжения и токи цепи возбуждения и якорной цепи, R_{ϵ} , L_{ϵ} , $R_{я}$, $L_{я}$ - сопротивления и индуктивности цепи возбуждения якорной цепи, L_{12} - взаимная индуктивность обмоток якоря и возбуждения, ω - угловая скорость ротора, $M_{\partial\epsilon}$ - электромагнитный момент двигателя, $M_{н}$ - момент нагрузки, $k\Phi = p_n L_{12} I_{\epsilon}$, p_n - число пар полюсов, J_{Σ} - суммарный момент инерции двигателя и нагрузки, w_{ϵ} - число витков обмотки возбуждения.

Следовательно, для записи уравнений механической характеристики двигателя постоянного тока можно, как это принято, непосредственно использовать схему его цепей на постоянном токе, приведенную на рис. 3.1.1.

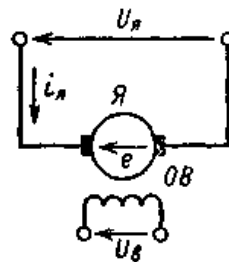


Рис. 3.1.1. Естественная схема включения двигателя с независимым возбуждением

Математическое описание механической характеристики двигателя постоянного тока при переменном потоке нелинейно в связи с тем, что ЭДС двигателя e и электромагнитный момент $M_{\partial\partial}$ пропорциональны произведениям потока соответственно на скорость и ток якоря. Во многих случаях двигатель с независимым возбуждением работает при постоянном потоке $\Phi = \text{const}$, при этом уравнения механической характеристики линеаризуются и после преобразований математическое описание динамических процессов преобразования энергии в двигателе с независимым возбуждением представляется в виде следующего уравнения механической характеристики:

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} M_{\partial\partial} - \frac{L_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} \frac{dM_{\partial\partial}}{dt}. \quad (3.4)$$

Подстановка $M_{\partial\partial} = k\Phi I_{\text{я}}$ в (3.4) дает уравнение электромеханической характеристики:

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi} i_{\text{я}} - \frac{L_{\text{я}}}{k\Phi} \frac{di_{\text{я}}}{dt}. \quad (3.5)$$

Как частный результат полученного математического описания могут быть определены уравнения статических электромеханической и механической характеристик двигателя. При постоянном потоке уравнения этих характеристик с помощью (3.4) и (3.5) при $dM_{\partial\partial}/dt = di_{\text{я}}/dt = 0$ записываются в виде

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k^2\Phi^2} M_{\partial\partial}; \quad (3.6)$$

$$w = \frac{U_{\text{я}}}{k\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{k\Phi} i_{\text{я}}. \quad (3.7)$$

Рассматривая полученные уравнения, можно заключить, что при $\Phi = \text{const}$ электромеханическая и механическая характеристики двигателя с независимым возбуждением линейны. Поэтому положение каждой характеристики может быть охарактеризовано двумя точками: точкой идеального холостого хода, в которой

$i_{я} = 0$; $M_{об} = 0$, и точкой короткого замыкания, в которой $w = 0$. В соответствии с (3.6) и (3.7) первой из них соответствует скорость идеального холостого хода:

$$w_0 = \frac{U_{я}}{k\Phi}. \quad (3.8)$$

Второй соответствуют момент $M_{к.з}$ и ток $i_{к.з}$ короткого замыкания. Их можно определить, решив (3.6) и (3.7) относительно тока и момента. Приняв в этих уравнениях $w = 0$, получим

$$i_{к.з} = \frac{U_{я}}{R_{я}}, \quad M_{к.з} = k\Phi \frac{U_{я}}{R_{я}}. \quad (3.9)$$

На основе кривой намагничивания $\Phi(I)$ определены статическая $L_{ст}(I_{в})$ и динамическая $L_{дин}(I_{в})$ индуктивности тягового двигателя.

$$L_{ст}(I_{в}) = 2p \cdot \sigma \cdot \frac{w_{в} \cdot \Phi}{I_{в}}, \quad (3.10)$$

где σ – коэффициент рассеяния; $w_{в}$ – число витков обмотки возбуждения.

$$L_{дин} = L_{ст} + I_{в} \cdot \frac{\Delta L_{ст}}{\Delta I_{в}}, \quad (3.11)$$

где $\Delta L_{ст}$ – приращение статической индуктивности;

Токи якоря и возбуждения

$$\begin{cases} \frac{di_{я}}{dt} = \frac{1}{L_{я+д}} [u_{я} - c_e v \Phi - i_{я} r_{я+д}] \\ \frac{di_{в}}{dt} = \frac{1}{L_{в}} (u_{в} - i_{в} r_{в}) \end{cases} \quad (3.12)$$

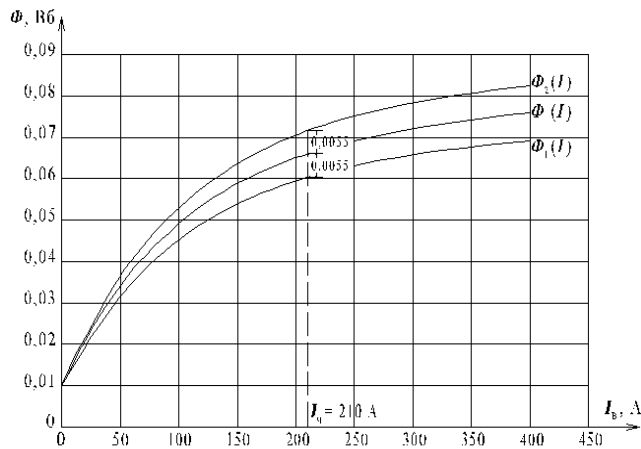


Рис. 3.1.2. Кривые намагничивания тягового двигателя

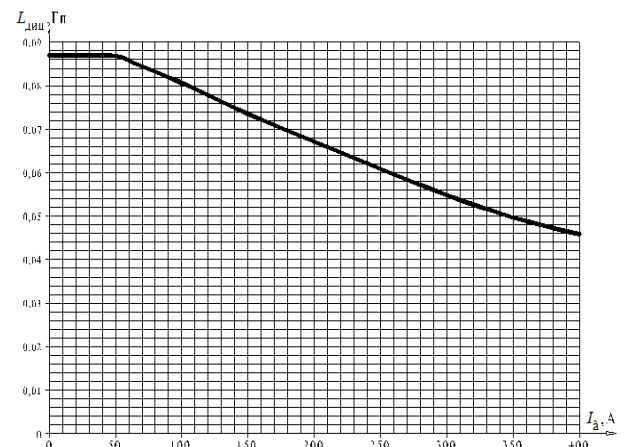


Рис 3.1.3. Зависимость индуктивности обмотки возбуждения двигателя от тока

Исследование электромагнитных процессов на вагоне метро с независимым возбуждением выполнено с учетом изменения скорости движения поезда в режимах разгона до заданного значения и выбега. Изменение скорости учитывалось с помощью решения уравнения движения поезда (рис. 8), которое записано в виде:

$$\frac{dv_{\text{дв}}}{dt} = f_{\text{д}} \xi, \quad (3.13)$$

где $f_{\text{д}}$ – удельная равнодействующая всех сил, действующих на поезд;

ξ – переводной коэффициент, учитывающий размерности величин.

$$f_{\text{д}} = f_{\text{к}} \mp w \mp w_i - b. \quad (3.14)$$

где, $f_{\text{к}}$ – удельная сила тяги; w – удельная сила сопротивления движения поезда (знак «+» соответствует режиму тяги, а знак «–» – режиму торможения); w_i – удельная сила сопротивления движения поезда от уклона (+), подъема (–); b – удельная тормозная сила.

$$f_{\text{к}} = \frac{F_{\text{к}}}{G}, \quad (3.15)$$

где $F_{\text{к}}$ – сила тяги вагона; G – вес вагона метрополитена.

При решении нелинейной системы дифференциальных уравнений (3.1)– (3.15) построены графики (рис. 3.1.4 и рис. 3.1.5 а-б-в).

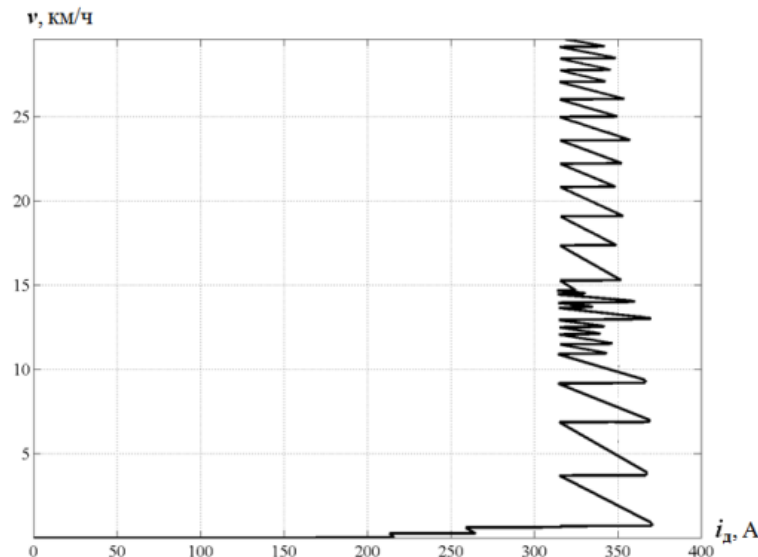


Рис. 3.1.4. Реализованная пусковая диаграмма вагона метрополитена

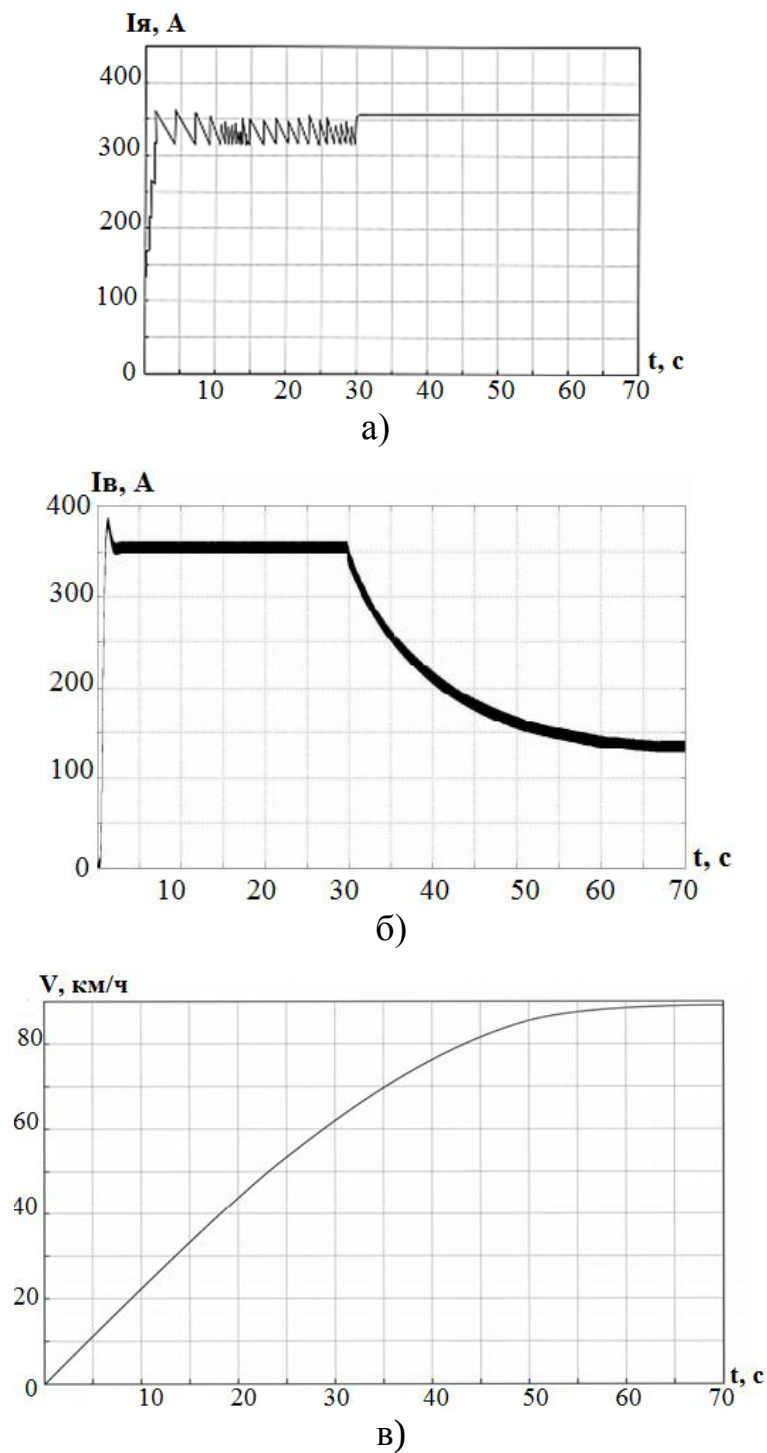


Рис. 3.1.5. Графики изменения тока якоря (а), тока возбуждения (б) и скорости движения вагона (в) при работе системы автоматического регулирования для стабилизации тока после выхода на автоматическую характеристику

Как видно на рис. 3.1.5 после включения системы стабилизации на 30с ток возбуждения начинает снижаться, за счет чего происходит поддержание тока якоря на заданном уровне и происходит дальнейший рост скорости.

3.2.4. Сравнительный анализ тягово-энергетических характеристик предлагаемой системы ТЭП на опытных вагонах метрополитена

3.2.4.1. Тяговые характеристики предлагаемой системы ТЭП на опытных вагонах метрополитена

В специфических условиях метрополитенов действие одних положительных качеств АР НВ ТМ ослабляется, а других усиливается. В частности, анализ показывает, что тяговая область метровагонов практически не имеет ограничений по условиям сцепления. Поэтому одно из преимуществ АР НВ ТМ – улучшение противобоксовочных свойств, имеющее важнейшее значение для локомотивов, – для метрополитена несущественно. Другие преимущества АР НВ ТМ в полной мере проявляются и в условиях метрополитена.

Основными элементами электрического оборудования, степень стабильности характеристик которых отражается на разбросе сил тяги и торможения отдельных колесных пар, являются ТМ, пуско-тормозные резисторы (ПТР), реле ускорения и торможения (РУТ), сопротивления цепей ослабления поля ТМ. Дополнительное влияние на разброс сил тяги и торможения оказывают разница диаметров бандажей колесных пар и температур нагрева обмоток ОВ тяговых машин. Последняя в режимах ослабления поля может привести к заметному разбросу сил тяги и торможения даже при одинаковых характеристиках ТМ и цепей ослабления поля.

Математическая обработка данных контрольных испытаний 400 машин типа ДК-108 и 800 машин типа ДК-116 показала, что у 85 % машин типа ДК-108 в номинальном режиме отклонения частот вращения не превышают $\pm 2,6$ %; для 82,5% машин типа ДК-116 отклонения частот вращения лежат в пределах $\pm 3,0$ %. Основной причиной отклонений частот вращения ТМ является различие их потоков возбуждения при равных магнитодвижущих силах в обмотках возбуждения. Поэтому можно считать, что потоки машин приблизительно имеют такой же разброс, как их частоты вращения. При движении поезда частоты вращения его машин заданы принудительно, и их отклонения определяются лишь разницей

диаметров колес. В связи с этим при последовательном возбуждении разбросы магнитных характеристик и отклонения частот вращения ТМ вызывают различие токов и, следовательно, неодинаковые реализуемые мощности ТМ при параллельном их включении, как это имеет место на электровозах переменного тока.

На моторных вагонах постоянного тока, в том числе метрополитена, используется перегруппировка ТМ и реостатный пуск. Это вносит свои особенности в разброс нагрузок ТМ. При последовательной группировке все ТМ одного вагона включены последовательно, их токи равны и в режиме реостатного пуска определяются работой РУТ. В этом режиме разброс характеристик ТМ вызывает перераспределение приложенных к ним напряжений, т.е. также приводит к разным реализуемым мощностям и силам тяги осей одного вагона. Разброс параметров РУТ вызывает различия в силах тяги разных вагонов. При параллельной группировке в режимах изменения сопротивления пусковых резисторов и степени ослабления поля влияние характеристик РУТ на разброс сил тяги вагонов сохраняется и, кроме того, постепенно растет влияние разброса характеристик ТМ и устройств ослабления поля на разницу нагрузок параллельных цепей ТМ одного вагона.

Теоретический расчет отклонений характеристик вагонов от номинальных и разброса нагрузок их ТМ достаточно сложен. Поэтому для оценки этих параметров в одном из депо Московского метрополитена были испытаны четыре вагона серии Е. Испытания показали существенное различие установок РУТ отдельных вагонов и возможность значительного разброса нагрузок параллельных групп ТМ одного вагона. Так, на двух вагонах нагрузки параллельных групп ТМ существенно отличались друг от друга. На одном из них при уменьшении среднего тока якоре с 404 до 162 А (на автоматической характеристике) разброс увеличился с 7,4 до 14 %.

Тяговые характеристики, рассчитанные по полученным в испытаниях осциллограммам, свидетельствуют о существенных недостатках системы контакторно-реостатного регулирования силы тяги с ТМ последовательного возбуждения во всех зонах тяговой области. Эти недостатки, приводящие к

недоиспользованию тяговых возможностей вагонов и к ухудшению их динамики, в большинстве своем устраняются при оборудовании вагонов системой АР НВ ТМ.

В зоне нарастания ускорения (при токах якорей, меньших уставки РУТ) влияние разброса характеристик привода реостатного контроллера (РК) можно устранить, выбрав величину первой ступени пускового реостата такой, чтобы ток якорей достигал уставки при максимальном напряжении в КС, а силу тяги регулировать плавным изменением тока возбуждения. Используя датчики токов системы, легко создать электронное РУТ с гораздо более стабильными характеристиками и тем самым улучшить регулирование силы тяги на реостатных позициях. В зоне работы с ослабленным полем система АР НВ ТМ обеспечивает плавное уменьшение токов возбуждения до допустимого значения независимо от нагрева ОВ, автоматически корректирует допустимую степень ослабления поля в зависимости от уровня напряжения в КС и выравнивает нагрузки параллельных групп ТМ за счет изменения их токов возбуждения. Этим достигается регулирование силы тяги по расчетным ограничениям, что позволяет существенно увеличить силу тяги в зоне с предельным ослаблением поля, особенно при пониженном напряжении в КС.

Использование АР НВ ТМ обеспечивает существенное снижение влияния напряжения в КС на величину силы тяги благодаря возможности плавной коррекции степени ослабления поля. В результате появляется возможность регулировать силу тяги в соответствии со всеми действующими при данной скорости движения ограничениями. На ВМ такими ограничениями являются вначале допустимый ток якоря, а затем максимальное межламельное напряжение на коллекторе.

О потенциальной эффективности применения АР НВ ТМ на вагонах типа Е свидетельствуют приведенные на рис. 3.2 тяговые характеристики, рассчитанные для напряжения 750В. Кривая 1 соответствует режиму последовательного возбуждения с минимальным ослаблением поля $\beta=0,42$, которое несколько меньше, чем полученное при испытаниях значение 0,44; кривая 2 соответствует расчетной величине $\beta=0,35$. На первый взгляд, разница между характеристиками 1 и 2

незначительна, однако при скорости 60 км/ч различие по силе тяги превышает 10%, что для динамики поезда существенно. Кривая 3 рассчитана для режима АР НВ ТМ при предельном токе якоря 350 А и максимальном межламельном напряжении 37,5 В; при этом допустимое значение реактивной э. д. с. не достигается. Величина 350 А принята в качестве допустимой потому, что на вагонах типа Е в зоне регулирования ослабления поля при уставке РУТ 260А броски тока в случае высокого напряжения в КС превышают 350 А даже при нормальной работе устройств ослабления поля.

Сравнение характеристик 1 и 3 показывает высокую эффективность применения АР НВ ТМ. В частности, при скорости 60 км/ч сила тяги увеличивается вдвое. Расширение тяговой области в зоне высоких скоростей движения сопоставимо с достигаемым путем увеличения мощности ТМ. Это следует из сравнения характеристики 3 с кривой 4, которая представляет собой ограничение тяговой области вагона типа 81-717 с машинами мощностью 110 кВт (т. е. на 66 % выше, чем на вагонах типа Е) в режиме последовательного возбуждения с расчетным значением $\beta=0,28$. Фактически в эксплуатации реализуется величина β порядка 0,35 и тяговая характеристика будет расположена ниже.

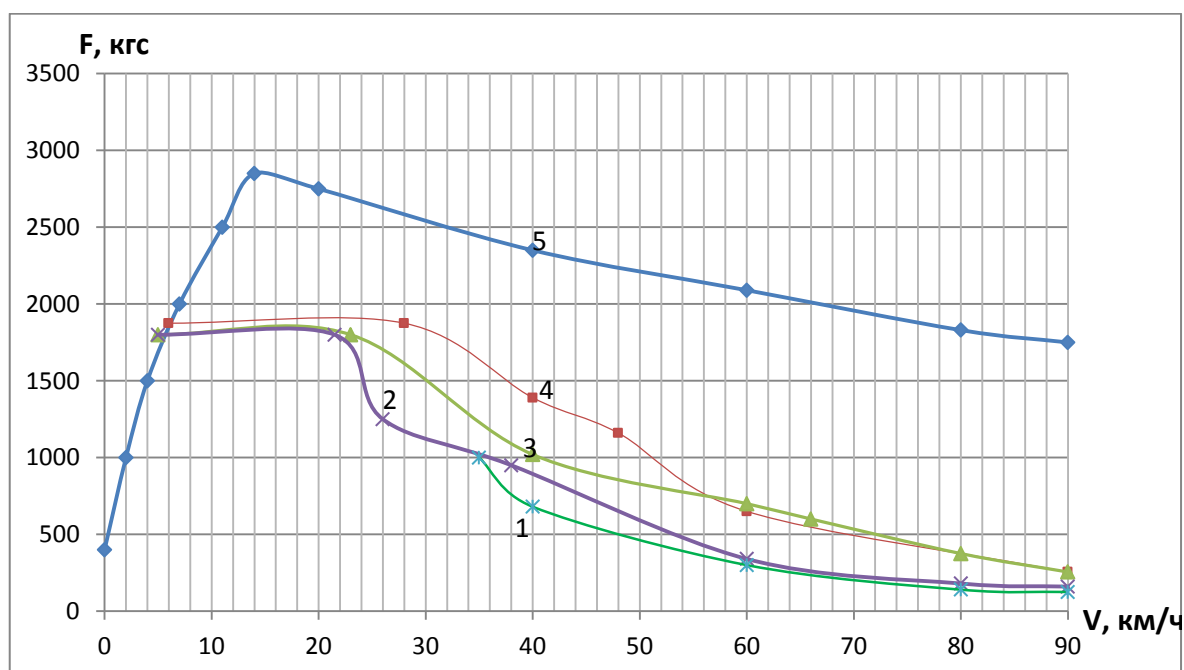


Рис 3.2. Тяговые характеристики опытного вагона при применении АР НВ ТМ

Для оценки предельных тяговых возможностей вагонов метрополитена и степени их использования на эксплуатируемом парке приведена характеристика 5, рассчитанная для одной движущей оси при нагрузке от нее на рельсы 12 т с учетом следующих ограничений: пусковое ускорение $a_0=0,4 \text{ м/с}^2$, производная максимального ускорения по времени $\dot{h} = 0,6 \text{ м/с}^3$ и коэффициент сцепления $\Psi_k=25/(100+V)$. Сравнение характеристики 5 с 1, 2 и даже с 4 показывает, что возможности улучшения тяговых свойств вагонов метрополитена использованы далеко не полностью.

Реализация этих резервов путем увеличения мощности ТМ ограничена параметрами системы электроснабжения и допустимой массой и габаритами электрооборудования. Действительно, для обеспечения силы тяги, соответствующей характеристике 5, мощность ТМ при скоростях 70 и 90 км/ч должна достигать соответственно 340 и 400 кВт. При современном уровне электромашиностроения это нереально. Существенно и ограничение по предельному току в контактной сети: именно этим параметром ограничена сила тяги вагонов 81-717 в интервале скоростей движения от 15 до 50 км/ч. В случае же применения АР НВ ТМ существенное расширение тяговой области достигается без изменения параметров электрооборудования вагонов.

Чтобы достоверно и всесторонне оценить эффективность принимаемых решений в области совершенствования тягового привода, необходимо провести сравнительные тяговые расчеты. Такие расчеты дают возможность установить как динамические, так и энергетические показатели вагонов с разными системами привода. Однако результаты такой оценки во многом зависят от условий, для которых выполнены тяговые расчеты. К таким условиям относятся длина перегона, профиль пути, техническая скорость (V_T), режим напряжения в контактной сети, загрузка вагонов, сопротивление движению.

Например, при малой длине перегона даже при движении с предельными ускорениями поезд не успевает развить высокой скорости и поэтому проблема

увеличения силы тяги в зоне высоких скоростей утрачивает свою актуальность. Наоборот, при длинном перегоне величина силы тяги в зоне высоких скоростей движения приобретает основное значение. Если все станции расположены на горках, то пуск поезда происходит на спуске, а торможение — на подъеме. В этом случае снижаются требования к величине силы тяги в зоне разгона поезда и к тормозной силе; в частности, по-иному может рассматриваться проблема рекуперации. Поэтому для тяговых расчетов следует использовать усредненные, наиболее вероятные условия.

Приведенные соображения позволили выбрать в качестве расчетного номинальное напряжение в контактной сети 750 В. Анализ параметров пути линий Московского метрополитена показал, что несмотря на большой разброс величин уклонов на участках разгона и торможения поездов математическое ожидание этих величин близко к нулю, а средняя длина перегонов равна 1670 м. Техно-экономические исследования, выполненные с учетом стоимости пассажира-часа, показывают, что минимум приведенных затрат достигается при $V_T > 60$ км/ч. Поэтому необходимо было оценить эффективность совершенствования тягового электропривода не только для существующих, но и для рациональных в перспективе значений V_T в пределах до 60 км/ч.

На динамические и энергетические показатели электропоездов существенное влияние оказывает эффективность тормозного процесса. На поездах метрополитена используется реостатное торможение, в процессе которого напряжение на коллекторах ТМ вдвое превышает номинальное. Это обеспечивает высокую эффективность тормозного процесса. На вагонах с АР НВ ТМ можно использовать рекуперативно-реостатное торможение. Однако учитывая большую вероятность срывов рекуперации из-за отсутствия потребления энергии в сети или по другим причинам и исключительную важность надежности тормозных средств в метрополитене, в качестве рабочего тормоза следует принимать реостатный. Кроме того, достижение в режиме рекуперации равного с режимом реостатного

торможения эффекта является, как указывалось, сложной задачей, которая практически решается только включением в цепь тормозного тока балластных резисторов. С учетом этих соображений в тяговых расчетах для всех вариантов ограничений сил тяги принималась одна и та же тормозная характеристика — реостатного тормоза вагонов типа Е. Практически это означает, что тормозная сила в процессе торможения остается почти постоянной и равной 1,96 тс/ось.

3.2.4.2. Энергетические характеристики предлагаемой системы ТЭП на макетных вагонах метрополитена

Некоторые результаты серии тяговых расчетов, выполненных по специально разработанной методике [84], приведены на рис. 3.3. Изображенные на нем кривые движения соответствуют тяговым характеристикам, показанным на рис. 3.2. Кривые рис. 3.3 наглядно свидетельствуют об основном преимуществе расширения тяговых областей — возможности достижения той же скорости движения за меньшее время и увеличения V_T . В частности, с учетом того что график движения на метрополитене должен иметь 10-секундный запас на нагон, для поезда с тяговыми характеристиками вагонов типа Е при $\beta_{min}=0,42$ максимальная техническая скорость составляет 54,8 км/ч; применение на этих же вагонах АР НВ ТМ позволяет увеличить ее до 60 км/ч.

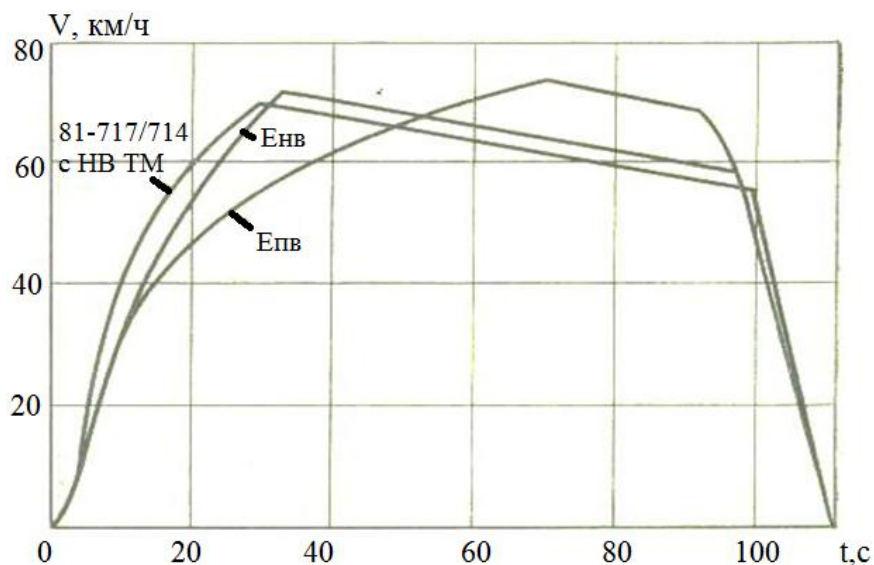


Рис. 3.3. Кривые движения вагонов метро ЕПВ, ЕНВ и 81-717 с АР НВ ТМ

Возможности улучшения энергетических показателей поездов серии Е при оборудовании вагонов системой АР НВ ТМ показаны на рис. 3.4. На нем приведены зависимости удельного расхода энергии от технической скорости для вагона с последовательным возбуждением машин при $\beta=0,42$ ($E_{пв}$), для вагона с системой АР НВ ТМ ($E_{нв}$) и для того же вагона с учетом возврата энергии в сеть при рекуперативно-реостатном торможении ($E_{нвр}$). Последняя характеристика получена с учетом потерь энергии в балластных резисторах, но без учета возможных срывов рекуперации; не учитываются также потери энергии в системе электроснабжения и ее затраты на возбуждение тяговых машин при АР НВ ТМ.

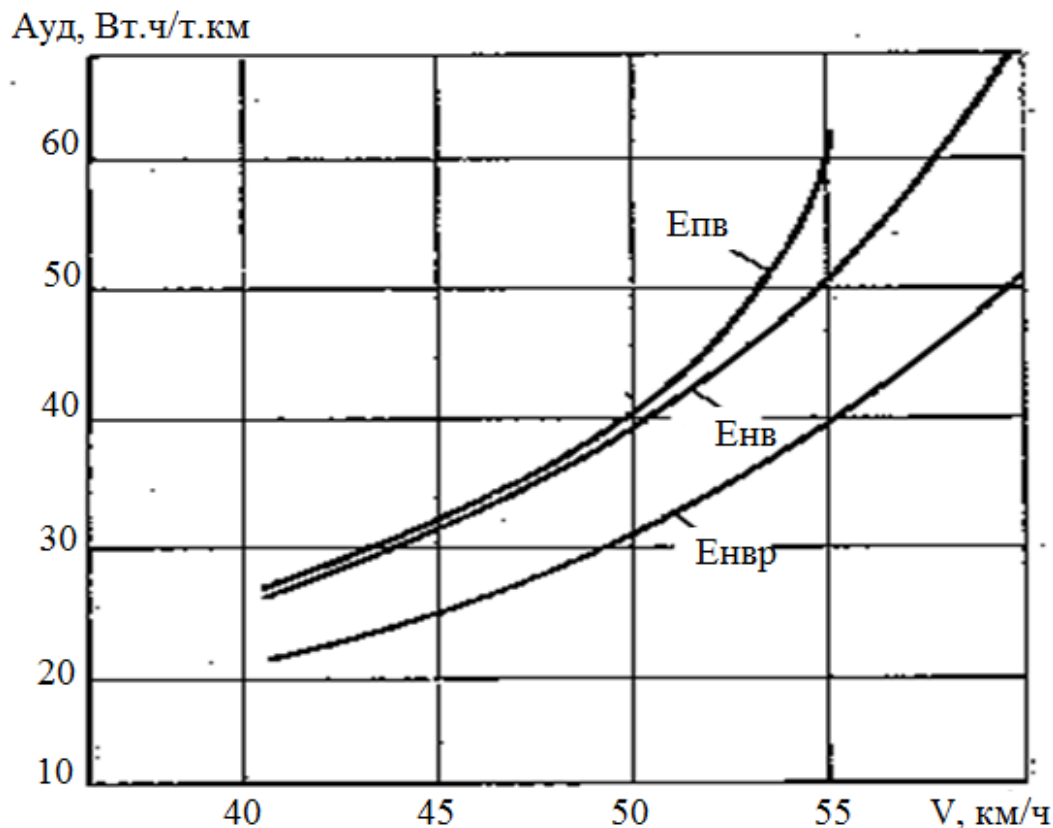


Рис 3.4. Возможности улучшения энергетических показателей опытных вагонов серии Е при оборудовании вагонов системой АР НВ ТМ

Некоторые показатели, отражающие возможность улучшения тягово-энергетических характеристик вагонов метрополитена, приведены в таб. 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнительные тягово-энергетические показатели опытных вагонов метрополитена серии Е с ПВ, НВ и АР НВ ТМ

Параметры	Тип вагона		
	Е _{ПВ}	Е _{НВ}	Вагон с АР НВ ТМ
Время разгона, с	70,5	33	29,9
Удельный расход энергии на тягу, Вт.ч/т.км (%)	55,7 (100)	49,3 (88,5)	45,6 (81,9)
Скорость начала торможения , км/ч	64,94	40,46	42,935
Тормозные потери, %	100	72,3	67,2

Из этих данных видно, что тягово-энергетические показатели поездов метрополитена серии Е заметно улучшаются при замене последовательного возбуждения автоматически регулируемым независимым. В частности, при технической скорости 54,4 км/ч расходы электроэнергии на тягу сокращаются на 11,5%, а тормозные потери на 27,7%. Такое улучшение тягово-энергетических показателей близко к соответствующему эффекту, получаемому при вводе в эксплуатацию поезда 81-717 с расчетной тяговой характеристикой.

Следует отметить, что этот результат получается за счет использования только одного преимущества АР НВ ТМ — плавного регулирования тока якоря. Использование других его преимуществ, таких как устранение разброса нагрузок ТМ во всех режимах и регулирование силы тяги по допустимым значениям ограничивающих параметров при всех уровнях напряжения контактной сети, позволит еще больше расширить тяговую область поездов типа Е и приблизить ее к тяговой области поездов типа 81-717.

Важным достоинством рассмотренной возможности улучшения показателей вагонов типа Е является простота осуществления модернизации. Требуемые при этом изменения схемы силовых цепей невелики. Основным дополнительным

оборудованием является статический преобразователь постоянного напряжения контактной сети в переменное, которое используется для питания возбудителей, представляющих собой тиристорные выпрямители. Тиристорные возбудители обеспечивают и реверсирование тока в обмотках возбуждения. Статический преобразователь служит также для питания собственных нужд вагона.

В связи с заменой системы возбуждения ТМ из схемы устраняются цепи ослабления поля, включая индуктивные шунты, резисторы и соответствующую коммутирующую аппаратуру. Кроме того, появляется возможность снять с вагона тормозной переключатель, а для переключения схемы из тягового режима в тормозной применить реверсор и индивидуальные контакторы. Проведенные на опытном вагоне типа Е испытания показали практическую осуществимость автоматически регулируемого НВ ТМ и подтвердили его преимущества.

Кроме улучшения динамических и энергетических показателей поездов метрополитена применение АР НВ ТМ облегчает решение проблемы внедрения на метрополитене рекуперативного торможения и автоведения поездов. Основные преимущества НВ ТМ сохраняются и при его применении на поездах с тиристорно-импульсным управлением, в частности, упрощается осуществление режима рекуперативно-реостатного торможения. Техничко-экономическая целесообразность использования НВ ТМ на поездах метрополитена с контакторно-реостатным и ТИУ подтверждается и опытом зарубежных метрополитенов.

Выводы по главе 3

1. Показано, что основной недостаток сегодняшней тяги постоянного тока не в коллекторных ТМ, а в контакторном управлении их работой. Оно существенно снижает конкурентоспособность тяги постоянного тока. Возможность достижения заметных эксплуатационных преимуществ у ТМ ПТ связана с использованием бесконтактных элементов в силовых цепях ТЭП, что позволяет упростить схему силовой кабельной разводки и исключить практически всю контакторную аппаратуру, в результате более половины повреждений можно полностью исключить из практики эксплуатации электропоездов.

2. Показано, что внедрение усовершенствованных систем ТЭП нельзя начинать до того, как они покажут решающие преимущества перед уже освоенными. Еще более весомыми технико-экономическими преимуществами должны обладать новые вагоны, если ставить вопрос о замене ими эксплуатируемого ЭПС, не выработавшего расчетного ресурса. Такая мера, требуя больших материальных и трудовых затрат, не может быть экономически эффективной при использовании всех рассмотренных направлений совершенствования ТЭП, включая увеличение мощности ТМ, реализованное на метровагонах. Следовательно, в эксплуатации еще долго будут находиться не выработавшие свой ресурс вагоны старых типов. Сегодня назрела необходимость модернизации эксплуатируемых вагонов, которую, естественно, следует осуществлять с максимальным использованием имеющегося электрооборудования. В наибольшей мере этому требованию удовлетворяет применение на вагонах системы ТЭП с независимого возбуждения тяговых машин.

3. Предложена система ТЭП (на основе КТМ постоянного тока независимого возбуждения и энергобегающего алгоритма управления) с улучшенными характеристиками и существенными преимуществами: повышение тягово-энергетических показателей поездов метрополитена с ТМ ПТ за счет более эффективного применения рекуперативного торможения в случае замены в схеме

силовых цепей контакторов тиристорными ключами и использования энергосберегающего электропривода (ЭС ТЭП); улучшение тяговых свойств в зоне ограничения силы тяги условиями сцепления в зоне ослабления поля ТМ соответственно за счет повышения динамической жесткости тяговых характеристик и регулирования силы тяги; повышение эффективности тормозного процесса за счет более плавного регулирования тормозной силы в зоне высоких скоростей движения и сохранения максимальной тормозной силы до существенно меньшей скорости движения; рекуперативное торможение, являющееся основным резервом повышения энергетической эффективности метровагонов, с осуществлением в этом режиме перегруппировки ТМ.

4. Предлагаемая система ТЭП с НВ ТМ и тиристорным реостатным контроллером (ТРК) была реализована на макетном вагоне метрополитена и на партии построенных Ленинградским вагоностроительным заводом (ЛВЗ) опытных вагонов метро. Их испытания в эксплуатации подтвердили надежность работы и высокие энергетические показатели. Это техническое решение имеет преимущество перед использованием на вагонах АТМ, в особенности по стоимости, что и определяет целесообразность его использования как на новых вагонах, так и для модернизации эксплуатируемых.

ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАГОНОВ МЕТРО С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Эффективность перевозного процесса метрополитена во многом определяется технико-экономическим показателям используемого ЭПС, в частности, тягового электропривода.

С учетом специфики проектируемой системы существует проблема выбора из нескольких альтернатив систем ТЭП с коллекторными и асинхронными тяговыми двигателями. Обоснованный выбор с учетом предстоящих особенностей эксплуатации позволит снизить эксплуатационных затрат, повысить надежность ЭПС и, как следствие, сделать проектируемый метрополитена эффективной транспортной системой.

В связи с этим для выбора рациональных систем ТЭП вагонов метрополитена необходима сопоставление их эффективности. Для этого было необходимо проведение комплексного исследования, включающего:

- Тягово-энергетические расчеты
- Техничко-экономические расчеты

4.1. Методика и технические данные для тягово-энергетических расчетов (ТЭР)

Определение тягово-энергетических показателей вагонов метрополитена с различными системами ТЭП проводится на основе тяговых расчетов в среде пакета MatCAD 15, графики и диаграммы построены компьютерной программой Microsoft Excel [14, 93-97].

В расчетах использованы параметры (технические характеристики) серийного вагона типа 81-717/714 для двух вариантов ТЭП:

1. с тяговой машиной постоянного тока ДК-117А
2. с асинхронными тяговыми машинами ДАТЭ–170 4У2

Расчет отличается только типом тяговых двигателей и системой управления, в том числе, массой электрооборудования, имея при этом такой же кузов и тележки, (табл. 4.1).

К ТЭР относятся главные задачи [98]:

- расчёт и построение электромеханических характеристик;
- расчёт и построение пусково-тормозных характеристик;
- расчёт и построение кривых движения для заданных условий;
- определение расхода энергии на движение поезда.

Таблица 4.1. Технические данные для тягово-энергетических расчетов

Конструкции и технические показатели ЭПС		
Тара вагона, $m_{\text{т}}$ (т)	34/33,5	
Количество мест для сидения	40/44	
Вместимость вагона при плотности 10 чел/м ² , чел.	308/330	
Средняя масса одного пассажира, $m_{\text{ч}}$ (т)	0,07	
Конструкционная скорость, $V_{\text{констр.}}$ (км/ч)	90	
Скорость сообщения (при расчете), $V_{\text{сообщ}}$ (км/ч)	48	
Передаточное число редуктора, μ	5,33	
Диаметр колеса, $D_{\text{к}}$ (м)	0,78	
Характеристики тяговых электродвигателей		
Тип двигателя	С тяговой машиной постоянного тока ДК-117А	С асинхронными тяговыми машинами ДАТЭ–170 4У2
Мощность номинальная, кВт	110	170
Коэффициент полезного действия (КПД), η (%)	89	92

Коэффициент мощности		
Номинальная частота вращения, $n_{ном}$ (об/мин)	1480	1290
Максимальная частота вращения, n_{max} (об/мин)	3600	3600
Коэффициент ослабления поля, β	0,8/0,5/0,35/0,28	-
Масса двигателя, G_d (кг)	740	805
Масса комплекта электрооборудования, $G_{обор.}$ (кг)	5600	6277
КПД преобразователя, $\eta_{пр}$ (%)	0,96	-
Коэффициент мощности	-	0,94

4.2. Тягово-энергетические расчеты вагонов метро с ТМ ПТ

4.2.1. Кривые удельного основного сопротивления движению

Сначала, определим массы, веса ЭПС по данным сведениям (табл. 4.1)

$$\text{Масса вагона с пассажирами } m_B = m_T + 330 \cdot m_q = 57,1 \text{ т} \quad (4.1)$$

$$\text{Вес вагона с пассажирами } G_B = 9,81 \cdot m_B = 560,15 \text{ кН} \quad (4.2)$$

$$\text{Количество вагонов поезда } n_B = 8$$

$$\text{Масса поезда с пассажирами } m_{\Pi} = n_B \cdot m_B = 456,8 \text{ т} \quad (4.3)$$

$$\text{Вес поезда с пассажирами } G_{\Pi} = n_B \cdot G_B = 4481,2 \text{ кН} \quad (4.4)$$

Кривые удельного основного сопротивления движению при движении под током w_0^T и без тока $w_0^{6/T}$ (Н/кН) для вагонов метрополитена строятся по выражениям:

$$w_{0T}(V) = 1,1 + (0,09 + 0,022 \cdot n_B) \cdot \frac{V^2}{m_{\Pi}}, \quad (4.5)$$

$$w_{06T}(V) = 1,1 + \frac{52}{m_B} + 0,025V + (0,09 + 0,022 \cdot n_B) \cdot \frac{V^2}{m_{\Pi}} \quad (4.6)$$

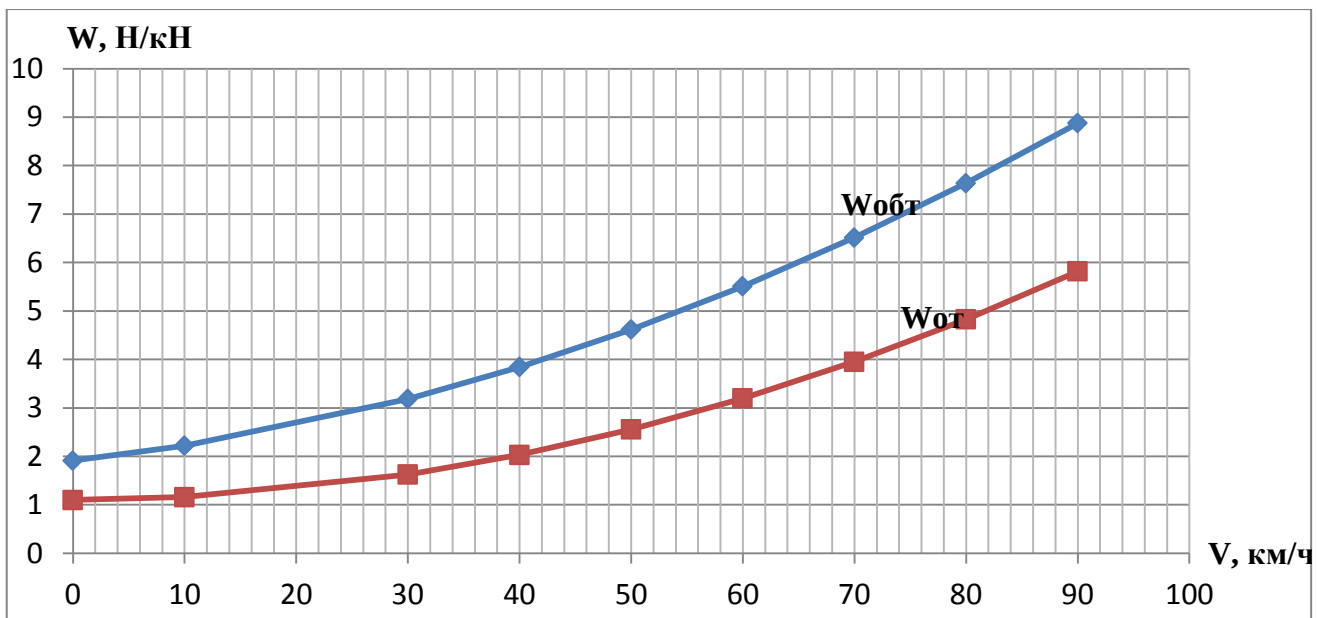


Рис. 4.1. Кривые удельного основного сопротивления движению

4.2.2. Расчет электромеханических характеристик

4.2.2.1. Автоматическая электромеханическая характеристика

Представим исходную электромеханическую характеристику, полученную из справочника, в вид табл. П.5 (П-приложение).

Автоматическая электромеханическая характеристика на параллельном соединении ТЭД при полном поле изображена на рисунке 4.2.

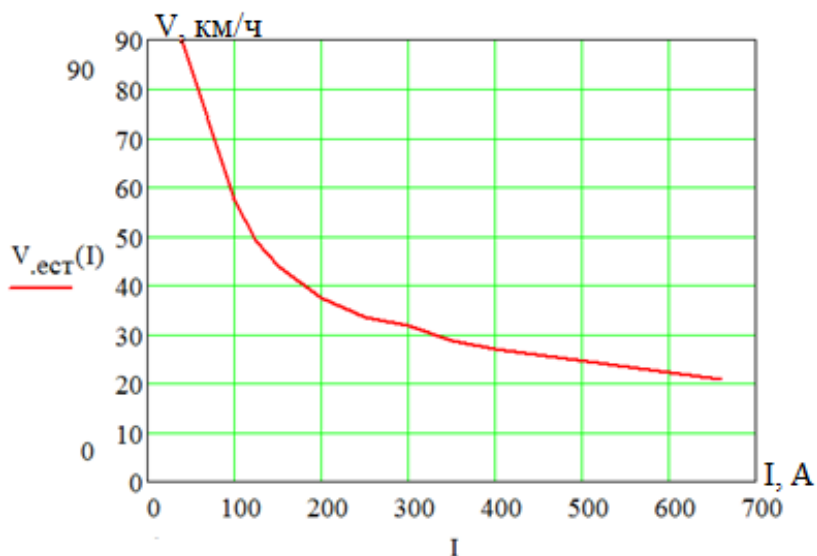


Рис. 4.2. Автоматическая электромеханическая характеристика на параллельном соединении ТМ при полном поле

Для построения электромеханических характеристик на обode колеса необходимо построить безреостатную электромеханическую характеристику при последовательном соединении ТМ, то есть электромеханическую характеристику при измененном значении напряжения:

$$V_{cc} = V_{полн} \cdot \frac{U_{cc} - I \cdot R_{ТМ}}{U_{пс} - I \cdot R_{ТМ}} \quad (4.7)$$

где $V_{полн}$ - скорость, которая определяется по известной характеристике $V_{ест}(I)$ при напряжении U и токе I ;

V_{cc} - скорость, которую необходимо найти при измененном напряжении U_{cc} и том же токе I .

В данном случае $U_{пс} = 375$ В – напряжение на двигателе при параллельном соединении $U_{ксп} = 750$ В.

$U_{cc} = 750/4 = 187,5$ В (напряжение на двигателе при последовательном соединении ТМ).

В расчетах сопротивление двигателя:

$$R_{ТМ} = R_{я} + R_{д.п} + R_{в} = 0,041 + 0,0135 + 0,045 = 0,0995 \text{ Ом} \quad (4.8)$$

Получаем безреостатную электромеханическую характеристику, представленную на рис. 4.3.

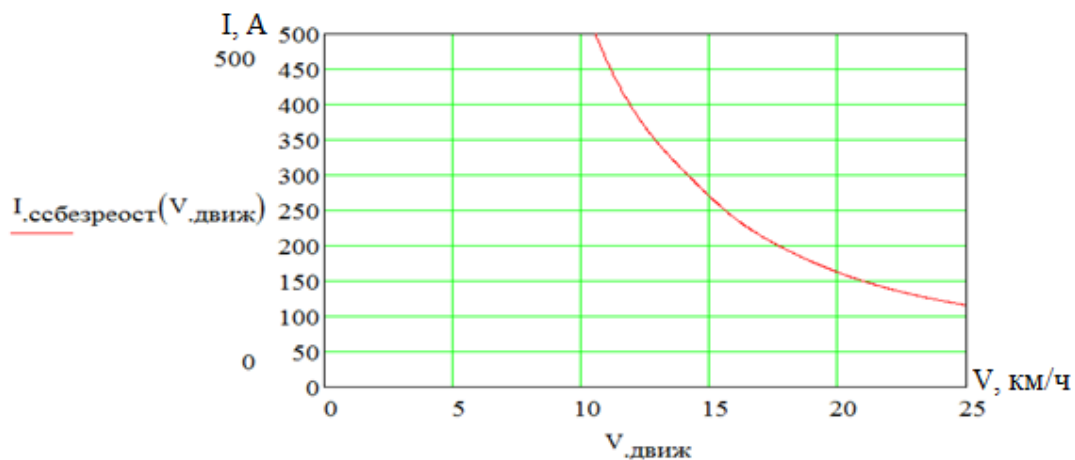


Рис. 4.3. Безреостатная электромеханическая характеристика при последовательном соединении ТМ

Характеристика $F_{cc}(I)$ при новом напряжении принимается той же, что и при напряжении U .

Характеристика $\eta_{in}(I)$ при U_{in} рассчитывается по выражению:

$$\eta_{cc} = 1 - (1 - \eta_{\varepsilon}) \frac{U_{cc}}{U_{nc}} - \frac{I \cdot R_{TM}}{U_{cc}} \left(1 - \frac{U_{cc}^2}{U_{nc}^2}\right) \quad (4.9)$$

где : η - КПД при напряжении U и токе I ; η_{cc} - КПД при напряжении U_{cc} и токе I .

Результаты расчета приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Электромеханические характеристики ТМ при изменении напряжении

I_d, A	$V, \text{ км/ч}$	F_d, H	$\eta, \%$	$V_{cc}, \text{ км/ч}$	$\eta_{cc}, \%$
100	57,5	1860	82,5	27.966	87,27
125	49	2790	84,5	23.66	87,275
150	43,8	3920	85,5	20.992	86,78
200	37,5	6220	86,4	17.699	85,24
250	33,6	8720	86	15.606	83,05
300	31,9	11270	85,5	14.159	80,81
350	28,7	13920	84,7	12.881	78,42
400	27	16610	83,9	11.897	76,03

4.2.2.2. Электромеханические характеристики на последовательном соединении ТМ

Рассчитаем электромеханические характеристики на ободе колеса на последовательном соединении двигателей, для всех реостатных позиций.

Величины сопротивлений на каждой позиции реостатного контроллера для последовательного соединения (С-соединение) и параллельного соединения (П-соединение) на один двигатель (табл. П.6).

Расчет будет осуществляться по выражению

$$V_{\text{среост}} = V_{\text{полн}} \cdot \frac{U_{\text{сс}} - I \cdot (R_{\text{ТМ}} + R_{\text{сс}})}{U_{\text{пс}} - I \cdot (R_{\text{ТМ}} + R_{\text{сс}})} \quad (4.10)$$

$R_{\text{сс}}$ - сопротивление на каждой позиции реостатного контроллера на последовательном соединении

С помощью программы Mathcad представим алгоритм расчета для двухреостатных позиций на последовательном соединении (рис. П.7).

Аналогичный алгоритм расчет производится для всех сопротивлений реостатных позиция, изменяя значения сопротивлений соответствующих каждой позиции, график реостатных характеристик на последовательном соединении изображен на рисунке П.7.

4.2.2.3. Электромеханические характеристики на параллельном соединении ТМ

Сначала, определим кривую намагничивания. Воспользуемся выражением:

$$\text{сФ} = \frac{U_{\text{пс}} - I \cdot R_{\text{ТМ}}}{V} \quad (4.11)$$

Все расчетные значения при изменении тока сведены в табл. 3.4.

Таблица 4.3

I	100	125	150	200	250	300	350	400
сФ	6,35	7,40	8,22	9,47	10,42	10,82	11,85	12,41

По данным таблицы строим нагрузочную характеристику (рис. 4.4)

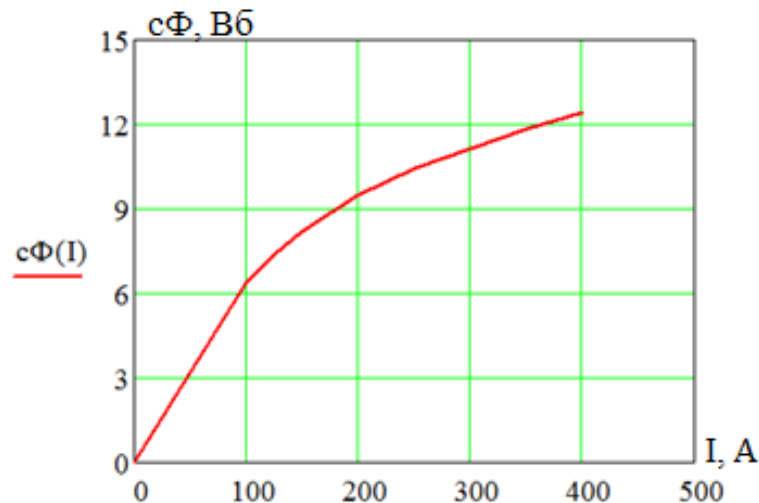


Рис. 4.4. Нагрузочная характеристика ТМ ДК-117

Рассчитаем электромеханические характеристики на ободе колеса на параллельном соединении двигателей, для всех реостатных позиций.

Расчет будет осуществляться по выражению

$$V_{\text{псреост}} = \frac{U_{\text{пс}} - I \cdot (R_{\text{ТМ}} + R_{\text{пс}})}{сФ} \quad (4.12)$$

$R_{\text{пс}}$ – сопротивление на каждой позиции реостатного контроллера на параллельном соединении двигателей

$сФ$ – значение магнитного потока определяется по нагрузочной характеристике, которая изображена на рисунке 4.4.

С помощью программы Mathcad представим алгоритм расчета для двух реостатных позиций и для безреостатной позиции на параллельном соединении (результаты расчета в приложении рис. П.8).

Аналогичный алгоритм расчет производится для всех сопротивлений реостатных позиция, изменяя значения сопротивлений соответствующих каждой позиции. Электромеханические характеристики при ослабления поля на параллельном соединении для значений коэффициента $\beta = 0.8, 0.5, 0.35$ (рис.4.5.)

$$V_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{пс}} - I \cdot R_{\text{оп}}}{сФ(\beta \cdot I)} \quad (4.13)$$

$$F_{\text{оп}} = 3,6 \cdot I \cdot сФ(\beta \cdot I) \cdot \eta \quad (4.14)$$

Где: $V_{\text{оп}}$ – скорость при ослаблении магнитного поля;

$F_{\text{оп}}$ – сила тяги при ослаблении магнитного поля;

$R_{\text{оп}}$ – Суммарное сопротивление, приходящееся на одну ТМ при ослаблении магнитного поля:

$$R_{\text{оп}} = R_{\text{я}} + R_{\text{д.п}} + \beta \cdot R_{\text{в}} \quad (4.15)$$

$сФ(\beta \cdot I)$ – Магнитный поток при токе $\beta \cdot I$

Расчет и реостатные характеристики на параллельном соединении представлены на рис. П.9, П.10 в приложении

На рис. 4.6. представлена зависимость скорости движения от тока ТМ.

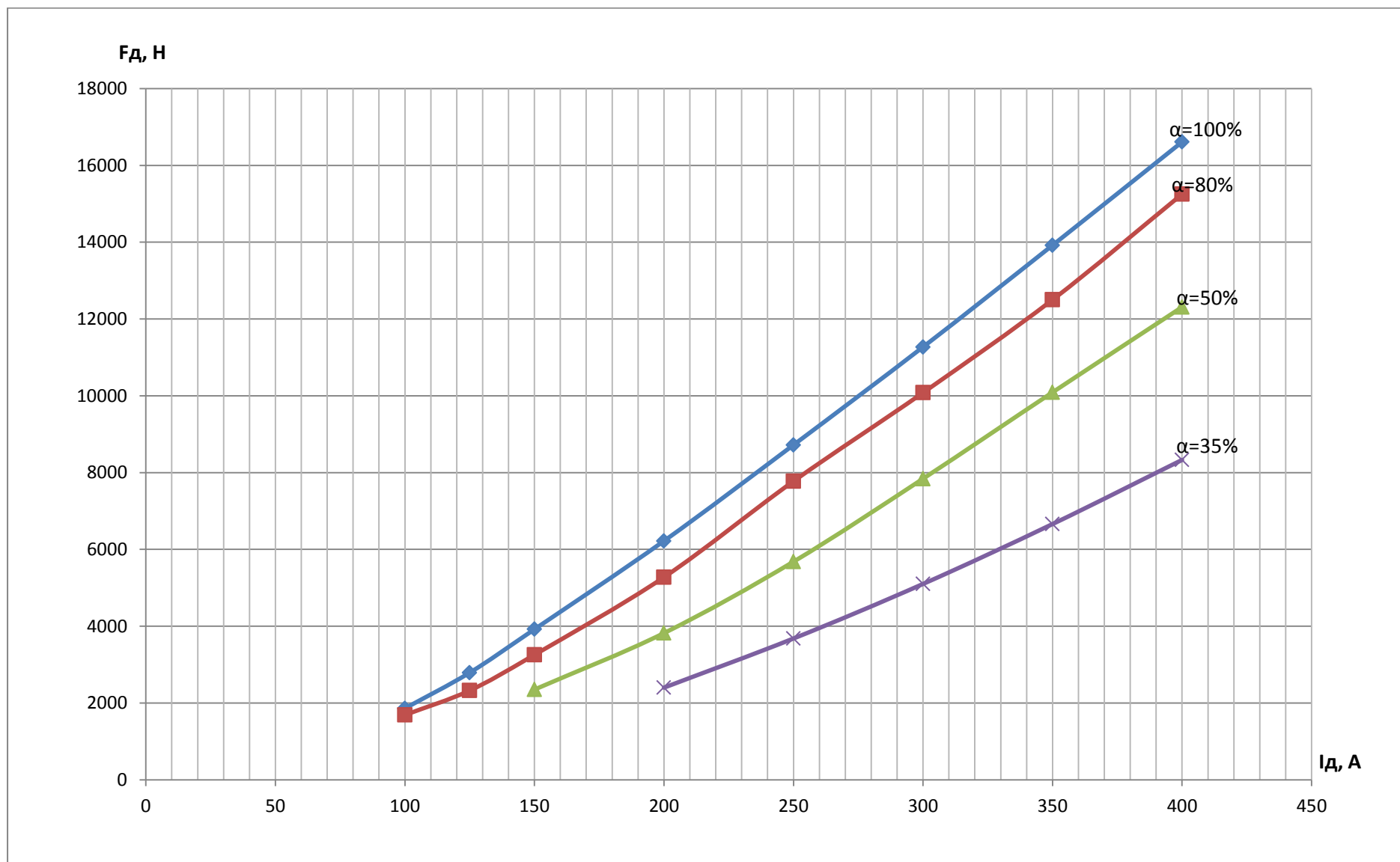


Рис. 4.5. Электромеханические характеристики при ослаблении поля

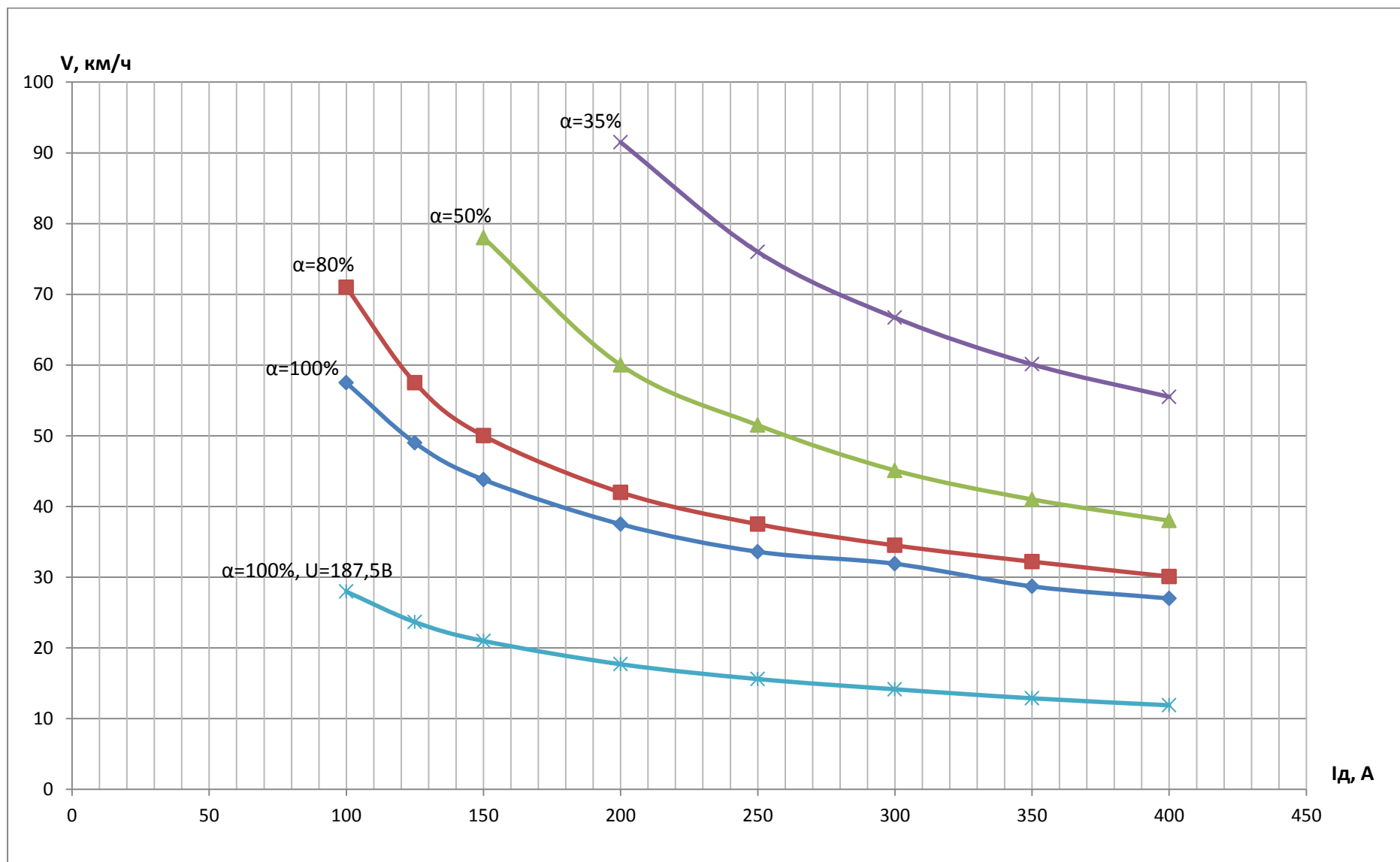


Рис. 4.6. Зависимость скорости движения от тока электродвигателя при ослаблении поля

4.2.3. Определение пускового тока. Режим пуска

Средний пусковой ток рассчитываем по формуле:

$$I_{\text{п}} = \frac{I_{\text{п макс}}}{(1 + k_I) \cdot k_3} \quad (4.16)$$

где k_I - относительное значение пульсаций пускового тока; k_3 – коэффициент запаса.

Для вагонов метро $k_I = 0,05 \dots 0,07$, $k_3 = 1,05$.

Под $I_{\text{п макс}}$ понимают меньшее значение тока, определяемое из условия максимально допустимого тока для данного двигателя $I_{\text{макс}}$ и из условия сцепления колеса с рельсом:

$$I_{\text{п макс}} \leq I_{\text{макс}},$$

$$I_{\text{п макс}} \leq I_{\text{сц.}}$$

где $I_{\text{макс}} = 2 \cdot I_{\text{ч}}$ в соответствии с ГОСТ на тяговые электродвигатели.

Для двигателя ДК-117:

$$I_{\text{макс}} = 2 \cdot 330 = 660 \text{ А}$$

Максимальный ток $I_{\text{сц}}$ определяется по $F_{\text{п макс}}$ и электромеханическим характеристикам для полного поля.

$$F_{\text{п макс}} \leq 1000 \cdot G_{\text{п макс}} \cdot \psi = 22410 \text{ Н} \quad (4.17)$$

где, расчетное значение коэффициента сцепления для метрополитена $\psi = 0,2$. Сцепной вес поезда находим как произведение массы поезда с пассажирами (считаем, что вагоны максимально заполнены, средняя масса пассажира – 70 кг) на ускорение свободного падения.

Принимаем $I_{\text{п макс}} = 400 \text{ А}$. Из электромеханической характеристики (рис. 3.7) для полного поля находим значение силы, соответствующее этому току $F = 16610 \text{ Н}$. Выбранное значение тока $I_{\text{п макс}}$ удовлетворяет обоим условиям.

Находим средний пусковой ток:

$$I_{\text{п}} = \frac{400}{(1 + 0,06) \cdot 1,05} \approx 360 \text{ А}$$

Режим пуска на электромеханические характеристики двигателя наносится исходя из следующих положений. Пусковой ток, равный $I_{\text{п}}$ и ограниченный по условию $I_{\text{макс}}$, вплоть до выхода на автоматическую характеристику полного поля, остается постоянным. Далее происходит переход на позиции ослабленного поля. Переход с одной позиции ослабленного поля на другую происходит таким образом, чтобы скачок тока при переходе не превосходил $I_{\text{п макс}}$. Скоростные характеристики с нанесенными на них режимом пуска изображены на рис. П.11 в приложение.

4.2.4. Расчет тяговых характеристик и построение кривой потребляемого поездом тока

Тяговые характеристики поезда $F_{\text{л}} = f(V)$ (рис. П.12) строятся на основании электромеханических характеристик двигателя. Скорость переносится без изменения, а сила тяги поезда определяется по формуле:

$$F_{\text{л}} = F_{\text{д}} \cdot Z_{\text{М}} \cdot n_{\text{в}} \quad (4.18)$$

где $Z_{\text{М}} = 32$ - число обмоточных осей вагона, $n_{\text{в}} = 8$ – количество вагонов.

Режим пуска на тяговые характеристики наносится переносом режима пуска с электромеханических характеристик.

Все необходимые для построения данные представлены в табл. П.13 и П.14.

Кривая потребляемого тока $I_{\text{л}} = \varphi(V)$ (рис. П.14) строится на основании электромеханических характеристик с учетом нанесенного режима пуска:

$$I_{\text{л}} = I \cdot Z_{\text{П}} \cdot n_{\text{в}} \quad (4.19)$$

где $Z_{\text{П}}$ - число параллельно соединенных двигателей одного моторного вагона. При переходе с последовательного соединения двигателей на параллельное величина тока поезда удваивается. Скорость движения, при которой происходит это изменение, определяется пересечением кривой пускового тока и скоростной характеристики, соответствующей напряжению на двигателе $U_1 = 175$ В, и равна 12,6 км/ч. Данные для построения кривой тока двигателя и кривой тока, потребляемого поездом, представлены в табл. П.12.

4.2.5. Расчет тормозных характеристик

Торможение ЭПС осуществляется в три этапа: сначала рекуперативное торможение до некоторой скорости, которая подлежит определению, затем реостатное, и электромеханическое дотормаживание до полной остановки. При рекуперативном торможении последовательная обмотка возбуждения подключается к независимому источнику питания (получаем ТМ с независимым возбуждением), т.к. ТМ последовательного возбуждения не может обеспечить рекуперацию энергии. Торможение начинается на параллельном соединении ТМ.

Расчет характеристик удельных тормозных сил при механическом торможении $b(V)$ (Н/кН) производится по выражению:

$$b = 1000 \varphi_k \theta \quad (4.20)$$

где, значение расчетного коэффициента трения φ_k определяется по выражению:

$$\varphi_k = 0,36 \frac{V + 150}{2V + 150} \quad (4.21)$$

$$\text{тормозной коэффициент поезда определяется: } \theta = \frac{\sum K}{G} \quad (4.22)$$

где, $\sum K$ - суммарное нажатие колодок

Наибольшее суммарное нажатие колодок $\sum K_{\text{макс}}$ ограничено условиями сцепления колеса и рельса и характеризуется коэффициентом нажатия тормозных колодок:

$$\delta = \frac{\sum K_{\text{макс}}}{G_T} \quad (4.23)$$

Так как вагоны метро – моторные и все колеса имеют механические тормоза, то $G = G_T$ и $\theta_{\text{макс}} = \delta$, т.е. наибольший тормозной коэффициент поезда равен коэффициенту нажатия (при экстренном торможении).

Для вагонов метро $\theta_{\text{макс}} = \delta = 0,55$. При рабочем нажатии колодок тормозной коэффициент принимается равным $0,75 \cdot \theta_{\text{макс}} = 0,75 \cdot 0,55 = 0,4125$.

Таким образом, тормозная сила при рабочем и экстренном торможении $b(V)$, $b_z(V)$ определяются по (4.24) и (4.25)

$$b(V) = 1000 \cdot 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2V + 150} \cdot 0,4125 \quad (4.24)$$

$$b_э(V) = 1000 \cdot 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2V + 150} \cdot 0,55 \quad (4.25)$$

Результаты расчета приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Удельная тормозная сила метро при рабочем и экстренном торможении

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b, Н/кН	148,5	139,8	132,9	127,3	122,7	118,8	115,5	112,7	110,2	108
bэ, Н/кН	198,0	186,4	177,2	169,7	163,6	158,4	154,0	150,2	146,9	144,0

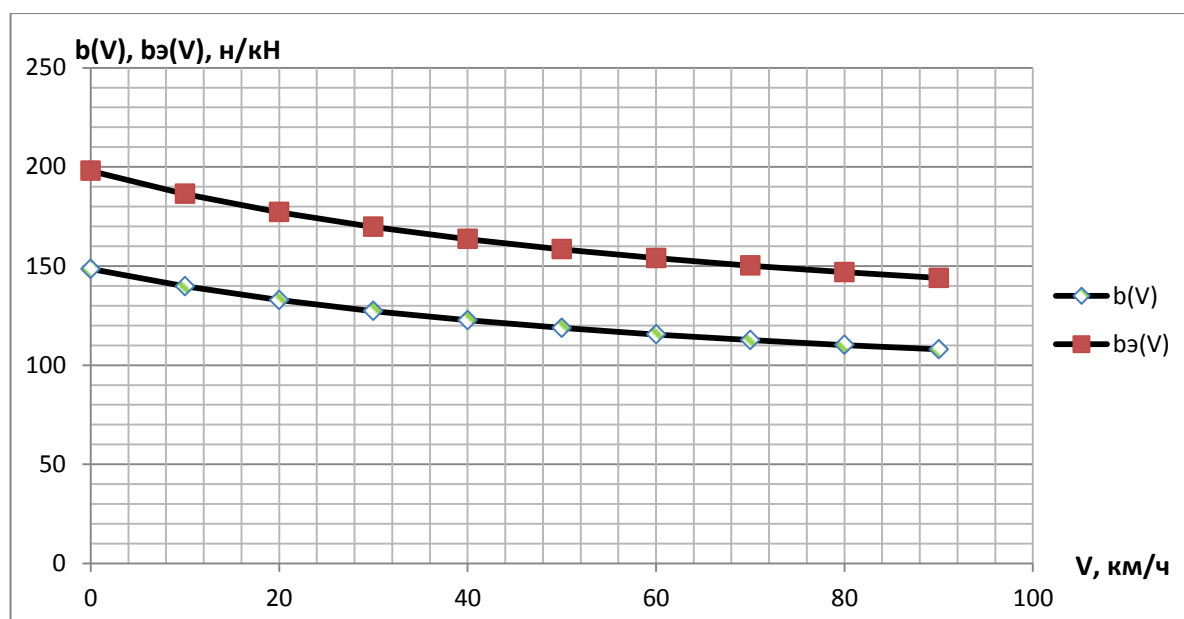


Рис. 4.7. Тормозные характеристики при механическом торможении

Удельная действующая тормозная сила при максимальном нажатии колодок (100% нажатии) зависит от скорости так:

$$b_э + w_{обт} = \varphi(V) \quad (4.26)$$

Результаты расчета приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 - Удельная действующая тормозная сила при максимальном нажатии колодок

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
bэ, Н/кН	198,0	186,4	177,2	169,7	163,6	158,4	154,0	150,2	146,9	144,0
w _{обт}	1,91	2,22	2,64	3,18	3,84	4,62	5,51	6,51	7,64	8,88
bэ + w _{обт}	199,91	188,57	179,8	172,9	167,41	163,02	159,51	156,72	154,54	152,88

4.2.6. Определение допустимой скорости движения расчетным методом

Задаем отрезки скорости ΔV (не более 10 км/ч), на каждом отрезке ΔV_i определяем $(b_{\Sigma} + w_{обт})_{cp}$, а расчет проводится следующими формулами:

$$\Delta l = \frac{7,87(1 + \gamma)v_{cp}\Delta v}{(b_{\Sigma} + w_{обт})_{cp}} \quad (4.27)$$

Результаты расчета для значений уклонов $i = 0$ приведены в **табл. П.15**.

На диаграмме $V = \varphi(l)$ (рис. 4.8) по оси абсцисс в выбранном масштабе пути складывают значение расчетного тормозного пути l_{pT} и из точки O в обратном порядке (от $V=0$) графическим методом строят кривые торможения $V = \varphi(l)$ для значения уклонов: $i = 0$.

Для учета подготовительного пути достаточно для любой скорости V отложить от оси ординат отрезок $l_{п} = V \cdot t_{п}/3,6$ и соединить его с точкой O . Ординаты точек пересечения этой прямой и кривых $V = \varphi(l)$ определяют наибольшие скорости, допустимые на соответствующих участках пути.

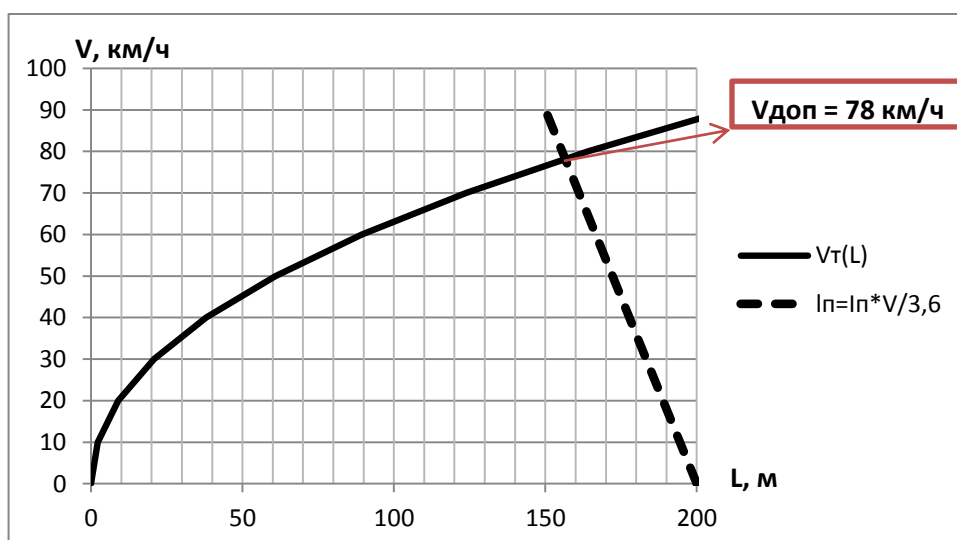


Рис. 4.8. Определение допустимой скорости движения

4.2.7. Построение характеристик удельных действующих сил

Характеристика сил, действующих на поезд в режиме тяги, строится путем вычитания при одной и той же скорости ординат кривой основного удельного сопротивления при движении под током из ординат удельной тяговой характеристики, рассчитываемой по уравнению:

$$f_{\text{л}} = \frac{F_{\text{л}}}{G} \text{ и } f = f_{\text{л}} - w_0(T) \quad (4.28)$$

Результаты расчета для значений уклонов $i = 0$ приведены в табл. П.14.

Характеристика сил, действующих на поезд в режиме торможения, строится путем сложения при одной и той же скорости ординат кривых основного удельного сопротивления при движении без тока и $b(V)$ в случае механического торможения.

$b(V)$ определяется при рабочем нажатии колодок.

$$f_{\text{т}} = b + w_0(bT) \quad (4.29)$$

Результаты расчета приведены в табл. П.17

Характеристика сил, действующих на поезд в режиме выбега:

$$f_{\text{в}} = w_0(bT) \quad (4.30)$$

Результаты расчета приведены в табл. П.18

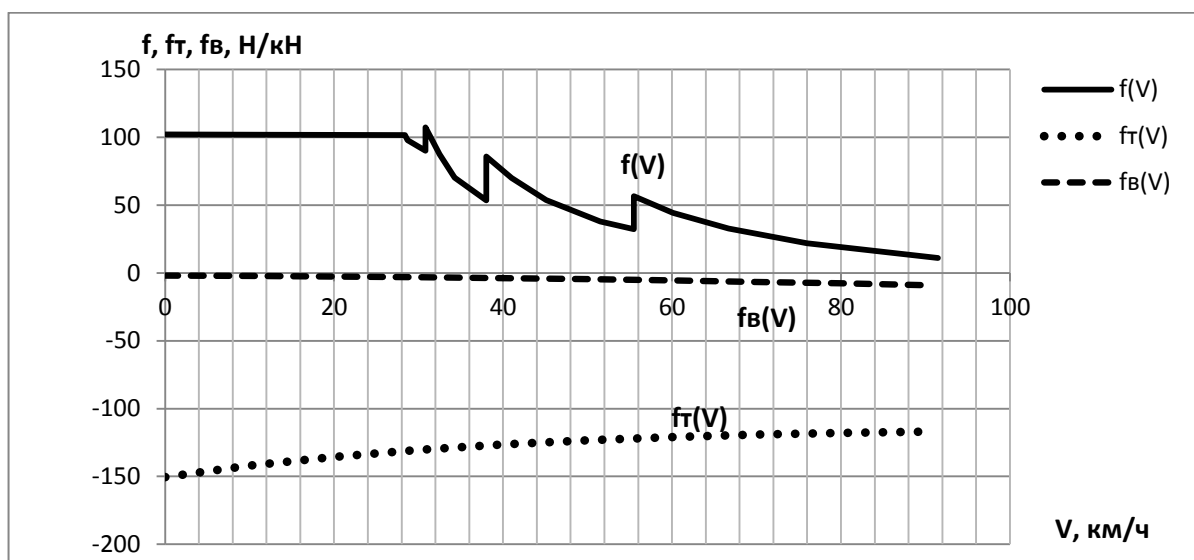


Рис. 4.9. Зависимость действующих сил на поезд в режимах тяги, торможения и выбега от скорости движения

4.2.8. Построение кривых движения

Для построения кривых движения воспользуемся расчетным методом. Кривые удельных действующих сил разбивают на интервалы ΔV , для каждого из которых вычисляют значение средней удельной действующей силы $f_{\text{д,ср}}$, средней скорости движения на интервале $V_{\text{ср}}$, которые и используются в дальнейших расчетах приращений времени и пути.

Приращения времени вычисляют по выражению:

$$\Delta t = \frac{28,3(1 + \gamma)\Delta V}{f_{\text{д.ср}}}, \text{с} \quad (4.31)$$

где: $(1 + \gamma) = 1,065$ – коэффициент инерции вращающихся частей.

Приращения пути вычисляют по выражению:

$$\Delta l = \frac{V_{\text{ср}}\Delta t}{3,6}, \text{м} \quad (4.32)$$

Результаты расчета приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Расчет пути и времени для построения кривых движения

№	ΔV , км/ч	V , км/ч	$V_{\text{ср}}$, км/ч	f_g , Н/кН	Δt , с	T , с	Δl , м	L , м	режим
1	12,6	12,6	6,3	102,1	3,72	3,72	6,5	6,5	тяга
2	7,4	20	16,3	102	2,19	5,91	9,9	16,4	тяга
3	8,4	28,4	24,2	101	2,51	8,41	16,9	33,3	тяга
4	0,3	28,7	28,55	99,3	0,09	8,50	0,7	34,0	тяга
5	2,1	30,8	29,75	94	0,67	9,18	5,6	39,5	тяга
6	1,7	32,5	31,65	97,4	0,53	9,70	4,6	44,2	тяга
7	5,5	38	35,25	65,77	2,52	12,22	24,7	68,9	тяга
8	3	41	39,5	77,97	1,16	13,38	12,7	81,6	тяга
9	4,1	45,1	43,05	61,84	2,00	15,38	23,9	105,5	тяга
10	6,4	51,5	48,3	45,82	4,21	19,59	56,5	162,0	тяга
11	4	55,5	53,5	35,137	3,43	23,02	51,0	212,9	тяга
12	4,6	60,1	57,8	50,475	2,75	25,77	44,1	257,0	тяга
13	6,6	66,7	63,4	38,544	5,16	30,93	90,9	347,9	тяга
14	9,3	76	71,35	27,273	10,28	41,21	203,7	551,6	тяга
15	3	78	77	22,5	2,68	43,89	57,3	608,9	тяга
16	10	68	73	6,522	46,21	90,10	937,1	1546,0	выбег
17	8	60	64	120,19	2,01	92,10	35,7	1581,7	торм.
18	10	50	55	122,2	2,47	94,57	37,7	1619,3	торм.
19	10	40	45	124,95	2,41	96,98	30,2	1649,5	торм.
20	10	30	35	128,5	2,35	99,33	22,8	1672,3	торм.
21	10	20	25	133	2,27	101,59	15,7	1688,0	торм.
22	10	10	15	138,75	2,17	103,77	9,1	1697,1	торм.
23	10	0	5	146,2	2,06	105,83	2,9	1700,0	торм.

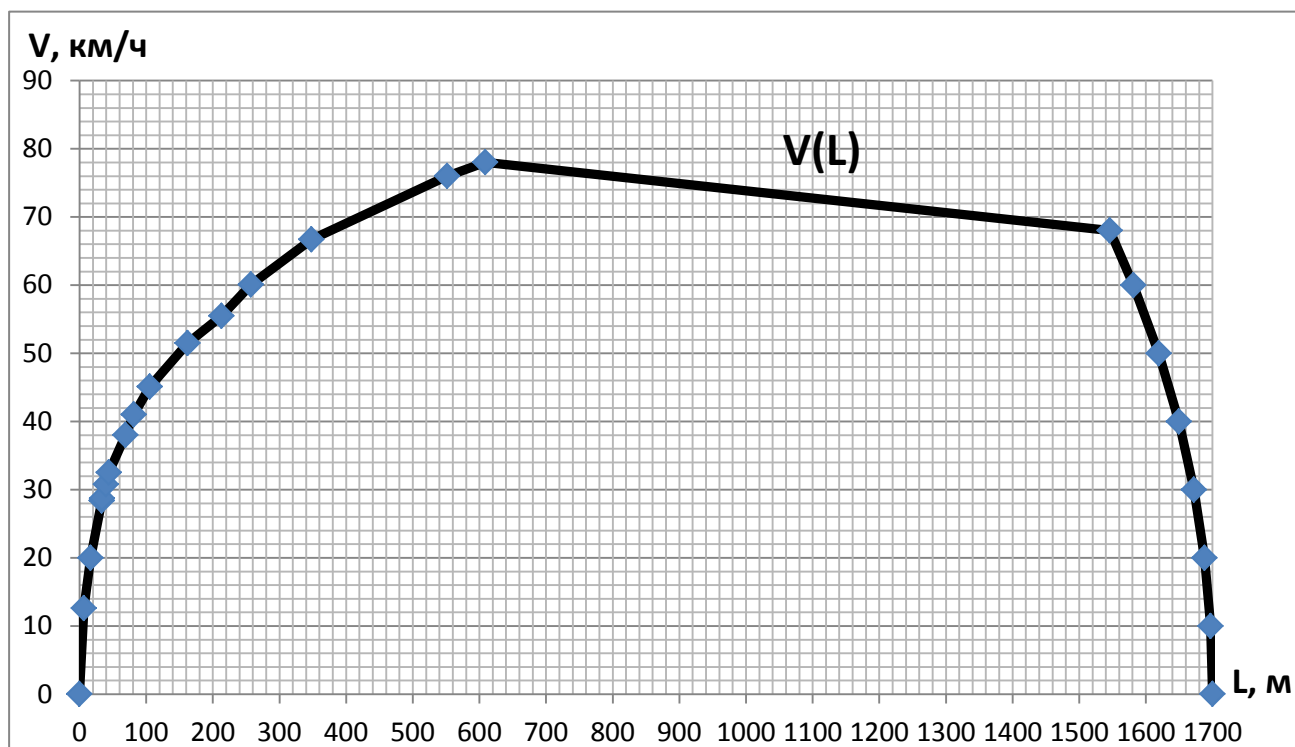


Рис. 4.10. Кривая движения $V(L)$ вагона метро с ТЭП постоянного тока ПВ

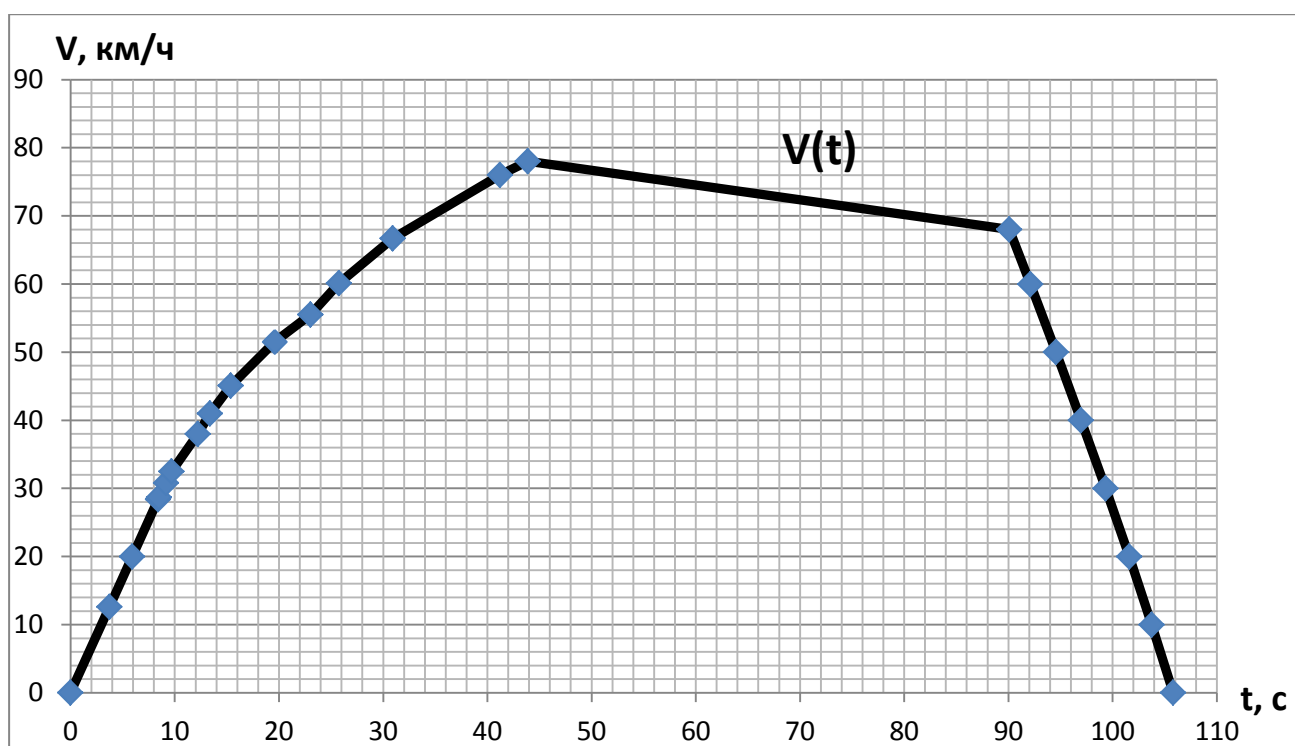


Рис. 4.11. Кривая движения $V(t)$ вагона метро с ТЭП постоянного тока ПВ

Определяем по кривым движения величину средней скорости движения по перегону $V_{\text{пер}}$, пускового ускорения $a_{\text{п}}$ и тормозного замедления $a_{\text{т}}$:

$$V_{\text{пер}} = \frac{3,6 \cdot L}{T_{\text{пер}}} = \frac{3,6 \cdot 1700}{105,83} = 57,83 \text{ (км/ч)} \quad (4.33)$$

$$a_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^2}{2 \cdot 3,6^2 l_{\text{п}}} = \frac{28,4^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 33,3} = 0,94 \text{ (м/с}^2\text{)} \quad (4.34)$$

$$a_{\text{т}} = \frac{V_{\text{т}}^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot l_{\text{т}}} = \frac{68^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 154} = 1,158 \text{ (м/с}^2\text{)} \quad (4.35)$$

где: $L = 1700$ м – длина перегона;

$T_{\text{пер}} = 105,83$ с – время движения поезда по перегону;

$V_{\text{п}} = 28,4$ км/ч, $l_{\text{п}} = 33,3$ м – скорость и длина пути, проходимого поездом до выхода на автоматическую характеристику при полном поле;

$V_{\text{т}} = 68$ км/ч, $l_{\text{т}} = 1700 - 1546 = 154$ м – тормозная скорость и путь торможения.

4.2.9. Определение расхода энергии на движение поезда

Расход электрической энергии может быть определен по кривым движения либо путем расчета отдельных составляющих по аналитическим выражениям.

По кривым движения расход энергии определяют по выражению:

$$A = U_{\text{кв}} \int_0^T I_3 dt \quad (4.36)$$

Отсюда,

$$A = \frac{1}{\eta_{\text{тс}} \eta_{\text{п/ст}}} \left\{ \frac{U_{\text{кв}}}{3600} \left[\left(\sum I_{\text{л.ср}} \Delta t \right)_{\text{тяг}} - \left(\sum I_{\text{л.ср}} \Delta t \right)_{\text{рек}} \right] + \frac{P_{\text{сн}}}{3600} (T_{\text{пер}} + T_{\text{ост}}) \right\}$$

где, по [98]: $\eta_{\text{тс}} = 0,93$ – средний КПД тяговой сети;

$\eta_{\text{п/ст}} = 0,95$ – средний КПД тяговой подстанции;

$P_{\text{сн}} = 3$ кВт – мощность нагрузки собственных нужд;

$T_{\text{пер}}$ – время движения поезда по перегону;

$T_{\text{ост}} = 25$ с – время остановки для метрополитена;

$U_{\text{кв}} = 750$ В – среднее напряжение в контактной сети.

Таблица 4.7 - Произведения $I_{л.ср} \cdot t_i$ для расчета расхода энергии движения

п/п	$\Delta t, c$	t, c	$I_{л.ср}, A$	$I_{л.ср} \Delta t, A \times c$	$I_{л.ср}^2 \cdot \Delta t, A^2 \times c$
1	3,72	3,72	2880	10711	30846874
2	2,19	5,91	5760	12597	72559411
3	2,51	8,41	5760	14440	83176243
4	0,09	8,50	5680	517	2935878
5	0,67	9,18	5440	3661	19916493
6	0,53	9,70	6000	3156	18936000
7	2,52	12,22	4400	11088	48787200
8	1,16	13,38	6000	6960	41760000
9	2,00	15,38	5200	10390	54025920
10	4,21	19,59	4400	18524	81505600
11	3,43	23,02	3840	13175	50592154
12	2,75	25,77	6000	16482	98892000
13	5,16	30,93	5200	26837	139553440
14	10,28	41,21	4400	45219	198962720
15	4,35	45,56	3904	16982	66299290
$\sum I_{л.ср} \Delta t$				210739	
$\sum_{T_{уч}} I_{л.ср}^2 \cdot \Delta t$					1008749222

Тогда

$$A = \frac{1}{0,93 \cdot 0,95} \left[\frac{750}{3600} \cdot 210739 + \frac{3 \cdot 10^3}{3600} (105,83 + 25) \right] = 49819 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Удельный расход энергии на движение по горизонтальному профилю:

$$A_{удел.} = \frac{U_{кc} \int_0^T I_3 dt}{\eta_{п/ст} \eta_{тс} \cdot m \cdot L} \quad (4.37)$$

$$A_{уд1} = \frac{A}{m \cdot L \cdot 10^{-3}} = \frac{49819}{456,8 \cdot 1700 \cdot 10^{-3}} = 64,16 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$$

Определение расхода энергии на движение поезда аналитическим методом

При аналитическом методе расход энергии определяется отдельных составляющих:

$$A = A_w + A_i + A_T + A_\eta + A_\Pi + A_{сн} + A_{п/ст.кc} \quad (4.38)$$

$$A = \frac{1}{\eta_{п/ст} \eta_{кc}} \left(\frac{A_w + A_i + A_T}{\eta_{ср.ТЭД}} + A_\Pi + A_{сн} \right) \quad (4.39)$$

где: A_w – расход энергии на преодоление основного сопротивления движению; A_i – расход энергии на преодоление уклонов; A_T – расход энергии на торможение до остановки; A_η – расход энергии на компенсацию потерь в ТЭД; $A_{сн}$ – расход энергии на собственные нужды; A_Π – расход энергии на пуск; $A_{п/ст.кС}$ – расход энергии на тяговые подстанции и контактную сеть.

Расход энергии на преодоление основного сопротивления движению:

$$A_{w0} = 0,278 \cdot 10^{-3} G \cdot w_{0cp} \cdot L \quad (4.40)$$

где: $w_{0cp} = 5,9$ Н/кН – среднее значение основного сопротивления движению, определяется по кривой $w_0 = f(v)$ (см. рис. 3.1) для движения без тока для скорости:

$$1,1V_{cp} = \frac{1,1 \cdot L}{T} = 1,1 \frac{1700 \cdot 3,6}{105,83} = 64 \text{ км/ч} \quad (4.41)$$

$$A_{w0} = 0,278 \cdot 10^{-3} G \cdot w_{0cp} \cdot L = 0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 4481,2 \cdot 5,9 \cdot 1700 = 12495 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Расход энергии на торможение (без рекуперативного торможения):

Расход энергии определяется кинетической энергией поезда в момент начала торможения по формуле:

$$A_T = \frac{mV_T^2}{2 \cdot 3,6^2} - G(w_{0cp} + i_T)l_T \quad (4.42)$$

где: V_T – скорость поезда в момент начала торможения;

$m = \frac{1000G(1+\gamma)}{9,81}$ – приведенная масса поезда; $i_T = 0$

$$A_T = \frac{0,278 \cdot 10^{-3} G V_T^2}{2 \cdot 3,6^2} \left[\frac{1000(1 + \gamma)}{9,81} - \frac{w_{0cp} + i_T}{a_T} \right] \quad (4.43)$$

$$A_T = 24220 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Расход энергии в пусковых устройствах:

$K_\Pi = 0,5$ – коэффициент пуска для вагона метро с четырьмя двигателями.

При пуске полезная работа ТЭД затратится на создание кинетической энергии и преодоление пути.

$$A_\Pi = \frac{0,278 \cdot 10^{-3} K_\Pi G V_\Pi^2}{2 \cdot 3,6^2} \left[\frac{1000(1 + \gamma)}{9,81} + \frac{w_{0cp} + i_\Pi}{a_\Pi} \right] \quad (4.44)$$

$$A_{\Pi} = \frac{0,278 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 4481,2 \cdot 28,4^2}{2 \cdot 3,6^2} \left(\frac{1000 \cdot 1,065}{9,81} + \frac{5,9}{0,94} \right)$$

$$A_{\Pi} = 2226 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Расход энергии на собственные нужды:

$$A_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{сн}} \cdot 10^3}{3600} (T_x + T_{\text{ост}}) = \frac{3 \cdot 10^3}{3600} (105,83 + 25) = 109 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \quad (4.45)$$

Суммарный расход энергии (без рекуперативного торможения):

Суммарный расход энергии при движении метрополитена с учетом расхода энергии на КПД ТЭД ($\eta_{\text{ТЭД}} = 0,89$) и на электрические тяговые станции, подстанции ($\eta_{\text{п/ст}} = 0,95$), тяговые сети ($\eta_{\text{кс}} = 0,93$) будет равен:

$$A_{\text{сум}} = \frac{1}{\eta_{\text{п/ст}} \eta_{\text{кс}}} \left(\frac{A_w + A_i + A_T}{\eta_{\text{ср.ТЭД}}} + A_{\Pi} + A_{\text{сн}} \right) \quad (4.46)$$

$$A_{\text{сум}} = \frac{1}{0,95 \cdot 0,93} \left(\frac{12495 + 24220}{0,89} + 2226 + 109 \right) = 49335 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Удельный расход энергии (без рекуперативного торможения):

$$A_{\text{уд}} = \frac{A_{\text{сум}}}{m \cdot L \cdot 10^{-3}} = \frac{49335}{456,8 \cdot 1700 \cdot 10^{-3}} = 63,53 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}} \quad (4.47)$$

Проверка погрешности между аналитическим методом и графическим методом расчета расхода энергии:

$$\delta = \frac{|A_{\text{уд}2} - A_{\text{уд}1}|}{A_{\text{уд}1}} \cdot 100\% = \frac{|63,53 - 64,16|}{64,16} \cdot 100\% = 1,1\% \quad (4.48)$$

Погрешность δ меньше 10%, то расчет сходится.

4.3. Тягово-энергетические показатели вагона метро с асинхронными тяговыми машинами ДАТЭ-170-4У2

Все расчеты производятся для вагонов метро типа 81-717.714 с асинхронными тяговыми машинами ДАТЭ-170-4У2

Расчет отличается только типом тяговых двигателей и системой управления, в том числе, массой электрооборудования (имея при этом такой же кузов и тележки).

4.3.1. Кривые удельного основного сопротивления движению

По данным таблицы 4.1., разность массы комплекта электрооборудования вагонов с АТМ и ТМ ПТ составляет $6277 - 5600 = 677$ (кг) = 0,677(т), то при расчете, принимаем массу вагона с пассажирами $m_{в,АТМ} = m_{в,ТМ ПТ} + 0,677 = 57,777$ т

Масса поезда с пассажирами $m_{п,АТМ} = 8 \cdot m_{в,АТМ} = 462,2$ Кн

Вес вагона с пассажирами $G_{в,АТМ} = 9,81 \cdot m_{в,АТМ} = 566,8$ кН

Количество вагонов поезда $n_{в} = 8$

Вес поезда с пассажирами $G_{п,АТМ} = 8 \cdot G_{в,АТМ} = 4534,3$ кН

Рассчитаем и построим кривые удельного основного сопротивления движению (рис. 4.12) по выражению (4.5) и (4.6).

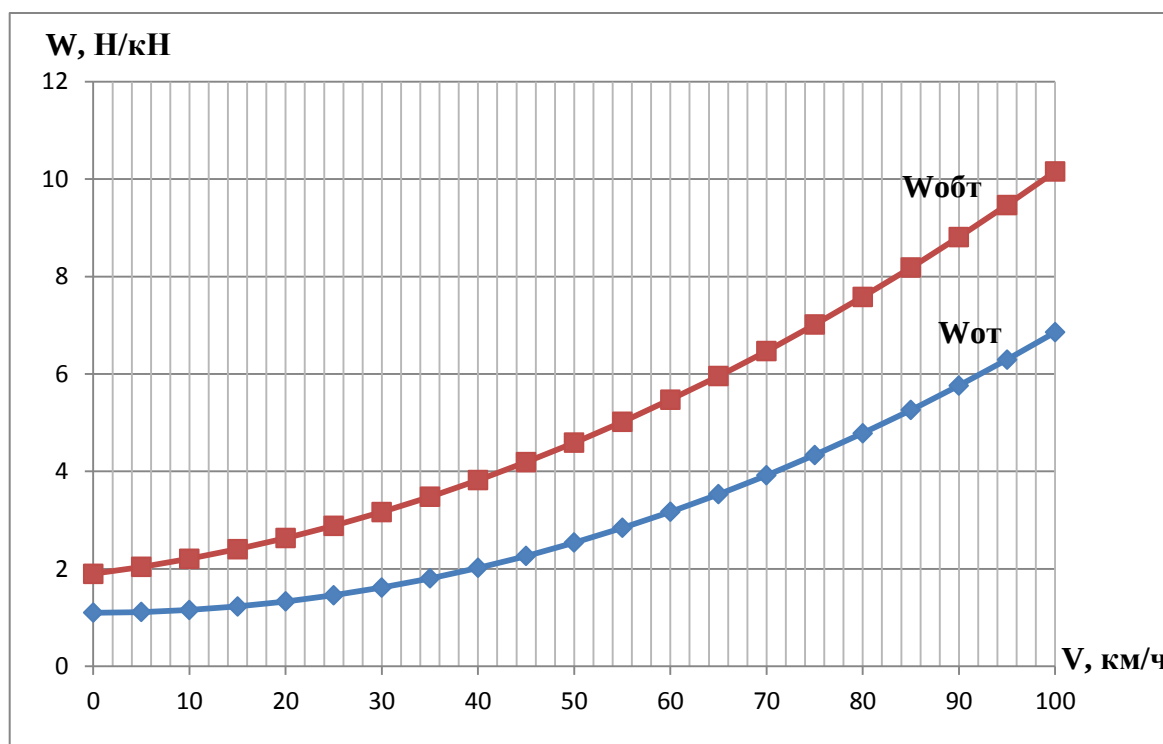


Рис. 4.12. Кривые удельного основного сопротивления движению поезда с АТМ

4.3.2. Построение тягово-тормозных характеристик и кривых мощности и момента

Данные характеристики двигателя ДАТЭ-170-4У2 (компания ALSTOM) приведены в приложении. Учитывая данные условия, рассчитаем и построим

тягово-тормозные характеристики двигателя $F(V)$, $B(V)$, кривые суммарной электромагнитной мощности двигателей $P(V)$ и кривые момента $M(V)$ по выражениям:

$$n = \frac{V \cdot \mu}{0,1885 \cdot D_k} \quad (1/\text{мин}) \quad (4.49)$$

$$M = \frac{1000 \cdot F \cdot D_k}{2\mu \cdot \eta} \quad (\text{Н} \cdot \text{м}) \quad (4.50)$$

$$P = \frac{F \cdot V}{3,6 \cdot \eta} \quad (\text{Вт}) \quad (4.51)$$

По расчетным данным построены все характеристики и кривые двигателя в тяговом режиме и в тормозном режиме представлены на рисунке 4.13 и 4.14.

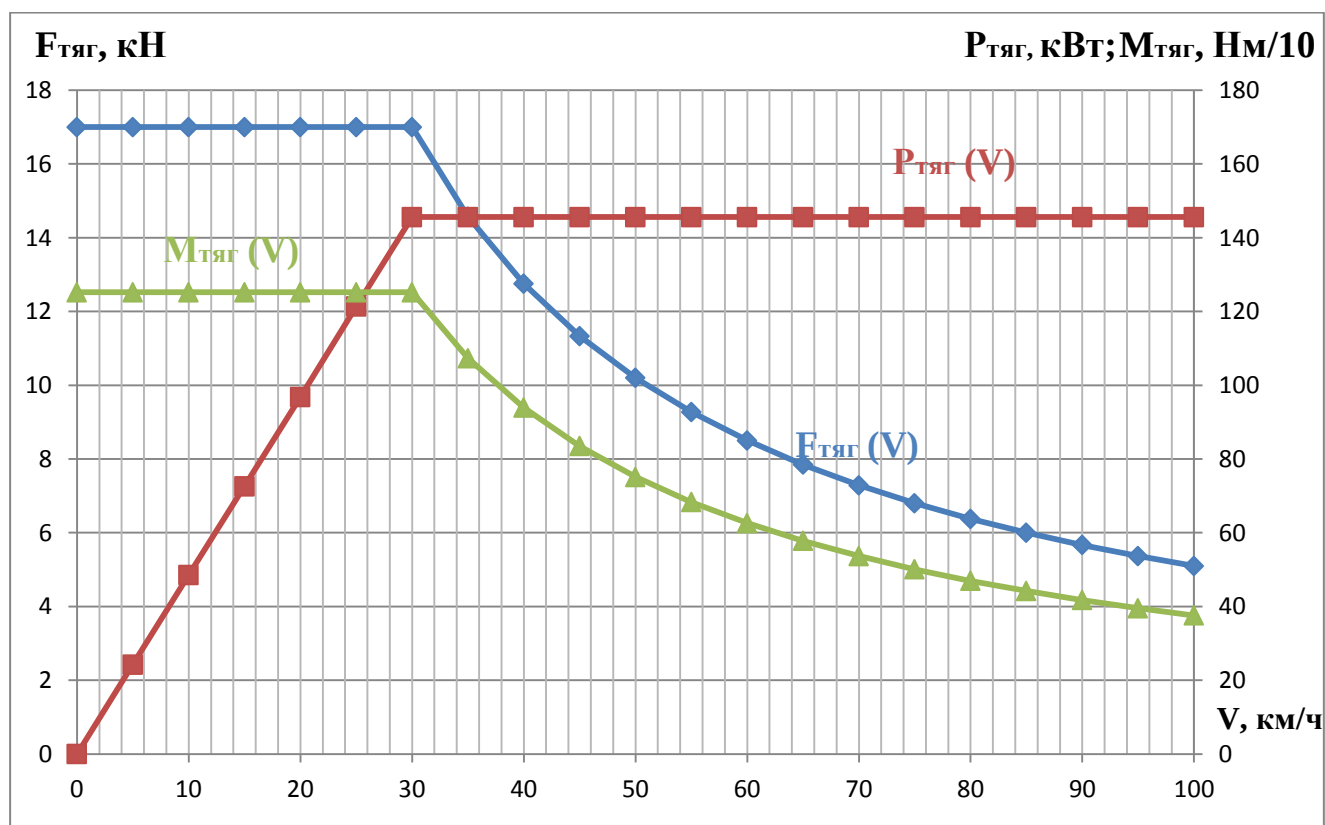


Рис. 4.13. Характеристики двигателя ДАТЭ-170-4У2 в тяговом режиме

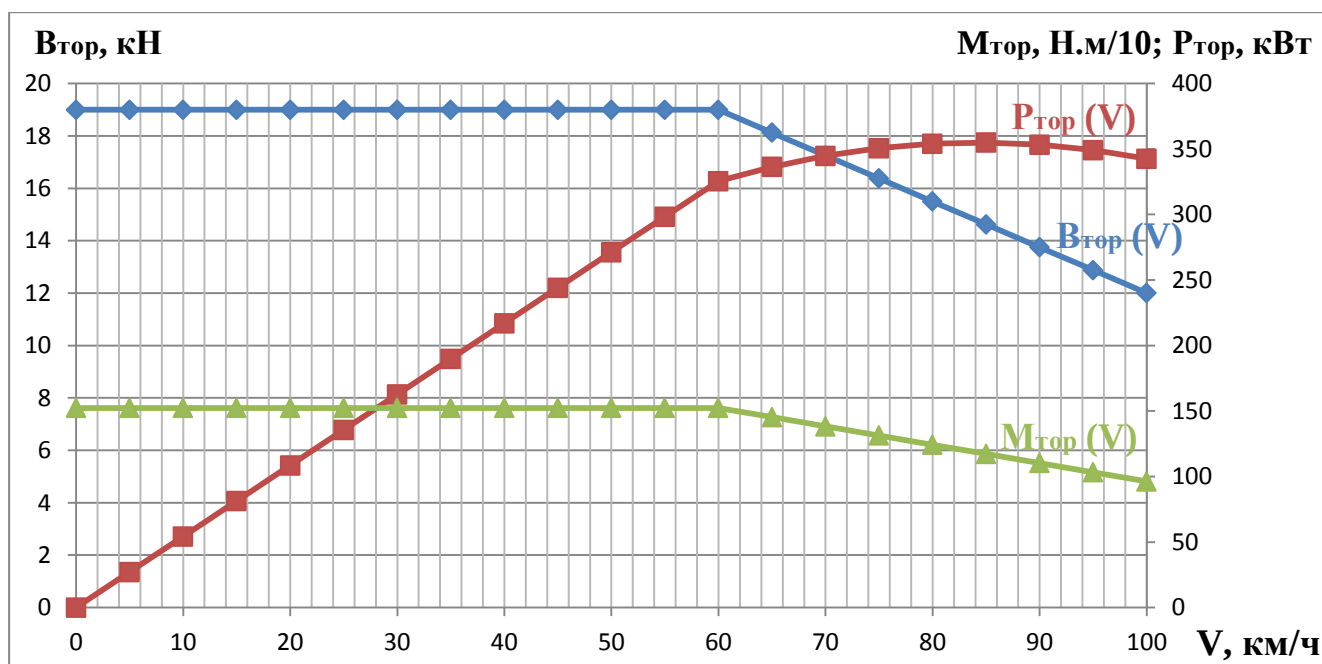


Рис. 4.14. Характеристики двигателя ДАТЭ-170-4У2 в токозном режиме

4.3.3. Расчет и построение кривой движения поезда с АТМ

Рассчитаем и построим кривые удельной действующей силы в режиме тяги, выбега и торможении по выражениям (4.28), (4.29) и (4.30).

Используя расчетный метод, построим кривые движения при помощи выражений (4.31) и (4.32). Расчетные данные занесены в таблицу П.19 (приложение). Построение производится по аналогичному предыдущему построению способу. Кривые движения изображены на рисунках (4.15.) и (4.16).

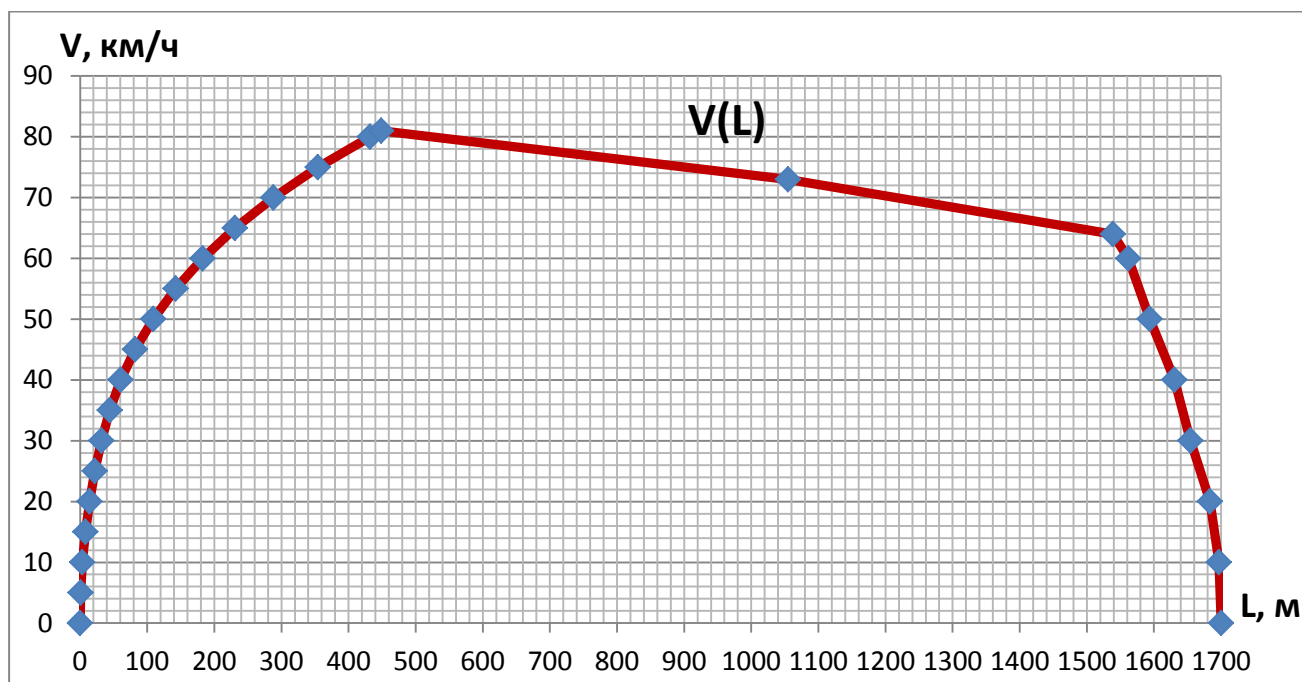


Рис. 4.15. Кривая движения $V(L)$ вагона метро с АТМ

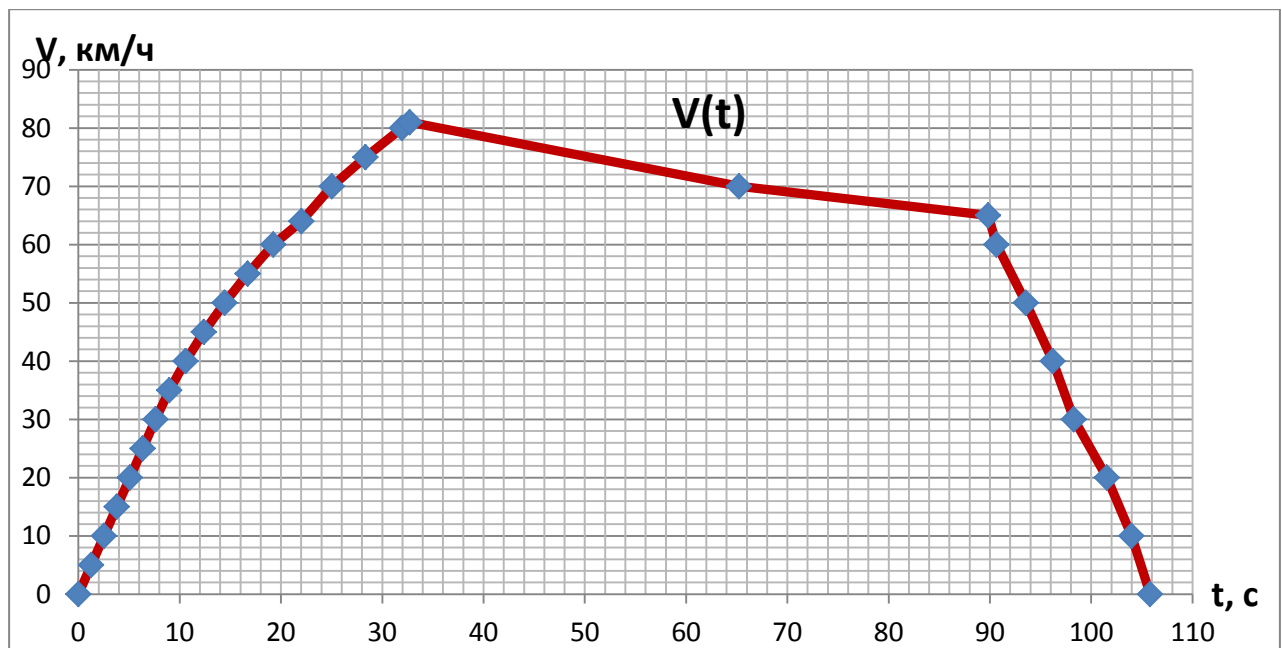


Рис. 4.16. Кривая движения $V(t)$ вагона метро с АТМ

Определяем по кривым движения величину средней скорости движения по перегону $V_{\text{пер}}$, пускового ускорения $a_{\text{п}}$ и тормозного замедления $a_{\text{т}}$:

$$V_{\text{пер}} = \frac{3,6 \cdot L}{T_{\text{пер}}} = \frac{3,6 \cdot 1700}{105,83} = 57,83 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$$

$$a_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}^2}{2 \cdot 3,6^2 l_{\text{п}}} = \frac{30^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 31,76} = 1,09 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$a_{\text{т}} = \frac{V_{\text{т}}^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot l_{\text{т}}} = \frac{65,5^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 142,1} = 1,165 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

где: $L = 1700$ м – длина перегона;

$T_{\text{пер}} = 105,83$ с – время движения поезда по перегону;

$V_{\text{п}} = 30$ км/ч, $l_{\text{п}} = 31,76$ м – скорость и длина пути, проходимого поездом до выхода на автоматическую характеристику при полном поле;

$V_{\text{т}} = 65,5$ км/ч, $l_{\text{т}} = 1700 - 1557,9 = 142,1$ м – тормозная скорость и путь торможения.

4.3.4. Расход энергии на тягу

Определим расход энергии на тягу поезда метро с помощью кривых движения. Разобьем кривую мощности за время пуска на интервалы Δt , для каждого из которых определим значение средней мощности $P_{\text{ср}}$. Определим расход энергии при помощи выражения:

$$A = \frac{1}{\eta_{тс} \cdot \eta_{п/ст}} \left(\frac{\sum P_{ср} \cdot \Delta t}{3600 \cdot \eta_{преобр.}} + A_{сн} + A_{преобр.} \right), \text{Вт} \cdot \text{ч} \quad (4.52)$$

где: $\eta_{преобр.} = 0,94$ – КПД тягового преобразователя

$\eta_{тс} = 0,93$ – КПД тяговой сети

$\eta_{п/ст} = 0,95$ – КПД тяговой подстанции

$A_{сн}$ – Расход энергии на собственные нужды

$A_{преобр.}$ – Расход энергии в преобразователях на *IGBT*

Найдем значение $\sum P_{ср} \cdot \Delta t$ при помощи таблицы 4.8 и кривой мощности (рис. 4.13). Полученные результаты занесены в таблицу 4.9

Таблица 4.9. Произведения $\sum P_{ср} \cdot \Delta t$ для расчета расхода энергии движения

№	ΔV , км/ч	V , км/ч	$V_{ср}$, км/ч	Δt , с	$P_{ср}$, Вт	$P_{ср} \cdot \Delta t$, Вт. с
0	0	0	0	0	0	0
1	5	5	2,5	1,27	48536,1	61640,84
2	5	10	7,5	1,27	145608,3	184922,5
3	5	15	12,5	1,27	242036,8	307386,7
4	5	20	17,5	1,27	338851,5	430341,4
5	5	25	22,5	1,27	436824,9	554767,6
6	5	30	27,5	1,27	533897,1	678049,3
7	5	35	32,5	1,37	582433,2	797933,4
8	5	40	37,5	1,59	582433,2	926068,7
9	5	45	42,5	1,82	582433,2	1060028
10	5	50	47,5	2,05	582433,2	1193988
11	5	55	52,5	2,28	582433,2	1327948
12	5	60	57,5	2,52	582433,2	1467732
13	5	65	62,5	2,77	582433,2	1613340
14	5	70	67,5	3,03	582433,2	1764773
15	5	75	72,5	3,31	582433,2	1927854
16	5	80	77,5	3,59	582433,2	2090935
17	1	81	80,5	0,76	582433,2	442649,2
$\sum P_{ср} \cdot \Delta t$, Вт. с						16830357
$\sum P_{ср} \cdot \Delta t$, Вт. с для поезда						134642852

4.3.4.1. Расход энергии на собственные нужды

$$A_{\text{сн}} = \frac{P_{\text{сн}} \cdot 10^3}{3600} (T_x + T_{\text{ост}}) = \frac{3,4 \cdot 10^3}{3600} (105,83 + 25) = 124 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

где, $P_{\text{сн}} = 3,4 \text{ кВт}$ – мощность потребителей собственных нужд (освещение пассажирского салона, наружные световые приборы, тормозные механизмы, для АТМ еще система охлаждения привода и т.д.)

4.3.4.2. Расход энергии в преобразователе на IGBT типа FF1200R17KP4_B2 (по данным П.22 в приложении)

Потери в IGBT в проводящем состоянии:

$$P_{\text{ss}} = I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{ce(sat)}} \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cos \Theta \right) = 1000 \cdot 2,7 \left(\frac{1}{8} + \frac{0,95}{3\pi} \cdot 0,94 \right) = 594 \text{ Вт} \quad (4.53)$$

где $I_{\text{ср}} = I_{\text{с, макс}} / k_I = 1200 / 1,2 = 1000 \text{ А}$ – максимальная величина амплитуды тока на выходе инвертора ($k_I = 1,2 \div 1,5$ – коэффициент допустимой кратковременной перегрузки по току, необходимой для обеспечения динамики электропривода); $D = t_p / T \approx 0,95$ – максимальная скважность; $\cos \theta \approx \cos \varphi = 0,94$ – коэффициент мощности; $U_{\text{ce(sat)}}$ – прямое падение напряжения на IGBT в насыщенном состоянии при $I_{\text{ср}}$ и $T_j = 150^\circ\text{C}$ (типовое значение $-2,7 \text{ В}$)

Потери IGBT при коммутации:

$$P_{\text{sw}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \frac{I_{\text{ср}} \cdot U_{\text{cc}} (t_{\text{c(on)}} + t_{\text{c(off)}}) f_{\text{sw}}}{2} \quad (4.54)$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \frac{1000 \cdot 750 (1,06 \cdot 10^{-6} + 2,38 \cdot 10^{-6}) \cdot 10000}{2} = 2912 \text{ Вт}$$

Где $U_{\text{cc}} = 750 \text{ В}$ – напряжение на коллекторе IGBT, здесь равное напряжению звена постоянного тока U_d ; f_{sw} , Гц – частота коммутаций ключей, (частота ШИМ), обычно от 5000 до 15 000 Гц, здесь принимается $f_{\text{sw}} = 10000 \text{ Гц}$

$t_{\text{c(on)}}, t_{\text{c(off)}}$ – продолжительность переходных процессов по цепи коллектора IGBT на открывание $t_{\text{c(on)}}$ и закрывание $t_{\text{c(off)}}$ транзистора, с

$$t_{\text{c(on)}} = t_{\text{d(on)}} + t_{\text{r(on)}} = 0,86 + 0,2 = 1,06 (\mu\text{с}) = 1,06 \cdot 10^{-6} (\text{с}) \quad (4.55)$$

$$t_{\text{c(off)}} = t_{\text{d(off)}} + t_{\text{r(off)}} = 1,85 + 0,53 = 2,38 (\mu\text{с}) = 2,38 \cdot 10^{-6} (\text{с}) \quad (4.56)$$

Суммарные потери IGBT:

$$P_Q = P_{ss} + P_{sw} = 594 + 2912 = 3506 \text{ Вт} \quad (4.57)$$

Потери диода в проводящем состоянии:

$$P_{DS} = I_{ep} \cdot U_{ec} \left(\frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \cos \Theta \right) = 1000 \cdot 2,7 \left(\frac{1}{8} - \frac{0,95}{3\pi} \cdot 0,94 \right) = 82 \text{ Вт} \quad (4.58)$$

где $I_{ep} \approx I_{cp}$, А – максимум амплитуды тока через обратный диод;

U_{ec} , В – прямое падение напряжения на диоде (в проводящем состоянии) при I_{ep} .

Потери восстановления запирающих свойств диода:

$$P_{DR} = \frac{1}{8} (I_{rr} \cdot U_{cc} t_{rr} \cdot f_{sw}) = \frac{1}{8} (1000 \cdot 750 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 10000) = 188 \text{ Вт} \quad (4.59)$$

где, I_{rr} – амплитуда обратного тока через диод ($\approx I_{cp}$);

t_{rr} – продолжительность импульса обратного тока (типовое значение 0,2 мкс)

Суммарные потери диода:

$$P_D = P_{DS} + P_{DR} = 82 + 188 = 270 \text{ Вт} \quad (4.60)$$

Результирующие потери в IGBT с обратным диодом определяются по формуле:

$$P_T = P_Q + P_D = 3506 + 270 = 3776 \text{ Вт} \quad (4.61)$$

Силовая схема (рис. П.3) включает инвертор (МСИ) из шести тиристорных ключей (Т1-Т6) и двух ключей (Т7 и Т8) тормозного преобразователя, то есть:

Суммарные потери на весь инвертор составят:

$$P_{\Sigma} = 8 \cdot P_T = 30208 \text{ Вт} \quad (4.62)$$

Расход энергии в преобразователе на вагоне:

$$A_{\text{преоб.}} = \frac{P_{\Sigma}}{3600} (T_{\text{пуск}} + T_{\text{тор.}}) = \frac{30208}{3600} (32,71 + 16,89) = 416 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \quad (4.63)$$

Тогда, по (4.52) суммарный расход энергии на движение поезда составляет

$$A_{\text{сум}} = 47411 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \quad (4.64)$$

Удельный расход энергии (без рекуперативного торможения):

$$A_{\text{уд}} = \frac{A_{\text{сум}}}{m \cdot L \cdot 10^{-3}} = 60,34 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}} \quad (4.65)$$

4.3.5. Расход энергии рекуперации

Поскольку тяговый привод вагона метро с АТМ предусматривает рекуперацию при торможении, рассчитаем энергию рекуперации по формуле

$$A_{\text{рек}} = \frac{0,278 \cdot 10^{-3} G (V_T^2 - V_K^2)}{2 \cdot 3,6^2} \left[\frac{1000(1 + \gamma)}{9,81} - \frac{w_{0\text{ср}} + i_T}{a_T} \right] \cdot \eta_{\text{ТЭП}} \cdot \eta_{\text{ТС}} \quad (4.66)$$

где, V_T – скорость начала рекуперативного торможения, км/ч;

V_K – скорость окончания рекуперации, км/ч

G – вес вагона метро с пассажирами,

$w_{0\text{ср}}$ – среднее основное удельное сопротивление движению (без тока), Н/кН

$i_T = 0$ – уклон на участке рекуперативного торможения;

a_T – тормозное замедление при рекуперативном торможении, м/с²

$\eta_{\text{ТЭП}}$ – КПД тягового привода

$$\eta_{\text{ТЭП}} = \eta_{\text{ред.}} \cdot \eta_{\text{ТЭД}} \cdot \eta_{\text{преоб.}} = 0,96 \cdot 0,92 \cdot 0,94 = 0,83$$

где, $\eta_{\text{ред.}} = 0,96$ – КПД редуктора; $\eta_{\text{ТЭД}} = 0,92$ – КПД тягового двигателя.

Следовательно, получим

$$A_{\text{рек}} = \frac{0,278 \cdot 10^{-3} 4534,3 \cdot 65,5^2}{2 \cdot 3,6^2} \left[\frac{1000 \cdot 1,065}{9,81} - \frac{5,9}{1,165} \right] \cdot 0,83 \cdot 0,93$$

$$A_{\text{рек}} = 16669 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

$$A_{\text{уд,рек}} = \frac{A_{\text{рек}}}{m \cdot L \cdot 10^{-3}} = 21,21 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$$

4.3.6. Суммарный расход энергии (с рекуперативным торможением)

При рекуперации, суммарный расход энергии поезда метро с АТМ определяется

$$A_{\text{сум}} = A_{\text{тяг}} - A_{\text{рек}} = 47411 - 16669 = 30742$$

Удельный суммарный расход энергии (с рекуперативным торможением):

$$A_{\text{уд,сум}} = A_{\text{уд,тяг.}} - A_{\text{уд,рек}} = 60,34 - 21,21 = 39,13 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}} \quad (4.67)$$

4.4. Тягово-энергетические показатели вагона метро с предполагаемой системой ТЭП (на основе ТМ ПТ независимого возбуждения)

Расчет кривых движения вагона метро с НВ ТМ не отличается от расчета для серийного вагона (с ПВ ТМ), особенно при пуске. Все связано с тем, что реостатный пуск наиболее эффективен по сравнению с бесступенчатым реостатным пуском.

Результаты расчета пути и времени для построения кривых движения вагона метро с НВ приведены в табл. П.20 (приложение)

Кривые движения при одинаковых условиях для серийных вагонов (с ПВ) и вагонов с НВ приведены на рис. 4.17 и 4.18. Увеличение силы тяги вагонов с НВ ТМ по отношению к вагонам с ПВ ТМ обусловлено известным [101] общим преимуществами применения на ЭПС автоматически регулируемого НВ ТМ и их конкретным проявлением на ВМ [102].

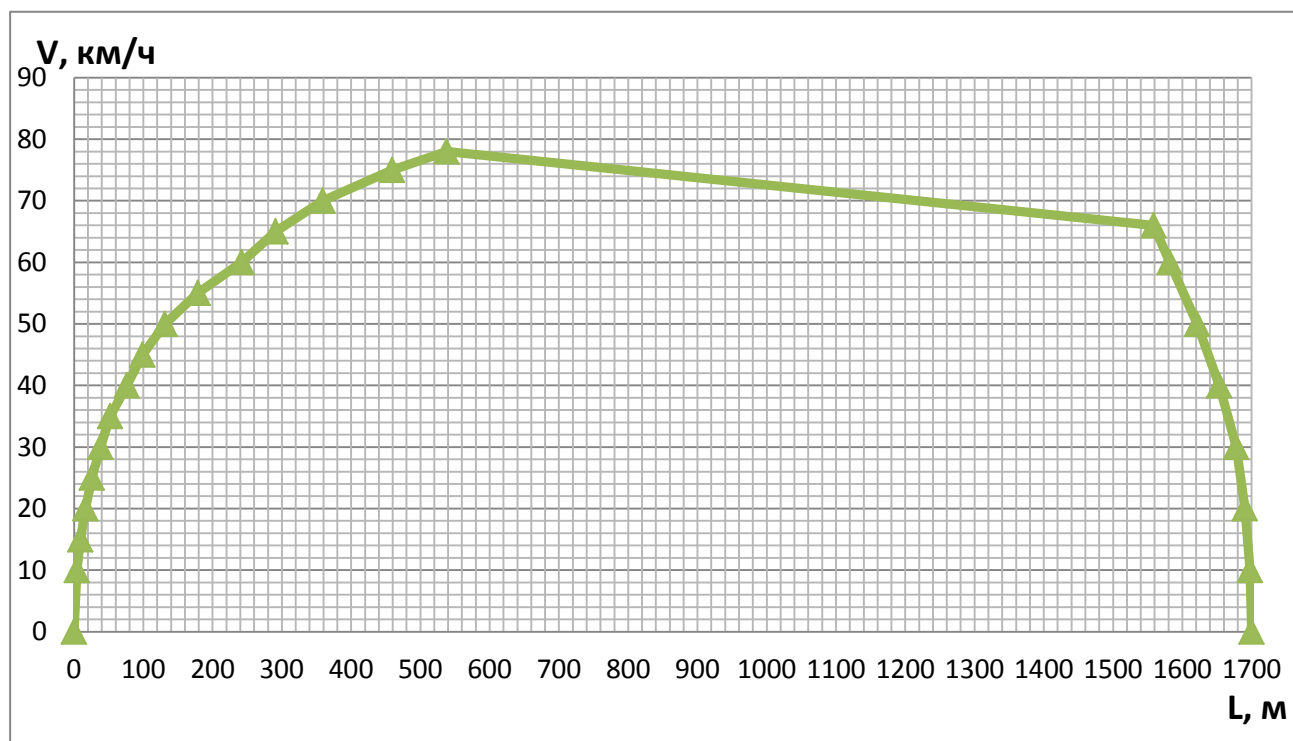


Рис. 4.17. Кривая движения $V(L)$ с ТЭП постоянного тока НВ

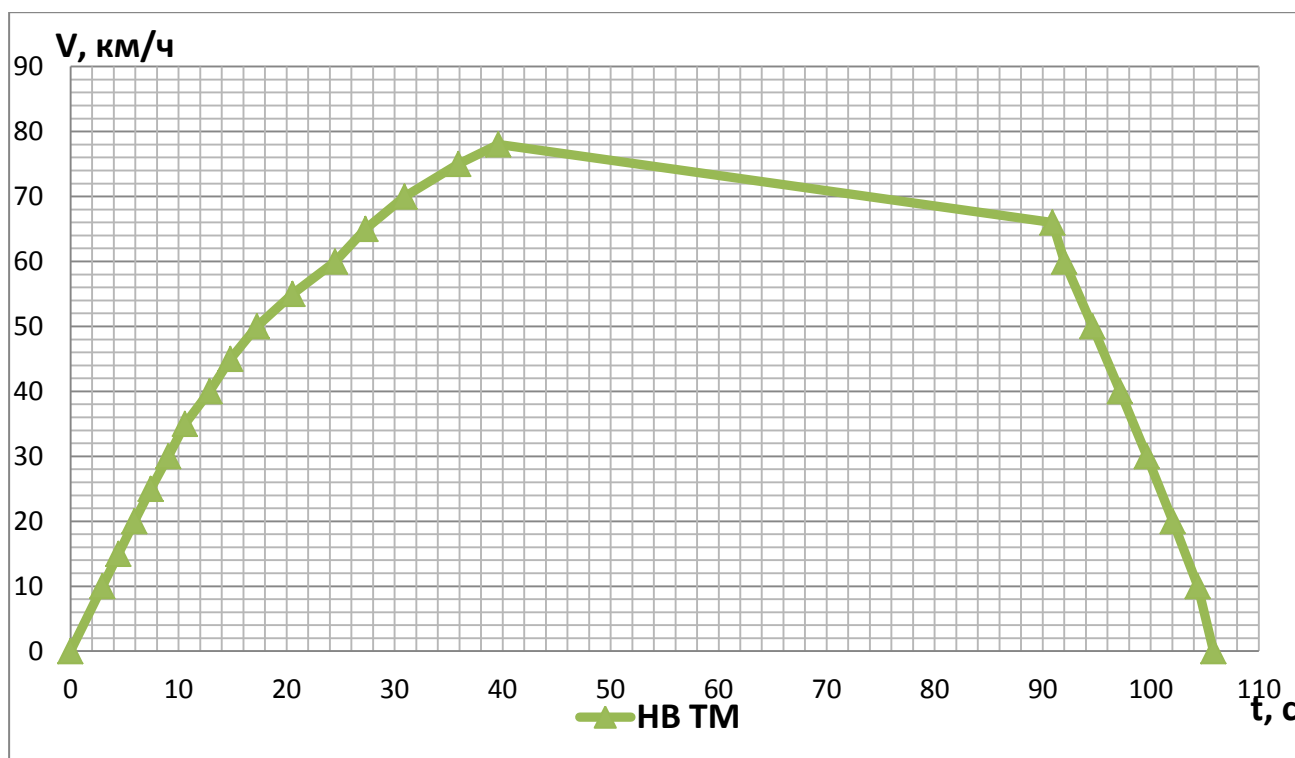


Рис. 4.18. Кривая движения $V(t)$ с ТЭП постоянного тока НВ

По кривым движения НВ рассчитаны все тягово-энергетические показатели в режимах тяги и рекуперации. В этих расчетах, учитывая приведенные в разделе 4.1, масса тары сравниваемых вагонов принята одинаковой.

Полученные результаты расчета тягово-энергетических показателей ВМ с НВ приведены в П.21.

4.5. Сравнительный анализ тягово-энергетических показателей вагонов метрополитена с различными системами ТЭП по данным эксплуатации и по расчетным результатам

4.5.1. Сравнительный анализ тягово-энергетических показателей вагонов метрополитена по данным эксплуатации

По имеющимся данным [46] составим таблицу удельного расхода энергии для различных типов вагонов метро без учета энергии рекуперации (табл. 4.10 и 4.11). Также в таблицу сведены значения ускорения и замедления эксплуатируемых поездов метро.

По представленной информации можно сделать вывод, что расход энергии вагонов метро с АТМ (с безреостатным пуском) в среднем на 8-15 % ниже, чем у

вагонов с двигателям постоянного тока (с реостатным пуском). При этом расход энергии практически не зависит от марки и производителя подвижного состава, главный фактор, влияющий на значение удельного расхода энергии - наличие реостатного пуска. Также не стоит забывать, что величина удельного расхода энергии еще зависит от многих факторов: основного удельного сопротивления движению, расхода энергии на собственные нужды, расхода энергии в преобразователе и т.д.

Таблица 4.11. Некоторые тягово-энергетические показатели вагонов метрополитена с ТЭП постоянного тока по данным эксплуатации

Модель вагонов/поставщик тягового оборудования	Тип двигателя постоянного тока	Удельный расход энергии, кВт.ч/т.км	Ускорение, м /с ²	Замедление, м /с ²
А, мот/безм.	ДМП-151	78**	0,65-0,7	0,65-0,7
Г	ДК-102Г	72**	1	1
Д	ДК-104Д	73**	1	1
Е, Е _{чс} (81-710)	ДК-108А, ДК-116А	62***	1,1(1,2)	1,3(1,2)
Еи, Е _{ир} (81-710)	ДК-108А	61**** без рекуп.	1,1	1,2
81-717, 81-540	ДК-117А	68	1,2	1,1
81-717М/714М	ДК-117А	66	1,2	1,1
Е _{нв} (81-710)	ДК-108А	-	1,2	1,1
И 81-715/716	ДК-117А	73 без рекуп.	1,2	1
81-718/719	ДК-117А	67 без рекуп.	1,2	1
81-720/721 з-д Динамо	ДК-120 (постоянного тока)	73,3	1,3	1,1

*На перегоне 1700 м при скорости сообщения 48 км/ч и стоянке 25 с

**Экспертная оценка

***На 1500 м при скорости сообщения 42,3 км/ч и стоянке 25 с

****На 1500 м при скорости сообщения 45 км/ч и стоянке 25 с.

Таблица 4.12. Вагоны метрополитенов с ТЭП с АТМ по данным эксплуатации

Модель вагонов/поставщик тягового оборудования	Тип асинхр. тягового двигателя	Удельный расход энергии, кВт.ч/т.км	Ускорение, м /с ²	Замедление, м /с ²
81-720А/721А Альстом	4ЕРА 1832В	73,3	1,3	1,1
81-720Х/721Х Хитачи	ЕР0-К60	60	1,3	1,1
81-740/741 Альстом	4ЕРА 1832В	59	1,3	1,1
81-720/721 Метровагонмаш	ТАД 280 М4У2	41**	1	1
81-553/554/555 Шкода (Казань)	М1_ 3844 К/4	59	1,3	1,1
81-760/761 Метровагонмаш (Ока)	ДАТЭ-170-4У2	62	1,2	1,0-1,2
81-556/557/558 Шкода (НеВа)	МШ 3839 К/4	60	1,3	1,1
81-760А/761А/763А Метровагонмаш	ДАТЭ-170-4У2	60	1,3	1,4
81-760/761/763 Хитачи (Охта)	ЕР0-К60	62***	1,3	1,1

*Перегон 1700 м, скорость сообщения 48 км/ч, стоянка 25 с, нагрузка 8 чел./м²

**Перегон 1700 м, скорость сообщения 42 км/ч, стоянка 25 с, нагрузка 6,6 чел./м²

***Экспертная оценка (Примечание: за 25 лет (1991–2015 гг.) в России разработано 10 новых типов вагонов)

По данным, приведенные в таблице (4.11 и 4.12) показано, что разгон у вагонов с АТМ эффективнее, чем у вагонов с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения (ПВ) в среднем на 7-15 %, а их замедления незначительно отличается.

Для более убедительного анализа необходимо сравнение расчетных данных в следующих разделах.

4.5.2. Сравнительный анализ тягово-энергетических показателей вагонов метрополитена по результатам расчетов

На рис. 4.19-4.22 представлены кривые движения, кривые разгона и тормозные пути для сравниваемых вагонов метро при расчетном режиме.

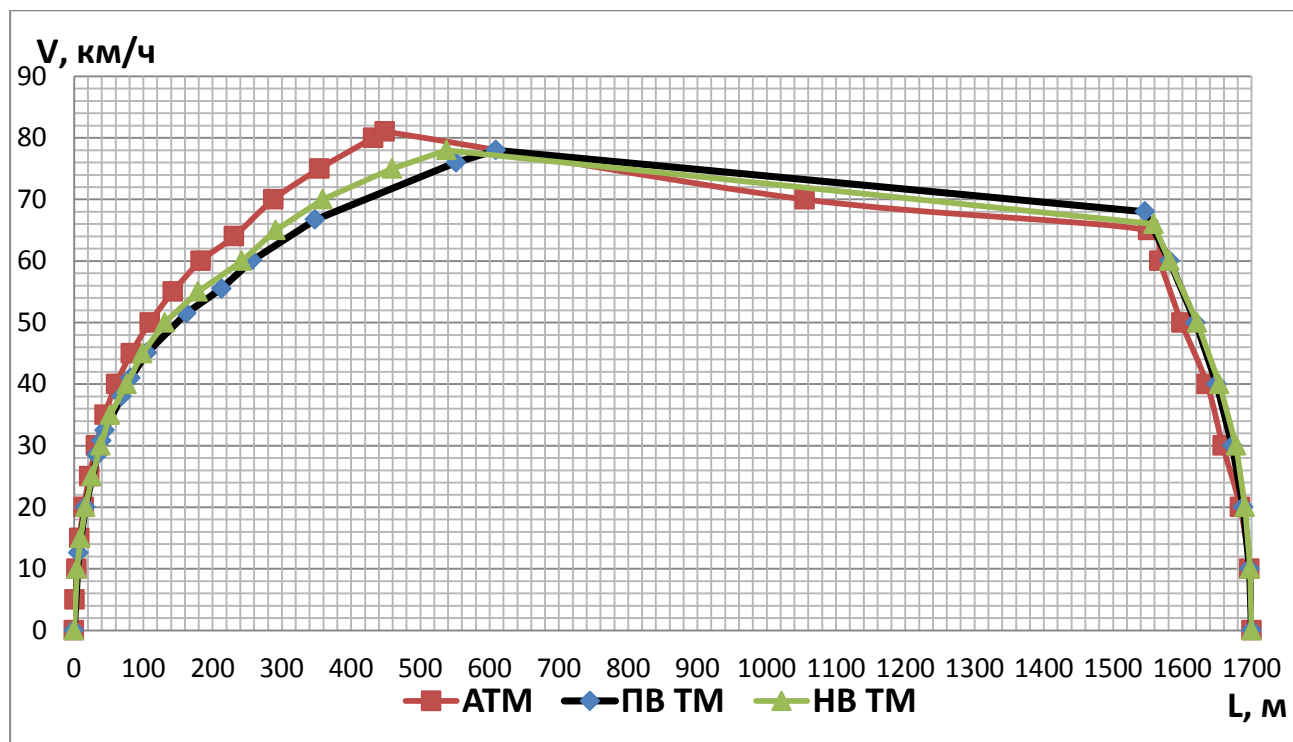
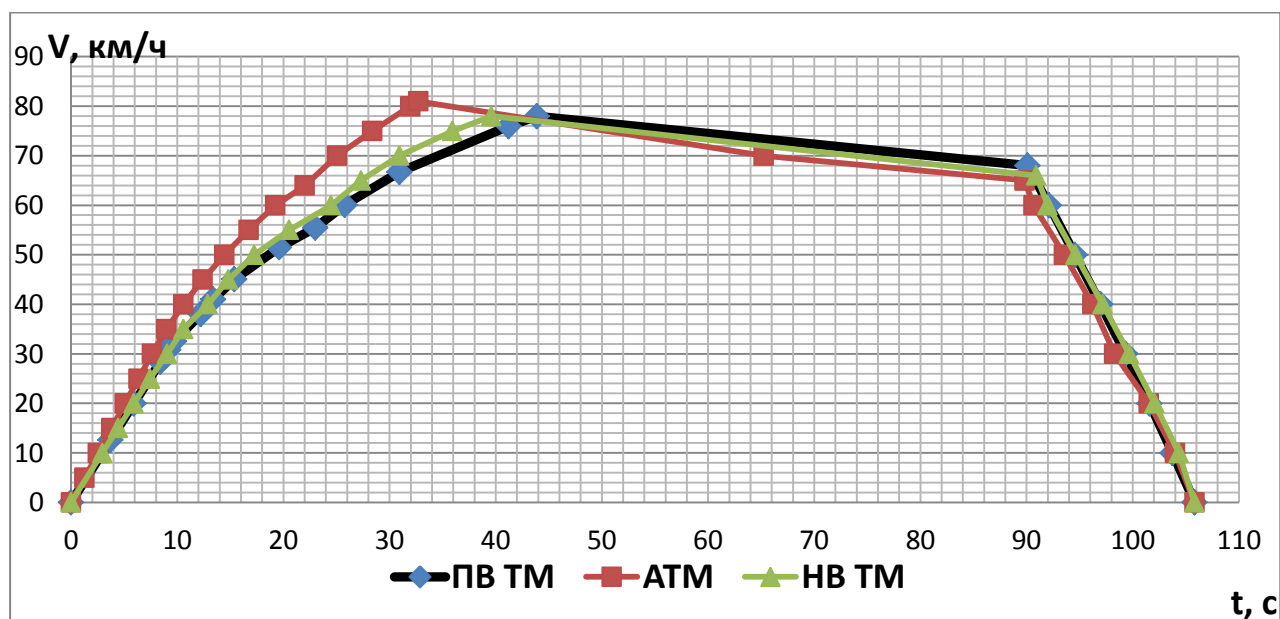


Рис. 4.19. Кривые движения $V(L)$ с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ



б)

Рис. 4.20. Кривые движения $V(t)$ с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ

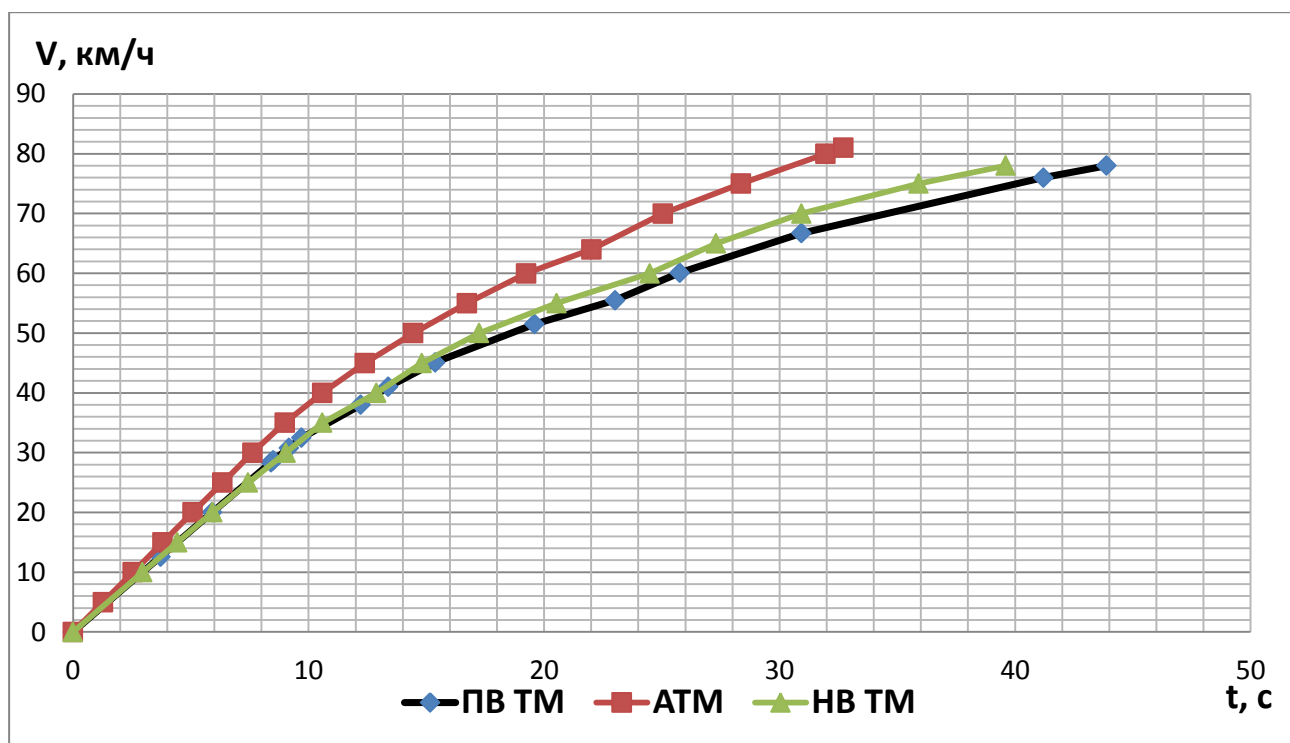


Рис. 4.21. Кривые разгона вагонов метрополитена с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ

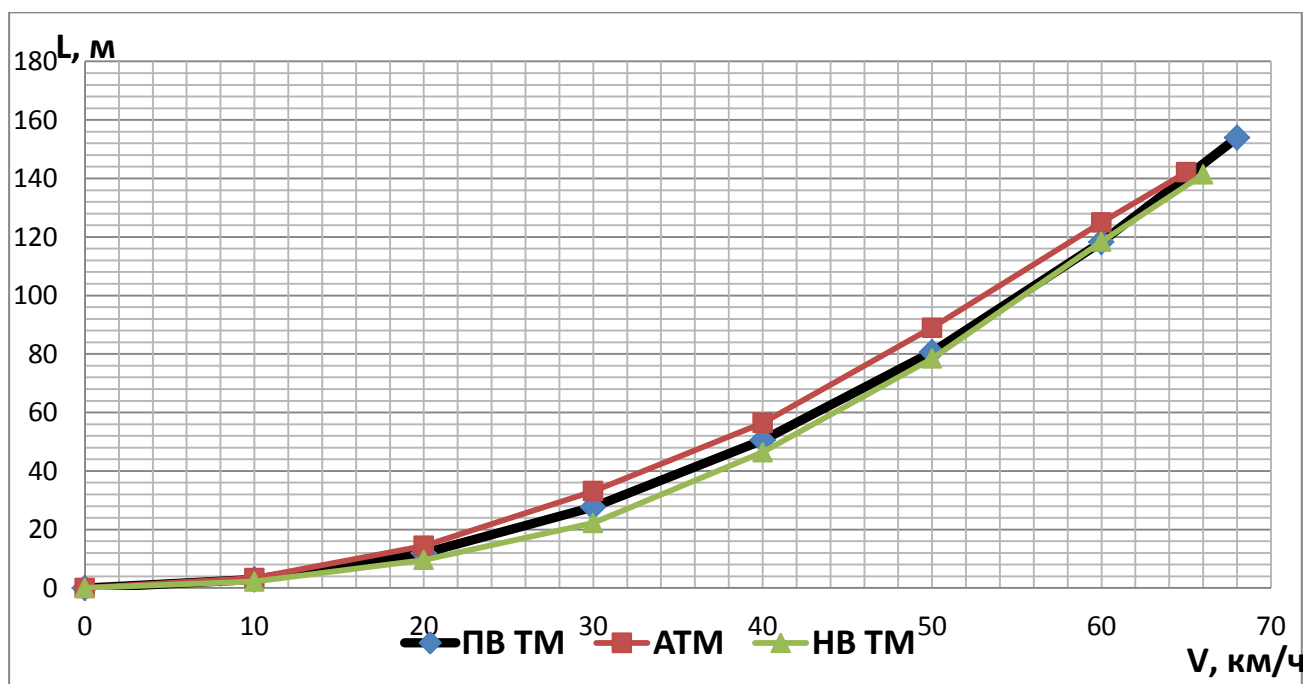


Рис. 4.22. Тормозные пути вагонов метрополитена с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ

В результате расчетов метровагон с ТЭП постоянного тока НВ (при рекуперации) потребляет энергии на 42,42% меньше, чем вагон с ТЭП ПВ ТМ (без рекуперации) и на 4,01% меньше, чем вагон с АТМ (при рекуперации).

Во всех трех выше перечисленных случаях имеет место примерно небольшое различие энергии в режиме тяги (снижение расхода энергии вагона с НВ ТМ по сравнению с ПВ ТМ и АТМ составляет соответственно 6,57% и 2,78%, и отличие итогового расхода энергии заключается в существенном возврате энергии при рекуперативном торможении. Для вагона с ТЭП постоянного тока ПВ рекуперативное торможение полностью отсутствует, поэтому в этом случае имеет место наибольший расход энергии. У вагона с АТМ энергия рекуперации ниже чем у вагона с ТЭП постоянного тока НВ из-за массы вагонов (тяжелее) и меньшего замедления при торможении хотя бы у обоих типов вагонов рекуперативное торможение осуществляется практически до полной остановки.

Что же касается среднего ускорения при разгоне, то ускорение у вагона с АТМ ($a_n=1,09 \text{ м/с}^2$) выше, чем у вагона с НВ ТМ ($0,97 \text{ м/с}^2$) и на 13,76% выше, чем у вагона с ПВ ТМ ($0,94 \text{ м/с}^2$). На рис. 4.21. представлены кривые разгона с ТЭП постоянного тока ПВ, НВ и с АТМ. Как видно, метропоезда с АТМ разгоняются интенсивнее, чем метропоезд с коллекторными двигателями НВ, а вагон с ПВ – самый медленный.

В эксплуатации низкое ускорение метропоезда при разгоне приводит к необходимости двойного подключения тяги даже при работе на перегонах средней длины. Это вызывает перерасход электроэнергии на тягу и затрудняет работу машиниста в режимах нагона опозданий. Кроме того, более длительный уход метропоезда из зоны станции сокращает провозную способность линий метрополитена, которая ограничена именно пропускной способностью станции. Это повышает преимущества ВМ с АТМ.

На рис. 4.22. отражена зависимость тормозного пути при служебном торможении от скорости. Очевидно, что такие характеристики при расчетном режиме для всех типов поездов незначительно отличаются. Что же касается среднего замедления при торможении, то у вагона с НВ ТМ ($a_t=1,196 \text{ м/с}^2$) на выше чем у вагона с АТМ ($1,165 \text{ м/с}^2$), а у вагона с ПВ ТМ ($1,158 \text{ м/с}^2$) – самое низкое.

4.6. Техничо – экономические показатели вагонов метрополитена с различными типами ТЭП

Экономическая часть расчета включает в себя сравнительный анализ цен и ценообразование на некоторые эксплуатируемые вагоны метро, сравнение цен на комплектующие для различных систем тягового привода, расчет расходов на электроэнергию для вагонов метро с ТЭП постоянного тока (с ПВ и НВ) и ТЭП с АТМ, а также расчет амортизационных отчислений для различных моделей подвижного состава и тд.

4.6.1. Сравнение цен эксплуатируемых вагонов метро с различными типами ТЭП

Сопоставим цены на некоторые вагоны метрополитена, эксплуатируемые в России. Цены взяты из открытых источников [103, 104], в частности из интернет-сайта государственных закупок <http://zakupki.gov.ru/>. [105]. Для корректного сравнения приведем цены к уровню 2018 года с учетом коэффициентов инфляции [105]. По полученным данным составим таблицу 4.13.

Таблица 4.13. Сравнительные цены эксплуатируемых вагонов метро с различными типами ТЭП

Модель вагона	Тип привода	Цена, млн. р.	Год закупки	Цена на 2018 г. с учетом инфляции, млн. р.
81-717/714 (серийный вагон)	Тяговый привод постоянного тока	10,3	2003	38,52
81-717.5 81-714.5		25,5 22,5	2009	49,75 43,89
81-717.6 81-714.6		30 26	2009	58,52 50,72
81-740/741 (Русич)		30,5	2003	114,07
81-740.1 81-740.1 (Русич)	Асинхронный тяговый привод	56 50	2010	100,41 89,65
81-740.4 81-740.4 (Русич)		67 60	2010	120,13 107,58
81-720/721А (Яуза)		41	2011	67,58
81-760/761 (Ока)		74,67	2011	123

Как видно из таблицы, самым дешевым является вагон 81-717/714 с разными поколениями (с ТЭП постоянного тока и реостатным пуском). Стоимость вагонов с асинхронным приводом на 2-3 выше, за счет иной конструкции тележки и импортных комплектующих. По указанному списку самый дорогой является вагоном 81-760/761 (Ока), Оно тоже было успешным. Однако за счёт установки на вагоны мод. 81-760/761 кондиционеров салона, масса каждого вагона возросла примерно на 1,5т, а средняя масса тары вагона составила около 37 т. При массе тары вагона метро 25 т и его среднесуточном заполнении 50 чел./вагон (как на Московском и Петербургском метрополитенах) каждый пассажир платит за свою перевозку и перевозку 500 кг конструкции вагона. При массе тары вагона 30 т пассажир платит за себя, за 500 кг конструкции вагона и за «багаж», составляющий 100 кг (5 т/50 чел.). При массе тары 35 т «багаж» пассажира составляет уже 200 кг (10 т/50 чел.), что очень много. Поэтому масса тары вагона экономически очень важна.

4.6.2. Сравнительный анализ цен на комплектующие различных типов ТЭП

Цены на комплектующие (запасные части) являются важным фактором, во многом определяющим стоимость полного цикла эксплуатации вагона метро (т.е. от покупки до списания). Сравним цены на основные составляющие систем тягового привода с ТМ ПТ и АТМ вагонов метрополитена (таблица 4.14-4.16). Источники цен указаны в приложениях, также использованы цены из интернет-сайта <http://zakupki.gov.ru/> и с электронной торговой площадки ГУП «Мосгортранс»

Таблица 4.14. Цены на комплектующие ТЭП одного вагона с ПВ ТМ

№ п/п	Наименование деталей	Сумма для всего вагона, рубл.
1	Тяговый двигатель ДК-117 (4 шт.)	1208000
2	Групповой реостатный контроллер	1810237
3	Контакты	
4	Блок САУ	
5	Блок питания собственных нужд	
6	Прочие	
Транспортные расходы		30182
Всего		3048419

Таблица 4.15. Цены на комплектующие одного вагона с АТМ

№ п/п	Наименование деталей	Цена, рубл.	Количество на вагоне, шт.	Сумма для вагона, рубл.
1	Дроссель сетевого фильтра	388 737	1	388737
2	Тяговый двигатель ДТА170 У2	443 190	4	1772760
3	Контейнер тягового привода	759762	1	759762
4	Блок управления тяговым приводом БУТП-2У2	132706	1	132706
5	Модуль силового инвертора МСИ-2/800У2	81071	1	81071
6	Прочие (низковольтные блоки управления, блок САУ, блок питания собственных нужд...)	3141873	—	3141873
Итого отечественной комплектации		6276910		
Итого импортной комплектации		1737410		
Транспортные расходы		80143		
Всего		8094463		

Как показано в главе 2, одной из особенностей схемы с ТМ НВ является замена группового кулачкового реостатного контроллера тиристорным коммутатором, вместе с этим вагон метро модернизируется (блок САУ, система питания – статический преобразователь и т.д), в результате цена на комплектующие у одного вагона с ТМ НВ увеличивается. (табл. 4.16).

Таблица 4.16. Цены на комплектующие ТЭП одного вагона с НВ ТМ

№ п/п	Наименование деталей	Сумма для вагона, рубл.
1	Комплектующие у вагона с ТМ ПТ (при замене группового кулачкового реостатного контроллера тиристорным коммутатором, блок САУ и прочие)	5152858
2	Транспортные расходы	51529
Всего		5204387

Проанализировав цены, можно сделать вывод, что стоимость на комплектующие ТЭП одного вагона метро с АТМ составляет более 8 млн. рублей, что как минимум в 2,5-2,7 раза дороже, чем у вагона с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения (более 3 млн. рублей) и на 1,5-1,6 раза чем у вагона независимого возбуждения (более 5 млн. рублей). А разница между стоимостью всего комплекта тягового электрооборудования будет еще выше, поскольку в сравнительную таблицу не вошли цены большинства низковольтных блоков управления, используемых в асинхронном тяговом приводе.

4.6.3. Расчет затрат на потребление электроэнергии поездов метро

При годовым пробеге $L_{\text{год}}=130000$ км, годовой расход электроэнергии поездов метро определяется по формуле

$$A_{\text{год}} = A_{\text{уд}} \cdot m_{\text{п}} \cdot L_{\text{год}} \quad \text{Вт} \cdot \text{ч} \quad (4.68)$$

$$S_{\text{э}} = 5,38 \cdot A_{\text{год}} \quad (\text{рубл.}) \quad (4.69)$$

где, $S_{\text{э}}$ – затрат на потребление электроэнергии на год при цене электроэнергии 5,38 рубл./ кВт · ч (по РЭК Москвы во время расчета)

Для поездов метро с двигателям постоянного тока ПВ

$$A_{\text{год,ПВ}} = 63,53.456,8 \cdot 130000 = 3654 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3654 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$S_{\text{э,ПВ}} = 5,38.3654 \cdot 10^3 = 19,659 \text{ (млн. рубл.)}$$

Для поездов метро с двигателям постоянного тока НВ

$$A_{\text{год,НВ}} = 36,58.456,8 \cdot 130000 = 2172 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 2172 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$S_{\text{э,НВ}} = 5,38.2172 \cdot 10^3 = 11,686 \text{ (млн. рубл.)}$$

Для поездов метро с АТМ

$$A_{\text{год,АТМ}} = 39,13.462,2 \cdot 130000 = 2351 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 2351 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$S_{\text{э,АТМ}} = 5,38.2351 \cdot 10^3 = 12,649 \text{ (млн. рубл.)}$$

4.6.4. Балансовая стоимость вагонов метро с разными системами ТЭП

Балансовая стоимость $\Pi_{\text{бал}}$ вагонов метро с разными системами ТЭП отличается их стоимостью на комплектующие ТЭП

По таблице 4.13, балансовая стоимость (с учетом инфляции) вагона 81-717/714 метро с двигателям постоянного тока ПВ составляет $\Pi_{\text{ваг,ПВ}} = 38,52$ (млн рубл.), а для метropоезд из 8 вагонов $\Pi_{\text{п,ПВ}} = 8 \cdot 38,52 = 308,16$ (млн рубл.)

Следовательно, $C_{\text{ваг,НВ}} = 38,52 + (5,204387 - 3,048419) \cong 40,676$ (млн рубл.)

$$C_{\text{п,НВ}} = 8 \cdot C_{\text{ваг,НВ}} = 325,408 \text{ (млн рубл.)}$$

$$C_{\text{ваг,АТМ}} = 38,52 + (8,094463 - 3,048419) \cong 43,566 \text{ (млн рубл.)}$$

$$C_{\text{п,АТМ}} = 8 \cdot C_{\text{ваг,АТМ}} = 348,528 \text{ (млн рубл.)}$$

4.6.5. Расчет затрат на амортизацию

Определим амортизационные отчисления на капитальный ремонт и восстановление по формуле

$$S_{\text{аморт.}} = C_{\text{п.}} \cdot H_{\text{а}} \quad (\text{млн рубл.}) \quad (4.71)$$

Где, $C_{\text{п}}$ – балансовая стоимость поезда метро

$H_{\text{а}} = 3,3\%$ – норма амортизационных отчислений поезда метро по [107]

$$S_{\text{аморт.,ПВ}} = C_{\text{п,ПВ}} \cdot 0,033 = 10,169 \text{ (млн рубл.)}$$

$$S_{\text{аморт.,ПВ}} = C_{\text{п,НВ}} \cdot 0,033 = 10,739 \text{ (млн рубл.)}$$

$$S_{\text{аморт.,АТМ}} = C_{\text{п,АТМ}} \cdot 0,033 = 11,502 \text{ (млн рубл.)}$$

4.6.6. Годовые затраты на монтаж, ремонт и обслуживание (запчасти и в основном машинист)

Основная заработная плата монтажника составляет

$$S_{\text{монт}} = n_{\text{в.}} \cdot K_{\text{час.}} \cdot T_{\text{монт}} = 151200 \text{ (рубл.)} = 0,1512 \text{ (млн рубл.)} \quad (4.72)$$

где, $K_{\text{час}} = 350$ рубл. – текущая средняя часовая тарифная ставка монтажника

$T_{\text{монт}} = 54$ часа – общая продолжительность модернизации одного вагона: изменение силовой схемы (30 часов), электромонтажная работа (12 часов), накладка устройств (8 часов), опытная проверка (4 часа).

$n_{\text{в}} = 8$ – количество вагонов поезда

Средняя зарплата обслуживающего персонала (в основном машинист)

составляет $S_{\text{зп.}} = 65000$ руб./ месяц. В течение суток происходит смена машиниста, то

$$S_{\text{обсл.}} = 2.12 \cdot S_{\text{зп.}} = 1,56 \text{ (млн рубл.)} \quad (4.73)$$

Годовые затраты на ремонт и обслуживание (запчасти) (4% от суммы комплекта оборудования ТЭП [108] определяется по формуле

$$S_{\text{рем.}} = 0,04 \cdot C_{\text{компл ТЭП.}} \quad (\text{млн рубл.}) \quad (4.74)$$

где, $C_{\text{компл.}}$ – цена на комплектующие ТЭП поезда метро (из 8 вагонов)

$$S_{\text{рем.,ПВ}} = 0,04 \cdot 3,048419 \cdot 8 = 0,976 \quad (\text{млн рубл.})$$

$$S_{\text{рем.,НВ}} = 0,04 \cdot 5,204387 \cdot 8 = 1,666 \quad (\text{млн рубл.})$$

$$S_{\text{рем.,АТМ}} = 0,04 \cdot 8,094463 \cdot 8 = 2,597 \quad (\text{млн рубл.})$$

Следовательно, суммарный расход на монтаж, ремонт и обслуживание (запчасти и в основном машинист) составляет

$$S_{\text{м-р-о}} = S_{\text{монт.}} + S_{\text{обсл.}} + S_{\text{рем.}} \quad (\text{млн рубл.}) \quad (4.75)$$

$$S_{\text{м-р-о,ПВ}} = 2,6872 \quad (\text{млн рубл.})$$

$$S_{\text{м-р-о,НВ}} = 3,3772 \quad (\text{млн рубл.})$$

$$S_{\text{м-р-о,АТМ}} = 4,3082 \quad (\text{млн рубл.})$$

4.6.7. Общие годовые эксплуатационные затраты поездов метро с различными системами ТЭП

$$S_{\text{общ}} = S_{\text{э}} + S_{\text{аморт.}} + S_{\text{м-р-о}} \quad (\text{млн рубл.}) \quad (4.76)$$

$$S_{\text{общ,ПВ}} = 33,1525 \quad (\text{млн рубл.})$$

$$S_{\text{общ,НВ}} = 25,8062 \quad (\text{млн рубл.})$$

$$S_{\text{общ,АТМ}} = 28,4596 \quad (\text{млн рубл.})$$

4.6.8. Расчет сроков окупаемости при замене ТЭП с ПВ ТМ новыми типами ТЭП с НВ ТМ, АТМ

Основным критерием при решении вопроса о целесообразности внедрения предлагаемой конструкции вагона является срок окупаемости дополнительных капитальных вложений в его производство. Как известно, нормативный срок окупаемости для транспорта составляет 8 лет [109].

Срок окупаемости разработанной конструкции вагона подсчитывается по формуле:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\Sigma K_{\text{Н}} - \Sigma K_{\text{С}}}{\Sigma S_{\text{общ,С}} - \Sigma S_{\text{общ,Н}}} \quad (\text{лет}) \quad (4.77)$$

где, $\Sigma K_{\text{Н}} - \Sigma K_{\text{С}}$ – дополнительные капитальные вложения при внедрении новых конструкций поездов;

$\Sigma K_{\text{Н}}, \Sigma K_{\text{С}}$ – общие капитальные затраты на приобретение новых и

серийных поездов

$\Sigma S_{\text{общ,С}} - \Sigma S_{\text{общ,Н}}$ — экономия эксплуатационных расходов при выполнении вагонами новой конструкции;

$\Sigma S_{\text{общ,Н}}, \Sigma S_{\text{общ,С}}$ — общие годовые эксплуатационные расходы для новой и существующей конструкций поездов

Тогда, срок окупаемости для поезда постоянного тока с НВ ТМ

$$T_{\text{окуп,НВ}} = \frac{\Sigma K_{\text{НВ}} - \Sigma K_{\text{ПВ}}}{\Sigma S_{\text{общ,НВ}} - \Sigma S_{\text{общ,ПВ}}} = \frac{325,408 - 308,16}{33,1552 - 25,8062} \\ = 2,347 \text{ (года) или 2 года 4 месяца}$$

Срок окупаемости для поезда с АТМ

$$T_{\text{окуп,НВ}} = \frac{\Sigma K_{\text{НВ}} - \Sigma K_{\text{ПВ}}}{\Sigma S_{\text{общ,ПВ}} - \Sigma S_{\text{общ,НВ}}} = \frac{348,528 - 308,16}{33,1552 - 28,4596} \\ = 8,597 \text{ (лет) или 8 лет 7 месяцев}$$

По результатам расчета показано, что срок окупаемости для поезда с АТМ много больше чем для поезда с НВ ТМ и он составляет 8 лет 7 месяцев, что больше нормативного срока окупаемости для транспорта (8 лет).

Таблица 4.17. Технико-экономические показатели метropоезда с различными типами ТЭП

№ п/п	Наименование	Затраты на метropоезд 81-717.714 (из 8 вагонов), млн. рубл.		
		с ПВ ТМ	с НВ ТМ	с АТМ
1	Комплекующие ТЭП для вагона	3,0484	5,2044	8,0945
2	Комплекующие ТЭП для поезда	24,3874	41,6351	64,7557
3	Капиталовложение в создание вагона (с учетом комплекующих)	38,52	40,676	43,504
4	Капиталовложение в создание поезда, ΣK	308,16	325,408	348,528
5	Общие годовые эксплуатационные затраты поезда, $S_{\text{общ}}$	33,1525	25,8063	28,4596
5.1	Затраты на потребление электроэнергии поезда, $S_{\text{э}}$	20,299	11,69	12,65
5.2	Затраты на амортизацию поезда, $S_{\text{аморт.}}$	10,169	10,201	10,933
5.3	Затраты на монтаж, ремонт и обслуживание (запчасти и в основном машинист), $S_{\text{м-р-о}}$	2,6872	3,3772	4,3082
6	Срок окупаемости, $T_{\text{окуп}}$ (лет)	—	2,347	8,597

Выводы по главе 4

1. В результате проведенных расчетов получены необходимые тягово-энергетические и экономические показатели для сравнительной оценки эффективности вагонов метрополитена с различными системами ТЭП.

2. Выполненные тягово-энергетические расчеты показали, что метropоезд с НВ ТМ имеет значительно лучшие энергетические показатели, чем метropоезд с ПВ ТМ, и эти энергетические показатели также лучше, чем у метropоезда с АТМ. Во всех трех выше перечисленных случаях имеет место примерно небольшое различие энергии в режиме тяги, и отличие итогового расхода энергии заключается в существенном возврате энергии при рекуперации. Для вагона с ПВ ТМ рекуперативное торможение полностью отсутствует, поэтому в этом случае имеет место наибольший расход энергии.

Что же касается динамических показателей, то здесь метropоезд с АТМ разгоняются интенсивнее, чем метropоезд с коллекторными двигателями НВ, а поезд с ПВ ТМ – самый медленный. При разгоне, среднее ускорение у вагона с АТМ ($a_{\text{п}}=1,09 \text{ м/с}^2$) выше, чем у вагона с НВ ТМ ($0,97 \text{ м/с}^2$), и на 13,76% выше, чем у вагона с ПВ ТМ ($0,94 \text{ м/с}^2$). Что же касается среднего замедления при торможении, то у вагона с НВ ТМ ($a_{\text{т}}=1,196 \text{ м/с}^2$) выше, чем у вагона с АТМ ($1,165 \text{ м/с}^2$), и у вагона с ПВ ТМ ($1,158 \text{ м/с}^2$).

3. Показано, что с экономической стороны, вагон метро с ТЭП постоянного тока выгоднее, чем с АТМ. Цена самого состава (с учетом инфляции) с АТМ в 2-3 выше за счет иной конструкции тележки и импортных комплектующих. Стоимость на комплектующие ТЭП вагона метро с АТМ (с учетом импортной комплектации) как минимум в 2,5-2,7 раза дороже, чем у вагона с ПВ ТМ и в 1,5-1,6 раз чем у вагона с НВ ТМ.

4. Выполненные технико-экономические расчеты показали, что срок окупаемости замены электрооборудования на вагонах серий 81-817.714 их модификаций с учетом эксплуатационных затрат составляет 2 года 4 месяца при полном использовании рекуперированной энергии для вагонов с приводом

постоянного тока НВ ТМ. Для приводов с АТМ срок окупаемости составит 8 лет 7 месяцев, что больше нормативного срока окупаемости для транспорта, и это говорит о невыгодности данного типа привода.

5. На основе анализа результатов расчетов и обработки данных испытаний показано, что реальные технико-экономические показатели ЭПС с АТМ хуже прогнозировавшихся при обосновании его высокой эффективности и необходимости повсеместного применения.

6. Установлено, что при реализации на ЭПС с ТМ ПТ простых и проверенных на опытных образцах технических решений по совершенствованию их ТЭП (оборудованы НВ ТМ и энергосберегающего ТЭП) они не будут уступать поездам с АТМ по тягово-энергетическим показателям. При меньшей цене они будут существенно эффективнее.

ГЛАВА 5. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЕЗДОВ МЕТРОПОЛИТЕНА С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

5.1. Исследование и обоснование основных показателей и характеристик для комплексной оценки эффективности метропоездов с различными типами ТЭП

При сравнительной оценке любых систем ТЭП основное внимание следует уделить тем критериям, которые определяют важнейшие цели и задачи совершенствования ЭПС. К таким критериям относятся:

- улучшение тяговых и тормозных свойств, что при тяге позволяет либо повысить скорость движения, либо уменьшить расход энергии при той же скорости;
- повышение надежности электрооборудования;
- улучшение энергетических показателей за счет снижения потерь энергии в тяге и увеличения ее возврата при рекуперации;
- уменьшение массы электрооборудования, что позволяет сократить расход энергии за счет улучшения динамики поездов;
- снижение стоимости и затрат на обслуживание электрооборудования;
- повышение комфорта для пассажиров за счет плавности регулирования сил тяги и торможения и сохранения эффективности последнего до наименьших скоростей движения;
- достижение высокой степени пригодности к модернизации эксплуатируемого парка ЭПС при минимальных изменениях в сложившейся системе эксплуатационного обслуживания.

В настоящее время потребительские свойства ЭПС в значительной степени определяются типом примененного ТЭП. Как показывает зарубежный опыт, выбор ЭПС с той или иной системой ТЭП проводится под конкретные условия его работы, после проведения соответствующих расчетов и определения оптимальных характеристик для предполагаемых условий эксплуатации [31].

Поэтому разработка и обоснование системы показателей и характеристик для оценки преимуществ и недостатков того или иного ТЭП и определение сфер наиболее целесообразного применения его для ЭПС имеют важное практическое значение [29].

Вопросам оценки влияния на тягово-энергетические показатели эксплуатационных режимов работы ЭПС посвящены ряд работ Л.В. Гуткина, З.М. Рубчинского, Л.Д. Капустина, Н.И. Бещевой [30], Г.В. Фаминского [28], В.Д. Тулупова [31], Д.Е. Кирюшин [29], а в последнее время Д.А. Солдатенко [68].

Наиболее полно проблемы подхода к методам оценки и сравнения вариантов ТЭП поездов отражены в работах О.Н. Назарова [86]. Им проведен анализ основных факторов, влияющих на режимы работы и тягово-энергетические показатели ЭПС, разработаны методика и основы программного обеспечения сравнительного анализа тягово-энергетических показателей ЭПС с различными схемными и конструктивными решениями, сделан анализ методов построения измерительных схем для проведения тягово-энергетических и эксплуатационных испытаний ЭПС, позволивший определить требования к аппаратному и программному обеспечению и реализовать их.

Важным при комплексной оценке того или иного ТЭП является обеспечение сопоставимости результатов, т.е. приведение выходных тягово-энергетических показателей ЭПС к одинаковым внешним условиям эксплуатации (параметрам движения, удельной мощности тяговых двигателей, удельному сопротивлению движению, передаточному числу редуктора и т.д) [29, 86].

Основными критериями, влияющими на выбор той или иной системы ТЭП, по мнению Д.Е. Кирюшина [29] должны являться: первоначальная стоимость при изготовлении и эксплуатационные расходы, включающие затраты на обслуживание и ремонт, а также оплату расхода электроэнергии на тягу поездов.

Окончательно выбор наиболее эффективного для ЭПС типа ТЭП Д.Е. Кирюшиным производится на основе данных по изменению стоимостной оценки результатов и затрат за весь расчетный период, полученных по методике технико-экономических расчетов затрат за жизненный цикл.

В работах Итальянских специалистов при оценке показателей ТЭП с ТМ ПТ и АТМ целесообразно использовать понятие «фактор роста» [87]. Он отражает соотношение между вкладом транспортного средства в эксплуатационные расходы и перевозимой им полезной нагрузкой для традиционных и перспективных видов подвижного состава. Использование этого показателя, по мнению итальянских ученых, позволяет оценить влияние скорости движения, энергетических затрат и т.д., и на основе этого дать конструкторам транспортных средств рекомендации, например, по снижению массы подвижных единиц благодаря применению более совершенных конструкций тяговых приводов [68].

По мнению русских специалистов Н.В. Князева и В.И. Захарова [27] и оценка технико-экономической эффективности конструкции тягового привода ЭПС с помощью таких критериев как: удельная мощность, удельный вращающий момент, коэффициент Балдина, который учитывает, что экономичную машину спроектировать тем труднее, чем больше соотношение максимальной и номинальной частот вращения и др.

Большинство работ вышеперечисленных авторов проводят оценку эффективности ТЭП по номинальному режиму. Однако, известно, что эффективность работы ЭПС и любой тяговой электрической машины в эксплуатации должна оцениваться по величине среднеэксплуатационного КПД.

В своих исследованиях С.В. Покровский [26] отмечает, что в технических требованиях к ЭПС их энергетические характеристики задаются величиной КПД и коэффициента мощности в продолжительном режиме. Однако в зависимости от режима нагруженности и скорости, конструкций отдельных узлов, алгоритмов управления преобразователями и их структуры, энергетические показатели ЭПС могут быть отличными от заданных. Поэтому выбор технических решений должен производиться с учетом среднеэксплуатационной эффективности исследуемых систем.

К таким же выводам приходит А.С. Курбасов при анализе работы ЭПС [88]. Очевидно, что при такой неравномерности нагружения тягового оборудования ЭПС в эксплуатации целесообразно оценивать эффективность работы тяговой

электрической машины по среднеэксплуатационным (интегральным) показателям.

В результате исследований С.В. Покровского им разработан набор новых энергетических показателей и были предложены следующие формулировки для их обозначения: среднеходовой КПД, среднеходовой баланс реактивной энергии, коэффициент среднеходовой энергетической эффективности.

Несмотря на большой объем работ, посвященных исследованию эффективности ТЭП ЭПС, до настоящего времени не предложена методика их комплексной оценки, учитывающая все факторы эксплуатации.

Для комплексной оценки эффективности применения ТЭП с точки зрения эксплуатационных затрат целесообразно принять критерии: стоимость при изготовлении, эксплуатационные затраты на обслуживание и ремонт, а также расход энергоресурсов на тягу, КПД. С позиций оценки эффективности конструкции тяговых двигателей такими критериями могут являться: удельная мощность, коэффициент использования конструкционных материалов, удельный вращающий момент и коэффициент мощности.

Очевидно, что в разных экономических ситуациях по значимости эти критерии могут меняться местами. Например, в экономических пространствах с высокой заработной платой одним из основных критериев будут затраты на эксплуатационные расходы, а в экономических зонах с большей стоимостью на изготовление и производство оборудования для ЭПС первостепенными являются критерии удельной стоимости расходных материалов. Однако для любого экономического пространства всегда важным остается желание потребителя иметь ЭПС, которые могут работать на заданном участке обслуживания с наибольшим КПД, обеспечивая наиболее низкую себестоимость перевозок.

Поэтому целесообразно выбранные критерии объединять в целевую функцию. Это позволит наиболее объективно оценивать эффективность работы ТЭП различного типа в энергетической цепи ЭПС в эксплуатации [68].

Повышение роли метрополитенов в решении проблемы пассажирских перевозок и увеличение потребления ими электроэнергии делают настоятельно

необходимым улучшение тягово-энергетических показателей электропоездов метрополитена, что является основным средством увеличения провозной способности линий метрополитена при одновременном ограничении роста или даже снижении удельного потребления энергии на единицу работы.

Очевидно, что в любом случае при создании новых систем ТЭП необходимо добиваться достижения максимального результата с наименьшими затратами, включая и затрату времени на разработку и освоение производства и эксплуатации. Вместе с тем, нужно учитывать и практические возможности реализации новых технических решений промышленностью и освоения их обслуживания в эксплуатации. Особенно необходима эта задача в сложившихся трудных объективных условиях как и в сфере производства, так и в сфере эксплуатации поездов метро [89, 90].

В связи с этим чрезвычайно актуальны рейтинги по «тягово-энергетическим и ценовым показателям» на основе обработки результатов расчета и данных эксплуатации для выбора более рационального вагона [91-92].

5.2. Комплексная оценка эффективности поездов метрополитена с различными типами ТЭП

Важнейшими характеристиками поездов метрополитена являются тягово-энергетические характеристики. Они определяют показатели назначения, т.е. показатели того как быстро вагон разгоняется и движется по линии, сколько электроэнергии расходует на движение и насколько эффективна его тормозная система, т.е. система безопасности.

Не менее важной характеристикой метropоездов считается экономической. Для оценки экономической эффективности их применения с точки зрения эксплуатационных затрат целесообразно принять критерии: стоимость при изготовлении, эксплуатационные затраты на обслуживание и ремонт, а также расход энергоресурсов на тягу.

Главная технико-экономическая задача вагонов метрополитена с различными типами ТЭП – перевезти максимальное количество пассажиров

безопасно, быстро и экономично (минимальные суммарные эксплуатационные расходы и наименьшие затраты на приобретение единицы метровагона).

Вагон, выполняющий эту задачу более эффективно, имеет более высокий рейтинг. Сумму показателей назначения, представленную в совокупности в относительных единицах и являющуюся технико-экономическим рейтингом вагона метро, можно рассчитать по формуле:

$$R = \overline{V_{\text{общ}}} \times \overline{A_{\text{уд}}} \times \overline{\Sigma t_{\text{разг.}}} \times \overline{\Sigma L_{\text{тор.}}} \times \overline{\Sigma \Pi} \times 100 (\%) \quad (5.1)$$

где: R - рейтинг вагона метро, %, а величины, входящие в формулу (5.1) представлены в относительных единицах по отношению к показателям вагона метро условной мод. 81.7XX с тягово-энергетическим и ценовым показателям:

$$\overline{V_{\text{общ}}} - \text{скорость сообщения в относительных единицах,} \quad \overline{V} = V/50 \quad (5.2)$$

$$\overline{A_{\text{уд}}} - \text{относительный удельный расход электроэнергии на тягу,} \quad \overline{A_{\text{уд}}} = 58/A_{\text{уд}} \quad (5.3)$$

$$\overline{\Sigma t_{\text{разг.}}} - \text{относительное суммарное время разгона,} \quad \overline{\Sigma t_{\text{разг.}}} = \frac{8+18+28}{\Sigma t_{\text{разг.}}} \quad (5.4)$$

$$\overline{\Sigma L_{\text{тор.}}} - \text{относительные тормозные пути,} \quad \overline{\Sigma L_{\text{тор.}}} = (120 + 200)/\Sigma L_{\text{тор.}} \quad (5.5)$$

$$\overline{\Sigma \Pi_{\text{итог}}} - \text{итоговая стоимость единицы метровагона (с учетом суммарных эксплуатационных расходов) в относительных единицах,} \quad \overline{\Sigma \Pi_{\text{итог}}} = \Sigma \Pi_{\text{с}}/\Sigma \Pi_{\text{н}} \quad (5.6)$$

Здесь, $\Sigma \Pi_{\text{с}} = 42,665$ (млн рубл.) – итоговая стоимость единицы метровагона (с учетом суммарных эксплуатационных расходов) с существующим комплектом (серийный вагон с ПВ ТМ); $\Sigma \Pi_{\text{н}}$ – итоговая стоимость единицы метровагона с новыми комплектами (НВ ТМ, АТМ).

Согласно формуле (5.1) вагон метро мод. 81.7XX со стандартными электротяговыми характеристиками имеет рейтинг 100% (табл. 5.1), поскольку при максимальной нагрузке он разгоняется до скоростей 30, 60 и 80 км/ч, соответственно, за 8, 18 и 28с, ездит по линии, состоящей из перегонов длиной 1700м, со скоростью сообщения 50 км/ч при 25с остановках, имеет при этом удельный расход электроэнергии на тягу при реостатном торможении 58 Вт.ч/т.км, а его тормозные пути со скоростей 60 и 80 км/ч составляют 120 и 200м

[91, 92, 110]. Эти показатели реально реализуемы в существующих условиях и близки к идеальным. Метропоезд из таких вагонов легко управляется машинистом и устойчиво работает в часы «пик», поскольку имеет достаточные запасы хода на нагон случайных опозданий.

Таблица 5.1. Данные показатели вагона метро модели 81.7XX со стандартными электротяговыми характеристиками

№ п/п	Показатель	Вагон метро модели 81.7XX с стандартными характеристиками (рейтинг 100%)
1	Скорость сообщения $V_{\text{общ}}$, км/ч	50
2	Удельный расход энергии $A_{\text{уд}}$, Вт.ч/т.км	58
3	Времена разгона $t_{\text{разг.}}$, с до скоростей 30 км/ч 60 км/ч 80 км/ч	8 18 28
4	Тормозные пути $L_{\text{тор.}}$, м с скорости (км/ч) 60 км/ч 80 км/ч	120 200
5	Итоговая стоимость единицы метровагона (с учетом суммарных эксплуатационных расходов) $\sum C_{\text{итог}}$,	42,665

Для рейтингов вагонов метрополитена с различными системами ТЭП необходимо узнать их сравнительные электротяговые характеристики согласно полученным результатам тягово-энергетических расчетов в главе 4.

Главные показатели для сравнения и рейтинга вагонов метрополитена показаны в таблице 5.2.

Используя данные таблиц 5.1 и 5.2, по формулам (5.1–5.6) подсчитаны рейтинги вагонов метрополитена с различными системами ТЭП, результаты которых (для 2 варианта расчета без рекуперации и при рекуперации) представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.2 - Сравнительные тягово-энергетические показатели вагонов метрополитена с различными системами ТЭП в расчетном режим

№ п/п	Показатель	Серийный вагон 81- 717.714 (с ПВ ТМ), расчетный режим	Серийный вагон 81- 717.714 (с НВ ТМ), расчетный режим	Серийный вагон 81- 717.714 (с АТМ), расчетный режим
1	Скорость сообщения $V_{\text{общ}}$, км/ч	48	48	48
2	Удельный расход энергии (без рекуперации) $A_{\text{уд, без рек.}}$, Вт.ч/т.км	63,53	59,36	60,34
3	Удельный расход энергии (при рекуперации) $A_{\text{уд, при рек.}}$, Вт.ч/т.км	63,53	36,58	39,13
4	Времена разгона $t_{\text{разг.}}$, с до скоростей 30 км/ч 60 км/ч 80 км/ч	9,02 25,65 46,52	9,05 24,49 41,03	8,36 19,95 32,55
5	Тормозные пути $L_{\text{тор.}}$, м с скорости (км/ч) 60 км/ч 80 км/ч	118 285	119 248	127 270
6	Итоговая стоимость единицы метровагона (с учетом суммарных эксплуатационных расходов) $\sum C_{\text{итог}}$, млн. рубл.	42,665	43,802	47,762

Таблица 5.3 - Рейтинги вагонов метро с различными системами ТЭП по расчетам

Показатели, в относительных единицах	Серийный вагон 81-717.714 (с ПВ ТМ), расчетный режим	Серийный вагон 81-717.714 (с НВ ТМ), расчетный режим	Серийный вагон 81-717.714 (с АТМ), расчетный режим
$\overline{V_{\text{общ}}}$	0,96	0,96	0,96
$\overline{A_{\text{уд, без рек.}}}$	0,913	0,979	0,961
$\overline{A_{\text{уд, при рек}}}$	0,913	1,586	1,482
$\overline{t_{\text{разг.}}}$	0,665	0,763	0,887
$\overline{L_{\text{тор.}}}$	0,794	0,872	0,806
$\overline{\Sigma C_{\text{итог.}}}$	1	0,976	0,893
Рейтинг, $R_{\text{без рек.}}$, %	46,29	61,08	58,95
Рейтинг, $R_{\text{при рек.}}$, %	46,29	93,83	90,71

Известно, что более высокий рейтинг ВМ указывает на его большую надежность, безопасность и экономичность в эксплуатации. Цена вагона, спроектированный на более высокий рейтинг, как правило, и стоит дороже.

Однако такой поход не всегда прав. В расчетном режиме по тендерно-экономическим рейтингам показал, что при цене ориентировочно много большей (из-за высокой стоимости комплекта электрооборудования) вагон метро с АТМ менее эффективнее чем вагон метро с НВ ТМ.

Очевидно, что цена вагона модели 81.717/714 (с учетом суммарных эксплуатационных затрат) с АТМ по сравнению с ценой вагона с НВ ТМ возросла на 9,5% (43,802 и 47,762 млн рубл.). А рейтинг вагона с АТМ по сравнению с рейтингом серийного вагона с НВ ТМ снизился (рис. 5.1).

Как показано в табл. 5.3 и на рис. 5.1., можно прийти к выводу, что самый эффективный – это вагон модели 81-717.714 с ТЭП постоянного тока НВ (рейтинг 61,08% – без рекуперации, а 93,83% – при рекуперации).

Эффективность вагона метро с АТМ уменьшается из-за его высокой стоимости (рейтинг 58,95% – без рекуперации, а 90,71% – при рекуперации), а самый низкий эффективный – вагон с ТЭП постоянного тока ПВ (рейтинг 46,29%).

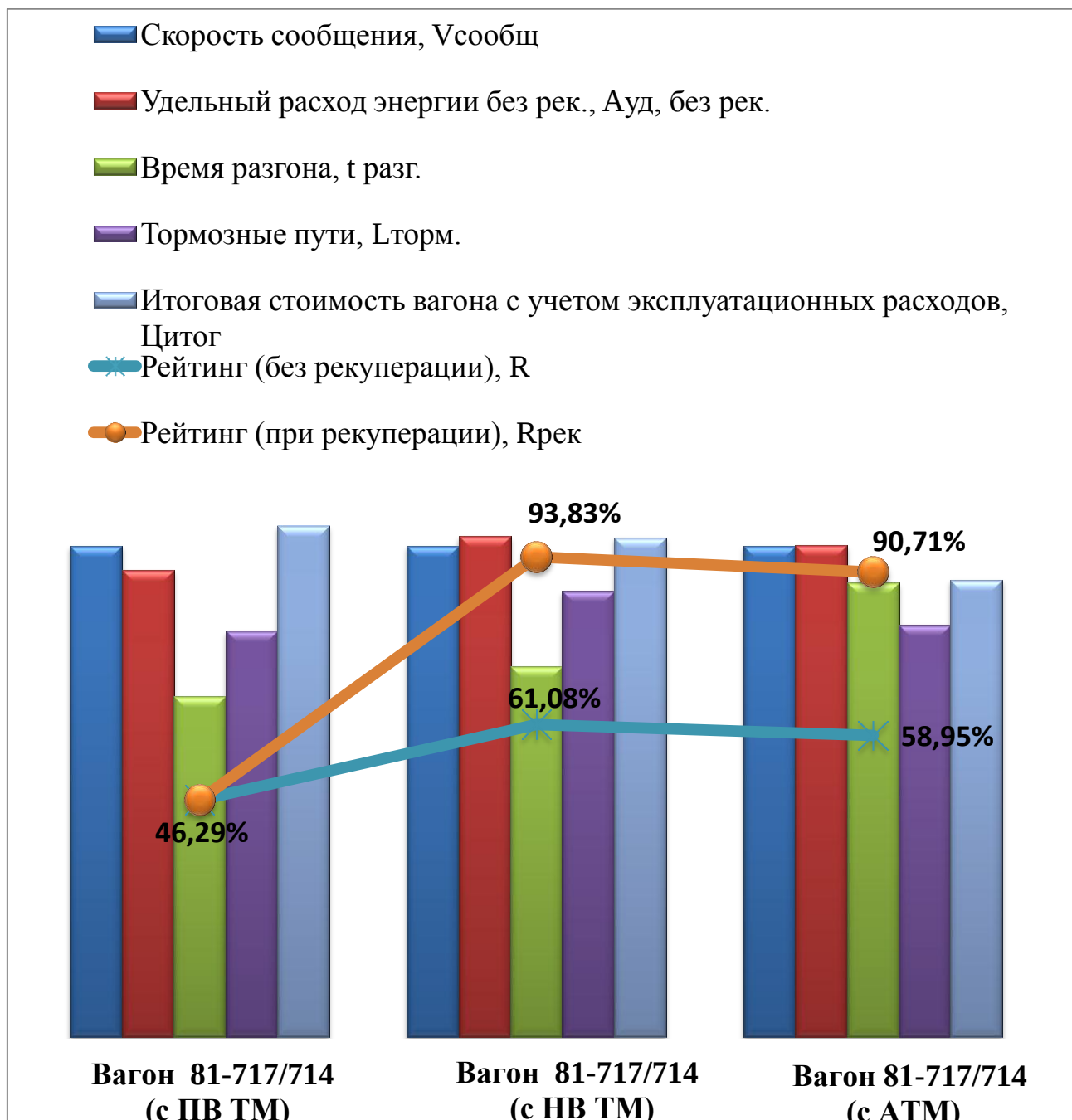


Рис. 5.1. Отношение показателей вагонов метро с различными системами ТЭП к показателям вагона метро условной модели 81.7XX со стандартными технико-экономическими характеристиками и их рейтинги по данным расчета (в случаях без рекуперации и при рекуперации)

Таблица 5.4 - Сравнительные тягово-энергетические показатели вагонов метрополитена с различными системами ТЭП по данным эксплуатации

Вагон мод.	81.717/714	«Русич» 81.740А/741А	«Яуза» 81.720А/760	«Нева» 81.556/558
Скорость сообщения V , км/ч	48	42	48	48
Удельный расход энергии на тягу A , Вт.ч/т.км	66	41	59	58
Тормозные пути $\sum L$ с 60 и 80 км/ч, м	132 + 216	175 + 300	150 + 260	117 + 200
Времена разгона $\sum t$ до скоростей 30+60+80 км/ч, с	8,5 + 21 + 40	11 + 24 + 39	9,5 + 19,5 + 30	8 + 18 + 29
Стоимости вагонов (с вычитанием расходов оснащения)	38,5	79,8	47,3	85,9

Все конкретные рейтинги проводимы аналогичны методу рейтингов по результатам расчета.

Таблица 5.5 - Рейтинги вагонов метро с различными системами ТЭП по данным эксплуатации

Вагон мод.	81.717/714 (с ПВ ТМ)	«Русич» 81.740А/741А	«Яуза» 81.720А/760	«Нева» 81.556/558
$\bar{V}$	0,96	0,84	0,96	0,96
$\bar{A}$	0,879	1,415	0,983	1
$\bar{\sum L}$	0,92	0,674	0,781	1,01
$\bar{\sum t}$	0,786	0,73	0,915	0,982
Рейтинг R, %	60,28	58,42	67,42	95,18
Рейтинг R (с учетом стоимости вагона), %	66,76	31,23	60,81	47,29

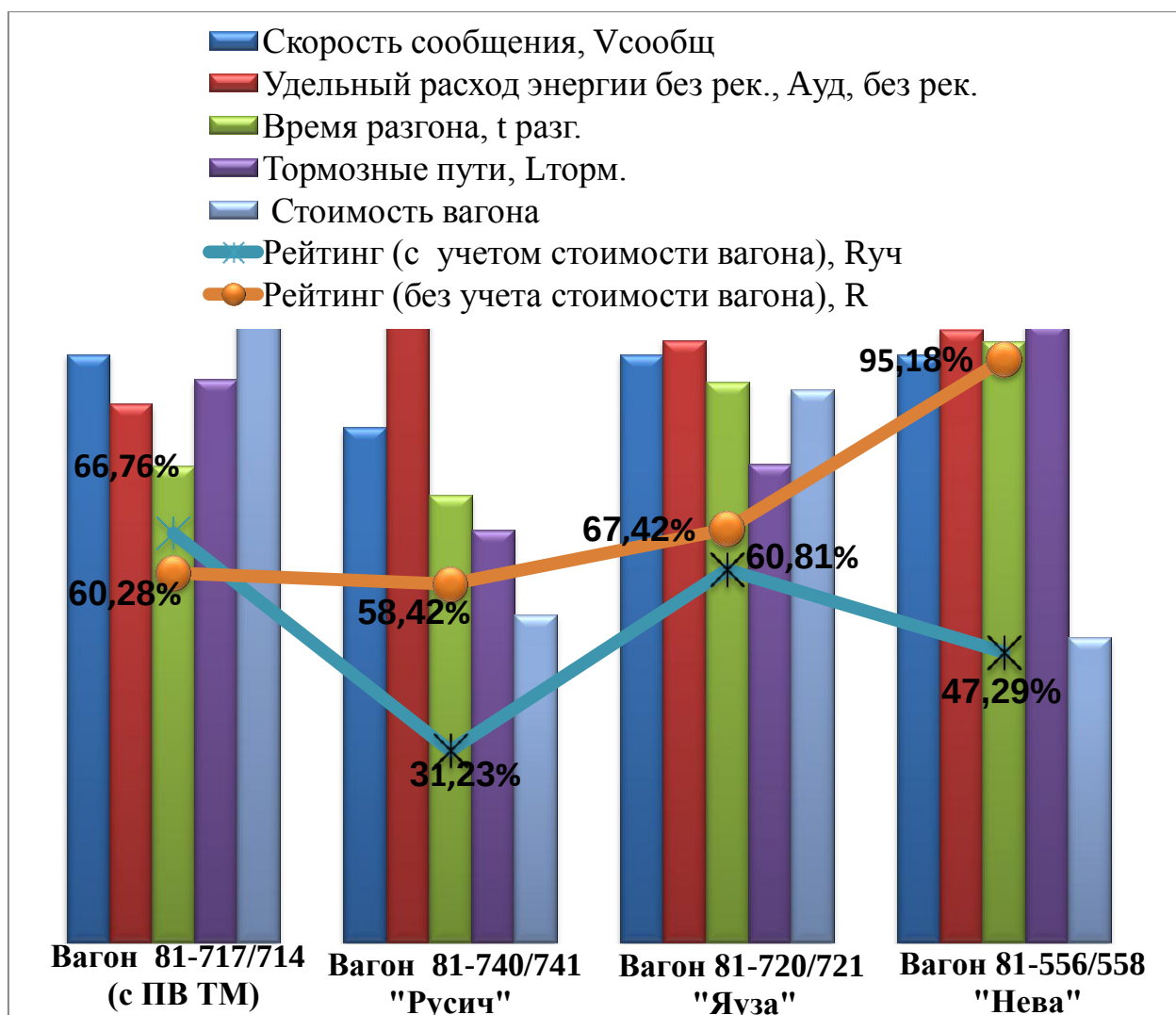


Рис. 5.2. Отношение показателей вагонов метро с различными системами ТЭП к показателям вагона метро условной модели 81.7XX со стандартными технико-экономическими характеристиками и их рейтинги по данным эксплуатации

На основе сравнительного анализа результатов рейтингов по данным эксплуатации можно прийти к выводу, в случае без учета стоимости вагона, самый эффективный – это вагон модели «Нева» 81.556/558 с ТЭП с АТМ (рейтинг 95,18%), а серийный вагон 81.717/714 с ТЭП постоянного тока ПВ (рейтинг 60,28%). С учетом стоимости вагона (с вычитанием расходов оснащения), эффективность вагона метро с АТМ снижается и его рейтинг – 47,29%, самый высокий рейтинг – вагон с ТЭП постоянного тока ПВ (рейтинг 66,76%), а рейтинги вагонов «Русич» 81.740А/741А и «Яуза» 81.720А/760 составляют, соответственно, 31,23% и 60,81% млн руб.

Выводы по главе 5

1. Обоснованы применение понятия «технико-экономический рейтинг» и его актуальность для комплексной оценки эффективности поездов метрополитена с различными типами ТЭП

2. По результатам всех рейтингов можно прийти к выводу, что самый эффективный – это вагон модели 81-717.714 с ТЭП постоянного тока НВ (рейтинг 61,08% – без рекуперации, а 93,83% – при рекуперации). Рейтинг вагона метро с АТМ уменьшается из-за его высокой стоимости (рейтинг 58,95% – без рекуперации, а 90,71% – при рекуперации), а самый низкий эффективный – вагон с ТЭП постоянного тока последовательного возбуждения ПВ (рейтинг – 46,29%).

3. На основе анализа результатов расчета и данных испытаний заметили, что рейтинг серийного вагона модели 81.717/714 с двигателями постоянного тока отечественного производства также может быть доведен до более эффективного уровня, если будут оптимизированы и доработаны его электротяговые характеристики за счёт применения на них рекуперативного торможения и энергосберегающего алгоритма управления ТЭП, достигаемого при относительно малых затратах и с использованием большей части установленного на них электрооборудования [111,112]. А надежность его тяговой установки не уступит надежности импортного АТМ, если будут доработаны электросхемы вагона и тщательно отработаны технологии производства, наладки и эксплуатации электронных систем.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Показаны актуальность и значимость усиления строительства линий метрополитена в крупных городах Вьетнама для решения всех их транспортных проблем. Обоснован выбор класса напряжения и постановлена задача выбора систем тягового электропривода (ТЭП) для вагонов метрополитена СРВ.

2. Выполнен сравнительный анализ преимуществ и недостатков систем ТЭП вагонов метро с различными видами тяговых двигателей и в результате выявлены следующие выводы:

2.1. показано, что целесообразность применения на ЭПС того или иного типа ТЭП определяется эксплуатационными требованиями;

2.2. показано, что при использовании на моторных вагонах ТИУ уступает ДРУ по многим показателям (тяговые и тормозные свойства, потребление энергии, эффективность рекуперации и т.д.) и замена ДРУ на ТИУ приводит к удорожанию и увеличению массы электрооборудования и не повышает его надежность;

2.3. показаны достоинства ТЭП с независимым возбуждением тяговых машин (НВ ТМ) для электропоездов метрополитена;

2.4. показана неоправданность замены в Московском метрополитене ТЭП с НВ ТМ на асинхронный электропривод, хотя эксплуатация опытных вагонов метро не была завершена в необходимом объеме

2.5. показано, что применение системы ТЭП с АТМ не дает существенных преимуществ при их эксплуатации на вагонах метрополитена Вьетнама, так как в связи с её высокой технологической сложностью необходимость дополнительных капиталовложений на переподготовку большого числа квалифицированного персонала и специалистов и оборудования специальных диагностических стендов для проверки работоспособности электронного оборудования;

2.6. установлено, что тяге средних мощностей и средних скоростей (например для метropоездов) привод переменного тока не обязателен и сделан вывод, что применение ЭПС с АТМ целесообразно, если ЭПС с ТМ ПТ не может обеспечить требуемые технические характеристики;

2.7. показано, что резервы улучшения технико-экономических показателей ЭПС с коллекторными тяговыми машинами постоянного тока (КТМ) далеко не исчерпаны и при их использовании применение ЭПС с ТМ ПТ экономически более целесообразно. ЭПС с КТМ могут быть существенно улучшены при замене последовательного возбуждения ТМ независимым, замене контакторного оборудования бесконтактным и при оснащении ею силовой электроникой. Это техническое решение не требует больших затрат и может быть реализовано при модернизации эксплуатируемого парка;

3. В результате проведенных расчетов получены необходимые тягово-энергетические и экономические показатели для сравнительной оценки эффективности вагонов метрополитена с различными системами ТЭП

3.1. Выполненные тягово-энергетические расчеты показали, что метropоезд с НВ ТМ имеет значительно лучшие энергетические показатели, чем метropоезд с ПВ ТМ, и эти энергетические показатели также лучше, чем у метropоезда с АТМ. Для вагона с ПВ ТМ рекуперативное торможение полностью отсутствует, поэтому в этом случае имеет место наибольший расход энергии;

3.2. Показано, что с экономической стороны, вагон метро с ТЭП постоянного тока выгоднее, чем с АТМ. Выполненные технико-экономические расчеты показали, что срок окупаемости замены электрооборудования на вагонах серий 81-817.714 их модификаций с учетом эксплуатационных затрат составляет 2 года 4 месяца при полном использовании рекуперированной энергии для вагонов с приводом постоянного тока НВ ТМ. Для приводов с АТМ срок окупаемости составит 8 лет 7 месяцев, что больше нормативного срока окупаемости;

4. По результатам всех технико-экономических рейтингов можно прийти к выводу, что самый эффективный – это вагон модели 81-717.714 с ТЭП постоянного тока НВ. Рейтинг вагона метро с АТМ снижается из-за его высокой стоимости, а самый низкий эффективный – вагон с ТЭП постоянного тока ПВ.

5. Предложена система ТЭП на основе КТМ постоянного тока независимого возбуждения и энергосберегающего алгоритма управления с улучшенными характеристиками и существенными преимуществами. для электропоездов метрополитена Вьетнама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нгуен Тхи Бик Ханг. Повышение эффективности функционирования пассажирских автобусных перевозок в крупнейших городах социалистической Республики Вьетнам : На примере города Хошимина : автореферат дис. канд. техн. наук. – Москва, 2005.- 22 с.
2. Городской транспорт Ханоя [Электронный ресурс]. http://knowledge.allbest.ru/transport/2c0b65635b2bc79a4c43a88521206c27_0.ht.
3. Тхак Минь Куан. Эффективность использования автобусов малой вместимости для пассажирских перевозок в густонаселенных городах СРВ (на примере г.Ханой): дисс. канд. экономических наук. – М., 2014.- 152 с.
4. Дедова И.Н. Дау Хоанг Хынг. Оценка состояния транспортной инфраструктуры Вьетнама. Журнал «Транспортное дело России». Выпуск № 7, 2011 г.
5. Giao thong Ha Noi [Электронный ресурс]. <http://infonet.vn/moi-ngay-ha-noi-co-them-gan-1000-o-to-xe-may-moi-ra-duong-post188099.info>
6. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Предлагаемая система тягового электропривода с наилучшими технико-экономическими показателями для вагонов метрополитена в крупных городах Социалистической Республики Вьетнам// Известия Тульского государственного университета. Технические науки 2017, № 4. Тула: Издательство ТулГУ. — 283 с.
7. Du an duong sat do thi Thanh pho Ho Chi Minh [Электронный ресурс].https://vi.wikipedia.org/wiki/Du_an_duong_sat_do_thi_Thanh_pho_Ho_Chi_Minh
8. Метро в Хошимине – первое во Вьетнаме. Началось строительство линии метро №1 во вьетнамской столице [Электронный ресурс].http://atrnews.ru/vietnam/21382/metro_v_khoshimine_pervoe_vo_vetname_nachalos_stroitelstvo_linii_metro_1_vo_vetnamskoy_stolitse_po_m/
9. Du an duong sat do thi Ha Noi [Электронный ресурс]. https://vi.wikipedia.org/wiki/D%E1%BB%B1_%C3%A1n_%C4%90%C6%B0%E1%B%9Dng_s%E1%BA%Aft_%C4%91%C3%B4_th%E1%BB%8B_H%C3%A0_N%E1%BB%99i

10. Марквардт К.Г. Энергоснабжение электрических железных дорог, М., «Транспорт», 1965, 463 с.
11. Быков Е.И., Б.В. Панин, В.Н. Пупынин, «Тяговые сети метрополитенов», М., «Транспорт», 1987, 256 с.
12. Электроснабжение метрополитенов. Под ред. Туманова В.Л. – М., «Транспортиздат», 1957, 399 с.
13. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Выбор рациональной системы тягового электропривода для вагонов метрополитена Социалистической Республики Вьетнам // Журнал «Электротехнические и информационные комплексы и системы». № 2 (Т. 13), 2017. - С. 19-24.
14. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Обоснование и выбор системы тягового электропривода вагонов метрополитена. Журнал «В мире научных открытий». 2015. № 7.8 (67). - С. 3119-3130.
15. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Анализ и оценка энерго-экономической эффективности вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода. Журнал «Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика», Том 15, №3. - 2015. - С. 74-81.
16. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. К выбору рациональных систем тягового электропривода вагонов метрополитена. Девятая международная научно-техническая конференция (МНТК) студентов, аспирантов и молодых учёных «Энергия-2014», ИГЭУ, г. Иваново, Т. 4. – С. 85-88.
17. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. К обоснованию целесообразности применения на поездах метрополитена альтернативных систем тягового электропривода // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XX МНТК студентов и аспирантов. - М.: МЭИ, 2014. - Т. 2.
18. А. Ракитин. Будущее – за асинхронным приводом. Технический отдел службы подвижного состава. Петербургский метрополитен N13 (1318) [Электронный ресурс]. <http://metroworld.ruz.net/trains/asyn.htm>
19. Nouvion F.F. Consideration on the use of d.c and three- phase traction motors and transmission system in the context of motive power development // Proc. Inst. Mech. Engrs. - 1987, Vol.201. - №2. - P. 99-113.

20. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. К выбору перспективных систем тягового электропривода электроподвижного состава // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы пятой МНПК. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2014. - 760 с. – С. 578-581.
21. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Оценка экономической эффективности альтернативных систем тягового электропривода Хошиминского метрополитена: Труды X юбилейной МНПК студентов и молодых ученых «Trans-Mech-Art-Chem», МИИТ, Москва 2014.
22. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Выбор рациональных систем тягового электропривода для Хошиминского метрополитена по экономической эффективности // Сборник материалов VII Всерос. НПК с международным участием «Россия молодая». – Кемерово, 2015.– С. 578-581.
23. Мугинштейн Л.А., Кучумов В.А., Назаров О.Н. О выборе типа тягового электропривода электроподвижного состава // Железнодорожный транспорт 2005 г. , №5, с. 42-48.
24. Тулупов В.Д. Проблема совершенствования электроподвижного состава. Железнодорожный транспорт. 1992 г., №10, с. 28-36.
25. Мнацаканов В. А. Форсажный тяговый привод // Железнодорожный транспорт, 2008, №2. - С.50-54.
26. Покровский С.В. Состояние и перспективы развития электроподвижного состава // 2 Международная научно-техническая конференция - Новочеркасск, 1997. С. 88-89.
27. Захаров В.И., Князев Н.В. Пути повышения технических показателей тяговых электродвигателей // Сб. научных трудов ВЭЛНИИ. - 1998. №40, С.57-72.
28. Фаминский Г.В. Экономия электроэнергии на электропоездах // М.: Транспорт, 1970., 88с.
29. Кирюшин Д.Е. Система показателей при комплексной оценке тягового электропривода пригородных и межрегиональных электропоездов. Дисс. ... канд. техн. наук. - М., 2005г.
30. Бещева Н.И. Пригородное движение на электрифицированных линиях //М.: Трансжелдориздат, 1961.

31. Тулупов В.Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения ЭПС // М.: Транспорт, 1976.
32. Чашин В.В. Повышение эффективности работы асинхронного тягового электродвигателя с учетом его теплового состояния. Дисс. на соискание уч. ст. к.т.н. - Москва, 2004.
33. Литовченко В.В. Внедрение асинхронного привода на тяговом подвижном составе //Ж.-д. трансп. ОИ/ЦНИИТЭИ МПС. - 1988. Вып. 1,- с. 1-36.
34. Бочаров В.И. Совершенствование и перспективы развития тяговых электродвигателей магистрального электроподвижного состава. Дисс. ... докт. техн. наук. - М., 1983.
35. Хвостов В.С. Выбор характеристик ТЭД электровозов и некоторые вопросы проектирования электрических машин постоянного тока. Дисс. ... докт. техн. наук. - М., 1964.
36. Кузьмич В.Д., Логинова Е.Ю. Математическое моделирование температурного поля обмоток тягового электродвигателя тепловоза // Вестник ВНИИЖТ - 1999, №2. С.39-43.
37. Мнацаканов В.А. Повысить комфортность проезда пассажиров в электропоездах // Локомотив - 2005, №3. С.38-39.
38. Фадеев С.В. Повышение экономичности электровозов переменного тока за счет применения новых электронных систем управления. Дисс. ... канд. техн. наук. - М., 2003.
39. Станкевич И.С. Повышение эффективности тяговых электроприводов путем применения импульсных преобразователей с непрерывным входным током. Дисс. ... канд. техн. наук. - М., 1987.
40. Трубицина Н.А. Повышение эксплуатационной эффективности тяговых электродвигателей электровозов. Дисс.... канд. техн. наук. - М., 2003.
41. Бородулин И.П. Применение на тепловозах ТЭД смешанного возбуждения с плавным регулированием магнитного потока. Дисс. ... канд. техн. наук. - М., 1964.
42. Пименова А.А. Оценка технико-энергетической эффективности альтернативных систем тягового электропривода // Тезисы докладов. XIV

международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. – Москва, 2008. – С. 195-197.

43. Тулупов В.Д, Ле Суан Хонг. Оценка технико-экономической эффективности асинхронного тягового электропривода // Современные проблемы электроэнергетики. Сборник статей II МНТК - Барнаул - 2014 г. – С. 138-145.

44. Мнацаканов В.А. Будущее — за бесконтактными аппаратами // Локомотив. 2005. № 9. С. 32 — 33.

45. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Сопоставление энергетических показателей вагонов метрополитена с различными системами тягового электропривода // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. VI МНТК. Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. – Иваново, 2015. – С. 416-421.

46. Мнацаканов В.А. К истории отечественного метровагоностроения // Метро и тоннели №3, 2015. – С. 28-33.

47. Колпаков-Мирошниченко Н.И. Сравнение эффективности систем тягового электрического привода трамвайных вагонов. Маг. дисс. - М., 2015.

48. Сорокин М.А. Исследование тягово-энергетических показателей вагонов метро с асинхронным приводом : магистерская диссертация. Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ), Кафедра электрического транспорта (ЭТ) . – М., 2010 . – 199 с.

49. Комплект электрооборудования тягового для вагонов метрополитена моделей 81-717.5м, 81-714.5м [Интернет-ресурс]. <http://laborant.ru/eltech/10/2/5/01-96.htm>

50. Построение силовой схемы тормозного режима [Интернет-ресурс]. http://studopedia.ru/3_210592_postroenie-silovoy-shemi-tormoznogo-rezhima.html

51. Реостатный контроллер (РК) типа ЭКГ – 36АУ2 [Интернет-ресурс]. <http://helpiks.org/5-77698.html>

52. Котышов Д.Г. Модернизация тягового электропривода вагонов метро: дипломный проект. МЭИ, – М., 2007.

53. Розенфельд В.Е, Шевченко В.В., Майбога В.А., Долаберидзе Г.П. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока. Издательство «Транспорт», 1970г.

54. Курбасов А.С. Система электрической тяги XXI века // Железные дороги мира. - 1999. - №4. – С. 24-26.
55. Курбасов А.С. Повышение работоспособности тяговых двигателей. М.: Энергия, 1977. – 223с.
56. Гаврилов Я.И., Комаров В.Г., Скибинский В.А., Сакаев В.Ш. Улучшение энергетических показателей метрополитенов: сб. науч. тр. – М.: Транспорт, 1987. – С. 29-36.
57. Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.
58. Матюшин В.А., Розенберг Б.М., Курбасов Б.А., Скачков В.А. Сравнительная оценка характеристик систем рекуперативного торможения вагонов // Улучшение энергетических показателей метрополитенов: Сб. научн. тр. М.: Транспорт, 1987. С.36-41.
59. Работа асинхронного тягового привода [Интернет-ресурс]. http://life-prog.ru/2_67445_rabota-asinhronnogo-tyagovogo-privoda.html
60. Вагоны метрополитена моделей 81-760 и 81-761 -руководство по эксплуатации [Интернет-ресурс]. <http://www.torgi-mosmetro.ru/>
61. Ротанов Н.А., Курбасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
62. Петров В.А., Николаев А.Г., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена модели с тяговым приводом повышенной надежности // Метро и тоннели. 2013. № 6. С. 22 – 24.
63. Тулупов В.Д, Бриедис А.А., Слепцов М.А. Модернизация электропоездов постоянного тока // XVI Международная конференция "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты". - М.: МЭИ, 2016. - С. 159-160.
64. Тулупов В.Д, Бриедис А.А. Возможность улучшения энергетических показателей электропоездов за счет модернизации схем силовых цепей // Журнал «Вестник МЭИ», №4. -2016. - С. 83-87.
65. Экспресс-информация: Городской транспорт. –2008. - № 25.

66. Реферативный журнал (РЖ) «Электротехника» 21л. Электрооборуд. тр-та. - 2006, №3.
67. Локомотив для Европы без границ // Железные дороги мира, 2004, №8.
68. Солдатенко Д.А. Разработка методов выбора параметров тяговых приводов тепловозов по уровню энергетической эффективности. Автореф. ... канд. техн. наук. – М., 2008. – 24 с.
69. Ле Суан Хонг. Оценка технико-экономической эффективности асинхронного тягового электропривода // Современные проблемы электроэнергетики. Сборник статей II МНТК - Барнаул - 2014 г. – С. 138-145.
70. Ле Суан Хонг. Сопоставление перспективных систем тягового электропривода электроподвижного состава // «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: Материалы трудов XX Всероссийской научно-технической конференции. – Томск, 2014.
71. Солодунов А.М., Иньков А.М., Иньков Ю.М., Сеничев Ф.И. и др. Асинхронный привод электропоездов // Ж-д тран. – 1987. - № 1. - С.43-46.
72. Kasperek F. Die elektrische Ausrüstung der neuen Wiener U-Bahn-Wagen / F. Kasperek // Eisenbahntechnik. – 1985. –№4.
73. Реферативный журнал (РЖ) «Электротехника» 21л. Электрооборуд. тр-та. –2008. –№1.
74. Анализ нарушений нормальной работы подвижного состава моделей 81-760 и 81-761 в условиях КЖЦ за 2017 год. Руководство эксплуатации, отдела ТУ, ЭД и ТД, Метровагонмаш, – М., 2017.
75. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Оценка эффективности альтернативных систем тягового электропривода по значениям их КПД // Тинчуринские чтения: Материалы докладов IX Международной молодежной научной конференции (ММНК). – Казан: КГЭУ, 2014. – С. 301.
76. Jorg Amler Ein Jahr Erfahrungen mit den Nurnberger U-Bahnwagen mit Drehstromantrieb. Verkehr and Technik. 2008г., №8.
77. Реферативный журнал. Железнодорожный транспорт. 11Б. Локомотивостроение и вагоностроение. Выпуск сводного тома. М., ВИНТИ, 2015, №5, реф. 5Б84.

78. Yang Anli. Подвижной состав железных дорог Китая // Chinese Railways, 1997, №2(9), p. 18-24.
79. Тулупов В.Д., Ле Суан Хонг. Повышение энергетической эффективности систем тягового электропривода вагонов метрополитена // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XXI МНТК студентов и аспирантов. - М.: МЭИ, 2015. - Т. 2.
80. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Оценка системы тягового электропривода вагонов метрополитена с автоматически регулируемым независимым возбуждением тяговых машин // Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации: Материалы МНТК, посвященной 60-летию ОГУ (ч. 1) / – г. Оренбург, 2015. – С. 89-94.
81. Тулупов В.Д. Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями. Сборник «Электросила», выпуск 41. Г. Санкт-Петербург 2002, с. 196-210.
82. Тулупов В.Д., Марченков А.П., Кабанец С.И. и др. Схема силовых цепей вагонов метрополитена с независимым возбуждением тяговых машин и тиристорным реостатным контроллером. // Тр. МЭИ 1992, выпуск 641, С. 36-45.
83. А.П. Марченков, В.Д. Тулупов. Тяговый электропривод транспортного средства // А. с. № 1168445. Бюлл. изобрет. 1984.
84. Ляпунова Н.Д. Исследование эффективности применения на вагонах метрополитена независимого возбуждения тяговых машин: Диссертация кандидата технических наук, МЭИ. – 1981. – 290 с.
85. Байрыева Л.С., Прокопович А.В. Тяговые расчеты подвижного состава. Учебное пособие по курсу «Теория электрической тяги». - М. МЭИ, 1997, 87 с.
86. Назаров О.Н. Совершенствование методов определения и сравнительного анализа тягово-энергетических показателей пригородных электропоездов. Дисс.... канд. техн. наук. - М., 2000.
87. Il fattore di accrescimento nei rotabili tradizionali e innovative veloci / Panagin Romano // Ing. Ferroviaria-1996.-51, №4.-С.181-196
88. Курбасов А.С., Седов В.П., Сорин Л.Н. Проектирование тяговых электродвигателей. М.: Транспорт, 1987. 536 с.

89. Тулулов В.Д., Ле Суан Хонг. Оценка эффективности новых систем тягового привода вагонов метрополитена // Будущее технической науки: сборник материалов XIV ММНК, НГТУ. – Нижний Новгород, 2015. – 618 с.– С. 203-204.
90. Тулулов В.Д., Ле Суан Хонг, Реальные энергетические показатели систем тягового электропривода вагонов метрополитена // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. «Омский государственный технический университет». г. Омск, 2016. С. 221-225.
91. Ле Суан Хонг, Тулулов В.Д. Рейтинг вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода по энерготехническим показателям //Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – Воронеж, 2015. - Вып. 2. №2 - С. 386-391.
92. Ле Суан Хонг, Тулулов В.Д. Тягово-энергетический рейтинг вагонов метрополитена с альтернативными системами тягового электропривода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки 2016, №3. Тула: Издательство ТулГУ. — 273 с.
93. Ле Суан Хонг. Расчет расходов электроэнергии метрополитена с различными системами тягового электропривода с помощью программы «Mathcad» // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2015), Том 2: труды МНТК / под ред. С.А. Прохорова. - Самара: Изд. Самарского научного центра РАН, 2015. - С. 92-95.
94. Ле Суан Хонг. Универсальная программа тягово-энергетических расчетов для метрополитена постоянного тока с различными системами тягового электропривода // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2014): труды / под ред. С.А. Прохорова. - Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2014 г. - С. 521-525.
95. Ле Суан Хонг, Тулулов В.Д. Разработка программы тягово-энергетических расчетов для метрополитена постоянного тока в среде Mathcad. "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты" 15-я Международная конференция (Труды МКЭЭЭ-2014) Алушта, Крым = 15-th International conference on Electromechanics, Electrotechnology,

Electromaterials and Components (ICEEE - 2014 Abstracts) : материалы конф. – М. : Изд МЭИ, 2014. – С. 186-188.

96. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Сопоставление энергетических показателей вагонов метрополитена с различными системами тягового электропривода: труды VI МНТК. – Иваново: ФГБОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», 2015. – С. 416-421.

97. Ле Суан Хонг, Тулупов В.Д. Расчет тягово-энергетических характеристик метрополитена с различными системами тягового электропривода с помощью программы «Mathcad» //Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – Воронеж, 2015. - Вып. 2. №1 - С. 37-42.

98. Байрыева Л.С., Прокопович А.В. Тяговые расчёты подвижного состава. Учебное пособие по курсу «Теория электрической тяги». - М. МЭИ, 1997, 87 с.

99. Копылов И.П. и др. Проектирование электр. машин. учебное пособие для вузов Под редакцией И.П. Копылова. – М. Энергия, 1980. 496 с.

100. Окка Пьо. Вагон метрополитена с независимым возбуждением тяговых двигателей для союза Мьянмы : дисс. канд. техн. наук. - Москва, 2010. - 110 с.

101. Тулупов В.Д. Автоматическое регулирование сил тяги и торможения электроподвижного состава. - М. : Транспорт, 1976, 368 с.

102. Ляпунова Н.Д. Исследование эффективности применения на вагонах метрополитена независимого возбуждения

103. Наш транспорт (Моё метро) [Интернет-ресурс]. <http://forum.nashtransport.ru/index.php?showtopic=1818>

104. Поставки вагонов в Московское метро в 2011 году [Интернет-ресурс]. <http://metroblog.ru/post/3384/>

105. Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок [Интернет-ресурс]. <http://zakupki.gov.ru/>

106. Уровень Инфляции в Российской Федерации (инфляционные калькуляторы) [Интернет-ресурс]. http://уровень-инфляции.рф/инфляционные_калькуляторы.

107. Постановление Совмина СССР от 22.10.1990 N 1072 «О единых нормах амортизационных отчислений на полное восстановление основных фондов народного хозяйства СССР» [Интернет-ресурс]
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_1927/8e1216e0048c586b500391bd62405a19b4b8c074/

108. Определение себестоимости ремонта вагонов [Интернет-ресурс].
https://vuzlit.ru/976918/opredelenie_sebestoimosti_remonta_vagonov

109. Нормативный срок – окупаемость [Интернет-ресурс].
<http://www.ngpedia.ru/id474129p1.html>

110. Технические требования к ЭПС Московского метрополитена для поставки в 2016-2022 годах
<http://yauzaforum.ru/index.php?app=core&module=attach§ion>

111. Ле Суан Хонг. Моделирование системы тягового электропривода вагонов метрополитена с наилучшими энергетическими показателям // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. науч.- техн. конф. Т.1., г. Томск. 10-14 ноября 2014 г. / Мнн-во образования и науки РФ. Томский политехнический университет. – Томск, 2014. – С. 407-411.

112. Тулупов В.Д. Улучшение энергетических показателей электропоездов // Железнодорожный транспорт, 1991, №9, С. 38-41.

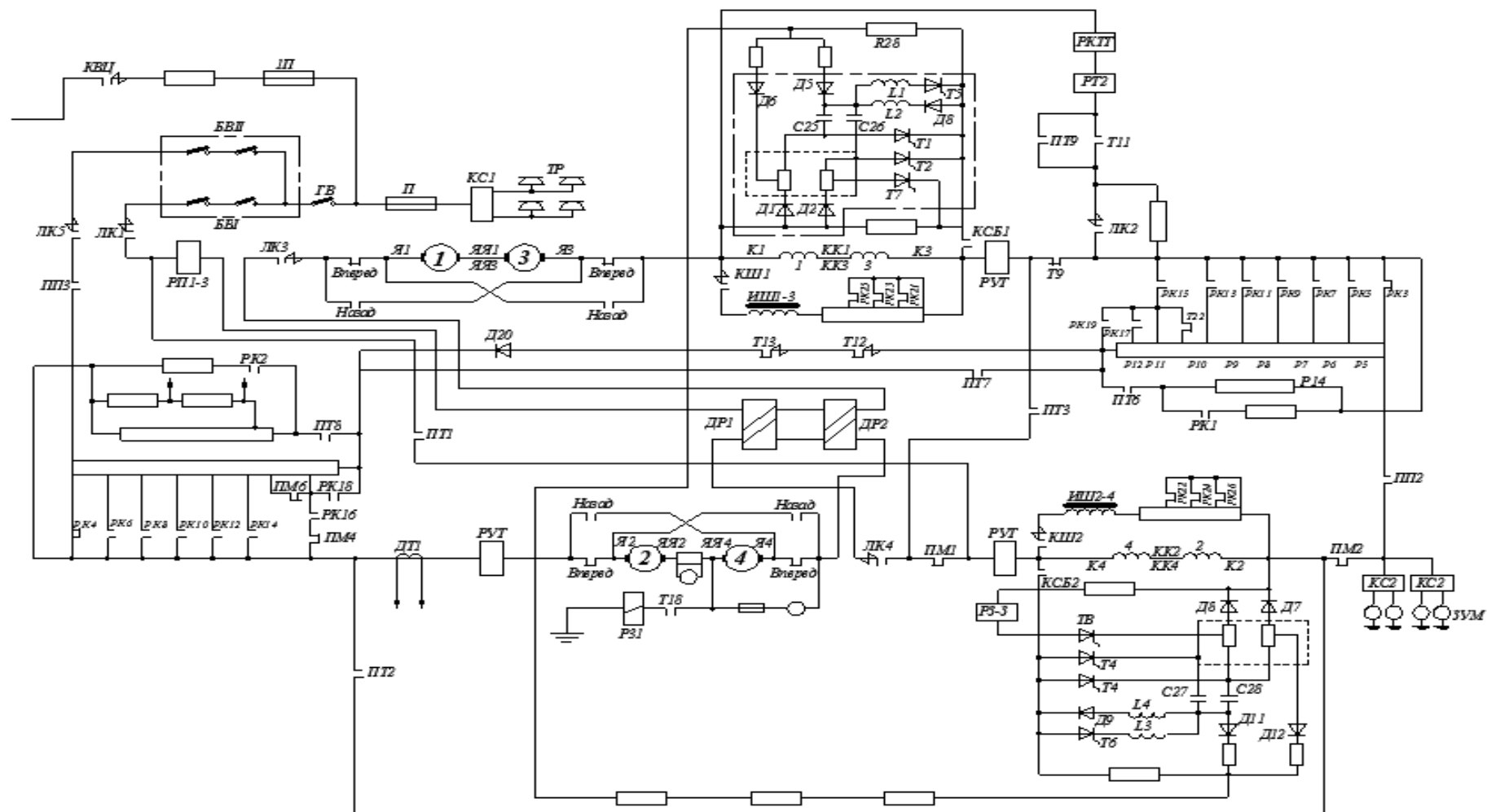


Рис. П1. Схема силовой цепи вагона метрополитена 81-717/14 постоянного тока с дискретным реостатным управлением

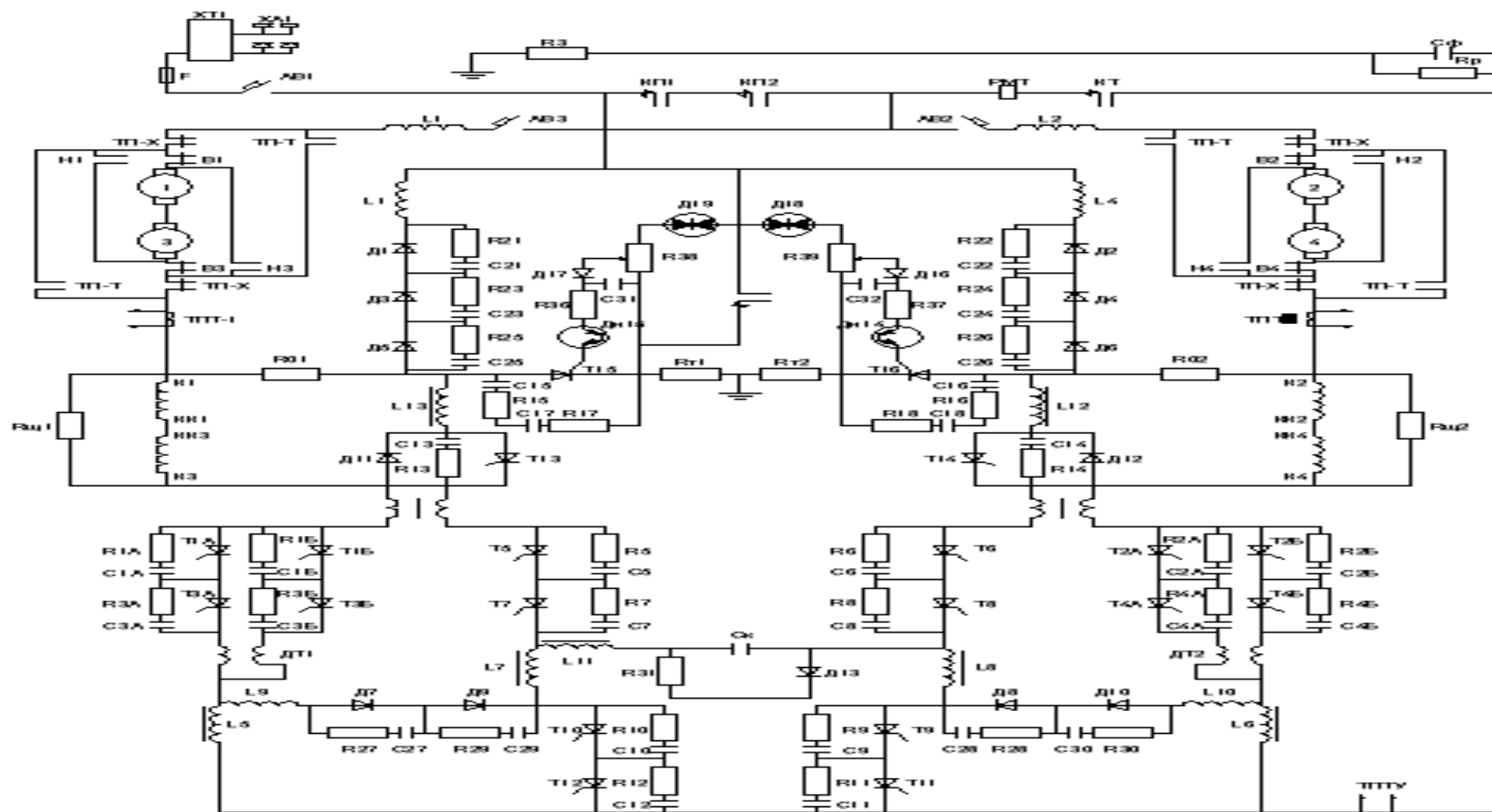


Рис. П2. Схема силовой цепи вагона метрополитена с ТИУ

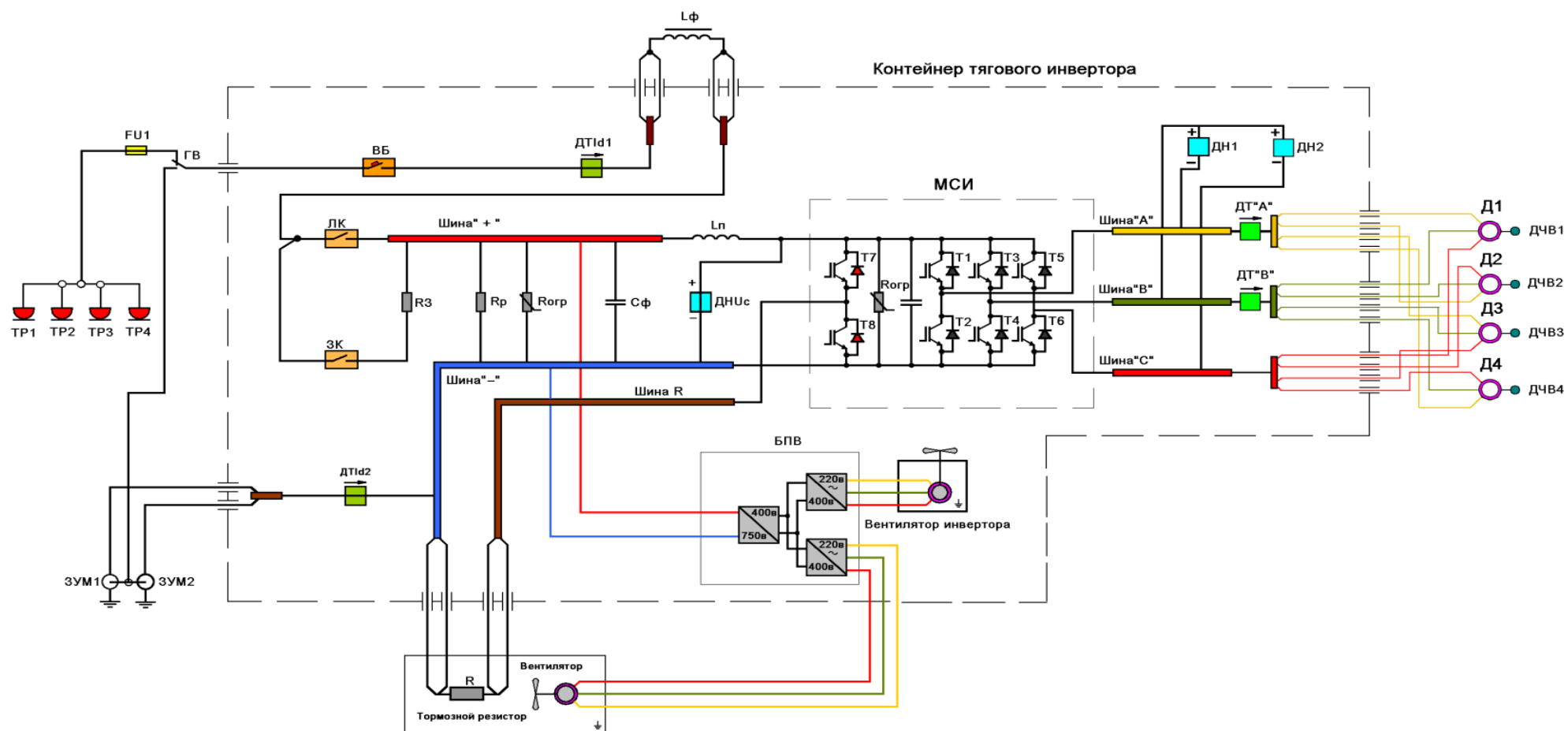


Рис.П 3. Схема силовых цепей комплекта электрооборудования АТМ вагона метрополитена

П4. Расшифровка фактических затрат на асинхронный тяговый привод по данным «Мосметрополитен»

№ п/п	Наименование	Обозначение	Цена в евро	Цена, рублей	Кол.	Сумма, рублей	Поставщик
	<u>Контейнер тягового инвертора</u>						
1	Выключатель быстродействующий	IR2015SV	4,736.00	234,432.00	1	234,432.00	Microelettrica Scientifica ИТАЛИЯ
2	Датчик напряжения	LV100-2000/SP6	257.37	12,739.82	3	38,219.46	LEM Components (ИТС)
3	Датчик тока	LT2005-T/SP8	379.54	18,787.23	5	93,936.15	LEM Components (ИТС)
4	Конденсатор	B25650-C9169-K004 или E.59.A85-166010	1,731.36	85,702.32	4	342,809.28	EPCOS AG , Германия (Диал Электролюкс)
5	Контактор	BMS15.08 E	989.16	48,963.42	1	48,963.42	SECHERON Швейцария (ИТС)
6	Контактор	LTC 250/1PNO/V/72/1NO	266.44	13,188.78	1	13,188.78	ООО "АкЭл"
	<u>Модуль силового инвертора</u>						
7	Варистор SIOV-B80K680	B72280-B681-K1	82.20	4,068.90	2	8,137.80	EPCOS AG , Германия (Диал Электролюкс)
8	Конденсатор 300 uF 1250 V	B25623-S1307-K253	99.53	4,926.74	12	59,120.88	ООО "Диал-Электролюкс"
9	IGBT - Модуль 1200 A 1700 V	FF1200R17KP4_B2	532.20	26,343.90	16	421,502.40	ООО "Диал-Компонент"
10	Резистор	LPS-300-22K-10%	48.73	2,412.14	1	2,412.14	ООО "Компания Ай-Ти-Си"
11	Радиатор (58 ребер) - плита теплопроводящая 7600.40.03.167	JK2373-1200-SE-IT/Junior	1,728.15	85,543.43	1	85,543.43	ALUTRONIC Германия (Correct Marine, г. Санкт- Петербург)
12	Термостат	US - 602SXRFB� 085	2.82	139.59	4	558.36	Asahi Keiki Япония (Перел-Раша, г. Санкт- Петербург)
13	Датчик частоты вращения	ME10AF-701	243.49	12,052.76	4	48,211.04	Rowe Hankins Components Ltd. Великобритания (ИТС)
14	Тормозной резистор	DT50923 sh1 ITEM2	6,876.26	340,374.87	1	340,374.87	Microelettrica Scientifica ИТАЛИЯ
	Итого импортная комплектация:		35,099.19			1,737,410.01	
	Транспортные расходы					17,374.10	
	ВСЕГО С ТЗР					1,754,784.11	

Таблица П21. Тягово-энергетические показатели вагонов метрополитена по расчетном режиму

Параметры	Серийный вагон 81-717.714 (с ПВ ТМ) расчетный режим	Серийный вагон 81-717.714 (с НВ ТМ), расчетный режим	Серийный вагон 81-717.714 (с АТМ), расчетный режим
Конструктивные показатели			
Масса комплекта электрооборудования, т	5,6	5,6	6,277
Масса вагона с пассажирами, т	57,1	57,1	57,777
Номинальная мощность двигателя, кВт	110	110	170
Тягово-энергетические показатели			
Общая длина участка, м	1700	1700	1700
Общее время движения, с	105,83	105,83	105,83
Средняя скорость движения, км/ч	57,83	57,83	57,83
Скорость начала торможения, км/ч	68	66,5	65,5
Скорость начала выбега, км/ч	78	78	81
Среднее ускорение при разгоне, м/с ²	0,94	0,97	1,09
Среднее замедление при торможении, м/с ²	1,158	1,196	1,165
Расход энергии на собственные нужды, Вт.ч	109	109	124
Расход энергии в преобразователе, Вт.ч	–	–	3328
Расход энергии на тягу (без рекуперации), Вт.ч	49335	46095	47411
Возврат энергии при рекуперативном торможении, кВт.ч	–	17787	16669
Итоговый расход энергии, кВт.ч	49335	28308	30742
Удельный расход энергии (без рекуперации), Вт.ч/т.км	63,53	59,36	60,34
Удельный расход энергии рекуперации, Вт.ч/т.км	–	22,78	21,21
Удельный расход энергии (при рекуперации)	63,53	36,58	39,13

Таблица П5 - Электромеханические характеристики тягового двигателя ДК-117

I _д , А	Усиленное поле ($\alpha=100\%$)			Нормальное поле ($\alpha=50\%$)			Ослабленное поле ($\alpha=35\%$)		
	v, км/ч	F _д , Н	η , %	v, км/ч	F _д , Н	η , %	v, км/ч	F _д , Н	η , %
100	57,5	1860	82,5	-	-	-	-	-	-
125	49	2790	84,5	-	-	-	-	-	-
150	43,8	3920	85,5	78	2350	84,3	-	-	-
200	37,5	6220	86,4	60	3820	87,0	91,5	2400	83,5
250	33,6	8720	86,0	51,5	5680	87,6	76	3680	85,8
300	31,9	11270	85,5	45,1	7840	87,8	66,7	5100	87,0
350	28,7	13920	84,7	41	10090	87,6	60,1	6660	87,6
400	27	16610	83,9	38	12310	87,4	55,5	8330	87,5

Таблица П6 - Величины сопротивлений на позиции реостатного контроллера

Позиции	Величина сопротивлений, Ом	
	С-соединение (R_{cc})	П-соединение ($R_{пс}$)
1	0.724	0.362
2	0.639	0.277
3	0.554	0.208
4	0.485	0.152
5	0.416	0.107
6	0.36	0.07
7	0.304	0.041
8	0.259	0.018
9	0.214	
10	0.177	
11	0.14	
12	0.111	
13	0.082	
14	0.059	
15	0.036	
16	0.018	

1-я позиция

$$i := 0, 1 \dots 3$$

$$V_{\text{ссреост}1_i} := V_{\text{полн}_i} \cdot \frac{[U_{\text{сс}} - I_i \cdot (R_{\text{тм}} + R_1)]}{U_{\text{пс}} - I_i \cdot (R_{\text{тм}} + R_1)}$$

$I_i =$	$a_0 := I_3$	$V_{\text{ссреост}1_i} =$	$b_0 := V_{\text{ссреост}1_3}$								
<table border="1"><tr><td>100</td></tr><tr><td>125</td></tr><tr><td>150</td></tr><tr><td>200</td></tr></table>	100	125	150	200	$a_1 := I_2$	<table border="1"><tr><td>20.66</td></tr><tr><td>15.23</td></tr><tr><td>11.143</td></tr><tr><td>4.066</td></tr></table>	20.66	15.23	11.143	4.066	$b_1 := V_{\text{ссреост}1_2}$
100											
125											
150											
200											
20.66											
15.23											
11.143											
4.066											
	$a_2 := I_1$		$b_2 := V_{\text{ссреост}1_1}$								
	$a_3 := I_0$		$b_3 := V_{\text{ссреост}1_0}$								

$$I_1 := \text{cspline}(b, a)$$

$$I_1(V_{\text{движ}}) := \text{interp}(I_1, b, a, V_{\text{движ}})$$

2-я позиция

$$i := 0, 1 \dots 4$$

$$V_{\text{ссреост}2_i} := V_{\text{полн}_i} \cdot \frac{[U_{\text{сс}} - I_i \cdot (R_{\text{тм}} + R_2)]}{U_{\text{пс}} - I_i \cdot (R_{\text{тм}} + R_2)}$$

$I_i =$	$a_0 := I_4$	$V_{\text{ссреост}2_i} =$	$b_0 := V_{\text{ссреост}2_4}$										
<table border="1"><tr><td>100</td></tr><tr><td>125</td></tr><tr><td>150</td></tr><tr><td>200</td></tr><tr><td>250</td></tr></table>	100	125	150	200	250	$a_1 := I_3$	<table border="1"><tr><td>21.7</td></tr><tr><td>16.499</td></tr><tr><td>12.719</td></tr><tr><td>6.566</td></tr><tr><td>0.507</td></tr></table>	21.7	16.499	12.719	6.566	0.507	$b_1 := V_{\text{ссреост}2_3}$
100													
125													
150													
200													
250													
21.7													
16.499													
12.719													
6.566													
0.507													
	$a_2 := I_2$		$b_2 := V_{\text{ссреост}2_2}$										
	$a_3 := I_1$		$b_3 := V_{\text{ссреост}2_1}$										
	$a_4 := I_0$		$b_4 := V_{\text{ссреост}2_0}$										

$$I_2 := \text{cspline}(b, a)$$

$$I_2(V_{\text{движ}}) := \text{interp}(I_2, b, a, V_{\text{движ}})$$

Рис. П7. Алгоритм расчета для двухреостатных позиций на последовательном соединении

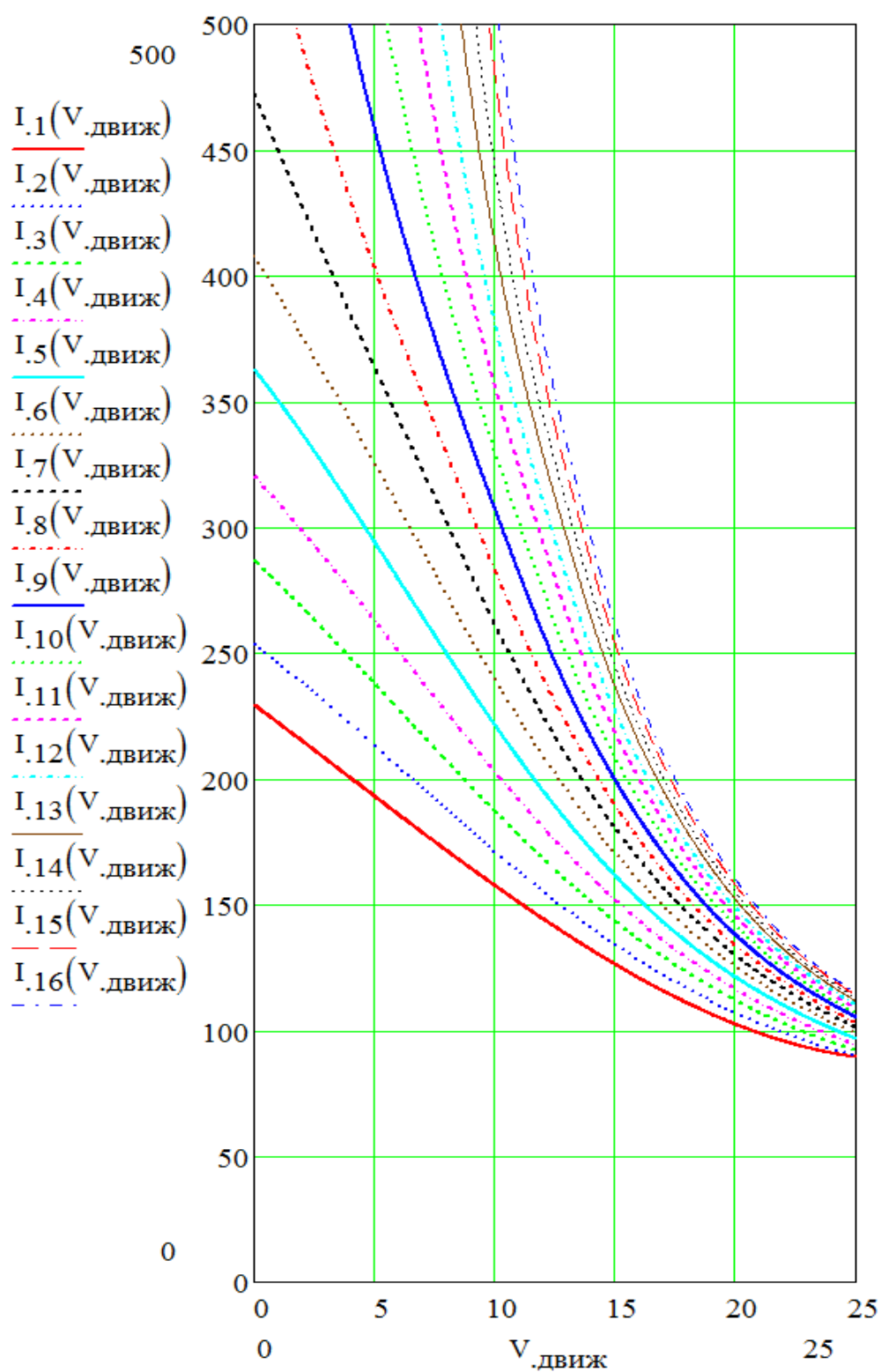


Рис. П8. Электромеханические характеристики на последовательном соединении ТМ

1-я позиция $i := 0, 1 \dots 7$

$$V_{\text{псреост}1_i} := \frac{U_{\text{пс}} - I_i \cdot (R_{\text{тм}} + R_{1\text{п}})}{c\Phi_i}$$

$k_0 := I_7$ $f_0 := V_{\text{псреост}1_7}$
 $k_1 := I_6$ $f_1 := V_{\text{псреост}1_6}$
 $k_2 := I_5$ $f_2 := V_{\text{псреост}1_5}$
 $k_3 := I_4$ $f_3 := V_{\text{псреост}1_4}$
 $k_4 := I_3$ $f_4 := V_{\text{псреост}1_3}$
 $k_5 := I_2$ $f_5 := V_{\text{псреост}1_2}$
 $k_6 := I_1$ $f_6 := V_{\text{псреост}1_1}$
 $k_7 := I_0$ $f_7 := V_{\text{псреост}1_0}$

$I_i =$

100
125
150
200
250
300
350
400

$V_{\text{псреост}1_i} =$

51.796
42.886
37.194
29.855
24.916
21.246
18.01
15.336

$$I_{1\text{п}} := \text{cspline}(f, k)$$

$$I_{1\text{п}}(V_{\text{движ}}) := \text{interp}(I_{1\text{п}}, f, k, V_{\text{движ}})$$

2-я позиция $i := 0, 1 \dots 7$

$$V_{\text{псреост}2_i} := \frac{U_{\text{пс}} - I_i \cdot (R_{\text{тм}} + R_{2\text{п}})}{c\Phi_i}$$

$k_0 := I_7$ $f_0 := V_{\text{псреост}2_7}$
 $k_1 := I_6$ $f_1 := V_{\text{псреост}2_6}$
 $k_2 := I_5$ $f_2 := V_{\text{псреост}2_5}$
 $k_3 := I_4$ $f_3 := V_{\text{псреост}2_4}$
 $k_4 := I_3$ $f_4 := V_{\text{псреост}2_3}$
 $k_5 := I_2$ $f_5 := V_{\text{псреост}2_2}$
 $k_6 := I_1$ $f_6 := V_{\text{псреост}2_1}$
 $k_7 := I_0$ $f_7 := V_{\text{псреост}2_0}$

$I_i =$

100
125
150
200
250
300
350
400

$V_{\text{псреост}2_i} =$

53.134
44.322
38.745
31.651
26.955
23.536
20.52
18.075

$$I_{2\text{п}} := \text{cspline}(f, k)$$

$$I_{2\text{п}}(V_{\text{движ}}) := \text{interp}(I_{2\text{п}}, f, k, V_{\text{движ}})$$

Рис. П9. Алгоритм расчета для двухреостатных позиций на параллельном соединении

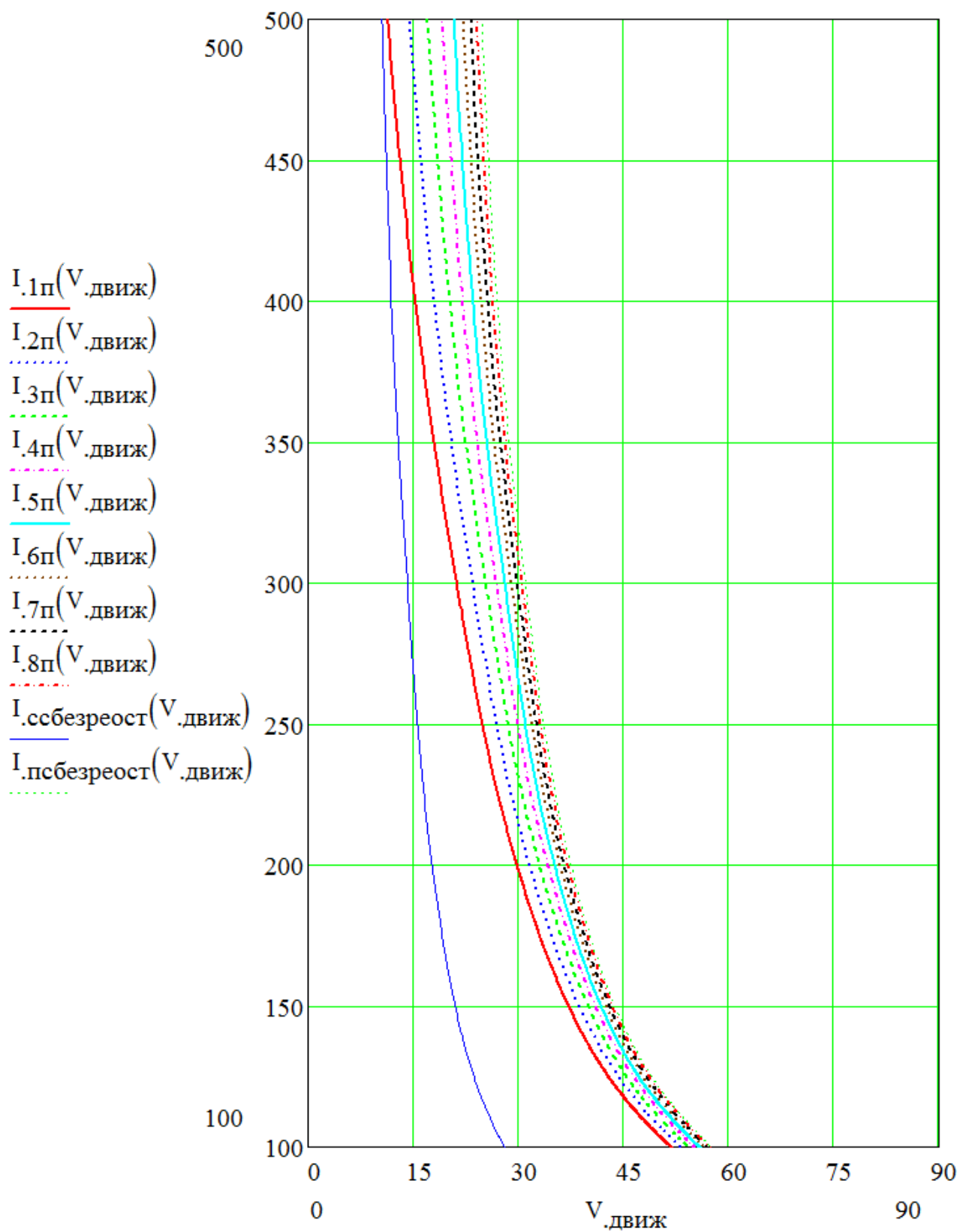


Рис. П10. Реостатные характеристики на параллельном соединении

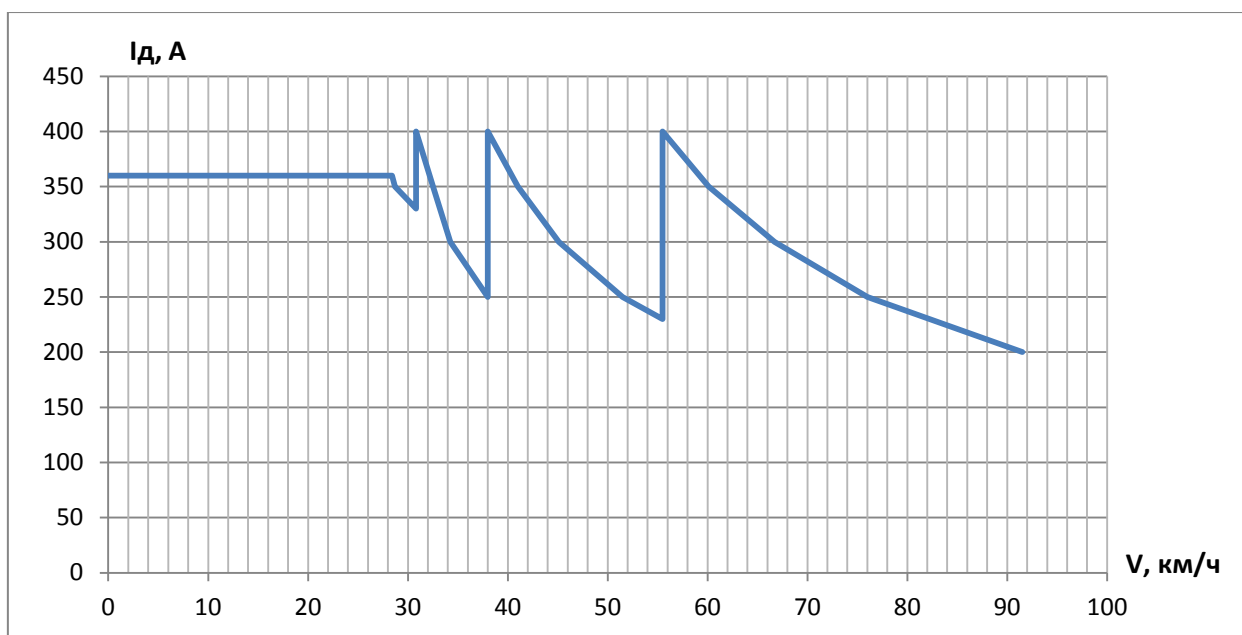


Рис. П11. Скоростные характеристики $I_d(V)$

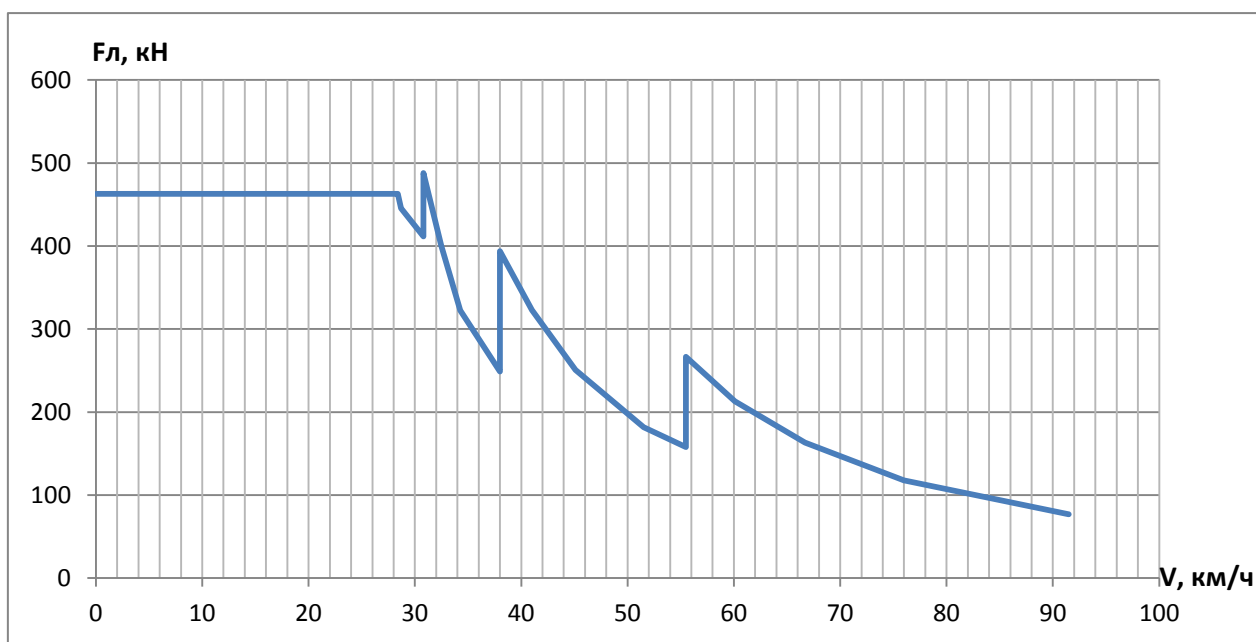


Рис. П12. Тяговые характеристики поезда $F_l = f(V)$

Таблица П13. Все необходимые для построения кривой поездного тока $I_l = \varphi(V)$

V, км/ч	38	41	45,1	51,5	55,5	55,5	60,1	66,7	76	91,5
I_d , А	400	350	300	250	230	400	350	300	250	200
I_l , А	6400	5600	4800	4000	3680	6400	5600	4800	4000	3200

Таблица П14 - Действующие силы на поезд в режиме тяги

V, км/ч	0	12,6	12,6	28,4	28,7	30,8	30,8	32,5	34,25	38
Fл, кН	462,656	462,656	462,656	462,656	445,44	411,52	488	400	322,56	248,8
fл, Н/кН	103,244	103,248	103,248	103,248	99,406	91,837	108,904	89,266	71,984	55,523
wo(T), Н/кН	1,1	1,192	1,192	1,570	1,580	1,652	1,652	1,715	1,783	1,941
fл-wo(T)	102,144	102,056	102,056	101,679	97,827	90,184	107,252	87,551	70,201	53,582

Продолжение табл. П.14

V, км/ч	38	41	45,1	51,5	55,5	55,5	60,1	66,7	76	91,5
Fл, кН	393,92	322,88	250,88	181,76	157,952	266,56	213,12	163,2	117,76	76,8
fл, Н/кН	87,909	72,055	55,988	40,562	35,249	59,487	47,561	36,420	26,280	17,139
wo(T), Н/кН	1,941	2,079	2,284	2,644	2,894	2,894	3,203	3,691	4,463	5,975
fл-wo(T)	85,968	69,976	53,703	37,918	32,356	56,593	44,357	32,730	21,816	11,164

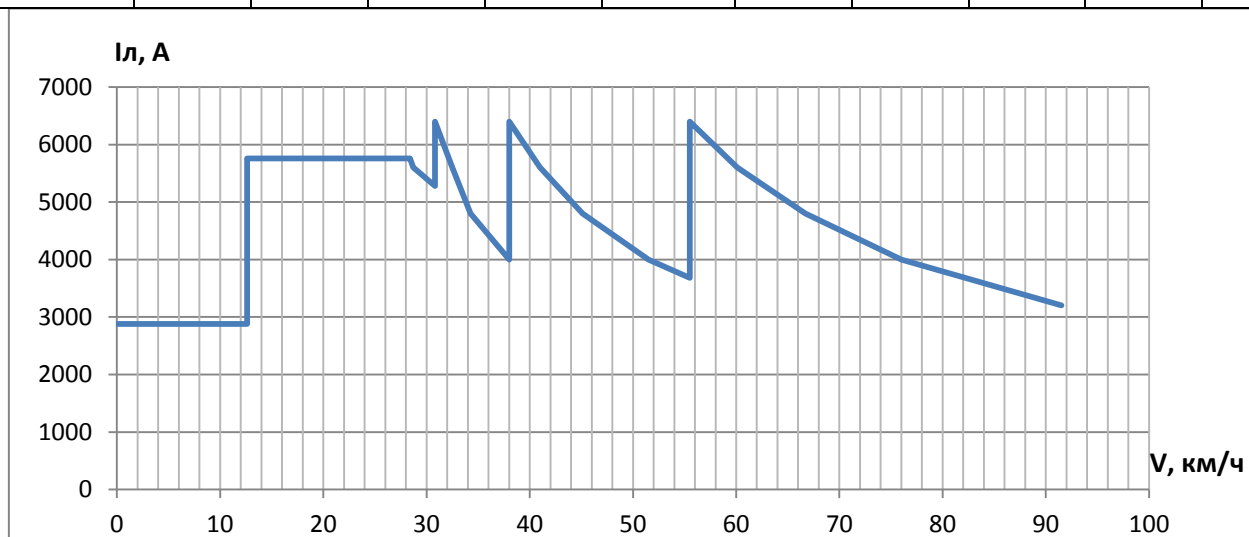
Рис. П.15. Кривая поездного тока $I_{л} = \varphi(V)$

Таблица П.16 - Действующие силы на поезд в режиме торможения

V, км/ч	0	12,6	12,6	28,4	28,7	30,8	30,8	32,5	34,25	38
Iд, А	360	360	360	360	350	330	400	350	300	250
Iл, А	2880	2880	5760	5760	5600	5280	6400	5600	4800	4000

Таблица П17. Результат расчета пути L при движении по горизонту

№	ΔV , км/ч	V, км/ч	$V_{\text{ср}}$, км/ч	$(b_0 + w_{\text{обг}})_{\text{ср}}$, Н/кН	Δl , м	L, м
1	10	10	5	194,240	2,155	2,155
2	10	20	15	184,185	6,818	8,973
3	10	30	25	176,350	11,869	20,842
4	10	40	35	170,155	17,221	38,063
5	10	50	45	165,215	22,803	60,866
6	10	60	55	161,265	28,553	89,419
7	10	70	65	158,115	34,417	123,836
8	10	80	75	155,630	40,346	164,182
9	10	90	85	153,710	46,297	210,479

Таблица П18. Действующие силы на поезд в режиме выбега

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$f_{\text{в}}$, Н/кН	9,63	8,25	7	5,89	4,9	4,06	3,34	2,76	2,31	1,99

Таблица П19. Расчет пути и времени для построения кривых движения вагонов метро с АТМ

№	ΔV , км/ч	V, км/ч	$V_{\text{ср}}$, км/ч	Δt , с	T, с	Δl , м	L, м	режим
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	5	5	2,5	1,27	1,27	0,88	0,88	тяга
2	5	10	7,5	1,27	2,54	2,64	3,52	тяга
3	5	15	12,5	1,27	3,81	4,41	7,93	тяга
4	5	20	17,5	1,27	5,08	6,17	14,1	тяга
5	5	25	22,5	1,27	6,35	7,94	22,04	тяга
6	5	30	27,5	1,27	7,62	9,72	31,76	тяга
7	5	35	32,5	1,37	8,99	12,4	44,16	тяга
8	5	40	37,5	1,59	10,58	16,61	60,78	тяга
9	5	45	42,5	1,82	12,4	21,48	82,25	тяга
10	5	50	47,5	2,05	14,45	27,02	109,28	тяга
11	5	55	52,5	2,28	16,73	33,29	142,56	тяга
12	5	60	57,5	2,52	19,25	40,31	182,87	тяга
13	5	65	62,5	2,77	22,02	48,16	231,03	тяга
14	5	70	67,5	3,03	25,05	56,89	287,92	тяга
15	5	75	72,5	3,31	28,36	66,59	354,51	тяга
16	5	80	77,5	3,59	31,95	77,37	431,88	тяга
17	1	81	80,5	0,76	32,71	16,9	448,78	выбег
18	9	72	77	28,33	65,24	606,02	1054,8	торм.

19	7,5	65,5	68	25,7	88,94	497,1	1557,5	торм.
20	5,5	60	62	1,92	90,66	17,12	1575,02	торм.
21	10	50	55	2,88	92,54	36	1611,02	торм.
22	10	40	45	2,87	95,41	32,53	1643,55	торм.
23	10	30	35	2,87	98,28	23,32	1666,87	торм.
24	10	20	25	2,86	101,54	18,71	1685,58	торм.
25	10	10	15	2,85	103,99	11,01	1696,59	торм.
26	10	0	5	2,84	105,83	3,41	1700	торм.

Таблица П20. Расчет пути и времени для построения кривых движения вагона метро с НВ ТМ

№	ΔV , км/ч	V, км/ч	V_{cp} , км/ч	Δt , с	T, с	Δl , м	L, м	режим
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	10	10	5	2,952	2,952	4,1	4,1	тяга
2	5	15	12,5	1,477	4,429	5,13	9,23	тяга
3	5	20	17,5	1,492	5,921	7,253	16,483	тяга
4	5	25	22,5	1,518	7,439	9,485	25,968	тяга
5	5	30	27,5	1,603	9,042	12,246	38,214	тяга
6	5	35	32,5	1,547	10,589	13,968	52,182	тяга
7	5	40	37,5	2,292	12,881	23,868	76,05	тяга
8	5	45	42,5	1,932	14,813	22,817	98,867	тяга
9	5	50	47,5	2,437	17,25	32,153	131,02	тяга
10	5	55	52,5	3,289	20,539	47,964	178,984	тяга
11	5	60	57,5	3,952	24,491	63,113	242,097	тяга
12	5	65	62,5	2,818	27,309	48,926	291,023	тяга
13	5	70	67,5	3,627	30,936	68,014	359,037	тяга
14	5	75	72,5	4,978	35,914	100,25	459,287	тяга
15	4	79	77	3,69	39,604	78,416	537,703	тяга
16	12	66,5	73	51,297	90,901	1020,938	1558,641	выбег
17	7	60	63,5	1,097	91,998	22,937	1581,578	торм.
18	10	50	55	2,618	94,616	40,005	1621,583	торм.
19	10	40	45	2,56	97,176	31,996	1653,579	торм.
20	10	30	35	2,487	99,663	24,176	1677,755	торм.
21	10	20	25	2,399	102,062	12,665	1690,42	торм.
22	10	10	15	2,297	104,359	7,38	1697,8	торм.
23	10	0	5	1,471	105,83	2,2	1700	торм.

Таблица П22. Данные IGBT типа FF1200R17KP4_B2

技术信息 / Technical Information

IGBT-模块
IGBT-Module

FF1200R17KP4_B2

IGBT, 逆变器 / IGBT, Inverter
最大额定值 / Maximum Rated Values

集电极 - 发射极电压 Collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	1700	V
连续集电极直流电流 Continuous DC collector current	$T_C = 80^{\circ}\text{C}, T_{vj\max} = 150^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\max} = 150^{\circ}\text{C}$	$I_{C\text{nom}}$ I_C	1200 1700	A A
集电极重复峰值电流 Repetitive peak collector current	$t_p = 1\text{ ms}$	I_{CRM}	2400	A
总功率损耗 Total power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\max} = 150^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	6,25	kW
栅极 - 发射极峰值电压 Gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V

特征值 / Characteristic Values

			min.	typ.	max.
集电极 - 发射极饱和电压 Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 1200\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_C = 1200\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_C = 1200\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\text{sat}}$	1,80 2,10 2,20	2,20 2,60 2,70 V V V
栅极阈值电压 Gate threshold voltage	$I_C = 48,0\text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		V_{GEth}	5,20 5,80 6,40	V
栅极电荷 Gate charge	$V_{GE} = -15\text{ V} \dots +15\text{ V}$		Q_G	12,5	μC
内部栅极电阻 Internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		R_{Gint}	1,6	Ω
输入电容 Input capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{iss}	98,0	nF
反向传输电容 Reverse transfer capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{res}	3,15	nF
集电极-发射极截止电流 Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 1700\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{CES}		5,0 mA
栅极-发射极漏电流 Gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\text{ V}, V_{GE} = 20\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{GES}		400 nA
开通延迟时间(电感负载) Turn-on delay time, inductive load	$I_C = 1200\text{ A}, V_{CE} = 900\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Gon} = 0,68\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_{don}	0,80 0,85 0,86	μs μs μs
上升时间(电感负载) Rise time, inductive load	$I_C = 1200\text{ A}, V_{CE} = 900\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Gon} = 0,68\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_r	0,19 0,20 0,20	μs μs μs

技术信息 / Technical Information

IGBT-模块
IGBT-Module

FF1200R17KP4_B2



二极管, 逆变器 / Diode, Inverter

最大额定值 / Maximum Rated Values

反向重复峰值电压 Repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	1700	V
连续正向直流电流 Continuous DC forward current		I_F	1200	A
正向重复峰值电流 Repetitive peak forward current	$t_p = 1\text{ ms}$	I_{FRM}	2400	A
I _{2t} -值 I _t - value	$V_R = 0\text{ V}, t_p = 10\text{ ms}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $V_R = 0\text{ V}, t_p = 10\text{ ms}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_R	240 210	kA ² s kA ² s
最大损耗功率 Maximum power dissipation	$T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	P_{ROM}	1400	kW
最小开通时间 Minimum turn-on time		$t_{on\min}$	10,0	μs

特征值 / Characteristic Values

			min.	typ.	max.
正向电压 Forward voltage	$I_F = 1200\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}$ $I_F = 1200\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}$ $I_F = 1200\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	V_F	1,60 1,60 1,60	2,00 2,00 2,00
反向恢复峰值电流 Peak reverse recovery current	$I_F = 1200\text{ A}, -di/dt = 6000\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 900\text{ V}$ $V_{GE} = -15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	I_{RR}	1100 1300 1350	A A A
恢复电荷 Recovered charge	$I_F = 1200\text{ A}, -di/dt = 6000\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 900\text{ V}$ $V_{GE} = -15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	Q_r	290 500 585	μC μC μC
反向恢复损耗 (每脉冲) Reverse recovery energy	$I_F = 1200\text{ A}, -di/dt = 6000\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=150^{\circ}\text{C})$ $V_R = 900\text{ V}$ $V_{GE} = -15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	E_{rrc}	190 330 390	mJ mJ mJ
结 - 外壳热阻 Thermal resistance, junction to case	每个二极管 / per diode		R_{thJC}		32,0 K/kW
外壳 - 散热器热阻 Thermal resistance, case to heatsink	每个二极管 / per diode $\lambda_{paste} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}) \quad \lambda_{grease} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	29,0	K/kW
在开关状态下温度 Temperature under switching conditions		$T_{vj\text{op}}$	-40	150	$^{\circ}\text{C}$