

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи



ТОМИЛОВ Вячеслав Станиславович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМА
РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Мельниченко Олег Валерьевич

Иркутск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	6
1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	15
1.1 Анализ отечественных технических средств, повышающих энергетическую эффективность электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения	18
1.1.1 Система регулирования импульсно-фазовая	18
1.1.2 Искусственная коммутация тока в плечах выпрямительно-инверторного преобразователя	19
1.1.3 Секторное регулирование напряжения	21
1.1.4 Нерегулируемый компенсатор реактивной мощности	21
1.1.5 Регулируемый компенсатор реактивной мощности	23
1.1.6 Компенсатор реактивной мощности с плавным изменением компенсируемой мощности	24
1.1.7 Гибридный компенсатор реактивной мощности, включающий в себя четырехквadrантный преобразователь	26
1.2 Способы и алгоритмы управления выпрямительно-инверторным преобразователем, повышающие энергетическую эффективность отечественных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения	27
1.2.1 Исследование влияния управления инвертором по законам $\beta = const$ и $\delta = const$ на энергетические показатели электровоза	29
1.2.2 Способ одновременной коммутации тока плеч выпрямительно-инверторного преобразователя	29
1.2.3 Применение разрядного диодного плеча в выпрямительно-инверторном преобразователе	30

1.2.4 Алгоритм разнофазного управления электровоза в режиме рекуперативного торможения.....	32
1.2.5 Изменение параметров сопротивления блока балластных резисторов в определенных режимах работы электровоза.....	33
1.2.6 Преобразователи на современной элементной базе <i>IGBT</i> -транзисторов для отечественного электроподвижного состава.....	34
1.3 Выводы по разделу 1.....	39
2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА РЕАЛИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ БЕЗ БЛОКА БАЛЛАСТНЫХ РЕЗИСТОРОВ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	40
2.1 Исследование условий электрической устойчивости системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока.....	40
2.2 Разработка предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов.....	47
2.3 Расчет внешних характеристик генератора и инвертора для типового и предлагаемого способа управления выпрямительно-инверторным преобразователем.....	53
2.3.1 Расчет внешних характеристик выпрямительно-инверторного преобразователя на базе тиристоров с наличием балластного сопротивления в якорной цепи тягового электрического двигателя.....	54
2.3.2 Расчет внешних характеристик выпрямительно-инверторного преобразователя на базе <i>IGBT</i> -транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления.....	58
2.3.3 Расчет внешней характеристики генератора при наличии блока балластных резисторов и при его исключении.....	60
2.4 Коэффициент полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи	63

2.5 Влияние блока балластных резисторов на тормозную характеристику электровоза переменного тока серии 2ЭС5К при использовании выпрямительно-инверторного преобразователя на базе <i>IGBT</i> -транзисторов.....	66
2.6 Выводу по разделу 2.....	74
3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ – КОНТАКТНАЯ СЕТЬ – ЭЛЕКТРОВОЗ» ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ.....	75
3.1 Выбор пакета для проведения математического моделирования....	75
3.2 Математическая модель системы энергоснабжения железной дороги переменного тока.....	76
3.3 Математическая модель силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения.....	80
3.3.1 Математическая модель тягового трансформатора.....	81
3.3.2 Математическая модель выпрямительно-инверторного преобразователя на базе <i>IGBT</i> -транзисторов в режиме инвертора....	87
3.3.3 Математическая модель цепи выпрямленного тока в режиме рекуперативного торможения.....	91
3.3.4 Математическая модель выпрямительной установки возбуждения.....	99
3.4 Оценка адекватности электромагнитных процессов при работе физической модели электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе <i>IGBT</i> -транзисторов и в математической модели.....	100
3.5 Моделирование предлагаемого алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем на базе <i>IGBT</i> -транзисторов при исключении блока балластных резисторов из якорной цепи тяговых электродвигателей.....	102
3.6 Построение внешних характеристик генератора и выпрямительно-инверторного преобразователя, полученных в результате математического моделирования.....	114
3.7 Выводу по разделу 3.....	116

4	ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА.....	117
4.1	Проверка работоспособности силовой части выпрямительно-инверторного преобразователя на базе <i>IGBT</i> -транзисторов с предлагаемым способом реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов.....	117
4.2	Результаты проведения испытаний выпрямительно-инверторного преобразователя на базе <i>IGBT</i> -транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления на стенде в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский».....	124
4.3	Технико-экономическая оценка предлагаемого технического решения для повышения эффективности режима рекуперативного торможения.....	127
4.3.1	Расчет капитальных затрат на оснащение комплексным оборудованием в целях повышения эффективности режима рекуперативного торможения электровоза 2ЭС5К.....	128
4.3.2	Расчет экономии денежных средств от увеличения возврата электрической энергии в контактную сеть.....	131
4.4	Выводы по разделу 4.....	134
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	137
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Холдинг ОАО «Российские железные дороги» потребляет до 7 % электроэнергии ежегодно, производимой в Российской Федерации, и входит в состав крупнейших потребителей энергоресурсов в России. Рациональное и бережливое отношение ко всем видам ресурсов является одним из приоритетных условий развития экономики страны в целом.

Уменьшение энергопотребления электровозами при реализации тяговых и тормозных усилий является приоритетным фактором для экономии энергетических ресурсов, что сказано в перечне Федеральных и стратегических распоряжений:

- распоряжении ОАО «РЖД» от 11.02.2008 г., № 269р «Об энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2030 года» [77];

- указе Президента РФ от 01 декабря 2016 г., № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [107];

- распоряжении ОАО «РЖД» от 14.04.2018 г., № 769р «Об стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга)» [81];

- долгосрочной программе развития холдинга ОАО «РЖД» до 2025 года утвержденная Правительством Российской Федерации от 19 марта 2019 г., №466р [18] и др.

Сегодня, на железных дорогах России, электрифицированных переменным током, работают электровозы с коллекторными тяговыми электрическими двигателями (ТЭД), напряжение на зажимах которых регулируется плавно выпрямительно-инверторными преобразователями (ВИП). Применение инверторного режима таких преобразователей открывает возможность в реализации электрического рекуперативного торможения.

Использование электрического рекуперативного торможения на электроподвижном составе однофазно-постоянного тока дает возможность отдачи

электроэнергии в контактную сеть, снижения износа тормозных колодок и колесных пар электроподвижного состава (ЭПС), повышения безопасности движения тяжеловесных поездов на спуске и др.

Поддержание неизменной скорости движения состава на затяжных спусках становится возможным благодаря жестким тормозным характеристикам электровоза в режиме рекуперативного торможения, а это в свою очередь положительно сказывается на технической скорости и пропускной способности тягового участка.

Приоритетным направлением повышения энергоэффективности холдинга ОАО «РЖД» является увеличение величины удельной рекуперации энергии в тяговую сеть.

Одним из путей достижения поставленной задачи является увеличение коэффициента мощности электроподвижного состава. Данный коэффициент характеризует долю активной мощности электровоза к полной, который в свою очередь является крайне низким и не превышает значения 0,65 [12]. При таком показателе коэффициента мощности имеет место быть значительное потребление электровозом реактивной энергии из контактной сети, как следствие снижение пропускной способности тяговой сети, потеря мощности в электрооборудовании, значительное искажение тока в контактной сети, загрузка сети реактивной мощностью и др. [11-14].

На сегодняшний день, несмотря на совершенствование системы рекуперативного торможения на протяжении полувека, все еще имеются значительные ее недостатки, в свою очередь которые не позволяют в полной мере осуществлять энерго- и ресурсосбережение. В силовой электрической цепи электровоза переменного тока имеется наличие блока балластных резисторов (ББР), необходимость которого диктуется условием статической устойчивости режима ресурсосберегающего рекуперативного торможения [88, 106]. Наличие балластных резисторов в якорных цепях ТЭД не только значительно снижает энергетические показатели электровоза, но и ограничивает область его тормозных характеристик.

Поэтому изыскания путей повышения эффективности режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока остается актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Выполнен анализ научных трудов в области повышения эффективности режима рекуперативного торможения электровоза. Также отмечены работы ученых, которые стали научной основой при выполнении диссертационной работы.

Вопросам теории повышения эффективности реализации электрического рекуперативного торможения были посвящены работы Б.Н. Тихменева, Л.М. Трахтмана, А.В. Плакса, Л.В. Поссе, С.В. Захаревича, С.А. Петрова, В.А. Голованова, Б.И. Хоменко, К.Г. Кучмы, С.Н. Засорина, А.И. Харитонова, А.Н. Савоськина, Ю.М. Инькова В.А. Кучумова, Ю.А. Басова, В.М. Антюхина, Г.А. Штибена, А.Л. Лозановского, Б.М. Наумова, Н.С. Копанева, С.В. Власьевского, В.Г. Щербакова, Л.Д. Капустина, Ю.М. Кулинича, В.Т. Черемисина, А.М. Рутштейна, И.К. Лакина, В.В. Литовченко, В.В. Макарова, А.В. Каменева, О.Е. Пудовикова, А.М. Евстафьева, О.В. Мельниченко и многих других.

В трудах ученых отражены методы исследования процессов инвертирования тока при конечных величинах активных и индуктивных сопротивлений цепей переменного и выпрямленного тока, вопросы регулирования выпрямленного напряжения, исследования схмотехнических решений и влияния основных параметров схемы электровоза на его характеристики, исследование гармонических составляющих несинусоидального переменного тока в тяговой сети при работе электровозов, а также исследования взаимодействия электровозов с устройствами энергоснабжения и др.

В результате исследований разрабатываются технические средства, способы и алгоритмы управления ВИП, которые позволяют использовать режим рекуперативного торможения более эффективно с точки зрения технико-экономических показателей.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока, расширение его области тормозных характеристик и повышение возврата тока в контактную сеть за счет исключения балластного резистора из якорной цепи тягового электрического двигателя.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

- выполнить анализ существующих технических средств, способов и алгоритмов управления выпрямительно-инверторным преобразователем, направленных на повышение эффективности режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока;

- рассмотреть принцип обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока;

- разработать способ реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов в якорной цепи тяговых электрических двигателей;

- произвести расчет внешних характеристик генератора и инвертора с целью подтверждения устойчивой работоспособности режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов;

- произвести расчет тормозных характеристик электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи;

- произвести расчет коэффициента полезного действия электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи;

- доработать математическую модель системы «тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз» для режима рекуперативного торможения, учитывающую применение выпрямительно-инверторного преобразователя на базе *IGBT*-транзисторов и исключение блока балластных резисторов из силовой цепи;

- дать оценку адекватности математической модели на соответствие электромагнитных процессов полученных в ходе физического моделирования;
- провести экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов.

Объектом исследования является электровоз, работающий в режиме рекуперативного торможения электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов.

Предметом исследования является статическая устойчивость режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока без балластного резистора в якорной цепи ТЭД.

Методология и методы исследований. Диссертационные исследования основаны на применении математического моделирования и теории преобразовательных устройств. Экспериментальные исследования проводились на математической модели в среде *MatLab/Simulink* и на физической модели в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» филиал Восточно-Сибирский ООО «ЛокоТех-Сервис».

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- предложен способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе *IGBT*-транзисторов для обеспечения статической устойчивости системы «генератор-инвертор» без использования балластного резистора в якорной цепи тягового электродвигателя;
- предложена методика обеспечения электрической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработан алгоритм основной программы блока управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов для организации положительного наклона внешней характеристики преобразователя с целью обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов;

- доработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в режиме рекуперативного торможения в среде *MatLab/Simulink* с учетом применения предлагаемого алгоритма управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при реализации рекуперативного торможения без ББР в силовой цепи электровоза;

- проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза с транзисторным ВИП на испытательной станции СЛД «Боготол-Сибирский», которые показали увеличение энергетических показателей электровоза в режиме рекуперативного торможения и позволили сделать вывод о работоспособности предлагаемого алгоритма управления ВИП.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- алгоритм управления транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями, позволяющий исключить блок балластных резисторов из силовой цепи электровоза при обеспечении статической устойчивости режима рекуперативного торможения;

- результаты аналитического расчета тормозных характеристик электровоза переменного тока с выпрямительно-инверторными преобразователями на базе *IGBT*-транзисторов, внешних характеристик генератора и инвертора при реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов;

- результаты математического моделирования в среде *MatLab/Simulink* электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении балластного резистора из якорной цепи тяговых электрических двигателей.

Достоверность научных положений и результатов. Достоверность теоретических представлений подтверждается результатами, полученными при математическом моделировании в среде *MatLab/Simulink*, совпадением их с результатами экспериментальных исследований в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский», погрешность не превышает 10 %.

Апробация работы. Основные положения и результаты проведенных исследований докладывались на третьей всероссийской научно-практической конференции «Наука и молодежь» (ИрГУПС, Иркутск 2017 г., 2020 г., 2021 г.); девятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (ИрГУПС, Иркутск 2018 г., 2020 г., 2021 г.); международной научно-практической конференции «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (ДВГУПС, Хабаровск 2019 г.); международной научно-практической конференции «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава» (АО «ДЦВ» Красноярской железной дороги, Красноярск 2020 г.); седьмой международной научно-практической конференции «Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век» (ПГУПС, Санкт-Петербург 2020 г.).

Автор является победителем конкурса «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК») по теме «Разработка бортового аппаратно-программного комплекса ресурсо- и энергосбережения для режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока», по данной работе выполнена научно-исследовательская работа по договору №16798ГУ/2021 от 07.06.2021 г.

Диссертация доложена на заседании кафедры «Электроподвижной состав» (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 14 от 29.06.2021 г.

Диссертация доложена на расширенном заседании кафедры «Электроподвижной состав» (ИрГУПС, г. Иркутск), протокол № 2 от 12.10.2021 г.

Диссертация доложена и рекомендована к защите на заседании научно-технического семинара кафедры «Электропоезда и локомотивы» (РУТ (МИИТ), г. Москва), протокол № 1 от 08.02.2022 г.

Личный вклад соискателя. Проведен анализ существующих отечественных и зарубежных технических средств, способов и алгоритмов управления тиристорными и транзисторными выпрямительно-инверторными преобразователями электровоза, направленных на повышение эффективности рекуперативного торможения. Проведено аналитическое исследование электрической устойчивости режима рекуперативного торможения электровоза переменного тока с тиристорным ВИП, предложена методика обеспечения электрической устойчивости системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока с транзисторным ВИП при исключении ББР из силовой цепи электровоза. Разработан способ реализации рекуперативного торможения электровоза переменного тока с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи. Разработан алгоритм основной программы блока управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов для организации положительного наклона внешней характеристики преобразователя с целью обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения без блока балластных резисторов. Доработана математическая модель системы «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в режиме рекуперативного торможения в среде *MatLab/Simulink* с учетом применения предлагаемого алгоритма управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при реализации рекуперативного торможения без ББР в силовой цепи электровоза. Проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза с транзисторным ВИП на испытательной станции СЛД «Боготол-Сибирский».

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 17 печатных трудах, из них три статьи опубликованы в ведущих научных

рецензируемых журналах и изданиях перечня ВАК РФ, одна статья в журнале, индексируемом в научной базе *Scopus*, один патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, одного приложения, библиографического списка из 112 наименований и содержит 154 страницы основного текста, 22 таблицы и 106 рисунков.

1 АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Разработка и внедрение режима электрического рекуперативного торможения на отечественные электровазы переменного тока берет свое начало в 1960-х годах с выпуском экспериментальной партии электровазов серии ВЛ60Р, выполненных на базе ртутных (игнитронных) преобразователей. Затем с выпуском силовых диодов, рекуперация на электровазах сводится на нет вплоть до 1970-х годов. В этот период развивалось реостатное торможение, появляются такие серии электровазов как ВЛ60К, ВЛ80К, Т, С.

Далее с разработкой силовых тиристоров развитие режима рекуперативного торможения вновь возрождается на серии электровазов ВЛ80Р. Далее строятся и выпускаются такие серии электровазов как ВЛ85, ВЛ65, ЭП1/ви и 2(3,4)ЭС5К «Ермак» с тиристорными ВИП, оснащенные системой рекуперативного торможения, которая совершенствуется и по сей день.

Рекуперативное торможение – основной фактор энерго- и ресурсосбережения на отечественном ЭПС, помимо этого, оно обеспечивает максимальную скорость движения тяжеловесных поездов по участку, способствует снижению продольно-динамических усилий в поезде и т.д.

Среднегодовой возврат электрической энергии электровазами ВЛ60Р в пределах Дальневосточной железной дороги в 1964-1974 годах составил 12-18 % от расхода энергии на тягу поездов [13, 14]. Основные проблемы и недостатки применения режима рекуперативного торможения были выявлены также в этот период. Данные недостатки актуальны по сей день и в настоящее время требуют технических решений [12].

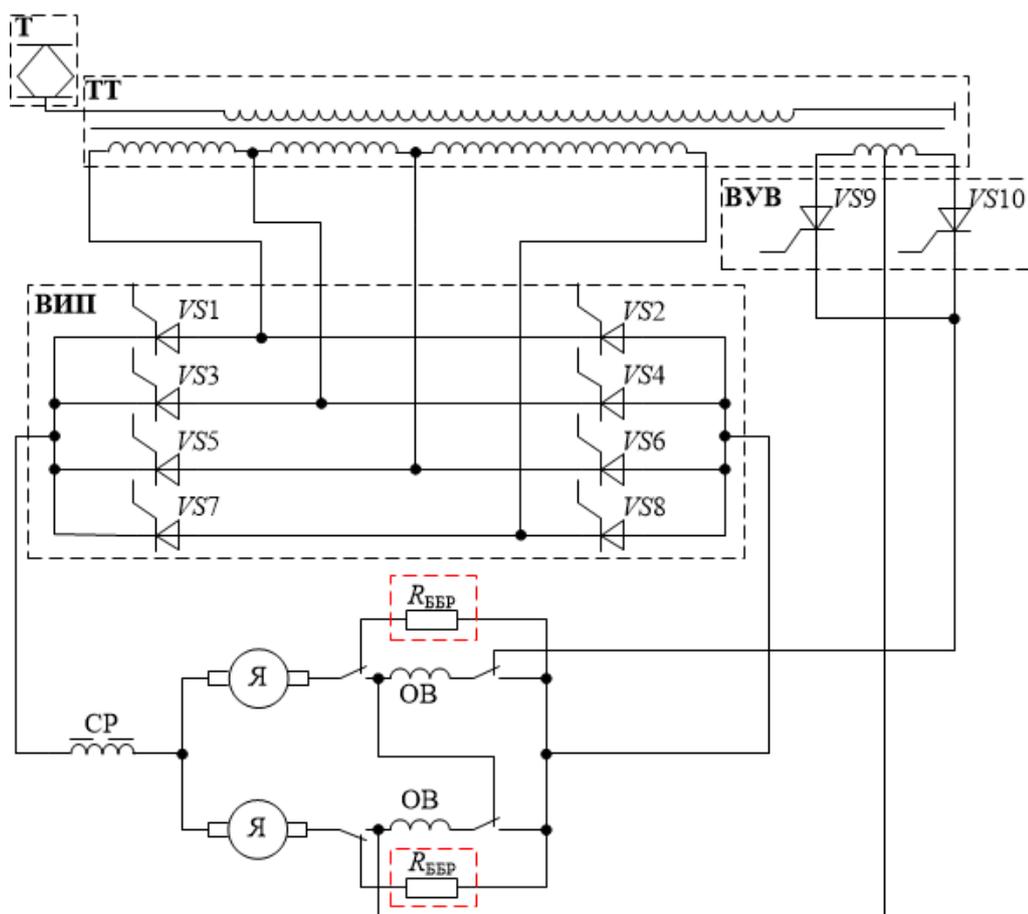
Сегодня, процент возврата электроэнергии в режиме рекуперации достигает в среднем 23-26 %. Однако, несмотря на совершенствование рекуперативного торможения на протяжении полувека, все еще имеются значительные ее недостатки, которые не позволяют в полной мере осуществлять энерго- и ресурсосбережение [12-14, 88].

Использование балластных резисторов в якорных цепях ТЭД оказывает негативное влияние не только на энергетические показатели электровоза в режиме рекуперативного торможения и надежность силовой цепи, но и ограничивает область его тормозных характеристик.

Также значительным недостатком является способ управления ВИП в режиме рекуперации. Алгоритм управления ВИП построен таким образом, что коммутация происходит с опережением угла открытия тиристорov с обязательным углом запаса инвертора [12-14]. Организация коммутации тиристорных плеч осуществляется на грани опрокидывания инвертора, поэтому дополнительно вводится угол запаса инвертора, который равен 20-25 электрических градусов, что существенно снижает коэффициент мощности электровоза. А это в свою очередь влечет к снижению коэффициента полезного действия тяговой системы свыше 10 %, что в современных условиях при развитии микропроцессорной базы и силовой электроники недопустимо.

Закон управления инвертором с постоянным углом опережения открытия тиристорov ($\beta = const$) или с постоянным углом запаса открытия тиристорov ($\delta = const$) оказывает влияние не только на энергетические показатели электровоза, но и на наклон внешней характеристики инвертора. Введение балластных резисторов в якорные цепи ТЭД связано с организацией статической устойчивости режима рекуперативного торможения при принятом на сегодняшний день законом управления $\delta = const$.

На рисунке 1.1 показана упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока с тиристорным ВИП.



ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; R_{ББР} – блок балластных резисторов; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; VS1-VS10 – тиристорные плечи ВИП и ВУВ; СР – сглаживающий реактор; Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.1 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока с тиристорным ВИП

В балластных резисторах расходуется бесполезно около 10 % вырабатываемой генераторами электровоза энергии [88, 106]. В связи с падением напряжения в них область тормозных характеристик ограничена на максимальном уровне – 3,5 зоны регулирования напряжения ВИП. Помимо этого, вынужденное применение балластных резисторов негативно сказывается на массогабаритных показателях и усложнении конструкции электровоза [34].

Таким образом, вопрос исключения блока балластных резисторов из силовой цепи электровоза является актуальной на сегодняшний день.

1.1 Анализ отечественных технических средств, повышающих энергетическую эффективность электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Влияние естественной коммутации тока в плечах ВИП рассмотрено в работах [5, 28-31, 83, 87]. Такая организация коммутации оказывает существенное воздействие на контактную сеть, а именно – сдвиг фазы первой гармоники тока относительно напряжения контактной сети, как следствие, потребление реактивной энергии электровозом в режиме рекуперативного торможения.

1.1.1 Система регулирования импульсно-фазовая

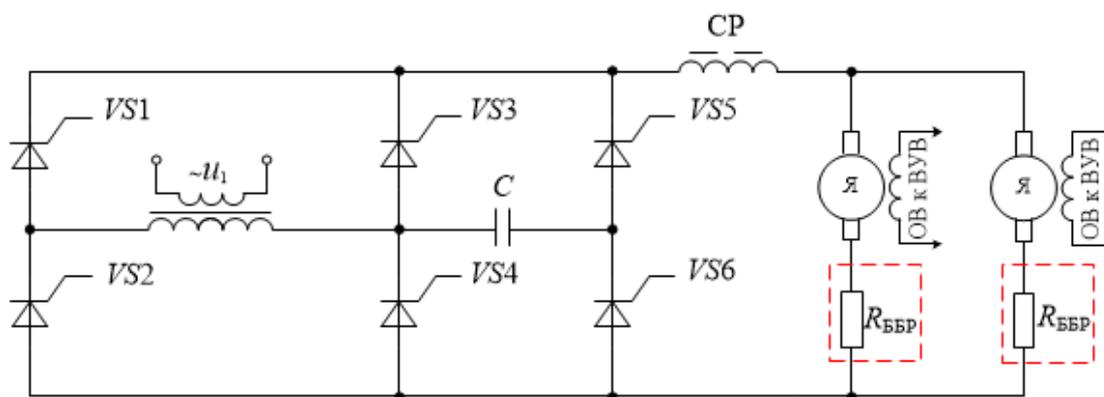
Особенно важной научной основой оказалась работа, проведенная в 1970-1980 годах Б.Н. Тихменевым, А.В. Каменевым, Б.К. Бурдасовым, З.М. Рубчинским и др. по разработке системы с импульсным управлением коммутацией и фазовым регулированием напряжения (РИФ) [28-31, 83, 87]. В такой системе процесс коммутации тока в преобразователе электровоза управляется импульсным регулированием, что в свою очередь улучшает форму рекуперированного в сеть тока. Преобразователь системы РИФ-2 для обеспечения рекуперативного торможения выполнен на тиристорах VS1-VS8, при этом часть тиристоров снабжены коммутирующими узлами, что дает возможность запирающих их в необходимые моменты времени. К вторичной обмотке тягового трансформатора (ТТ) включен входной конденсатор. Особенностью ВИП такой системы является управляемый колебательный процесс во входном демпфирующем конденсаторе. Принудительная коммутация улучшает форму рекуперированного в сеть тока.

Результаты исследований таких инверторов доказали их преимущества по энергетическим показателям перед типовыми [31]. Стоит отметить, что внешняя характеристика инвертора с рассматриваемой системой РИФ имеет положительный наклон [28, 30, 83, 87]. Недостатками данной системы является то, что снижение напряжения в тяговой сети является неблагоприятным режимом. Так же при совместной работе электровозов с импульсно-фазовым регулированием и зонно-фазовым управлением, первые способны негативно влиять на систему управления серийных электровозов, что делает их более ненадежными.

1.1.2 Искусственная коммутация тока в плечах выпрямительно-инверторного преобразователя

В начале 1990-х годов были проведены исследования преимуществ способа искусственной коммутации (ИК) в плечах преобразователя электровоза [5]. Использование ИК повышает энергетическую эффективность электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения.

Для реализации искусственной коммутации учеными и специалистами разработано различное множество схемотехнических решений, но наиболее перспективной оказалась одноконденсаторная схема (рисунок 1.2). Данное устройство состоит из емкости и двух коммутирующих плеч (тиристорных), которые могут быть подсоединены параллельно вторичной обмотке ТТ, либо конденсатор перезаряжается через цепи нагрузки ВИП. В первом случае в конце процесса искусственной коммутации на обмотке трансформатора имеется максимальное значение дозаряда коммутирующего конденсатора над мгновенным значением питающего напряжения.



VS1-VS6 – тиристорные плечи преобразователя; C – коммутирующий конденсатор; CP – сглаживающий реактор; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; R_{ББР} – блок балластных резисторов

Рисунок 1.2 – Упрощенная принципиальная электрическая схема однофазного мостового преобразователя с одноконденсаторной искусственной коммутацией

Однако при сочетании определенном сочетании такая организация искусственной коммутации представляет опасность для изоляции цепей высокого напряжения. Во втором случае максимальное значение напряжения коммутирующего конденсатора прикладывается к нагрузке. Применение такого способа организации искусственной коммутации плеч позволяет регулировать выпрямленное напряжение по переднему и заднему фронтам.

По результатам эксперимента, проводимого на физической модели, коэффициент мощности в режиме рекуперации с искусственной коммутацией повысился в среднем на 15 %, что, несомненно, является значимым достоинством. Применение искусственной коммутации приводит и к увеличению массогабаритных показателей и стоимости преобразователей. Что в свою очередь для электровозов такой недостаток является весомым, ввиду ограничений габарита и массы, поэтому данные устройства не получили широкого применения. Несмотря на значительное увеличение коэффициента мощности в режиме рекуперативного торможения и возможности регулирования выпрямленного напряжения по переднему и заднему фронтам, данный способ не предусматривает возможности реализации рекуперативного торможения без балластных резисторов в якорных цепях ТЭД.

1.1.3 Секторное регулирование напряжения

Принцип работы секторного регулирования напряжения заключается в симметрировании тока сети относительно напряжения питания. Данный вид регулирования напряжения реализован на электровозах серии 181.2 [7, 25, 89].

За счет регулирования выпрямленного напряжения по переднему и заднему фронту сдвига тока в тяговой сети не наблюдается, за счет чего и увеличивается коэффициент мощности электровоза. На данных электровозах также реализована схема искусственной коммутации, с помощью коммутирующих емкостей и тиристоров. Однако, несмотря на значительное увеличение коэффициента мощности, для реализации секторного регулирования напряжения необходима полная замена выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза, поскольку введение в электрическую схему коммутирующих плеч (тиристоров) и емкостей оказывает влияние на его конструктивное исполнение.

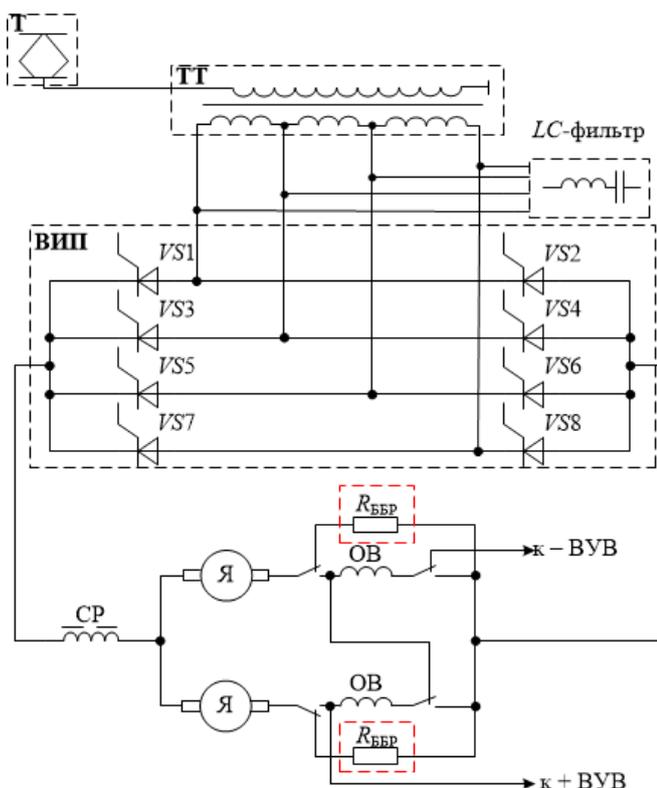
1.1.4 Нерегулируемый компенсатор реактивной мощности

Способы компенсации реактивной мощности электровозов переменного тока путем внедрения бортовых компенсаторов реактивной мощности (КРМ) разрабатывались в конце 1990-х годов, начале 2000-х годов [19, 21, 27, 32, 35-39, 45, 65, 66 и др].

При работе таких КРМ улучшается форма тока в первичной обмотке ТТ и увеличивается коэффициент мощности за счет снижения отставания по фазе первой гармоники тока от напряжения сети.

Применение нерегулируемых КРМ рассмотрено в работах [40, 76]. Такие компенсаторы выполняются в виде LC -цепей, подключаемых к вторичной обмотке тягового трансформатора. Положительным эффектом от применения

нерегулируемых КРМ является увеличение K_m электровоза. На рисунке 1.3 показана схема подключения нерегулируемого КРМ ко вторичной обмотке ТТ.



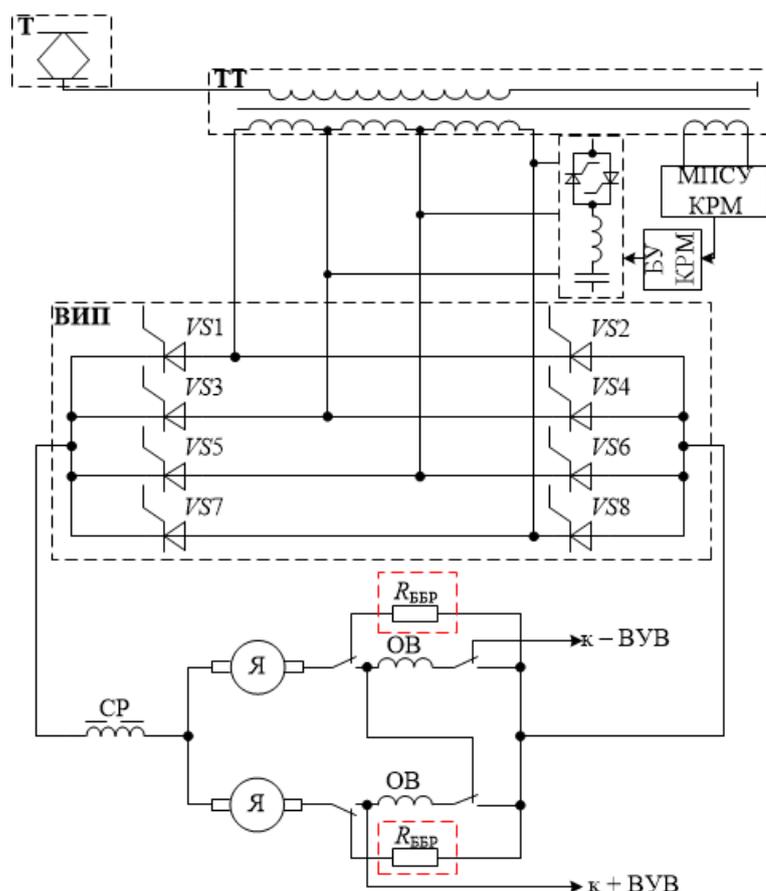
ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОБ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; $R_{ББР}$ – блок балластных резисторов; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; VS1-VS8 – тиристорные плечи ВИП; СР – сглаживающий реактор; Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.3 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с подключением нерегулируемого КРМ

Необходимо отметить, для режима рекуперативного торможения требуется большая мощность компенсатора, ввиду повышенного потребления реактивной мощности в этом режиме [86]. При смене режима работы электровоза, а также при смене профиля пути потребляемая реактивная мощность изменяется, поэтому нерегулируемые КРМ эффективны только при номинальном режиме работы электровоза, а при малых токах нагрузки наблюдается перекомпенсация реактивной мощности.

1.1.5 Регулируемый компенсатор реактивной мощности

В работе [45] рассмотрен регулируемый компенсатор реактивной мощности, схема подключения которого к вторичным обмоткам ТТ показана на рисунке 1.4. Данный компенсатор представляет собой два модуля, состоящих из компенсирующего устройства и тиристорного ключа, подключенных к разным выводам обмотки тягового трансформатора.



ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОБ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя;
 ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; VS1-VS8 – тиристорные плечи ВИП;
 БУ КРМ – блок управления КРМ; R_{ББР} – блок балластных резисторов;
 МПСУ КРМ – микропроцессорная система управления КРМ; СР – сглаживающий реактор;
 Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.4 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с подключением регулируемого КРМ

Каждый из модулей данного компенсатора способен обеспечить две ступени регулирования компенсации реактивной мощности, что позволяет исключить недокомпенсацию или перекомпенсацию в случае изменения нагрузки электровоза либо профиля пути при его эксплуатации.

Недостатком такого компенсатора является более усложненная схема, из-за наличия нескольких модулей в компенсирующем устройстве, что негативно сказывается на надежности и повышению массогабаритным показателям КРМ.

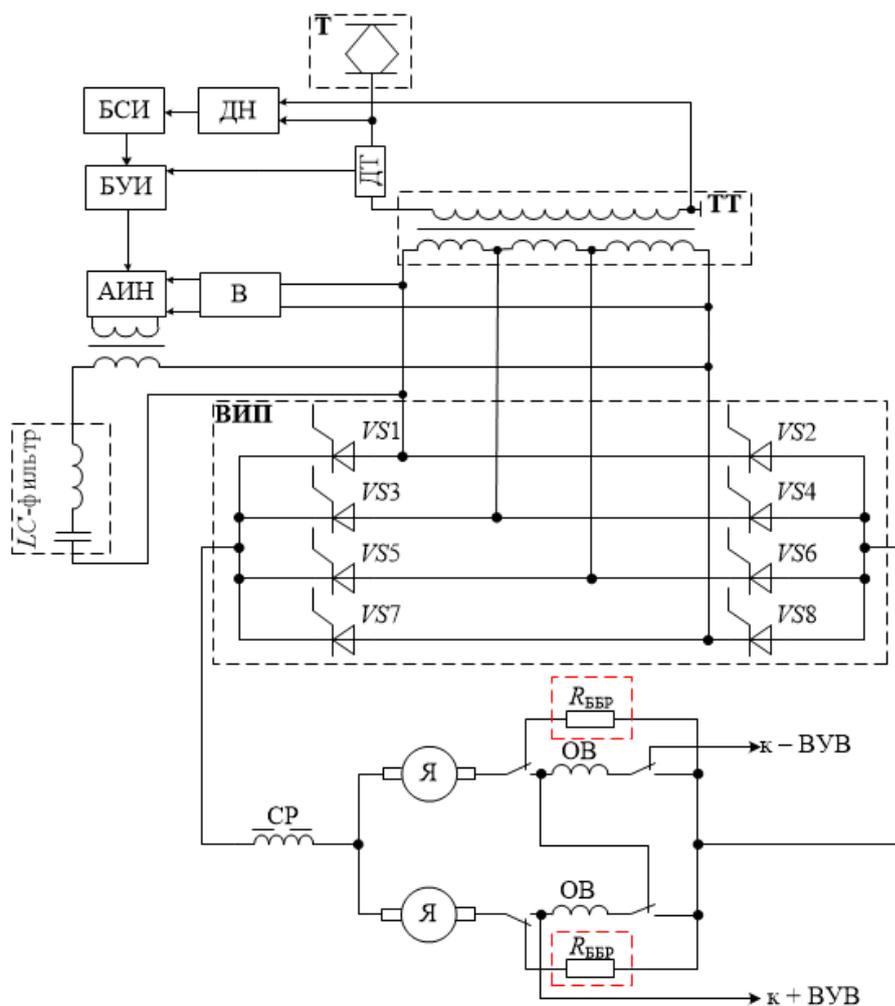
1.1.6 Компенсатор реактивной мощности с плавным изменением компенсируемой мощности

В работе [39] предложено устройство компенсации реактивной мощности, позволяющее увеличить коэффициент мощности во всем диапазоне токовых нагрузок за счет обеспечения равенства мощности компенсатора и реактивной мощности нагрузки путем плавного изменения реактивной мощности самого КРМ.

Схема подключения ко вторичной обмотке тягового трансформатора рассматриваемого КРМ показана на рисунке 1.5.

Блок управления инвертором (БУИ) при помощи датчиков тока (ДТ), напряжения (ДН) и блока синхронизирующих импульсов (БСИ) вычисляет величину реактивной мощности, потребляемую электровозом, и формирует на своем выходе сигнал, пропорциональный реактивной мощности нагрузки.

Этот сигнал принимает автономный инвертор напряжения (АИН), который плавно изменяет выходное напряжение, пропорционально выходной мощности нагрузки.



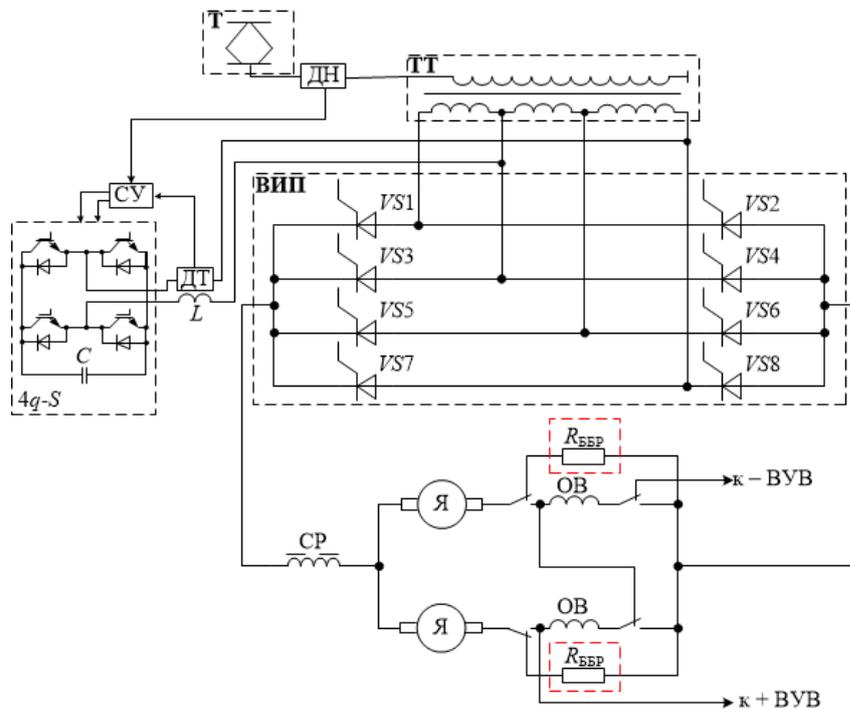
ВВП – выпрямительно-инверторный преобразователь; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; $R_{ББР}$ – блок балластных резисторов; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; VS1-VS8 – тиристорные плечи ВВП; СР – сглаживающий реактор; Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.5 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с подключением устройства КРМ с плавным изменением мощности компенсатора

При применении такого устройства коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения увеличивается приблизительно на 0,1 (10 %), но в свою очередь приводит к значительному усложнению силовой схемы и является дорогостоящим оборудованием. Дополнительно к этому вызывает затруднения расположения в кузове электровоза.

1.1.7 Гибридный компенсатор реактивной мощности, включающий в себя четырехквadrантный преобразователь

Работа гибридного компенсирующего устройства основана на генерации во вторичную обмотку ТТ электровоза высокочастотных колебаний тока, которые путем противофазного сложения со свободными колебаниями компенсируют высокочастотные колебания напряжения, возникающие в процессе коммутации тиристорных плеч ВИП. Тем самым достигается повышение синусоидальности напряжения в тяговой сети. На рисунке 1.6 показана схема подключения гибридного КРМ ко вторичной обмотке тягового трансформатора.



ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; $R_{ББР}$ – блок балластных резисторов; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения;

VS1-VS8 – тиристорные плечи ВИП; ДН – датчик напряжения; СУ – система управления КРМ; ДТ – датчик тока; 4q-S – четырехквadrантный преобразователь; СР – сглаживающий реактор; Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.6 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с подключением гибридного КРМ включающий в себя четырехквadrантный преобразователь

Компенсация высокочастотных колебаний напряжения от коммутации тиристоров ВВП достигается за счет генерации компенсаторов гармоник тока, которые компенсируют свободные колебания тока в обмотках тягового трансформатора.

Однако, электровоз работает в условиях практического отсутствия установившихся электромагнитных процессов, поэтому и требования, предъявляемые к многоэлементной системе управления компенсатором диктуют необходимость обеспечивать выполнение повышенных требований к надежности, качеству и помехозащищенности.

Рассматриваемый КРМ способен обеспечивать высокоточную компенсацию при изменении токовых нагрузок электровоза в широком диапазоне [37, 38]. Основными недостатками гибридного КРМ является усложненная схема, сложный алгоритм управления, что сказывается на надежности и массогабаритных показателях компенсатора.

1.2 Способы и алгоритмы управления выпрямительно-инверторным преобразователем, повышающие энергетическую эффективность отечественных электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Процессы инвертирования в многозонных выпрямительно-инверторных преобразователях рассмотрены в работах [24, 41, 46]. В них выявлено влияние процесса коммутации на внешние характеристики инвертора. Электромагнитные процессы в них рассматриваются в предположении, что напряжение в контактной сети синусоидальное. В этих работах рассматривается принцип поочередной коммутации тока в плечах преобразователя, данный способ коммутации реализован на всех работающих электровозах переменного тока и является штатным. Типовой алгоритм управления ВВП в режиме рекуперативного

торможения (инвертора) для каждой зоны регулирования представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Типовой алгоритм управления ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения

Зона	Направление ЭДС трансформатора	Тиристорные плечи выпрямительно-инверторного преобразователя							
		1	2	3	4	5	6	7	8
4	→	-	β	α_p	-	-	-	β	-
	←	β	-	-	α_p	-	-	-	β
3	→	-	-	-	β	α_p	-	β	-
	←	-	-	β	-	-	α_p	-	β
2	→	-	β	α_p	-	β	-	-	-
	←	β	-	-	α_p	-	β	-	-
1	→	-	-	-	$\alpha_0 \alpha_p$	$\alpha_0 \alpha_p$	-	-	-
	←	-	-	$\alpha_0 \alpha_p$	-	-	$\alpha_0 \alpha_p$	-	-

Примечание:
 β – угол опережения отпирания тиристоров преобразователя;
 α_p – регулируемый угол отпирания тиристоров преобразователя

Основными недостатками штатного алгоритма управления являются:

- значительное потребление электровозом реактивной электроэнергии, вследствие чего наблюдается крайне низкий коэффициент мощности;
- принятый способ поддержания постоянного угла запаса тиристоров, который диктует необходимость в применении ББР;
- ограничение тормозных характеристик электровоза на уровне 3.5 зоны регулирования напряжения ВИП;
- организация коммутации тиристорных плеч осуществляется на грани опрокидывания инвертора, поэтому дополнительно вводится угол запаса инвертора, который равен 20-25 электрических градусов, что также существенно снижает коэффициент мощности электровоза.

1.2.1 Исследование влияния управления инвертором по законам $\beta = const$ и $\delta = const$ на энергетические показатели электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Работа ВИП в режиме зависимого инвертора по законам управления $\beta = const$ и $\delta = const$ описана в работе [44]. Вариант с $\beta = const$ имеет устойчивую внешнюю характеристику инвертора, и, следовательно, система рекуперативного торможения может работать без ББР, однако он менее энергоэффективен, по сравнению с первым способом. Ввиду того, что при работе инвертора с постоянным углом опережения открытия тиристорov β при небольших токовых нагрузках наблюдается избыточное значения угла запаса δ . Поэтому в настоящее время все отечественные электровозы переменного тока, оборудованные выпрямительно-инверторными преобразователями, в режиме рекуперативного торможения управляются по закону $\delta = const$. Однако, в связи с принятым законом управления с целью обеспечения электрической устойчивости рекуперативного торможения требуется введения в цепь якоря ТЭД блоки балластных резисторов, недостатки от наличия которых были подробно рассмотрены ранее.

1.2.2 Способ одновременной коммутации тока плеч выпрямительно-инверторного преобразователя

Способ одновременной коммутации тока плеч выпрямительно-инверторного преобразователя, рассмотрен в работах [9, 11]. Он основан на одновременной подаче сигналов управления на тиристоры трех плеч 2-ой и 3-ей зонах регулирования, четырех или пяти плеч на 4-ой зоне, таблица 1.2. Коммутация при такой организации протекает одновременно в нескольких

контурах, на которых разряжается энергия ЭДС самоиндукции секций вторичной обмотки ТТ.

Таблица 1.2 – Алгоритм работы плеч ВИП в режиме рекуперативного торможения при одновременной коммутации

Номер зоны	Направление ЭДС в обмотках трансформатора	Тиристорные плечи выпрямительно-инверторного преобразователя							
		1	2	3	4	5	6	7	8
4	→	-	β	β_p	β	-	-	β	-
	←-----	β	-	β	β_p	-	-	-	β
3	→	-	-	-	β	β_p	β	β	-
	←-----	-	-	β	-	β	β_p	-	β
2	→	-	β	β_p	β	β	-	-	-
	←-----	β	-	β	β_p	-	β	-	-
1	→	-	-	-	β_p	β_p	-	-	-
	←-----	-	-	β_p	-	-	β_p	-	-

Из-за одновременного протекания коммутации время длительности уменьшается, по сравнению со штатным способом управления.

Уменьшение длительности коммутации ведет к увеличению коэффициента мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения в среднем на 2 %.

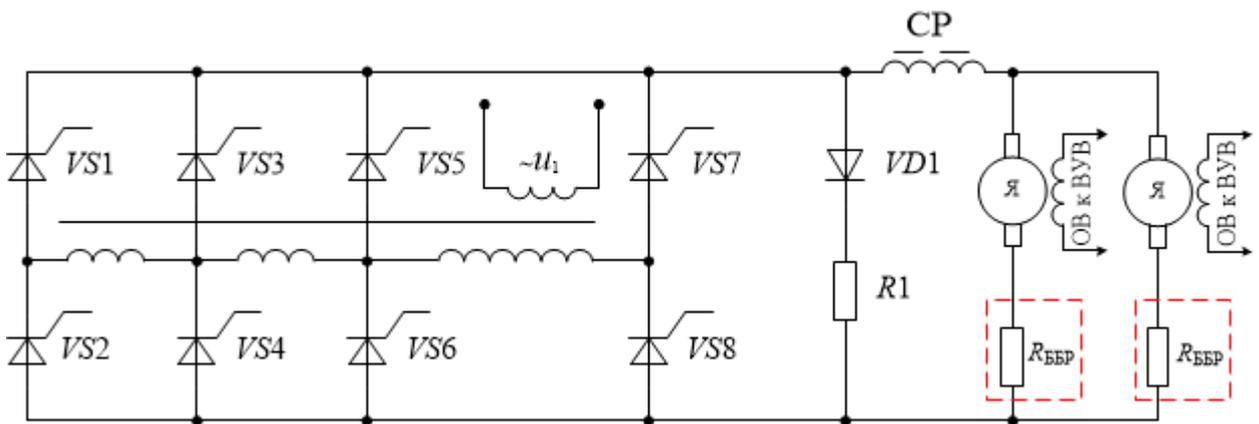
1.2.3 Применение разрядного диодного плеча в выпрямительно-инверторном преобразователе

Применение в ВИП параллельно цепи выпрямленного тока диода, включенного параллельно с ним резистора, рассмотрено в работах [6, 10, 58, 67, 108]. Такое техническое решение позволит повысить коэффициент мощности за счет уменьшения длительности угла коммутации γ , что в свою очередь приведет к уменьшению угла запаса δ .

Идея алгоритма управления в режиме рекуперативного торможения заключается в разбивке одного большого контура коммутации на два маленьких, проходящих друг за другом.

Достоинством такого технического решения является повышение коэффициента мощности на всех зонах регулирования.

Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза с применением разрядного диода параллельно цепи выпрямленного тока показана на рисунке 1.7.



*VS1-VS8 – тиристорные плечи преобразователя; VD1 – диодное разрядное плечо;
R1 – токоограничивающий резистор; CP – сглаживающий реактор; Я – обмотка якоря
тягового электродвигателя; ОБ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя;
R_{ББР} – блок балластных резисторов*

Рисунок 1.7 – Схема включения диодного плеча параллельно цепи выпрямленного тока для режима рекуперативного торможения

В проводящем состоянии, ток имеет значительную скорость нарастания через диодное плечо *VD1*, что способствует появлению дополнительной э.д.с. самоиндукции в индуктивных элементах электровоза, и, как следствие, появляется реактивный ток, проходящий через обмотки тягового трансформатора со всеми вытекающими потерями [53].

Несмотря на увеличение коэффициента мощности электровоза и снижении угла запаса тиристоров δ данный способ не позволяет реализовать режим рекуперации без блока балластных резисторов.

Техническое решение по включению последовательно с разрядным диодом, полупроводящего тиристора предложено в работе [71]. Данный подход позволяет осуществлять переход из режима инвертирования в режим выпрямителя и наоборот посредством подачи импульсов на тиристор. Такой способ управления увеличивает коэффициент мощности в режиме рекуперативного торможения до 0,8, а также позволяет обойтись без дополнительного токоограничивающего сопротивления в цепи разрядного диода.

Включение дополнительных полупроводниковых приборов в схему ВИП негативно сказывается на надежности устройства, ввиду усложнения системы управления инвертором и силовой схемы электровоза в целом.

1.2.4 Алгоритм разнофазного управления электровоза в режиме рекуперативного торможения

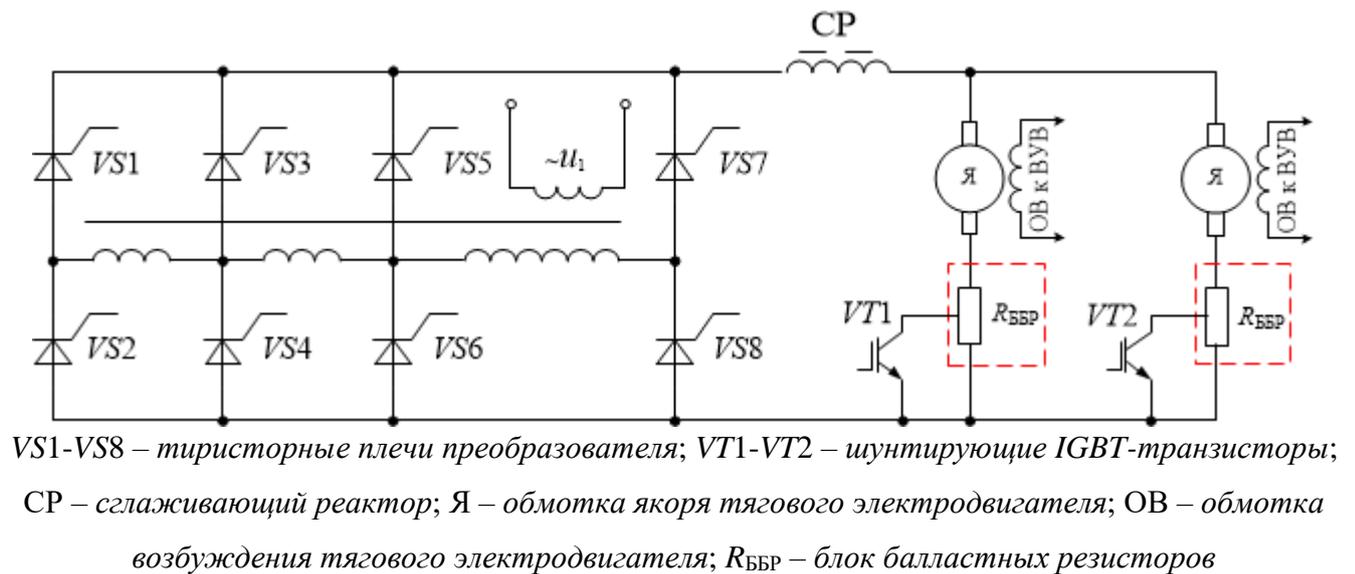
Для улучшения качества электроэнергии в тяговой сети и повышения коэффициента мощности электровоза разрабатывалась система разнофазного управления (РФУ) выпрямительно-инверторным преобразователем каждой секции электровоза по углу α_p [48, 52, 54, 57, 58, 71 и др.].

Данный способ основан на задержке импульсов по углу α_p , подаваемых на тиристорные плечи при фазовой коммутации различных ВИП, на расчетное время, равное первому полупериоду послекоммутационных колебаний напряжения на токоприёмнике электровоза с учётом изменяющихся распределённых параметров контактной сети.

Стоит отметить, что работа РФУ не влияет на электрическую устойчивость системы рекуперативного торможения и требует наличия балластных резисторов в силовой цепи со всем вытекающими недостатками.

1.2.5 Изменение параметров сопротивления блока балластных резисторов в определенных режимах работы электровоза

С целью расширения тормозных характеристик электровоза и увеличения возврата электроэнергии в контактную сеть был разработан способ шунтирования части сопротивления блока балластных резисторов [65, 68, 110, 111]. Изменение сопротивления ББР осуществляется шунтированием части сопротивления силовым полупроводниковым прибором на базе *IGBT*-транзистора (рисунок 1.8).



VS1-VS8 – тиристорные плечи преобразователя; VT1-VT2 – шунтирующие IGBT-транзисторы; CP – сглаживающий реактор; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; R_{ББР} – блок балластных резисторов

Рисунок 1.8 – Принципиальная упрощенная схема шунтирования части ББР IGBT-транзистором

Проведенные исследования показали, что при изменении величины сопротивления ББР на 50 % в конце полупериода, изменяется и форма тока на первичной обмотке ТТ, что в свою очередь улучшает энергетические показатели электровоза.

Однако, данный способ не дает возможности полного исключения блока балластных резисторов из якорной цепи генераторов, а позволяет лишь частично убрать недостатки, которые влечет за собой наличие стабилизирующего сопротивления, при этом значительно усложняет силовую схему электровоза и снижает надежность в эксплуатации.

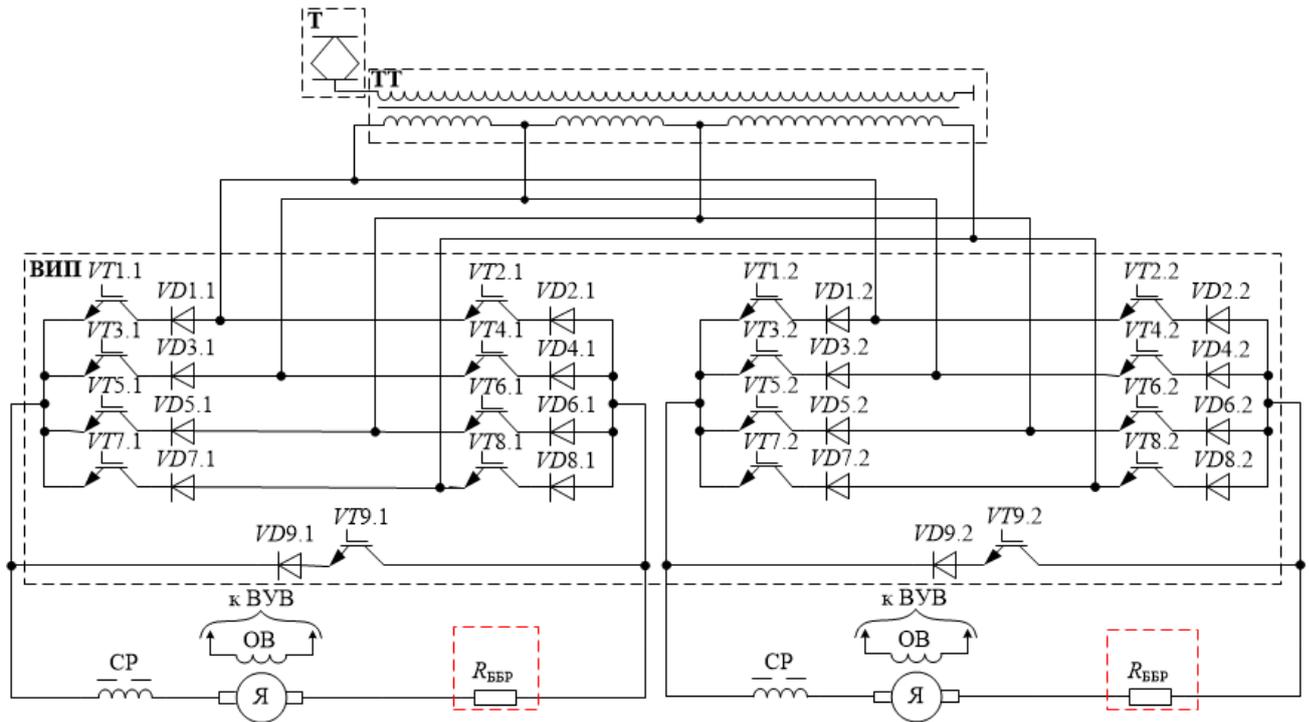
1.2.6 Преобразователи на современной элементной базе *IGBT*-транзисторов для отечественного электроподвижного состава

Применение биполярных транзисторов с изолированным затвором (*IGBT*-транзисторы) является перспективным направлением для повышения энергоэффективности режимов тяги и рекуперативного торможения электроподвижного состава [2, 4, 16, 17, 33, 42, 47, 49, 69, 73 и др].

Проводимые исследования специалистами и учеными ИрГУПС с 2010 года показывают, что перспективнее использовать вместо тиристорных выпрямительно-инверторных преобразователей – транзисторные, выполненные на базе *IGBT*-транзисторов [49-51, 55, 56, 61]. Применение таких силовых полупроводниковых приборов (СПП) позволяет решить существенную проблему оснащения ВИП электровозов переменного тока полностью управляемыми СПП.

Известен современный ВИП на базе *IGBT*-транзисторов и алгоритмы управления им в режимах тяги и рекуперативного торможения [49-51, 55, 56, 61]. На рисунке 1.9 представлена упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов.

При работе *IGBT*-транзисторов имеется возможность управления ими в любой момент полупериода напряжения. Применение таких полупроводников позволило авторам разработать новые энергоэффективные алгоритмы управления ВИП. Разработанный авторами алгоритм управления для режима рекуперативного торможения за счет надежного закрытия работающих ранее плеч ВИП исключает возможность образования опрокидывания инвертора. Все вышперечисленные факторы существенно увеличивают энергетические показатели электровоза.

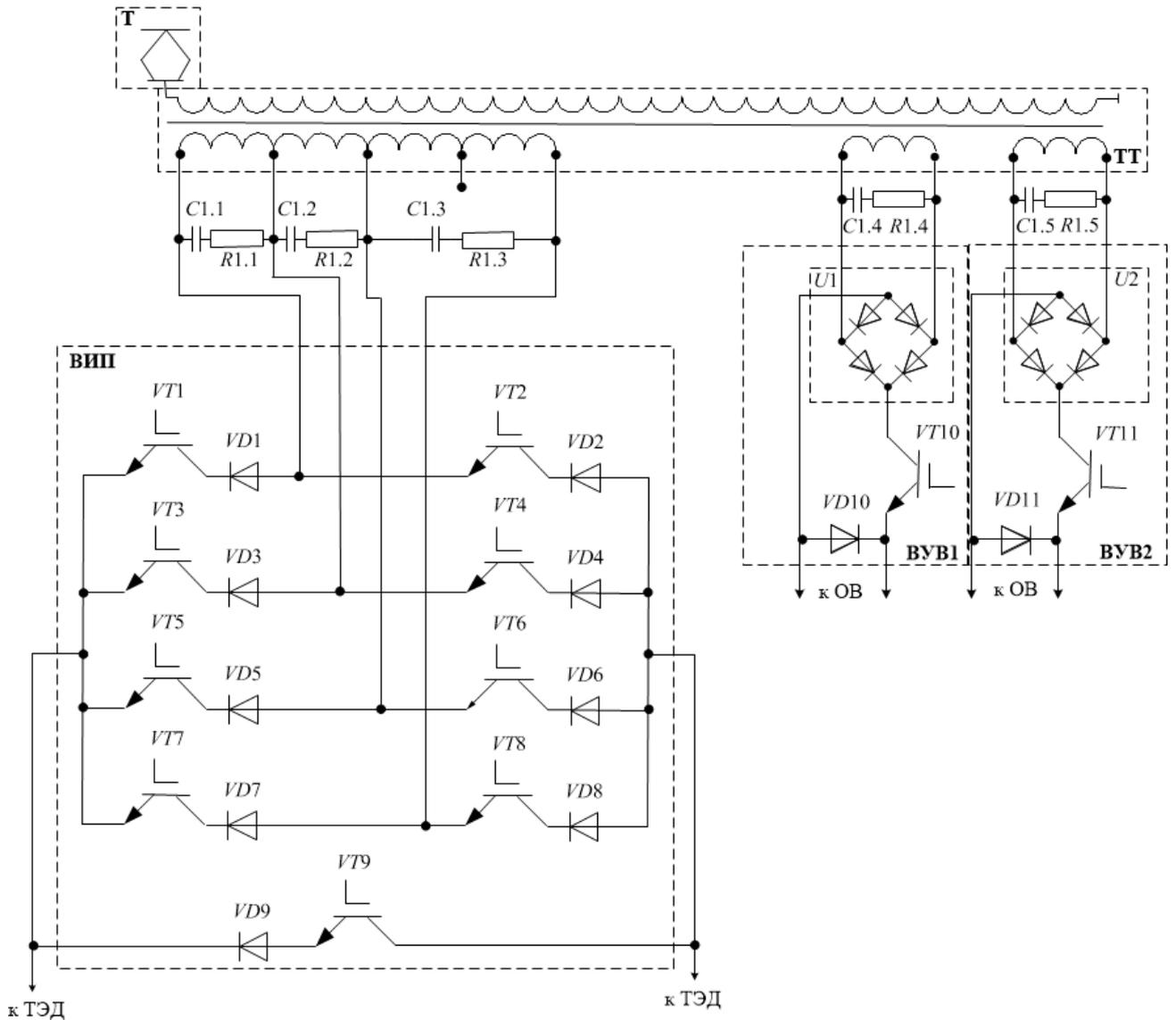


ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; Я – обмотка якоря тягового электродвигателя; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; VT1.1-VT9.2, VD1.1-VD9.2 – диодно-транзисторные плечи ВИП; СР – сглаживающий реактор; RББР – блок балластных резисторов; Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.9 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с ВИП на базе IGBT-транзисторов

Необходимо отметить, что недостатки, касающиеся способа управления тиристорным преобразователем полностью устраняются при работе перспективного транзисторного ВИП, что позволяет повысить коэффициент мощности электровоза до 0,95.

Также известный перспективный преобразователь, выполненный на базе IGBT-транзисторов для мотор-вагонного подвижного состава (МВПС) [26]. Схема данного ВИП предложена в исполнении восьмиплеечевого преобразователя с включением дополнительного девятого диодно-транзисторного разрядного плеча (рисунок 1.10).

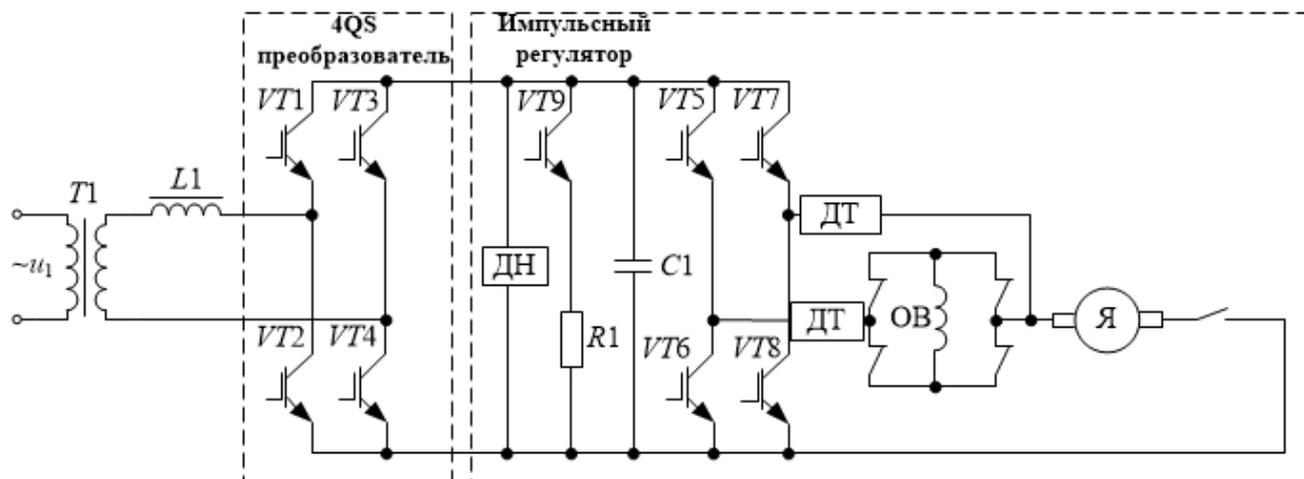


ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь; ОВ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; ВУВ – выпрямительная установка возбуждения; VT1-VT11, VD1-VD11 – диодно-транзисторные плечи ВИП и ВУВ; C1.1-C1.5, R1.1-R1.5 – снабберные RC-цепи; U1-U2 – диодный мостовой выпрямитель; Т – токоприемник; ТТ – тяговый трансформатор

Рисунок 1.10 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электропоезда переменного тока при использовании ВИП и ВУВ на базе IGBT-транзисторов

Исследования в данной работе показали, что при использовании данных преобразователей на МВПС повышается коэффициент мощности до значения 0,945, повышается величина средневыпрямленного напряжения в среднем на 24 % и снижается коэффициент пульсации тока якоря ТЭД на 25 %.

Перспективный преобразователь на базе *IGBT*-транзисторов также рассмотрен в работах [2, 16, 17, 73]. Данный преобразователь представляет собой выпрямительную установку, выполненную на базе *4q-S* преобразователя с использованием современных силовых *IGBT*-транзисторов в сочетании с двухзонными импульсными тяговыми преобразователями, упрощенная принципиальная схема такого преобразователя показана на рисунке 1.11.



T1 – тяговый трансформатор; *VT1-VT9* – транзисторные плечи *4q-S* преобразователя и импульсного регулятора; *Я* – обмотка якоря тягового электродвигателя; *ОВ* – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; *ДН* – датчик напряжения; *ДТ* – датчик тока

Рисунок 1.11 – Упрощенная принципиальная электрическая схема силовых цепей электровоза переменного тока с подключением *4q-S* преобразователя и двухзонного импульсного регулятора на базе *IGBT*-транзисторов

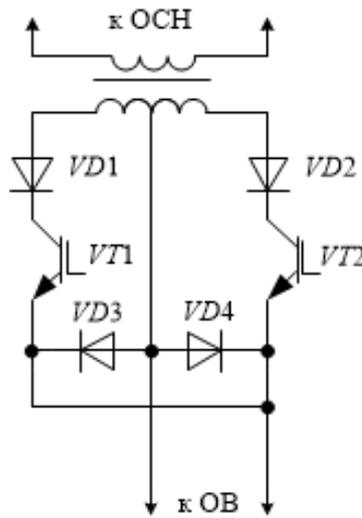
Достоинствами такого технического решения является не только повышение коэффициента мощности электровоза до 0,95 (95 %), но и упрощение его силовой схемы: отпадает потребность в применении контакторов и резисторов ослабления поля, тормозных переключателей, индуктивных шунтов и др.

Анализ основных направлений развития ВУВ представлен в работе [79]. Во время рекуперации, электровозом одновременно потребляет электроэнергию через выпрямительные установки возбуждения (ВУВ). Поэтому процесс выпрямления напряжения для питания обмоток возбуждения также сказываются на величине коэффициента мощности электровоза и его энергетические показатели в целом.

Известен способ и алгоритм управления ВУВ, в котором открытие его силовых плеч происходит в начале каждого полупериода напряжения сети с регулированием момента их закрытия [43]. Так же в данной работе представлена модернизированная силовая схема ВУВ, путем замены тиристоров на силовые диоды для выпрямления напряжения, а далее в цепь подключены полностью управляемые *IGBT*-транзисторы, которые плавно регулируют величину выпрямленного напряжения.

Данное схемотехническое решение было исследовано на электровозе ВЛ80Р №1829, которое показало, что коэффициент мощности электровоза увеличился в среднем на 4 %, а также уменьшился коэффициент относительной пульсации тока возбуждения на 67 %, что так же играет немаловажную роль.

Упрощенная принципиальная электрическая схема ВУВ на базе *IGBT*-транзисторов показана на рисунке 1.12.



VT1-VT2, VD1-VD.4 – диодно-транзисторные плечи ВУВ; ОБ – обмотка возбуждения тягового электродвигателя; ОСН – обмотка собственных нужд

Рисунок 1.12 – Упрощенная принципиальная электрическая схема модернизированной выпрямительной установки возбуждения на базе *IGBT*-транзисторов

1.3 Выводы по разделу 1

1 Проведенный анализ существующих технических средств, способов и алгоритмов управления ВИП, направленных на повышение энергетической эффективности режима рекуперативного торможения электровоза показал, что большинство технических решений направлено на повышение коэффициента мощности электровоза за счет применения компенсирующих устройств и различных алгоритмов управления ВИП.

2 Вопрос обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения с целью исключения блока балластных резисторов из якорной цепи тяговых электродвигателей в приведенных работы не рассматривался, ввиду того, что при организации управления тиристорами ВИП с постоянным углом запаса реализовать это не представляется возможным.

3 Перспективным направлением повышения энергетических показателей электровозов переменного тока является применение полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов, в частности – *IGBT*-транзисторов в тяговых преобразователях, также благодаря свойству данных транзисторов отпираться и запираться в любой момент времени полупериода напряжения возможно реализовать алгоритм управления, который позволит обеспечить устойчивую работу системы рекуперативного торможения без надобности в применении блока балластных резисторов.

2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА РЕАЛИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ БЕЗ БЛОКА БАЛЛАСТНЫХ РЕЗИСТОРОВ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Для реализации электрического рекуперативного торможения тяговые электрические двигатели электровоза переменного тока необходимо перевести в режим генератора, при реализации независимого питания их обмоток возбуждения. При этом необходимо изменить направление протекания тока якоря так, чтобы генерируемый ток имел одинаковое направление, с проводимостью тиристорov инвертора. Отпирание тиристорov осуществляется в конце полупериода с опережением окончания полупериода на угол β с целью обеспечения их проводящего состояния в отрицательный полупериод напряжения сети. Ток и напряжение контактной сети в режиме рекуперативного торможения электровоза находятся в противофазе, ток протекает против направления напряжения трансформатора, тем самым, ТТ своей первичной обмоткой передает ток, вырабатываемый генераторами в контактную сеть [106]. В якорную цепь генераторов электровоза включено добавочное активное сопротивление, которое предназначено для обеспечения устойчивой работы системы рекуперативного торможения [112].

2.1 Исследование условий электрической устойчивости системы рекуперативного торможения электровоза переменного тока

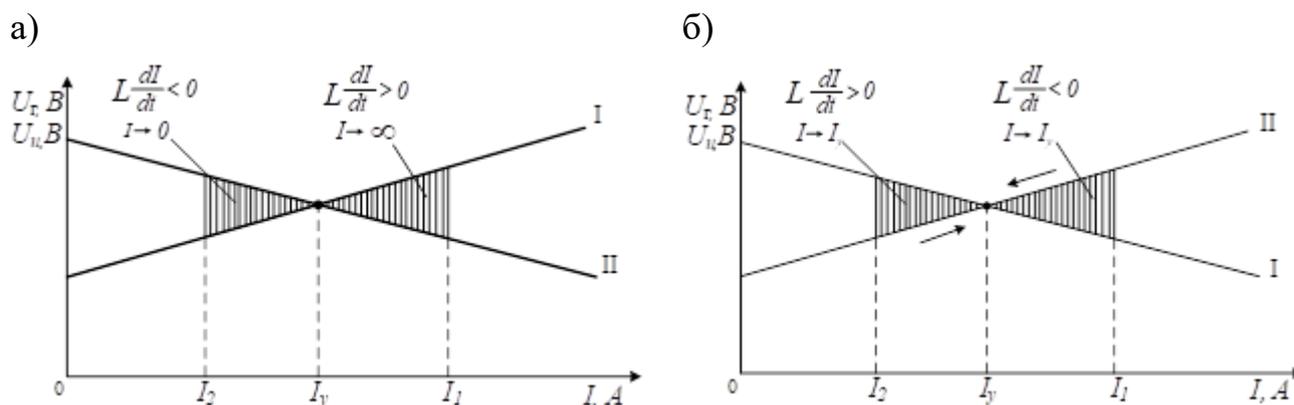
Статическая устойчивость определяется пересечением характеристик цепи двигателя и нагрузки. Взаимный наклон внешних характеристик в этих точках должен удовлетворять условию статической устойчивости системы электрического рекуперативного торможения [106]. Предположим, что

статическая внешняя характеристика генератора $U_d = f(I)$ обозначена кривой I на рисунке 2.1. А внешняя характеристика нагрузки (инвертора) $U_u = f(I)$ обозначена кривой II.

Тогда в точке пересечения этих характеристик наступит установившийся режим работы данной системы. Причем любое отклонение значения тока от его установившегося режима I_y в сторону увеличения, например, до значения I_1 , либо в сторону уменьшения до значения I_2 между ординатами характеристик I и II возникнет разность $U_d - U_u$, которую компенсирует лишь э.д.с. (электродвижущая сила) самоиндукции в переходном режиме, следовательно

$$U_d - U_u = L \frac{dI}{dt}, \quad (2.1)$$

где U_d, U_u – напряжение на генераторе и инверторе соответственно, В.



а – статически неустойчивая система; б – статически устойчивая система

Рисунок 2.1 – Внешние характеристики генератора и инвертора

В рассматриваемом случае при изменении величины установившегося тока в сторону его увеличения, напряжение генератора выше напряжения нагрузки, в таком случае величина $L \frac{dI}{dt} > 0$, и такое изменение тока сопровождается его дальнейшим ростом. Также если рассмотреть изменение величины установившегося тока в сторону его уменьшения, напряжение нагрузки выше напряжения генератора, величина э.д.с. самоиндукции $L \frac{dI}{dt} < 0$, в таком случае

изменение тока сопровождается его дальнейшим уменьшением. Таким образом, исходя из данных суждений, система, отображенная на рисунке 2.1 (а) является статически неустойчивой.

Пользуясь аналогичными суждениями – система, отраженная на рисунке 2.1 (б) является статически устойчивой. При отклонении установившегося тока в сторону увеличения либо уменьшения, величина э.д.с. самоиндукции будет компенсировать появившуюся разность между напряжением генератора и инвертора. Таким образом, условие статической устойчивости режима рекуперативного торможения определяет неравенство [75, 90, 106]

$$\frac{dU_d}{dI_d} < \frac{dU_u}{dI_d}, \quad (2.2)$$

где U_d , U_u – напряжение на генераторе и инверторе соответственно, В;

I_d – ток генератора, А.

Внешней характеристикой преобразователя (инвертора) называется зависимость выпрямленного напряжения от тока генератора [23, 64, 85, 90].

Прямое воздействие на величину напряжения и угол наклона характеристики оказывают размеры сопротивлений в цепи преобразователя (активного и реактивного), а также электромагнитные процессы со стороны преобразователя.

На рисунке 2.2 приведено семейство внешних характеристик тиристорного инвертора для законов управления с постоянным углом опережения $\beta = const$ и постоянным углом запаса $\delta = const$ [44, 90].

Наклон характеристик напрямую имеет зависимость от закона управления инвертора. Используя закон управления с постоянным углом опережения ВИП $\beta = const$, режим рекуперативного торможения имеет статическую устойчивость без добавления активного сопротивления в якорную цепь [44].

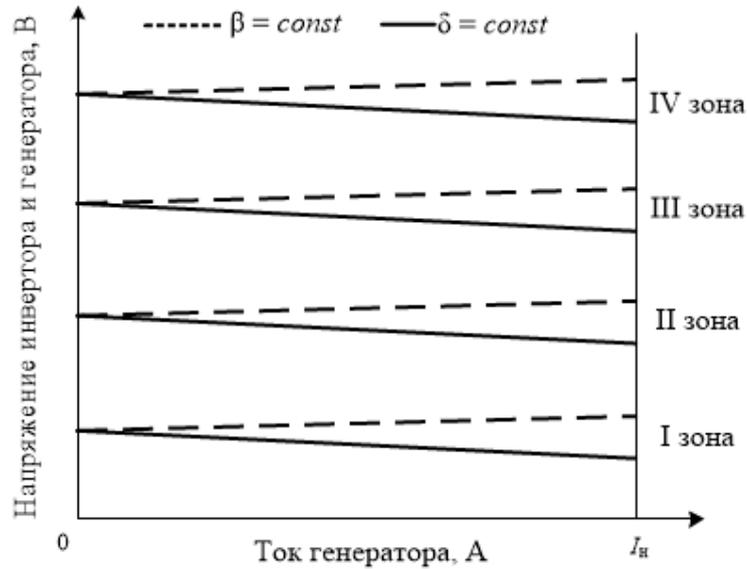
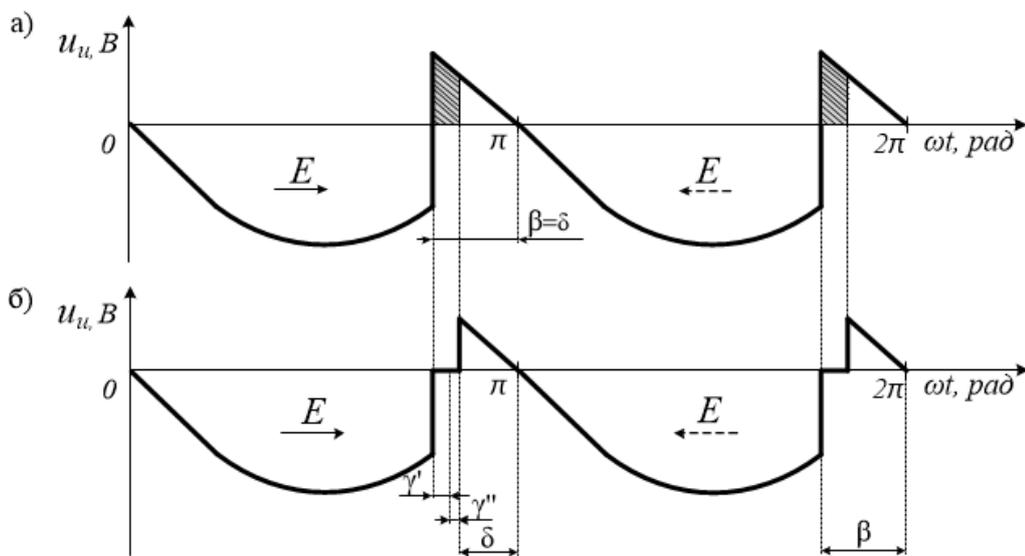


Рисунок 2.2 – Семейство внешних характеристик тиристорного инвертора по законам управления $\beta = const$ и $\delta = const$ для различных зон регулирования напряжения

Внешняя характеристика генератора без использования дополнительного активного сопротивления практически прямолинейна и не имеет наклона, т.к. падение напряжения в нем с ростом тока невелико из-за небольшого внутреннего сопротивления. На рисунке 2.3 показана диаграмма изменения напряжения инвертора, при его работе в режимах холостого хода и номинальном режиме, при управлении им по закону с постоянным углом опережения открытия тиристорov $\beta = const$.

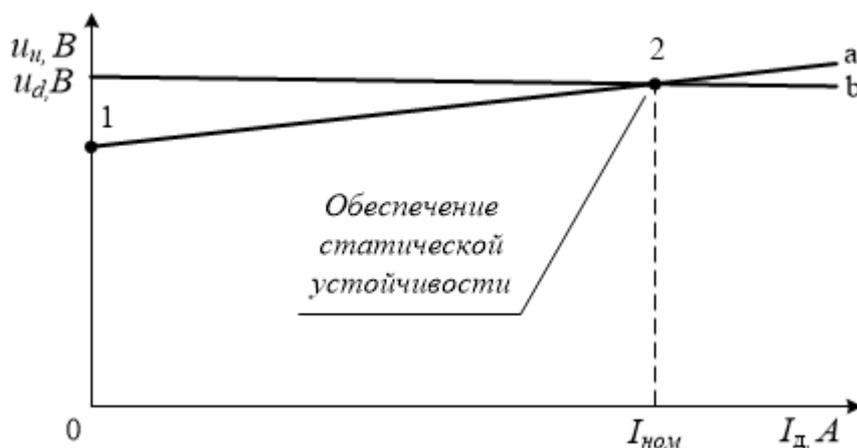


а – режим холостого хода, $I_d = 0$; б – номинальный режим $I_d = I_{дн}$

Рисунок 2.3 – Диаграмма напряжения инвертора u_u для закона управления $\beta = const$

Внешняя характеристика инвертора в свою очередь для рассматриваемого закона управления имеет положительный наклон, т.е. с увеличением тока увеличивается и величина среднего выпрямленного напряжения (рисунок 2.3).

На рисунке 2.4 показано условие выполнения статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП по $\beta = const$.



1 – режим холостого хода; 2 – режим номинальной работы; а – внешняя характеристика инвертора; b – внешняя характеристика генератора без балластного сопротивления в якорной цепи

Рисунок 2.4 – Обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП $\beta = const$

Однако, несмотря на то, что по закону управления с постоянным углом опережения β не требуется наличие дополнительного активного сопротивления в якорной цепи генераторов, при такой организации управления ВИП коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения находится в пределах 0,48, что обусловлено значительным потреблением реактивной энергии из контактной сети [90]. Выбирая угол β постоянным при малых нагрузках, когда величина угла коммутации γ мала, наблюдается избыточное значение угла запаса δ , согласно уравнению

$$\beta = \delta + \gamma, \quad (2.3)$$

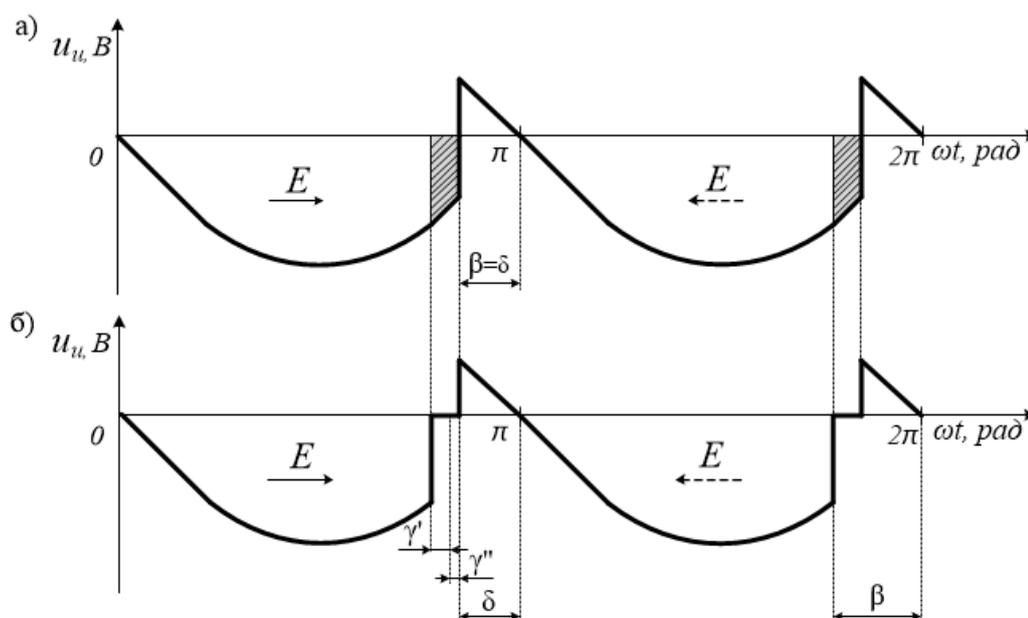
где δ – минимально-допустимая величина угла запаса инвертора, эл. град.;

γ – величина угла коммутации инвертора, эл. град.

С целью предотвращения этого недостатка на эксплуатирующихся отечественных электровозах переменного тока регулирование угла опережения осуществляется с поддержанием минимально-допустимого угла запаса по закону $\delta = const$. При этом реализуется автоматическое регулирование величины данного угла с целью поддержания постоянного минимального его значения, допустимого по условиям надежной работы плеч ВИП [10-14]. Реализация данного закона усложнена тем, что на величину угла коммутации γ , от которого зависит и угол запаса инвертора δ , влияют факторы, не связанные с параметрами самого электровоза. Входную величину системы автоматического регулирования принимают непосредственно зависящей от угла коммутации γ .

Такая организация управления инвертором позволяет увеличить коэффициент мощности электровоза в режиме рекуперативного торможения до значения 0,65 на высшей зоне регулирования напряжения ВИП.

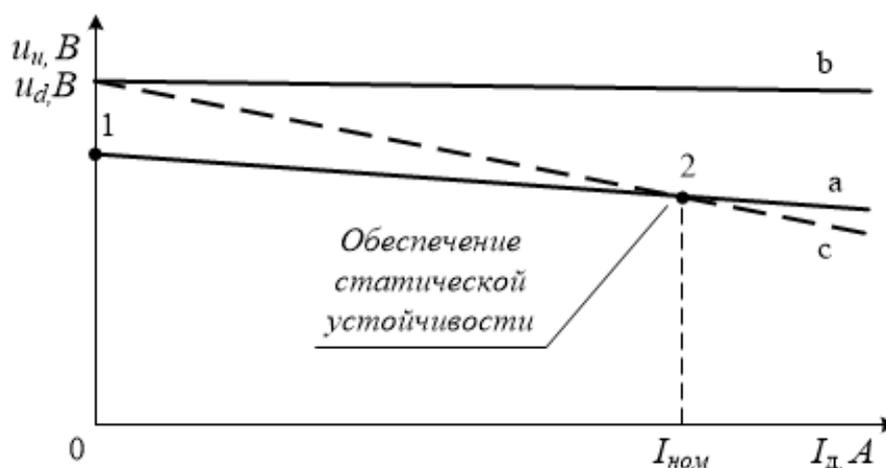
На рисунке 2.5 показана диаграмма выпрямленного напряжения инвертора в точке холостого хода ($I_d = 0$) и номинального режима работы ($I_d = I_{дн}$) для закона управления $\delta = const$.



а – режим холостого хода, $I_d = 0$; б – номинальный режим $I_d = I_{дн}$

Рисунок 2.5 – Диаграмма напряжения инвертора u_u для закона управления $\delta = const$

На рисунке 2.6 отображено условие выполнения статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП $\delta = const$.



1 – режим холостого хода; 2 – режим номинальной работы; а – внешняя характеристика инвертора; б – внешняя характеристика генератора без балластного резистора в якорной цепи; с – внешняя характеристика генератора с балластным резистором в якорной цепи

Рисунок 2.6 – Обеспечение статической устойчивости режима рекуперативного торможения для закона управления тиристорного ВИП $\delta = const$

Внешняя характеристика инвертора в данном случае имеет отрицательный наклон, т.к. по мере увеличения тока растет значение угла коммутации γ , что при неизменном значении угла запаса δ приводит к уменьшению величины среднего выпрямленного напряжения.

Несмотря на повышение коэффициента мощности по сравнению с $\beta = const$, данный закон управления влечет за собой ряд серьезных недостатков, основным из которых является вынужденная мера применения блока балластных резисторов в якорной цепи генераторов, необходимого для придания внешней характеристики генератора более крутого наклона с целью обеспечения электрической устойчивости ресурсосберегающего рекуперативного торможения.

2.2 Разработка предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов

Предлагаемый способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока заключается в том, что при использовании *IGBT*-транзисторов в плечах инвертора, имеется возможность влиять на положение и наклон внешней характеристики выпрямительно-инверторного преобразователя [90].

Как было рассмотрено ранее, для обеспечения устойчивой работы рекуперативного торможения без ББР необходимо чтобы внешняя характеристика ВИП имела положительный наклон (рисунок 2.4), т.е. по мере увеличения тока в цепи необходимо чтобы увеличивалось и напряжение инвертора [74, 90-105]. Достигнуть такого можно с помощью регулирования выпрямленного напряжения в зависимости от тока, протекающего в цепи генератора. В таблице 2.1 показан предлагаемый алгоритм управления транзисторным ВИП в режиме рекуперативного торможения.

Таблица 2.1 – Алгоритм управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при реализации режима рекуперативного торможения без ББР

Номер зоны	Направление ЭДС в обмотках ТТ	Транзисторные плечи ВИП								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	→	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	-	-	β_w	W_w
	←----	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	β_w	-	W_w
3	→	-	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	β_w	W_w
	←----	-	-	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	β_w	-	W_w
2	→	β_{breg}	-	β_{sreg}	-	-	β_w	-	-	W_w
	←----	-	β_{breg}	-	β_{sreg}	β_w	-	-	-	W_w
1	→	-	-	β_{reg}	-	-	β_{reg}	-	-	W_w
	←----	-	-	-	β_{reg}	β_{reg}	-	-	-	W_w

Примечание:

β_{reg} – угол регулирования фазы отпирания транзисторов плеча ВИП;

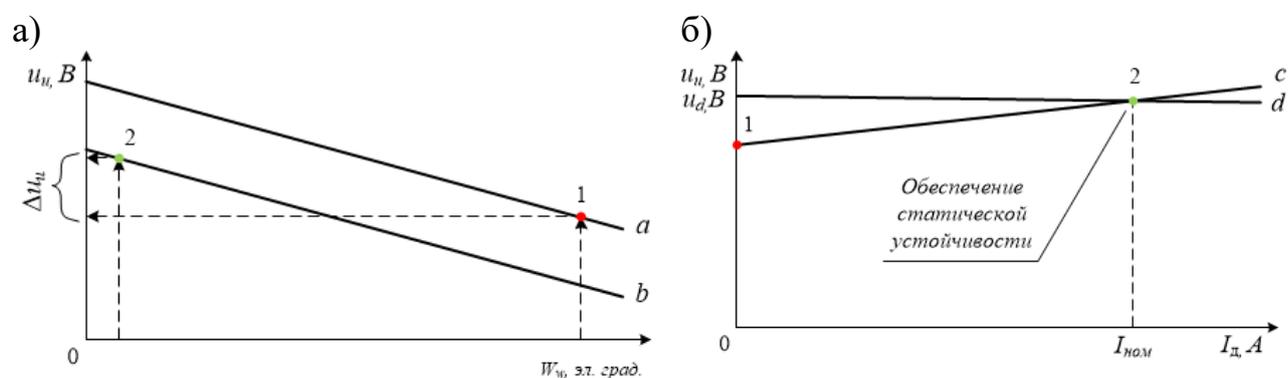
β_w – рабочий угол отпирания силовых транзисторов плеча ВИП;

β_{sreg} – регулируемый угол отпирания транзисторов плеча ВИП по малому контуру;

β_{breg} – регулируемый угол отпирания транзисторов плеча ВИП по большому контуру;

W_w – угол запираания транзистора девятого плеча ВИП.

На рисунке 2.7 (а) показан механизм обеспечения положительного наклона внешней характеристики (б) транзисторного ВИП в режиме инвертора путем выбора времени работы транзисторов по сигналам управления β_w , β_{sreg} и W_w , таким образом, что выбирая более длительное время работы диодно-транзисторного плеча ($VD9-VT9$) по сигналу W_w (точка 1, рисунок 2.7, а) и более позднее открытие транзисторов сигналами β_w , β_{sreg} на холостом ходу и постепенно уменьшая время работы диодно-транзисторного разрядного плеча ($VD9-VT9$) сигналом W_w (точка 2, рисунок 2.7, а) имеется возможность обеспечить положительный наклон внешней характеристики транзисторного ВИП в режиме инвертора на величину Δu_u .



а – зависимость выпрямленного напряжения ВИП от времени работы диодно-транзисторного плеча $VT9$ - $VD9$; б – внешние характеристики генератора и ВИП на базе IGBT-транзисторов в режиме инвертора; 1 – режим холостого хода; 2 – режим номинальной работы; а – напряжение транзисторного ВИП на холостом ходу; б – напряжение транзисторного ВИП при номинальном токе; с – внешняя характеристика транзисторного ВИП при реализации предлагаемого алгоритма управления; d – внешняя характеристика генератора без балластного резистора в якорной цепи

Рисунок 2.7 – Организация обеспечения положительного наклона внешней характеристики транзисторного ВИП

На рисунке 2.8 показаны временные диаграммы электромагнитных процессов транзисторного ВИП при реализации предлагаемого алгоритма управления им.

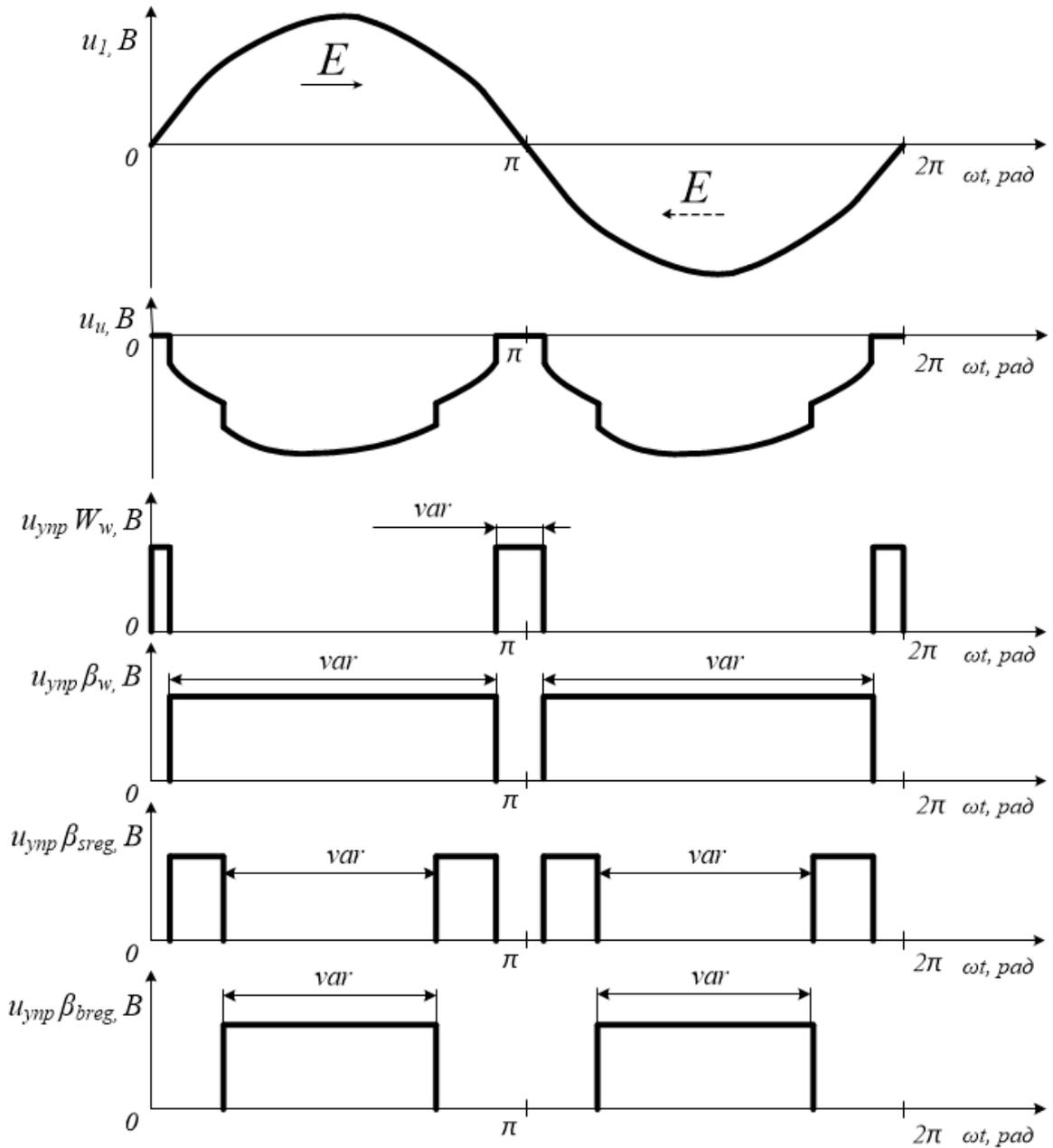


Рисунок 2.8 – Временные диаграммы электромагнитных процессов ВИП на базе IGBT-транзисторов при реализации предлагаемого алгоритма управления

Алгоритм работы основной программы блока управления (БУ) ВИП при реализации предлагаемого способа управления им представлен в виде блок-схем на рисунке 2.9.

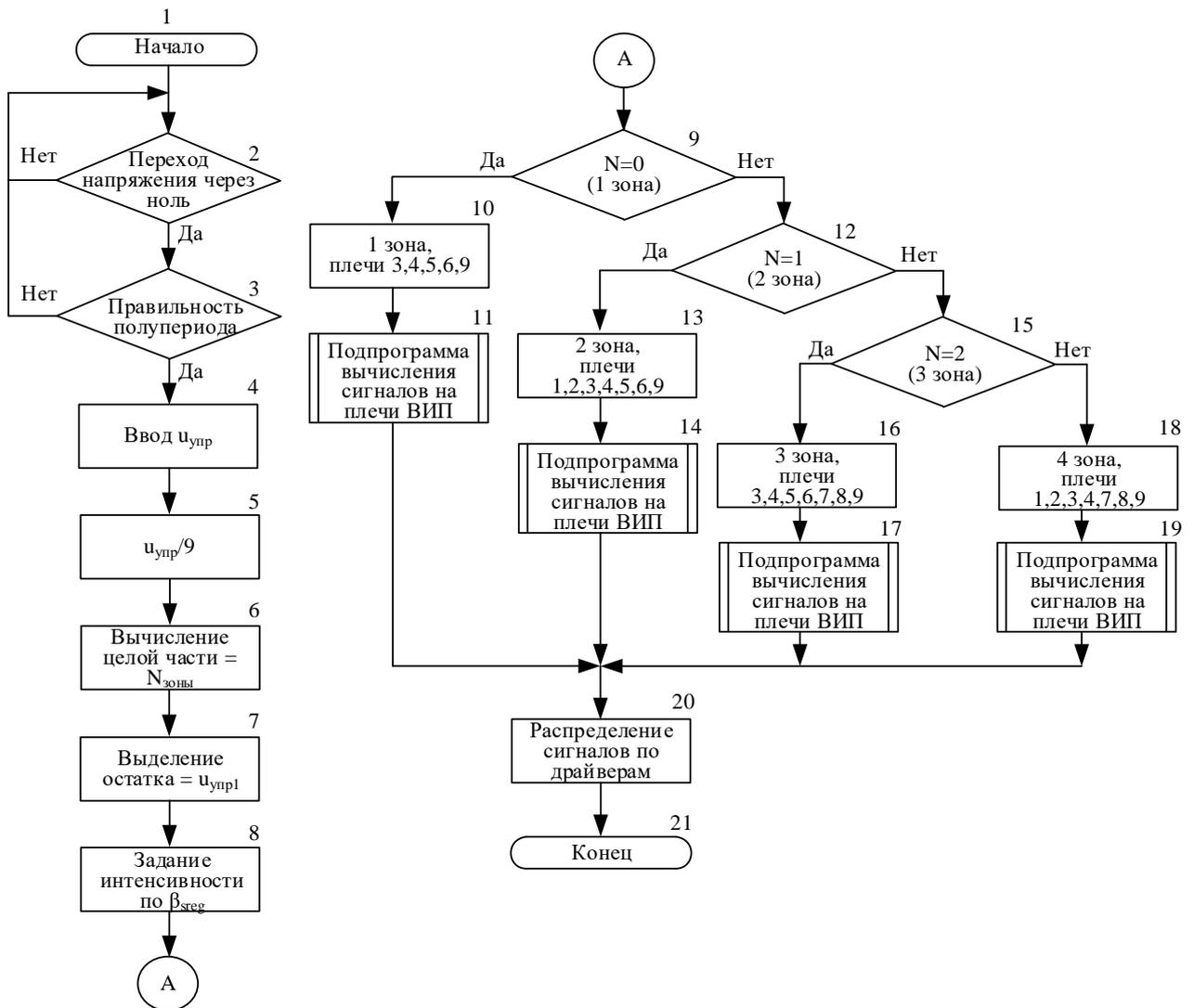


Рисунок 2.9 – Блок-схема алгоритма работы основной программы блока управления ВИП при реализации предлагаемого способа управления

Программа, которая реализует предлагаемый алгоритм, связана с управлением ВИП на базе *IGBT*-транзисторов, работающем на промышленной частоте 50 Гц, поэтому должно соблюдаться условие синхронизации интервала повторения вычислений с тактом работы преобразователя. Из этого следует, что в один полупериод (10 мс) происходит один интервал повторения вычислений.

При смене полярности напряжения сети программа запускает по приходу соответствующего сигнала (блок 2).

Ложные сигналы полупериода игнорируются в блоке 3. В случае прихода такого сигнала, программа находится в режиме ожидания до прихода истинного сигнала.

При условии, если в текущем цикле программы сигнал полупериода совпадает с сигналом, пришедшем в предыдущем полупериоде – он определяется программой как ложный и действие программы повторяется с блока 2. Если сигнал истинный (знак полупериода отличается от предыдущего) начинается цикл работы основной программы.

Блок 4 обеспечивает ввод исходных заданий (с пульта машиниста, датчиков коммутации и слежения).

Целочисленное деление сигнала ввода с пульта машиниста на девять осуществляется в блоке 5.

После выделения целой части (блок 6), полученной значение соответствует номеру зоны регулирования напряжения, остаток от деления – соответствует значению напряжения управления ($u_{упр1}$) осуществляется в блоке 7.

Интенсивность задания снижения/нарастания тока тягового электрического двигателя реализуется в блоке 8. Задатчик интенсивности обеспечивает плавность нарастания β_{sreg} и обеспечивает сравнение действующего задания со считанным заданием управляющего воздействия. В случае необходимости он так же уменьшает (либо увеличивает) угол регулирования со скоростью 47 эл. град/сек.

Далее осуществляется проверка номера зоны, к примеру, если $N = 0$ (блок 9), то реализуется алгоритм работы первой зоны (блок 10, 11), в случае ложного результата проверки, то осуществляется проверка номера зоны продолжается (блок 12) до тех пор, пока искомое значение не станет удовлетворительным и не будет выбран подходящий алгоритм работы. Заключительным этапом алгоритма является передача сигналов управления по драйверам *IGBT*-транзисторов (блок 20).

Работа подпрограммы по вычислению сигналов на плечи ВПП (блоки 11, 14, 17, 19) представлена на рисунке 2.10.

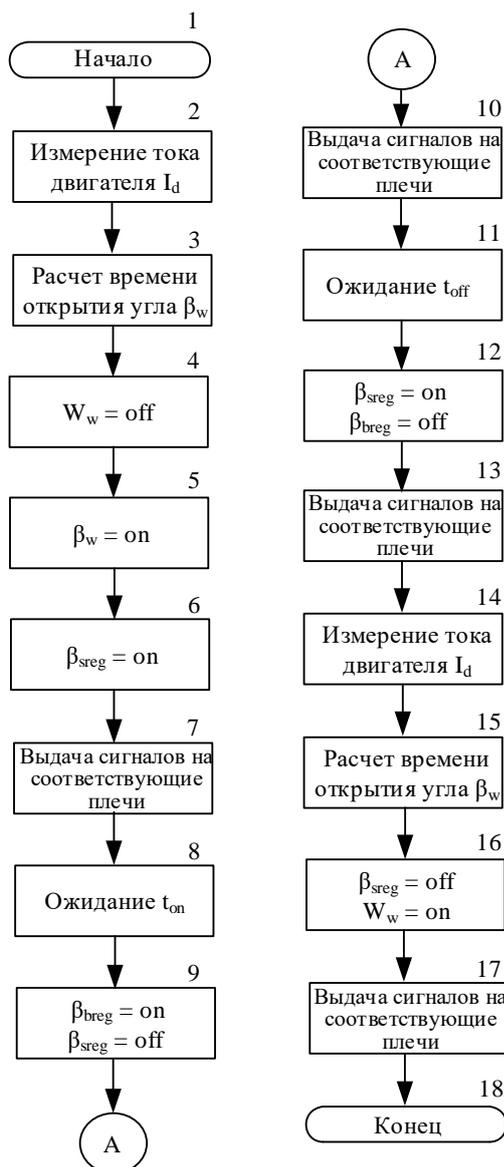


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритма работы подпрограммы по вычислению сигналов на плечи ВИП

Работа подпрограммы привязана к переходу сетевого напряжения через «ноль». Далее определяется величина тока двигателя (блок 2) и на основании полученных значений происходит расчет времени открытия транзистора по сигналу β_w (блок 3). Затем формируются сигналы включения и выключения для соответствующих плеч (блоки 4, 5, 6). Блок 7 осуществляет вывод управляющих сигналов на плечи, соответствующие зоне регулирования и текущему полупериоду (данные передаются из основной программы).

Блок 8 осуществляет ожидание до времени включения регулируемых плеч (время вычисляется в основной программе и передается в подпрограмму). В блоке 9 формируются соответствующие сигналы управления и в блоке 10 осуществляется вывод управляющих сигналов на плечи, соответствующие зоне регулирования и текущему полупериоду. Блок 11 осуществляет ожидание до времени выключения регулируемых плеч. В блоке 12 формируются соответствующие сигналы управления и в блоке 13 осуществляется вывод управляющих сигналов на плечи, соответствующие зоне регулирования и текущему полупериоду.

В блоке 14 снова определяется величина тока двигателя и на основании полученных значений происходит расчет времени открытия транзистора по сигналу W_w (блок 15).

В блоке 16 формируются соответствующие сигналы управления и в блоке 17 осуществляется вывод управляющих сигналов на плечи, соответствующие зоне регулирования и текущему полупериоду.

2.3 Расчет внешних характеристик генератора и инвертора для типового и предлагаемого алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем

С целью проверки обеспечения статической устойчивости режима рекуперативного торможения с предлагаемым способом его реализации необходимо провести расчет внешних характеристик системы «генератор – инвертор». Расчет будет проведен по двум точкам для каждой характеристики: первая точка соответствует режиму холостого хода, вторая – номинальному режиму работы [64, 89].

2.3.1 Расчет внешних характеристик выпрямительно-инверторного преобразователя на базе тиристорov с наличием балластного сопротивления в якровой цепи тягового электрического двигателя

Величина средневывпрямленного напряжения ВИП в точке холостого хода

$$U_{u0i} = \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times U_{mi} = 0,9 \times U_{mi}, \quad (2.4)$$

где U_{mi} – действующее значение напряжения вторичной обмотки тягового трансформатора на i зоне регулирования, В.

Величина средневывпрямленного напряжения ВИП в номинальном режиме работы с учетом падения напряжения ΔU

$$U_{uni} = U_{u0i} \pm \Delta U = U_{u0i} \pm I_{дн} \times R_{\text{Эп}} - \Delta U_{\text{В}}, \quad (2.5)$$

где $I_{дн}$ – номинальный ток генератора, А;

$R_{\text{Эп}}$ – эквивалентное сопротивление, определяющее наклон характеристики ВИП, Ом;

$\Delta U_{\text{В}}$ – падение напряжения в плечах ВИП, В.

Внешняя характеристика ВИП определяется уравнением (2.5). В данном выражении эквивалентное сопротивление определяется по формуле

$$R_{\text{Эп}} = \lambda \times \frac{2}{\pi} \times X_{\text{T}} + \xi \times R_{\text{T}} + R_{\text{д}}, \quad (2.6)$$

где λ – коэффициент, учитывающий влияние пульсаций;

ξ – отношение амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке тягового трансформатора к значению данного напряжения последующей зоны;

$X_{\text{T}}, R_{\text{T}}$ – соответственно индуктивное и активное сопротивления трансформатора, Ом;

$R_{\text{д}}$ – активное сопротивление двигателя, Ом.

Активное сопротивление тягового электродвигателя в расчетах принимается без учета активного сопротивления обмотки возбуждения и имеет вид

$$R_d = R_{оя} + R_{ко} + R_{дп}, \quad (2.7)$$

где $R_{оя}$ – активное сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{ко}$ – активное сопротивление компенсационной обмотки, Ом;

$R_{дп}$ – активное сопротивление добавочных полюсов, Ом.

Для тягового электродвигателя электровоза переменного тока серии «Ермак» НБ-514Б для расчета приняты следующие значения [112]:

- сопротивление якорной обмотки – 0,0112 Ом;

- сопротивление компенсационной обмотки и добавочных полюсов – 0,0125 Ом.

Внешняя характеристика инвертора $U=f(I_d)$ нелинейная, но в расчетах можно принять допущение, что она прямолинейна [88]. Таким образом в выражении (2.6) величины λ и ξ допускается принять постоянными. Причем корректирующий коэффициент, учитывающий влияние пульсаций в режиме рекуперативного торможения, принимается несколько меньшим, чем в режиме тяги ($\lambda = 1,05$), поскольку основная коммутация происходит при больших мгновенных значениях напряжения переменного тока и величина угла коммутации всегда меньше, нежели в режиме тяги.

Подставив выражение (2.6) в (2.5) получим

$$U_{ини} = U_{и0i} - I_{дн} \times (\lambda \times \frac{2}{\pi} \times X_T + \xi \times R_T + R_d) - \Delta U_v. \quad (2.8)$$

Номинальное значение индуктивного сопротивления трансформатора (для 4-ой зоны регулирования напряжения) определим согласно выражению [78]

$$X_{тн} = \frac{1,25 \times U_{кз} \times U_{дн}}{100 \times n_{дв} \times I_{дн}}, \quad (2.9)$$

где $U_{кз}$ – реактивные потери напряжения в трансформаторе;

$n_{дв}$ – число тяговых электрических двигателей в цепи выпрямленного тока одного выпрямительно-инверторного преобразователя.

1,25 – коэффициент, учитывающий соотношение между номинальным выпрямленным напряжением на двигателе и переменным напряжением холостого хода на наивысшей зоне регулирования [78].

Значение активного сопротивления обмоток трансформатора выразим через соотношение [78]

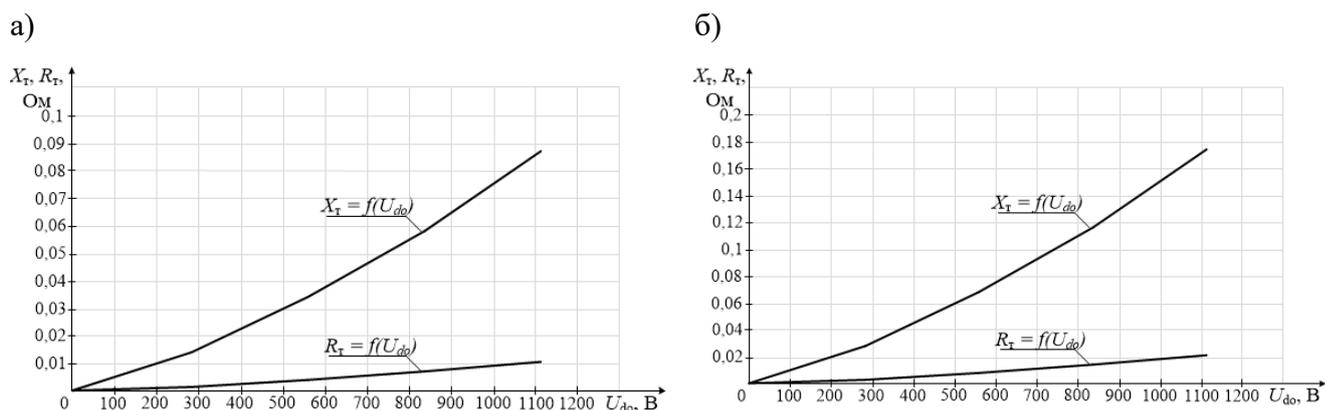
$$R_{тн} = 0,12 \times X_{тн}. \quad (2.10)$$

Параметры сопротивления обмоток трансформатора необходимо определить для четырех зон регулирования напряжения ВИП по зависимости $X_T = f(U_{do})$ и $R_T = f(U_{do})$. Для номинального напряжения используются формулы (2.9) и (2.10). Далее полученные значения умножаются на соответствующие значение относительных величин $(X_T/X_{тн})$, $(R_T/R_{тн})$ и $(U_{do}/U_{дон})$ по полученным значениям строится зависимость. Результаты расчета сопротивления обмоток трансформатора сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Расчет характеристик $X_T = f(U_{do})$ и $R_T = f(U_{do})$

№ зоны	U_{do} , В	X_T , Ом	R_T , Ом
$n_{дв} = 1$			
I	284	0,026	0,003
II	567	0,068	0,008
III	851	0,116	0,014
IV	1134	0,175	0,021
$n_{дв} = 2$			
I	284	0,013	0,002
II	567	0,034	0,004
III	851	0,058	0,007
IV	1134	0,088	0,011

По результатам таблицы 2.2 строится график зависимостей $X_T = f(U_{do})$ и $R_T = f(U_{do})$.



а – при расчете на два тяговых двигателя в выпрямленной цепи; б – при расчете на один тяговый двигатель в выпрямленной цепи

Рисунок 2.11 – График зависимостей индуктивного $X_T = f(U_{do})$ и активного $R_T = f(U_{do})$ сопротивления вторичной обмотки тягового трансформатора

Подставив найденные значения сопротивлений вторичной обмотки тягового трансформатора в выражение (2.7) определяется напряжение выпрямительно-инверторного преобразователя в номинальном режиме, напряжение при холостом ходе – по выражению (2.4), результаты расчета представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Данные для построения семейства внешних характеристик тиристорного выпрямительно-инверторного преобразователя с типовым алгоритмом управления

Режим работы	Ток генератора I_d , А	Напряжение инвертора U_u , В			
		I	II	III	IV
Холостой ход	0	284	567	851	992
Номинальный режим	810	240	498	772	918

По результатам таблицы 2.3 построены внешние характеристики ВИП на базе тиристоров с типовым алгоритмом управления на рисунке 2.12.

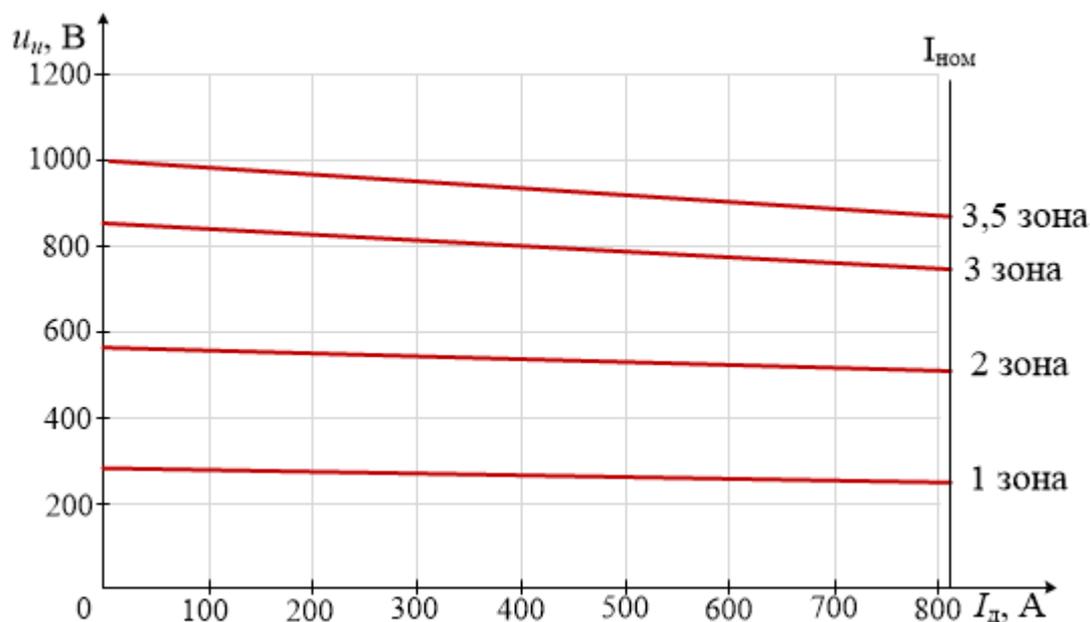


Рисунок 2.12 – Семейство внешних характеристик ВВП на базе тиристоров с типовым алгоритмом управления

2.3.2 Расчет внешних характеристик выпрямительно-инверторного преобразователя на базе *IGBT*-транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления

Расчет эквивалентного сопротивления цепи проводится аналогично расчету, приведенному выше, за исключением того, что в уравнении (2.5) падение напряжение прибавляется к напряжению холостого хода. Таким образом, для расчета внешних характеристик инвертора на базе *IGBT*-транзисторов выражение (2.8) примет вид

$$U_{uni} = U_{u0i} + I_{дн} \times \left(\lambda \times \frac{2}{\pi} \times X_T + \zeta \times R_T + R_d \right) - \Delta U_B. \quad (2.11)$$

Подставив найденные значения сопротивлений обмоток тягового трансформатора в выражение (2.7) определим напряжение ВВП в номинальном

режиме, напряжение при холостом ходе определяется по выражению (2.4), результаты расчета представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Данные для построения семейства внешних характеристик транзисторного инвертора с предлагаемым алгоритмом управления

Режим работы	Ток генератора I_d , А	Напряжение инвертора U_u , В			
		I	II	III	IV
Холостой ход	0	284	567	851	1134
Номинальный режим	810	310	619	932	1193

По результатам таблицы 2.4 построены внешние характеристики транзисторного ВИП для предлагаемого алгоритма управления.

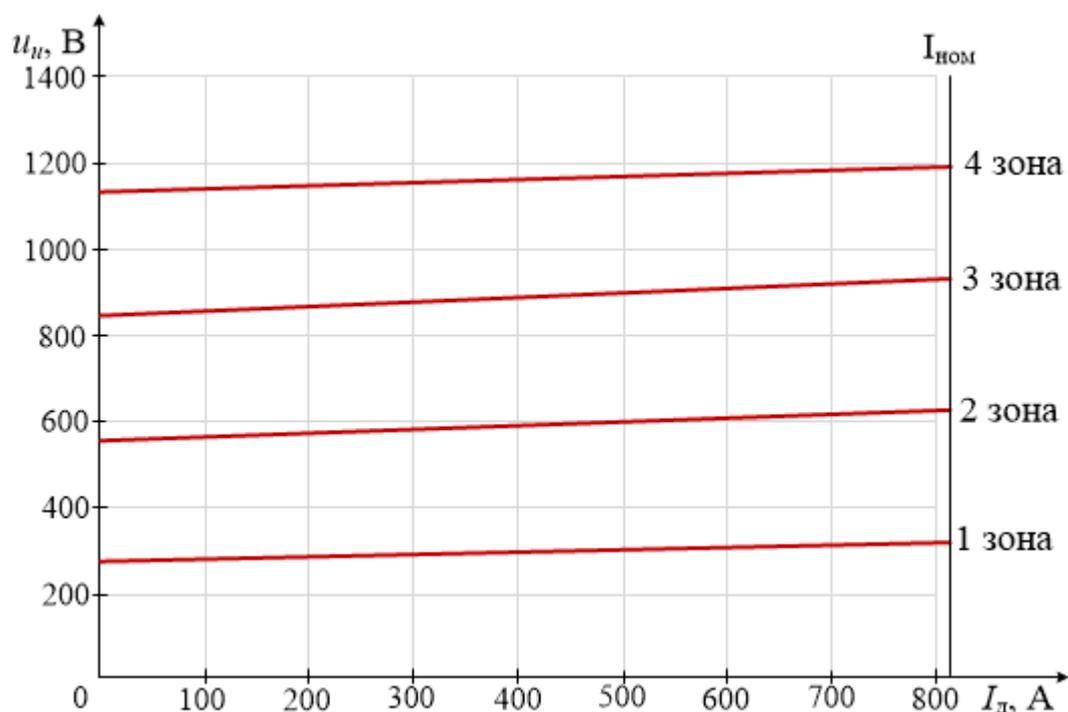


Рисунок 2.13 – Семейство внешних характеристик транзисторного ВИП с предлагаемым законом управления

Полученные внешние характеристики тиристорного и транзисторного ВИП достаточно адекватно отражают теоретическое представление и их характер наклона (рисунок 2.2). Для определения статической устойчивости работы режима рекуперативного торможения далее необходим расчет внешней характеристики генератора как при наличии ББР в его цепи, так и при его исключении.

2.3.3 Расчет внешней характеристики генератора при наличии блока балластных резисторов и при его исключении

Внешнюю характеристику генератора определим также по двум точкам, напряжение генератора в точке холостого хода для аналитического расчета примем на 2 В выше, чем напряжение инвертора на холостом ходу. Напряжение на зажимах генератора при номинальном токе с наличием ББР в цепи якоря ТЭД определим из уравнения (2.12)

$$U_{dni} = U_{d0i} - I_{дн} \times (R_{д} + R_{ББР}), \quad (2.12)$$

где U_{d0i} – напряжение генератора на холостом ходу на i зоне регулирования, В;
 $R_{ББР}$ – сопротивление ББР; 0,144 Ом.

Напряжение генератора в номинальном режиме без ББР в якорной цепи соответственно определяется выражением (2.13)

$$U_{dni} = U_{d0i} - I_{дн} \times R_{д}. \quad (2.13)$$

Результаты расчета внешних характеристик генератора вынесены в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Данные для построения внешней характеристики генератора при наличии ББР и его исключении из якорной цепи

	Режим работы	Ток генератора $I_{д}, А$	Напряжение генератора $U_d, В$			
			I	II	III	IV
С ББР	Холостой ход	0	317	632	947	1104,5
	Номинальный режим	810	191	506	791	928,5
Без ББР	Холостой ход	0	317	632	947	1209
	Номинальный режим	810	298	613	928	1187

Полученные характеристики системы «генератор-инвертор» показаны на рисунках 2.14 и 2.15 для ВИП на базе тиристоров с типовым алгоритмом

управления и наличии балластного сопротивления в силовой цепи и для предлагаемого алгоритма управления при исключении ББР соответственно.

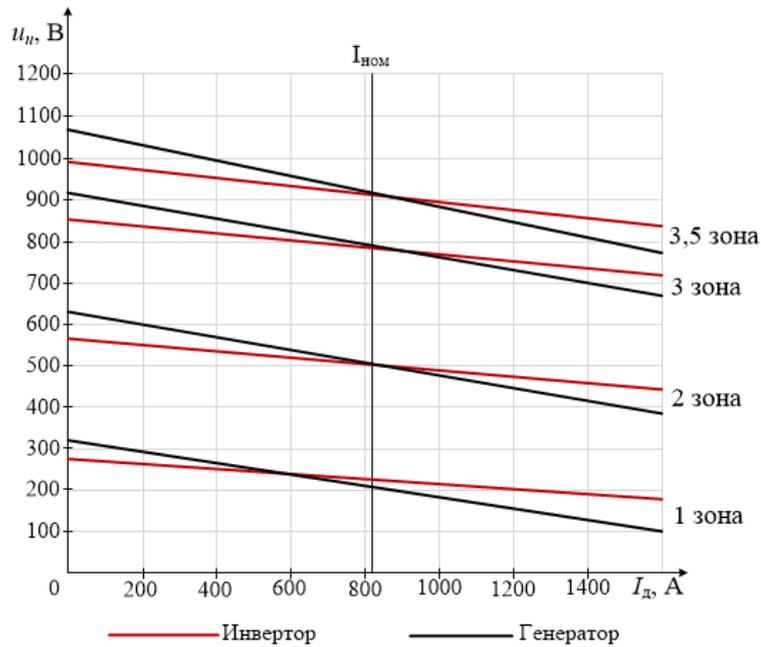


Рисунок 2.14 – Внешние характеристики генератора и инвертора для ВИП на базе тиристоров с типовым алгоритмом управления при наличии балластного резистора в якорной цепи ТЭД

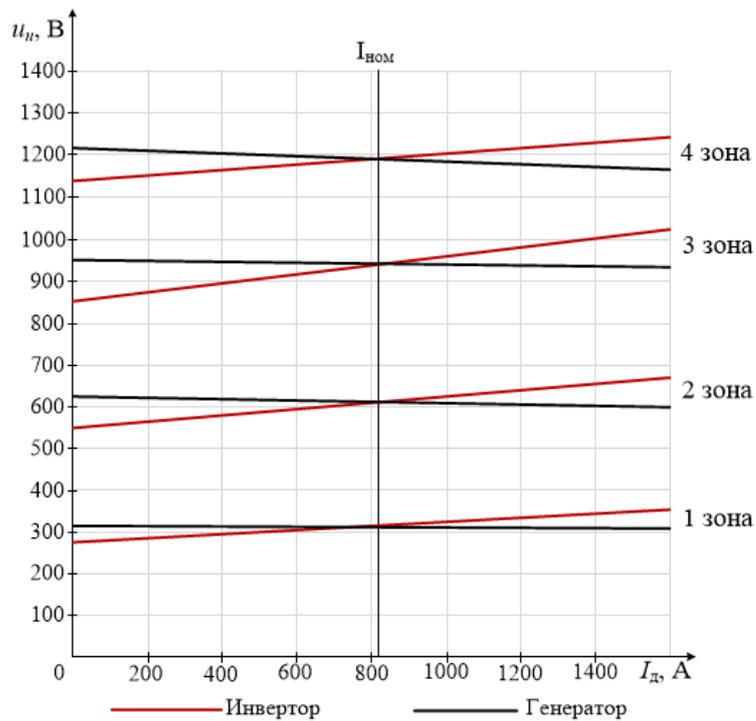


Рисунок 2.15 – Внешние характеристики генератора и инвертора для транзисторного ВИП с предлагаемым алгоритмом управления при исключении балластного резистора из якорной цепи ТЭД

Таким образом, система рекуперативного торможения с тиристорным ВИП (рисунок 2.14) имеет статическую устойчивость только при условии наличия дополнительного активного сопротивления в цепи тягового электродвигателя, в роли которого выступает ББР.

Полученные внешние характеристики системы «генератор-инвертор» с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов показывают, что система является статически устойчивой при исключении ББР из якорной цепи ТЭД при одновременной организации положительного наклона внешней характеристики ВИП и в полной мере отражают качественное соответствие теоретическим представлениям, рассмотренным ранее.

Блок балластных резисторов обеспечивает статическую устойчивость режима рекуперативного торможения, однако его применение негативно влияет на показатель коэффициента полезного действия (КПД) электрической цепи электровоза переменного тока и на область тормозных характеристик – значительно её ограничивая. Далее необходимо рассмотреть влияние ББР на данные показатели электровоза переменного тока.

2.4 Коэффициент полезного действия электрической цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при исключении блока балластных резисторов из его силовой цепи

Коэффициент полезного действия электровоза переменного тока при реализации рекуперативного торможения представляет собой отношение активной мощности, отдаваемой в сеть, к мощности, вырабатываемой тяговыми двигателями в генераторном режиме [106]

$$\eta = \frac{U_d \times I_d - (R'_{\text{за}} \times I_d^2 + \Delta U_B \times I_d + \Delta P_{\text{ТТ}})}{U_d \times I_d}, \quad (2.14)$$

где $\Delta P_{\text{ТТ}}$ – потери трансформатора, кВт.

Эквивалентное сопротивление цепи выпрямленного тока определяется выражением (2.15)

$$R'_{\text{Эа}} = R_{\text{Эа}} - \frac{m_{\text{я}} \times R_{\text{д}} \times \kappa_{\text{ВЭ}}^2}{p_{\text{ц}}}, \quad (2.15)$$

где $m_{\text{я}}$ и $p_{\text{ц}}$ – число последовательно включенных двигателей и их параллельных цепей.

$$R_{\text{Эа}} = \vartheta \times R_{\text{Т}} \times \kappa_{\text{Э}}^2 + R_{\text{В0}} \times \kappa_{\text{ВЭ}}^2, \quad (2.16)$$

где $R_{\text{Т}}$ – общее активное сопротивление обмоток трансформатора, Ом;

$R_{\text{В0}}$ – активное сопротивление цепи выпрямленного тока, Ом;

ϑ – поправочный коэффициент, учитывающий, что активное падение напряжения в цепи переменного тока в процессе коммутации не входит в сумму падений выпрямленного напряжения [89].

Общее активное сопротивление обмоток ТТ определяется выражением (2.17)

$$R_{\text{Т}} = \frac{1}{\kappa_{\text{Т}}^2} \times R_1 + R_2, \quad (2.17)$$

Мощность потерь в преобразователях включает в себя мощность, поглощаемую балластными резисторами, сопротивление которых на электровозах серии «Ермак» составляет 0,144 Ом. Эта мощность в часовом режиме составляет 95 кВт на каждый тяговый двигатель, т.е. около 10 %.

Результаты расчета КПД электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при наличии и исключении ББР из его силовой цепи представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты расчета КПД электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при наличии ББР в его силовой цепи и при его исключении

	Зона регулирования напряжения ВИП			
	4	3	2	1
$I_d = 1200 \text{ A}$				
$U_d, \text{ В}$	1209	947	632	317
$\eta_{\text{с ББР, ОТН. ед.}}$	0,785	0,726	0,589	0,181
$\eta_{\text{без ББР, ОТН. ед.}}$	0,922	0,9	0,851	0,702
$\Delta\eta, \%$	14,8	19,4	30,7	74,3
$I_d = 1000 \text{ A}$				
$U_d, \text{ В}$	1209	947	632	317
$\eta_{\text{с ББР, ОТН. ед.}}$	0,805	0,751	0,626	0,255
$\eta_{\text{без ББР, ОТН. ед.}}$	0,919	0,896	0,844	0,69
$\Delta\eta, \%$	12,4	16,2	25,8	63
$I_d = 810 \text{ A}$				
$U_d, \text{ В}$	1209	947	632	317
$\eta_{\text{с ББР, ОТН. ед.}}$	0,819	0,769	0,655	0,311
$\eta_{\text{без ББР, ОТН. ед.}}$	0,912	0,887	0,831	0,663
$\Delta\eta, \%$	10,1	13,3	21,2	53,1
$I_d = 600 \text{ A}$				
$U_d, \text{ В}$	1209	947	632	317
$\eta_{\text{с ББР, ОТН. ед.}}$	0,827	0,779	0,669	0,34
$\eta_{\text{без ББР, ОТН. ед.}}$	0,895	0,866	0,8	0,601
$\Delta\eta, \%$	7,6	10,1	16,3	43,4
$I_d = 400 \text{ A}$				
$U_d, \text{ В}$	1209	947	632	317
$\eta_{\text{с ББР, ОТН. ед.}}$	0,813	0,762	0,643	0,288
$\eta_{\text{без ББР, ОТН. ед.}}$	0,859	0,82	0,73	0,461
$\Delta\eta, \%$	5,3	7,1	11,9	37,7
$I_d = 250 \text{ A}$				
$U_d, \text{ В}$	1209	947	632	317
$\eta_{\text{с ББР, ОТН. ед.}}$	0,759	0,692	0,539	0,081
$\eta_{\text{без ББР, ОТН. ед.}}$	0,788	0,729	0,594	0,19
$\Delta\eta, \%$	3,6	5	9,2	57,3

На рисунках 2.16 и 2.17 представлены зависимости КПД электровоза в режиме рекуперативного торможения от тока ТЭД при наличии балластных резисторов в якорных цепях двигателей и при их исключении соответственно.

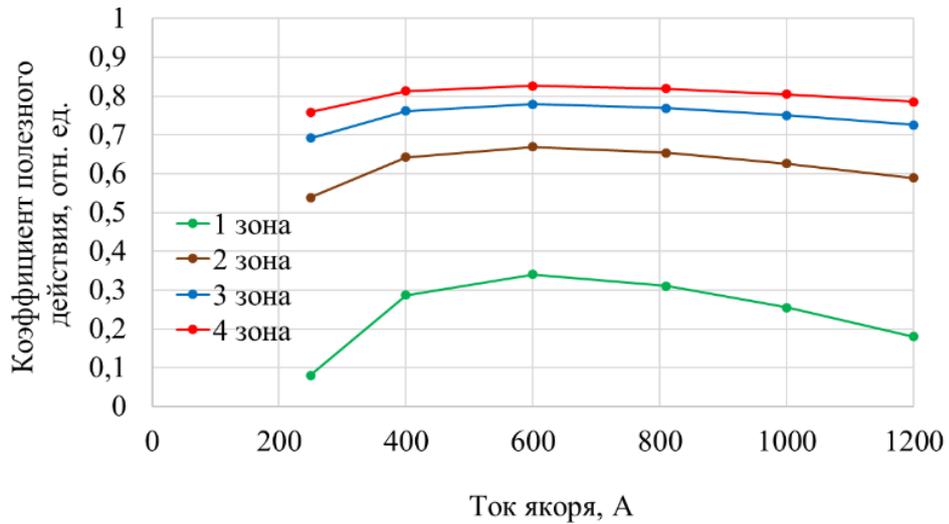


Рисунок 2.16 – Зависимость КПД электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения от тока ТЭД при наличии ББР в его силовой цепи

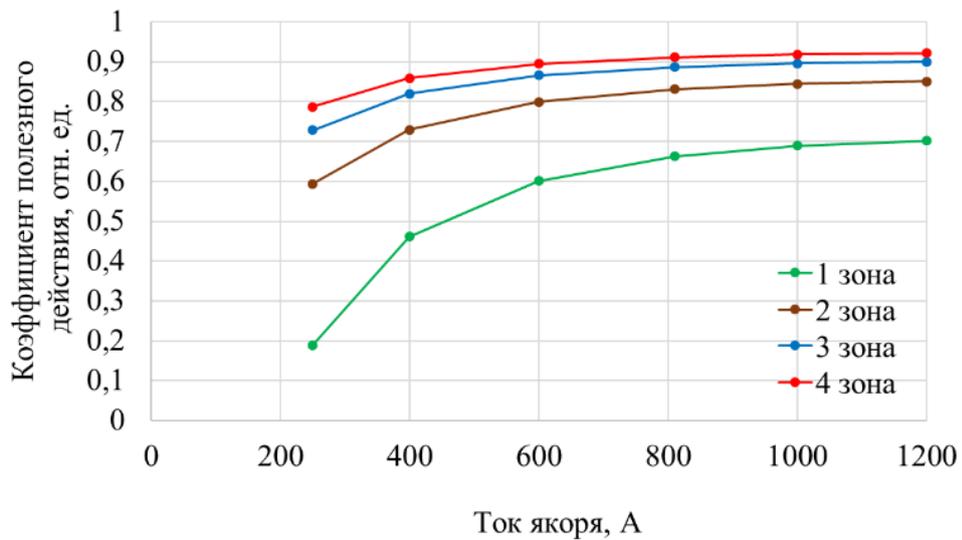


Рисунок 2.17 – Зависимость КПД электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения от тока ТЭД при исключении ББР из его силовой цепи

За счет исключения ББР повышается КПД электрической цепи электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения в среднем на 8,9 % для 4-ой зоны регулирования ВИП, 11,8 % для 3-ей зоны, 19,2 % для 2-ой зоны и 54,7 % для 1-ой зоны регулирования напряжения.

2.5 Влияние блока балластных резисторов на тормозную характеристику электровоза переменного тока серии 2ЭС5К при использовании выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов

Тормозные характеристики представляют собой зависимости тормозной силы и тока тягового двигателя от скорости движения ($B = f(V)$ и $I_d = f(V)$) с учетом нанесенных на них ограничений:

- по максимальной тормозной силе ($B_{max} = f(V)$);
- по максимальной скорости движения;
- по максимальному току двигателя ($I_{dmax} = f(V)$).

Основные номинальные величины тягового двигателя НБ-514Б представлены в таблице 2.7 [112].

Таблица 2.7 – Основные номинальные величины тягового двигателя серии НБ-514Б

Наименование величины	Значение
Номинальное напряжение, В	1000
Номинальный ток продолжительного режима, А	810
Коэффициент полезного действия двигателя	0,947
Активное сопротивление обмоток двигателя, Ом	0,0306

Для построения тормозных характеристик необходимо определить нагрузочную характеристику ТЭД серии НБ-514Б.

Нагрузочную характеристику (кривую намагничивания) тягового двигателя в расчетах более удобно представлять в виде зависимости удельной ЭДС $C_v \Phi$ от тока возбуждения I_v .

Электродвижущая сила определяется из выражения (2.18)

$$E = C_v \Phi \times V. \quad (2.18)$$

Отсюда

$$C_v \Phi = \frac{E}{V}, \quad (2.19)$$

где V – скорость движения, км/ч.

Произведение конструктивной постоянной C_v на магнитный поток Φ называется удельной ЭДС. Значение $C_v \Phi_n$ в номинальном режиме получают из уравнения (2.20)

$$U_{дн} = C_v \Phi \times V_n + I_{дн} \times \sum r_d, \quad (2.20)$$

где V_n – номинальная скорость движения электровоза, 51 км/ч [112].

Отсюда

$$C_v \Phi_n = \frac{U_{дн} - I_{дн} \times \sum r_d}{V_n}, \quad (2.21)$$

$$C_v \Phi_n = \frac{1000 - 810 \times 0,0306}{51} = 19,12 \frac{\text{Вч}}{\text{км}}.$$

Зависимость $C_v \Phi = f(I_B)$ определяется конструктивными особенностями тяговых двигателей электровозов. Для определения $C_v \Phi$ используется аналитическая зависимость (2.21), достаточно точно описывающая вид кривой намагничивания тяговых двигателей грузовых электровозов

$$C_v \Phi = 1,2 \times C_v \Phi_n \left(1 - e^{-1,8 \frac{I_{дн}}{I_{вн}}} \right), \quad (2.22)$$

где $I_{вн}$ – ток возбуждения двигателя в номинальном режиме, А.

При нормальном возбуждении (полное поле) номинальный ток якоря двигателя $I_{дн}$ и ток возбуждения $I_{вн}$ связаны соотношением (2.22)

$$I_{вн} = \beta_0 \times I_{дн}, \quad (2.23)$$

$$I_{вн} = 0,96 \times 810 = 777,6 \text{ А.}$$

Из формулы (2.21) получим

$$\frac{C_v\Phi}{C_v\Phi_H} = 1,2 \times \left(1 - e^{-1,8 \frac{I_{ДН}}{I_{ВН}}}\right), \quad (2.24)$$

Точки зависимости, рассчитанные по формуле (2.19), приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Универсальная нагрузочная характеристика

$I_B / I_{ВН}$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75
$\left(\frac{C_v\Phi}{C_v\Phi_H}\right)$	0,435	0,712	0,889	1,0	1,07	1,12	1,15

Значения $C_v\Phi$ и I_B нагрузочной характеристики $C_v\Phi = f(I_B)$ получают путем умножения относительных величин на соответствующие номинальные значения $C_v\Phi_H$ и $I_{ВН}$. Результаты расчета представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Нагрузочная характеристика тягового двигателя НБ-514Б $C_v\Phi = f(I_B)$ в номинальном режиме.

$I_B = (I_B / I_{ВН}) I_{ВН}, A$	194,4	388,8	583,2	777,6	925	1166,4	1360,8
$C_v\Phi = \left(\frac{C_v\Phi}{C_v\Phi_H}\right) C_v\Phi_H, B/км/ч$	8,32	13,61	16,99	19,12	20,45	21,41	21,99

По данным таблицы 2.9 произведено построение нагрузочной характеристики (рисунок 2.18).

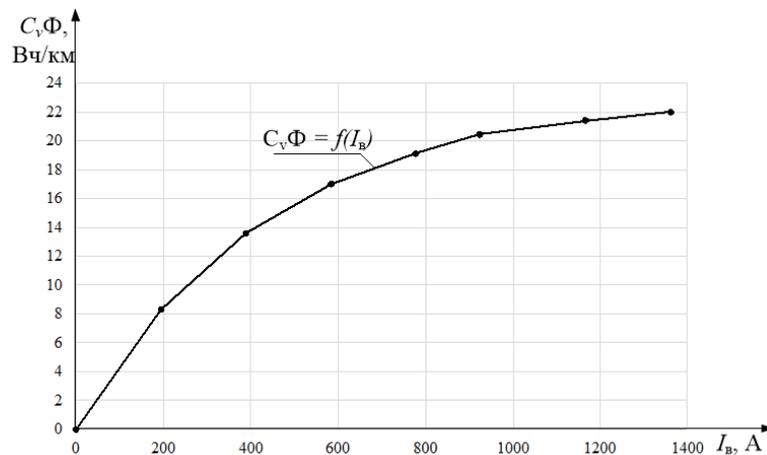


Рисунок 2.18 – Нагрузочная характеристика тягового электродвигателя серии НБ-514Б

Расчет скоростных характеристик при независимом возбуждении генератора выполняют по формуле (2.25)

$$V = \frac{U_d + I \times (\sum R_d + R_{БВР})}{C_v\Phi}. \quad (2.25)$$

Расчет значений тормозной силы производим по формуле (2.26)

$$B_{кэ} = \frac{3,6 \times n_d \times C_v \Phi \times I \times 10^{-3}}{\eta_{зп} \times \eta_d}, \quad (2.26)$$

где $\eta_{зп} = 0,975$ – коэффициент, учитывающий потери в зубчатой передаче в процессе преобразования энергии.

Максимальная сила торможения по сцеплению определяется по формуле (2.27)

$$B_{кэ \text{ макс}} = 0,8 \times \psi_k \times 2\Pi \times n_d, \quad (2.27)$$

где ψ_k – расчетный коэффициент сцепления;

2Π – нагрузка на ось электровоза, 24 т [112].

Расчетный коэффициент сцепления определяется по формуле для грузовых электровозов переменного тока (2.28)

$$\psi_k = 2,75 + \frac{39,2}{50+6 \times V} - 0,0059 \times V. \quad (2.28)$$

Полученные расчетные данные для ограничения по сцеплению при рекуперативном торможении представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Ограничения по сцеплению при рекуперативном торможении электровоза

V, км/ч	0	10	20	30	40	50	60	70	80
ψ_k	3,534	3,047	2,863	2,743	2,649	2,567	2,492	2,420	2,352
$B_{кэ \text{ макс}}, \text{ кН}$	543	468	440	421	407	394	383	372	361
$I_{\text{макс}}, \text{ А}$	950	900	857	832	812	793	900	950	950

Результаты расчета сетки тормозных характеристик при регулировании по каналу ВИП, сетки тормозных характеристик при регулировании по каналу ВУВ и ограничения по коммутационной устойчивости системы представлены в таблицах 2.11 – 2.13 соответственно.

Таблица 2.11 – Расчет сетки тормозных характеристик электровоза при регулировании по каналу ВИП

I, А	C _{VΦ} , В/км/ч	B _{кэ} , кН	V, км/ч			
			Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
0	19,12	0	12,6	26,1	40,4	47,1
202,5		120,8	14,3	27,8	42,2	48,9
405		241,5	16,1	29,6	43,9	50,7
607,5		362,3	17,9	31,4	45,7	52,5
810		483,1	19,7	33,2	47,5	54,2
1012,5		603,8	21,4	34,9	49,3	56

Таблица 2.12 – Расчет сетки тормозных характеристик электровоза для ступеней ослабления возбуждения при регулировании по каналу ВУВ

	Ток якоря, А					
	0	202,5	405	607,5	810	1012,5
C _{VΦ} (I _в =700А)	18,4					
B _{кэ} , кН	0	116,2	232,4	348,7	464,9	581,1
V, км/ч	49	51	53	55	56	58
C _{VΦ} (I _в =600А)	17,2					
B _{кэ} , кН	0	108,6	217,3	325,9	434,6	543,2
V, км/ч	52,4	54,4	56,3	58,3	60,3	62,3
C _{VΦ} (I _в =500А)	15,6					
B _{кэ} , кН	0	98,5	197,1	295,6	394,1	492,7
V, км/ч	57,8	59,9	62,1	64,3	66,5	68,6
C _{VΦ} (I _в =400А)	13,9					
B _{кэ} , кН	0	87,8	175,6	263,4	351,2	439,0
V, км/ч	64,8	67,3	69,7	72,1	74,6	77
C _{VΦ} (I _в =300А)	11,2					
B _{кэ} , кН	0	70,7	141,5	212,2	283,0	353,7
V, км/ч	80,4	83,5	86,5	89,5	92,6	95,6

Ограничение по коммутационной устойчивости при независимом возбуждении генератора рассчитывается исходя из условия $I_B = 0,5 \times I$.

Таблица 2.13 – Расчет кривой ограничения по коммутационной устойчивости

I, А	C _{VΦ} (I _в =0,5I)	B _{кэ} , кН	V, км/ч
202,5	4,1	25,9	228
405	8,5	107,4	114
607,5	11,2	212,2	89,5
810	14	353,7	74,1
1012,5	15,7	495,8	68,2

По результатам расчетов построены тормозные характеристики электровоза серии 2ЭС5К при реализации рекуперативного торможения с транзисторным ВИП и наличии балластного резистора в якорной цепи ТЭД (рисунок 2.19). На сетке тормозных характеристик штриховыми линиями показана область регулирования по каналу ВИП без ослабления магнитного потока ТЭД.

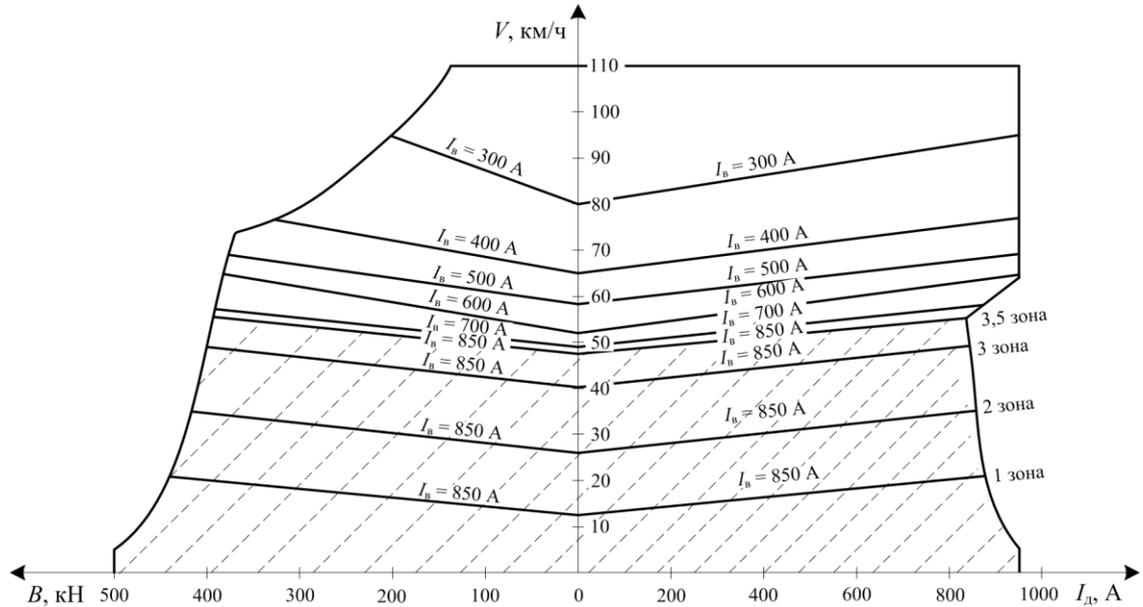


Рисунок 2.19 – Сетка тормозных характеристик электровоза переменного тока серии 2ЭС5К реализации рекуперативного торможения с тиристорным ВИП и наличии балластного резистора в якорной цепи ТЭД

Далее выполнен пересчет тормозных характеристик согласно уравнениям 2.24 – 2.27 при реализации рекуперации с транзисторным ВИП, с применением предлагаемого алгоритма управления для исключения ББР из силовой цепи.

Результаты расчета сетки тормозных характеристик представлены в таблицах 2.14 – 2.16.

Таблица 2.14 – Расчет сетки тормозных характеристик электровоза при регулировании по каналу транзисторного ВИП при исключении ББР

I, A	$C_{V\Phi},$ В/км/ч	$B_{кз}, кН$	$V, км/ч$			
			Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4
0	19,12	0	16,21	32,37	48,74	65,48
202,5		120,8	16,46	32,63	49,00	65,73
405		241,5	16,72	32,88	49,25	65,98
607,5		362,3	16,97	33,13	49,50	66,23
810		483,1	17,22	33,38	49,75	66,49
1012,5		603,8	17,47	33,63	50,00	66,74

Таблица 2.15 – Расчет сетки тормозных характеристик электровоза для ступеней ослабления возбуждения при регулировании по каналу ВУВ при исключении ББР

	Ток якоря, А					
	0	202,5	405	607,5	810	1012,5
$C_V \Phi_{(I_B=700A)}$	18,4					
$B_{кэ}$, кН	0	116,2	232,4	348,7	464,9	581,1
V , км/ч	68	68,3	68,6	68,8	69,1	69,3
$C_V \Phi_{(I_B=600A)}$	17,2					
$B_{кэ}$, кН	0	108,6	217,3	325,9	434,6	543,2
V , км/ч	72,8	73,1	73,3	73,6	73,9	74,2
$C_V \Phi_{(I_B=500A)}$	15,6					
$B_{кэ}$, кН	0	98,5	197,1	295,6	394,1	492,7
V , км/ч	80,3	80,6	80,9	81,2	81,5	81,8
$C_V \Phi_{(I_B=400A)}$	13,9					
$B_{кэ}$, кН	0	87,8	175,6	263,4	351,2	439,0
V , км/ч	90,1	90,4	90,8	91,1	91,5	91,8
$C_V \Phi_{(I_B=300A)}$	11,2					
$B_{кэ}$, кН	0	70,7	141,5	212,2	283,0	353,7
V , км/ч	111,8	112,2	112,6	113,1	113,5	113,9

Таблица 2.16 – Расчет кривой ограничения по коммутационной устойчивости при исключении ББР

I , А	$C_V \Phi_{(I_B=0,5I)}$	$B_{кэ}$, кН	V , км/ч
202,5	4,1	25,9	306,5
405	8,5	107,4	148,4
607,5	11,2	212,2	113,1
810	14	353,7	90,8
1012,5	15,7	495,8	81,3

По результатам расчетов также построены тормозные характеристики электровоза серии 2ЭС5К при реализации рекуперативного торможения с использованием транзисторного ВИП и его алгоритма управления для исключения ББР из силовой цепи (рисунок 2.20). На сетке тормозных характеристик показана разница в скорости по пределу регулирования каналом тиристорного и транзисторного ВИП при исключении ББР.

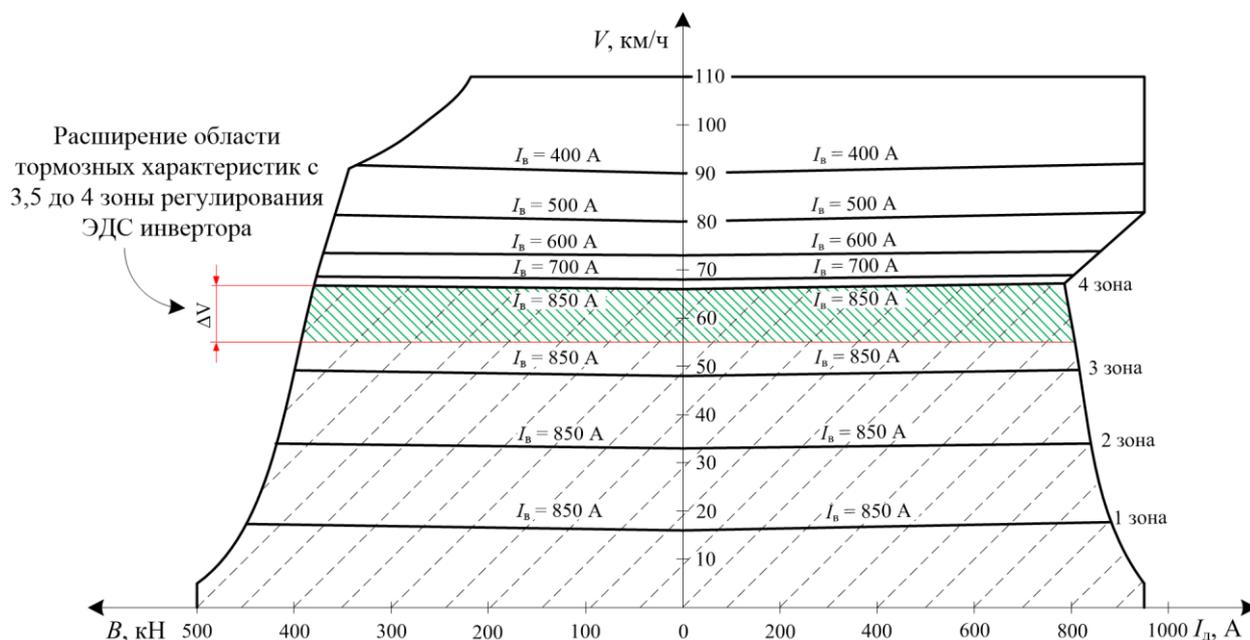


Рисунок 2.20 – Сетка тормозных характеристик электровоза переменного тока серии 2ЭС5К при реализации рекуперативного торможения с транзисторным ВИП и исключением ББР из силовой цепи

На сегодняшний день тормозные характеристики при регулировании по каналу выпрямительно-инверторного преобразователя ограничены на уровне при максимальном значении напряжения – 3.5 зоны регулирования, в связи с наличием падения напряжения на балластном резисторе в якорной цепи ТЭД. Ввиду этого, регулирование тормозной силы на более высоких скоростях осуществляется по каналу ВУВ путем ослабления магнитного потока ТЭД, приводит к пульсациям магнитодвижущей силы и магнитного потока, дополнительным потерям, нагреву обмоток ТЭД и нарушение его коммутации. Ожидаемым эффектом от исключения ББР из силовой цепи является расширение области тормозных характеристик до полной 4-ой зоны регулирования напряжения ВИП, что позволит использовать регулирование тормозной силы с помощью ВИП на более высоких скоростях и избежать вышеперечисленных недостатков при регулировании ВУВ.

2.6 Выводы по разделу 2

1 Выявлено, что при обеспечении положительного наклона внешней характеристики ВИП обеспечить статическую устойчивость можно без применения блока балластных резисторов.

2 Разработан способ управления выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов с обеспечением положительного наклона внешней характеристики, при котором обеспечивается статическая устойчивость режима рекуперации без применения ББР.

3 Рассчитаны внешние характеристики генератора и ВИП на базе тиристоров в режиме инвертора при организации типового алгоритма управления ВИП и наличии балластного резистора в якорной цепи ТЭД, и при организации предлагаемого способа управления с исключением ББР, полученные внешние характеристики системы «генератор-инвертор» с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов показывают, что система является статически устойчивой при исключении ББР из якорной цепи ТЭД при одновременной организации положительного наклона внешней характеристики ВИП.

4 За счет исключения ББР повышается КПД электрической цепи электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения в среднем на 8,9 % для 4-ой зоны регулирования ВИП, 11,8 % для 3-ей зоны, 19,2 % для 2-ой зоны и 54,7 % для 1-ой зоны регулирования напряжения.

5 Исключение балластного резистора из якорной цепи ТЭД позволяет расширить область тормозных характеристик с 3,5 до полной 4-ой зоны регулирования напряжения ВИП, повысить максимальную скорость электровоза в режиме рекуперативного торможения на 12 км/ч.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ – КОНТАКТНАЯ СЕТЬ – ЭЛЕКТРОВОЗ» ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

3.1 Выбор пакета для проведения математического моделирования

Проектирование технических систем существенно изменились с развитием современных компьютерных технологий. С повсеместным развитием цифровой и компьютерной техники и программного обеспечения (ПО) для реализации математических моделей на сегодня представлен широкий спектр программ.

Известно два основных направления при моделировании электромагнитных процессов – это программирование на алгоритмическом языке высокого уровня и применение готовых пакетов программ. Второе направление, на сегодняшний день, является основным способом разработки математических моделей.

Математическая модель – это описание реального физического объекта, которое основано на физических законах, описывающих поведение исследуемого объекта [109]. Аналитические методы разрабатываются на протяжении долгих лет ведущими мировыми учеными. Данные методы имеют ограничения в части исследования систем, описываемых дифференциальными уравнениями первого и второго порядка. Тогда как системы, которые описываются уравнениями третьего и четвертого порядка также могут быть решены, но внешние параметры, которые влияют на систему, могут быть исследованы только численными методами. А численные методы в свою очередь уже базируются на применении компьютерного моделирования.

Большинство ПО для математического моделирования (*Matlab*, *OrCad* и др.) разрабатывались с 1980-х годов. Данные прикладные пакеты в основном способствуют облегчению представления математической модели для ЭВМ [15].

Пакет *Matlab*, получил довольно широкое распространение для решения задач, которые связаны с матричными вычислениями. При моделирование в *Matlab*, происходящие расчеты, операции и команды достаточно адекватно отражают математическую запись формул. *Matlab* разрабатывался как пакет программ, способный реализовать наиболее эффективные вычислительные алгоритмы линейной алгебры. [15, 20, 63, 109].

Сегодня, пакет *Matlab* – это развитая программная среда, имеющая собственный язык программирования. Пакет *Simulink*, который входит в состав *Matlab*, обеспечивает визуальное моделирование нелинейных динамических систем. Именно этот пакет в дальнейшем будет применен для создания математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз».

Моделирование электрических систем в пакете *Simulink* осуществляется в виде синтеза структурных схем, которые могут содержать передаточные функции элементов. Имеется возможность самостоятельно разрабатывать и добавлять необходимые элементы в библиотеки. Для более качественного решения задач также есть возможность изменять метод решений системы [15, 20].

Все вышеперечисленные преимущества и возможности прикладного пакета *Matlab* позволили сделать вывод о целесообразности его применения в данной диссертационной работе для исследования электромагнитных процессов, протекающих в электровозе в режиме рекуперативного торможения.

3.2 Математическая модель системы энергоснабжения железной дороги переменного тока

Если длина волны в тяговой сети больше длины волны напряжения, протекающего в ней, то такую тяговую сеть нужно рассматривать как цепь с распределенными параметрами [80]

$$\lambda = v \cdot T, \quad (3.1)$$

где v – скорость распространения волны;

T – период напряжения.

Длина волны равняется $\lambda \approx 3 \times 10^8 \times 0,02 = 6 \times 10^6$ м = 6000 км (в реальности длина волны примет меньшее значение, ввиду того, что фазовая скорость не достигает скорости распространения электромагнитной волны в вакууме 3×10^8 м/с). Следовательно, при частоте 50 Гц (промышленной) тяговая сеть не проявляет себя как длинная линия.

Но при работе электровоза, оборудованного выпрямительно-инверторным преобразователем, имеет место быть постоянный процесс коммутации. Следствием этого является килогерцы частоты изменения, а длина волны сетевого напряжения – десятки километров, что в свою очередь сравнимо с расстоянием между тяговыми подстанциями. И в этот момент, тяговая сеть проявляет себя как длинная линия с соответствующими электромагнитными процессами [80].

Контактная сеть, отраженная на рисунке 3.1, представлена как конечно-элементная модель длинной линии, основанная на последовательном включении Т-образных 4х-полюсников, соответствующих участку линии длиной Δx , по аналогии с [84].

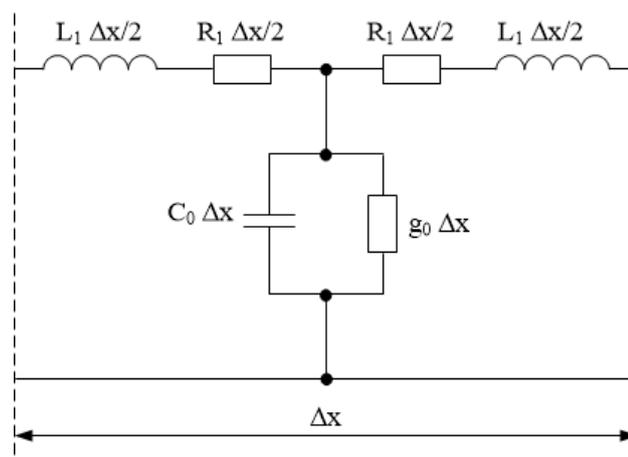


Рисунок 3.1 – Схема замещения участка тяговой сети

Данную схему замещения можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений. В случае, когда $\Delta x \rightarrow 0$ имеется бесконечное число

конечных элементов, что будет сопоставимо системе двух уравнений в частных производных

$$\begin{cases} -\frac{du}{dx} = ir_1 + L_1 \frac{di}{dt}; \\ -\frac{di}{dx} = ug_0 + C_0 \frac{du}{dt}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Оптимальное расчетное значение количество элементов длинной линии не должно быть больше 50, поскольку их последующее увеличение на переходные процессы не оказывает значительного воздействия [80].

Профессор Б.И. Косарев предложил схему замещения продольной составляющей конечного элемента (рисунок 3.2).

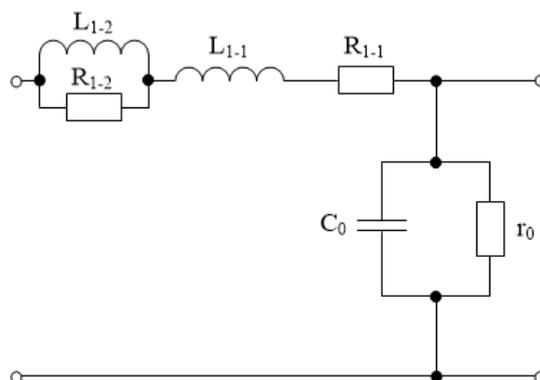


Рисунок 3.2 – Схема замещения участка тяговой сети с учетом нелинейности продольных активно-индуктивных параметров

Расчетные значения индуктивной составляющей и активной составляющей имеют вид

$$\begin{cases} r_p(\omega) = R_{1-1} + \frac{R_{1-2}\omega^2 L_{1-2}^2}{R_{1-2}^2 \omega^2 L_{1-2}^2}; \\ L_p(\omega) = L_{1-1} + \frac{R_{1-2} L_{1-2}}{R_{1-2}^2 \omega^2 L_{1-2}^2}. \end{cases} \quad (3.3)$$

При моделировании в качестве использовались следующие данные:

- двухпутный участок при параллельном соединении подвесок;
- марка троса ПБСМ1–95;
- тип рельса Р75;

- контактный провод 2МФ–100;

В дальнейшем, при многофакторной оптимизации были получены уточненные значения номиналов схемы замещения участка контактной сети длиной 400 м [80]

$$L_{1-1} = 2,480 \times 10^{-4} \text{ Гн}, R_{1-1} = 5,307 \times 10^{-2} \text{ Ом};$$

$$L_{1-2} = 4,400 \times 10^{-5} \text{ Гн}, R_{1-2} = 0,4669 \text{ Ом};$$

$$C_0 = 8 \text{ нФ}, r_0 = \frac{1}{g_0} = 2,4 \times 10^6 \text{ Ом}.$$

Проведенные исследования в работе [35] показано, что схема замещения, отраженная на рисунке 3.2, более полно и адекватно отражает переходные процессы в модели, реальным процессам. Следовательно, в диссертационной работе при проведении математического моделирования будет использована схема замещения контактной сети согласно рисунку 3.2.

Тяговая подстанция в модели представлена как источник (идеальный) синусоидального ЭДС. Расчетные параметры тяговой подстанции учитываются последовательно включенными приведенными индуктивным и активным сопротивлением. Схема замещения изображена на рисунке 3.3.

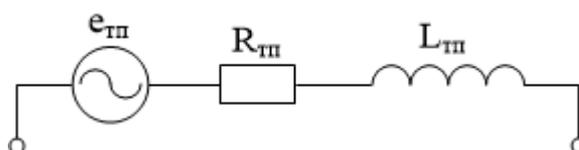


Рисунок 3.3 – Схема замещения тяговой подстанции

В таком случае значение ЭДС равняется

$$e_{тп} = E_{тп} \sqrt{2} \sin 2\pi ft, \quad (3.4)$$

где $f = 50$ Гц – частота сети;

$E_{\text{ТП}}$ = действующее значение ЭДС, В.

Величину ЭДС тяговой подстанции принимают на 10 % выше номинального значения, в результате, действующее значение ЭДС составляет 27,5 кВ. Тяговая подстанция включает в себя трансформатор, мощность которого равняется 40 МВА, индуктивное сопротивление составляет $X_{L_{\text{ТП}}} = 3,8$ Ом [35]. В свою очередь при данных значениях приведенные параметры подстанции составляют $L_{\text{ТП}} = 17,662$ мГн, $R_{\text{ТП}} = 0,2$ Ом [35].

В математической модели диссертационной работы применяется участок фидерной зоны с двухсторонним питанием (рисунок 3.4). Тяговые подстанции находятся на расстоянии 40 км, и тяговая сеть складывается из 100 конечных элементов, каждый из которых имитирует 400 метров контактной сети. Электромагнитные процессы при работе электровоза в режиме рекуперативного торможения исследуются на середине фидерной зоны.

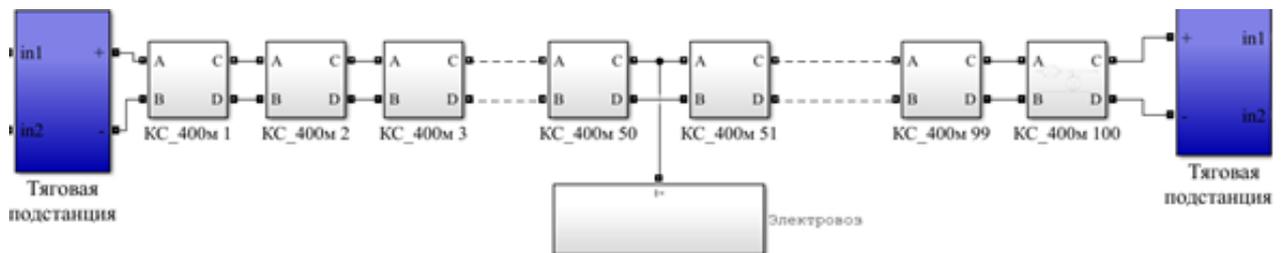


Рисунок 3.4 – Блок схема фидерной зоны с двухсторонним питанием, включением электровоза выполненная в редакторе *Simulink* пакета *MatLab*

3.3 Математическая модель силовых цепей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения

Электровоз серии 2ЭС5К принят в качестве прототипа, для разработки силовой части электрической схемы [112]. Каждая секция электровоза в составе имеет тяговый трансформатор, два ВИП, два сглаживающих реактора, один блок балластных резисторов, четыре ТЭД, датчики тока и напряжения, датчики угла

коммутации, датчики слежения за потенциальными условиями во вторичной обмотке ТТ и один ВУВ на обе секции.

3.3.1 Математическая модель тягового трансформатора

Принятый как прототип для математического моделирования электровоз имеет ТТ типа ОНДЦЭ-4350/25 [112]. На рисунке 3.5 представлена схема обмоток такого типа трансформатора. Технические характеристики трансформатора в свою очередь оказывают наибольшее влияние на протекание электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза, следовательно, для получения адекватных результатов к моделированию трансформатора необходимо подходить с особой тщательностью.

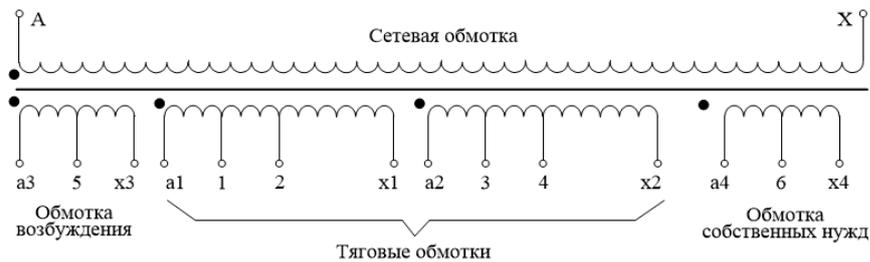


Рисунок 3.5 – Обмотки ТТ ОНДЦЭ-4350/25

Представим ТТ в виде схемы замещения (рисунок 3.6).

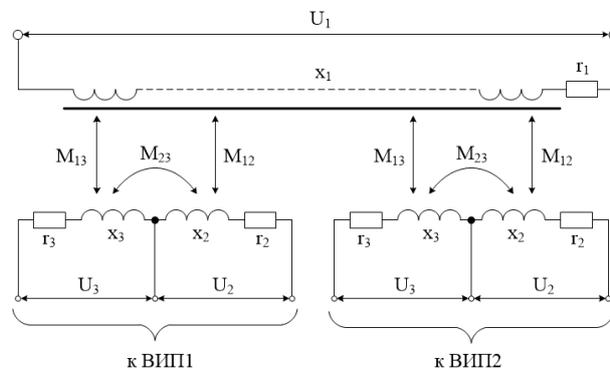


Рисунок 3.6 – Схема замещения ТТ ОНДЦЭ-4350/25 для проведения математического моделирования

Процессы, протекающие во время работы трехобмоточного трансформатора, описываются следующей системой дифференциальных уравнений [10]

$$u_1 = i_1 r_1 + L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (3.5)$$

$$u_2 = i_2 r_2 + L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (3.6)$$

$$u_3 = i_3 r_3 + L_{3\sigma} \frac{di_3}{dt} + w_3 \frac{d\Phi_0}{dt}. \quad (3.7)$$

Магнитодвижущая сила первичной и вторичных обмоток создает в стальном сердечнике ТТ основной магнитный поток [8]. Следовательно, он рассчитывается как

$$\Phi_0 = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3}{R_\mu} = \lambda_\mu (i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3), \quad (3.8)$$

где R_μ – магнитное сопротивление ТТ;

λ_μ – магнитная проводимость сердечника ТТ.

Переходные процессы в ТТ описываются следующими уравнениями

$$u_1 = i_1 r_1 + (L_{1\sigma} + w_1^2 \lambda_\mu) \frac{di_1}{dt} + w_1 w_2 \lambda_\mu \frac{di_2}{dt} + w_1 w_3 \lambda_\mu \frac{di_3}{dt}, \quad (3.9)$$

$$u_2 = i_2 r_2 + (L_{2\sigma} + w_2^2 \lambda_\mu) \frac{di_2}{dt} + w_2 w_1 \lambda_\mu \frac{di_1}{dt} + w_2 w_3 \lambda_\mu \frac{di_3}{dt}, \quad (3.10)$$

$$u_3 = i_3 r_3 + (L_{3\sigma} + w_3^2 \lambda_\mu) \frac{di_3}{dt} + w_3 w_1 \lambda_\mu \frac{di_1}{dt} + w_3 w_2 \lambda_\mu \frac{di_2}{dt}. \quad (3.11)$$

Примем обозначения

$w_1^2 \lambda_\mu = M_{11}$ – взаимная индуктивность первичной обмотки ТТ;

$w_1 w_2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}} = M_{12}$, $w_1 w_3 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T13}} = M_{13}$ – взаимные индуктивности между первичной и соответствующими вторичными обмотками ТТ, где K_{T12} и K_{T13} – коэффициенты трансформации ТТ, $K_{T12} = \frac{w_1}{w_2}$, $K_{T13} = \frac{w_1}{w_3}$;

$w_2 w_3 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}} \frac{1}{K_{T13}} = M_{23}$ – взаимная индуктивность между вторичными обмотками ТТ;

$w_2^2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T12}^2} = M_{22}$, $w_3^2 \lambda_\mu = M_{11} \frac{1}{K_{T13}^2} = M_{33}$ – взаимные индуктивности обмоток ТТ;

$L_{1\sigma} + M_{11} = L_1$ – индуктивность первичной обмотки ТТ;

$L_{2\sigma} + M_{22} = L_2$, $L_{3\sigma} + M_{33} = L_3$, – индуктивности соответствующих вторичных обмоток ТТ.

С учетом преобразований уравнения (3.9 – 3.11) примут вид [10]

$$u_1 = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt}, \quad (3.12)$$

$$u_2 = M_{12} \frac{di_1}{dt} + i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt}, \quad (3.13)$$

$$u_3 = M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} + i_3 r_3 + L_3 \frac{di_3}{dt}. \quad (3.14)$$

Данную систему уравнений представим в матричной форме

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 \end{vmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{vmatrix}. \quad (3.15)$$

Параметры модели для ТТ имеют следующие значения

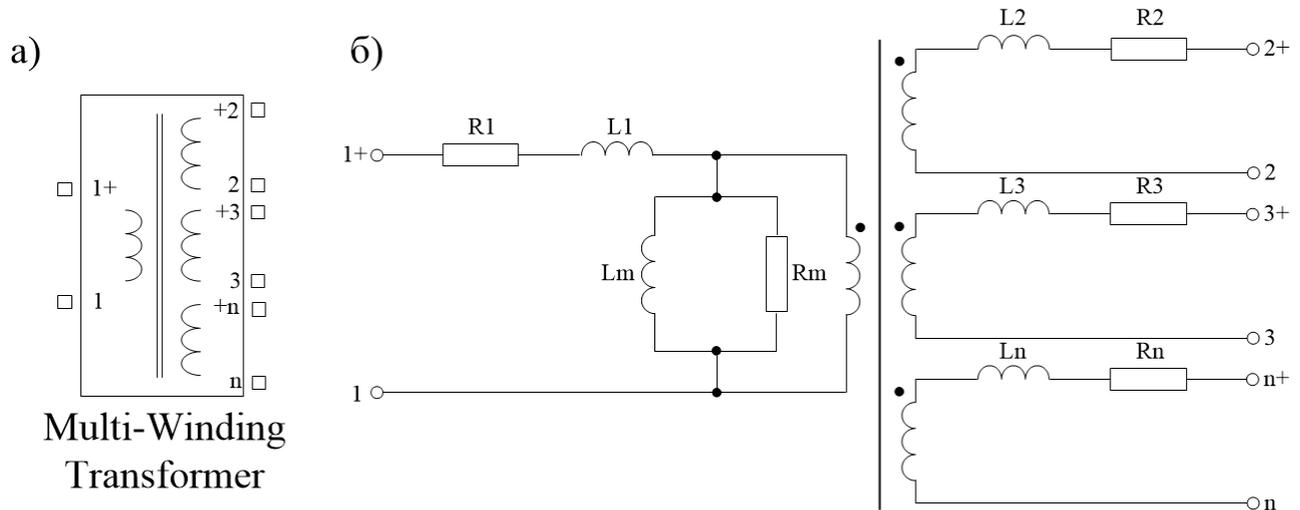
$$|M| = \begin{vmatrix} 29,196 & 0,367 & 0,734 \\ 0,367 & 0,0046314 & 0,00925 \\ 0,734 & 0,00925 & 0,0092628 \end{vmatrix} \quad |R| = \begin{vmatrix} 0,4285 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0007 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0014 \end{vmatrix}$$

Главные диагонали матрицы – значения индуктивных и активных сопротивлений ТТ.

Справа и слева от главной диагонали индуктивностей расположены значения взаимных индуктивностей между обмотками трансформатора.

В математической модели ТТ представлен в виде соответствующего блока (Multi-Winding Transformer). Этот блок представляет собой модель однофазного многообмоточного трансформатора. В блоке учитывается нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

Пиктограмма и электромагнитная схема ТТ представлена на рисунке 3.7 [15, 109].



а – внешний вид блока; б – схема модели

Рисунок 3.7 – Модель многообмоточного трансформатора в библиотеке SPS пакета MatLab

Расчет производится по методике, изложенной в работе [15], при этом необходимо учесть паспортные данные на тип ТТ ОНДЦЭ-4350/25 [112]. Блок схема трансформатора электровоза 2ЭС5К «Ермак», выполненная в среде *Simulink*, представлена на рисунке 3.8.

Номинальные напряжения обмоток ТТ (действующие)
 U_1 (выводы: А-Х) = 25 кВ; U_2 (выводы: а1-х1и а2-х2) = 1260 В;
 U_2 (выводы: 2-х1и4-х2) = 630 В; U_2 (выводы 1-х1и 3-х2) = 945 В;
 U_2 (выводы: а4-б и б-х4) = 229 В [112].

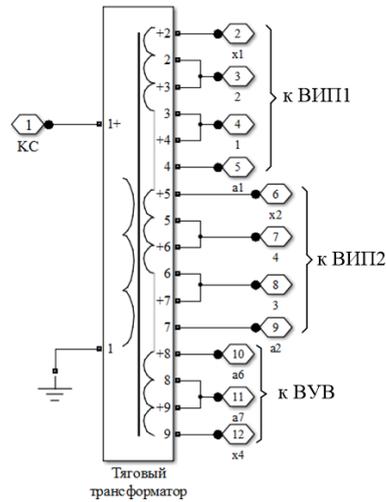


Рисунок 3.8 – Блок схема тягового трансформатора ОНЦЭ-4350/25 электровоза 2ЭС5К «Ермак» в среде *Simulink*

Адекватность модели трансформатора обосновывается выполнением на ней соответствующих опытов (короткого замыкания и холостого хода). На рисунках 3.9 и 3.10 представлены соответствующие диаграммы, определяющие адекватность работы модели ТТ.

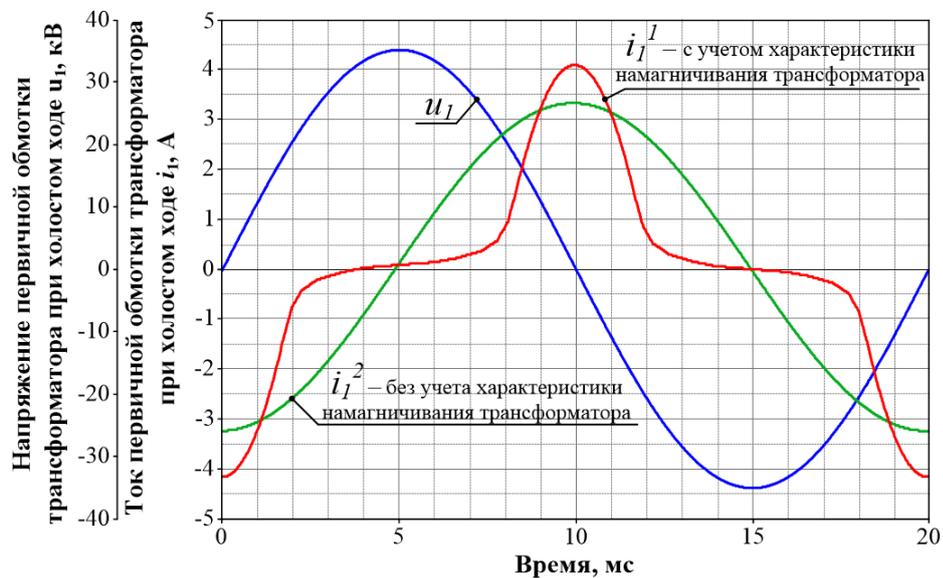


Рисунок 3.9 – Напряжение и ток первичной обмотки тягового трансформатора с учетом характеристики намагничивания в опыте холостого хода

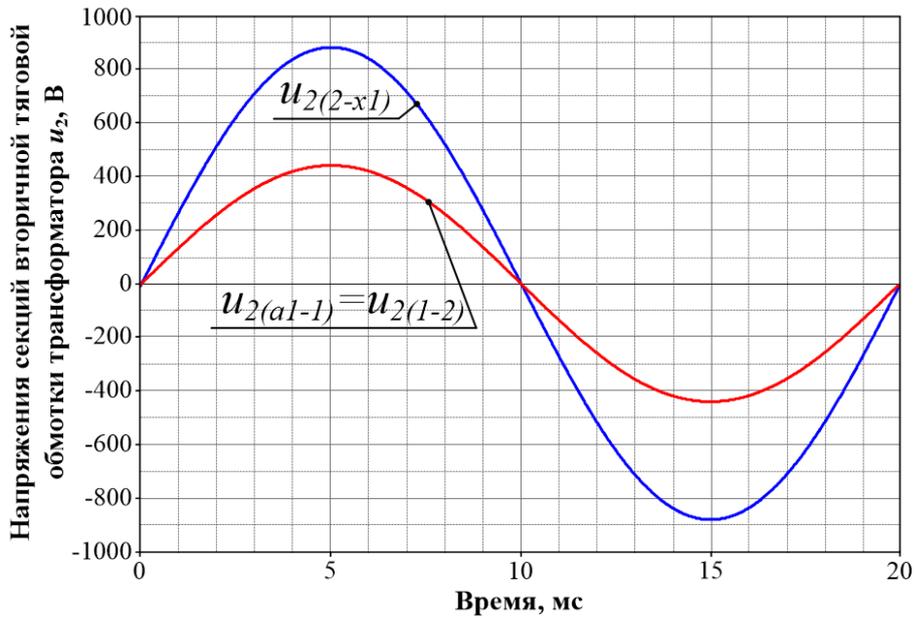


Рисунок 3.10 – Напряжение секций вторичной тяговой обмотки в опыте холостого хода

Опыт короткого замыкания проводился при пониженном напряжении на первичной обмотке тягового трансформатора. Результаты опыта короткого замыкания представлены на рисунке 3.11.

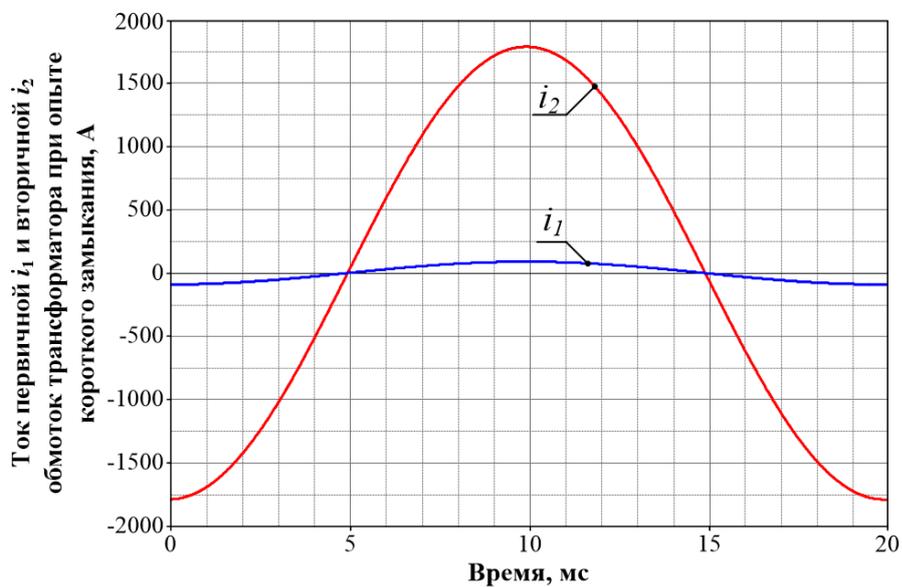


Рисунок 3.11 – Результаты опыта короткого замыкания обмоток трансформатора

Полученные результаты доказывают соответствие параметров модели паспортным данным ТТ [112].

3.3.2 Математическая модель выпрямительно-инверторного преобразователя на базе IGBT-транзисторов в режиме инвертора

Модель транзисторного ВИП состоит из силовых плеч (диод и транзистор) и дополнительного разрядного плеча, подключенного параллельно цепи выпрямленного тока. Схема замещения транзисторного ВИП показана на рисунке 3.12.

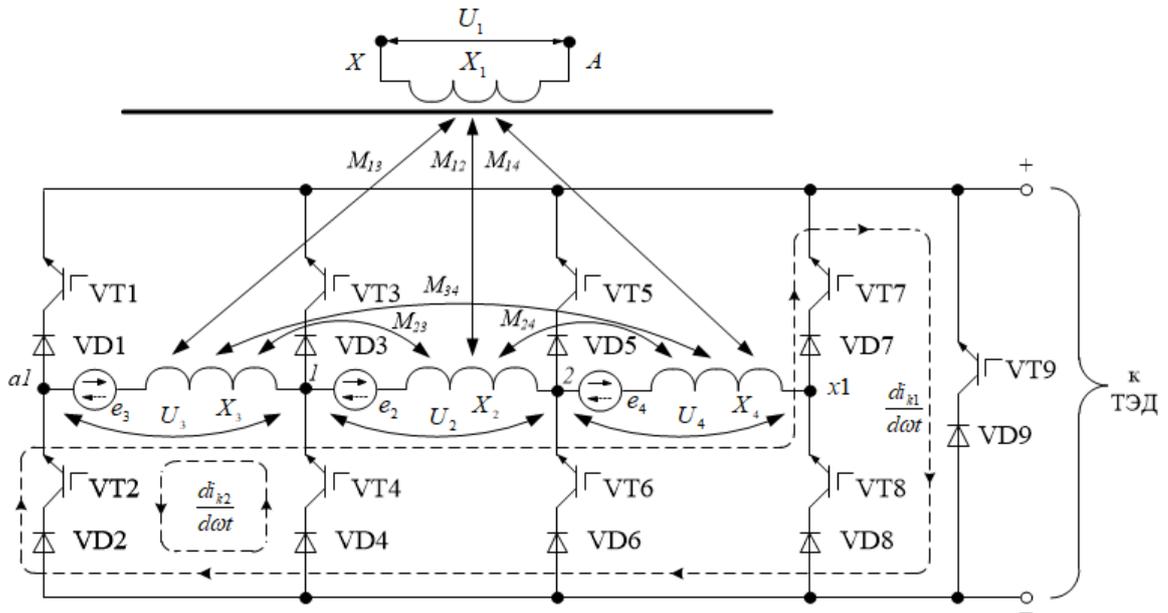


Рисунок 3.12 – Схема замещения транзисторного ВИП в режиме рекуперативного торможения

Согласно представленной схеме замещения далее приведен расчёт производной тока коммутации. Уравнение электрического равновесия в каждом контуре представляет собой

$$e = \frac{U_1}{K_T} = X_k \frac{di_k}{d\omega t}, \quad (3.16)$$

где e – ЭДС в витках вторичной обмотке от основного магнитного потока;

U_1 – напряжение на первичной обмотке ТТ;

K_T – коэффициент трансформации ТТ;

X_k – эквивалентное индуктивное сопротивление обмоток ТТ.

Значения K_T и X_K для большого контура коммутации равны

$$K_{T1(2+3+4)} = \frac{U_1}{e_2+e_3+e_4} = 19,84,$$

$$X_{K(2+3+4)} = \frac{X_1}{K_{T1(2+3+4)}^2} + X_2 + X_3 + X_4 = \frac{X_1}{19,84^2} + 4X_{секц} = \frac{X_1 + 1574,52X_{секц}}{393,63},$$

$$\frac{di_{k1}}{d\omega t} = \frac{e_2+e_3+e_4}{X_{K(2+3+4)}} = \frac{U_1}{K_{T1(2+3+4)}X_{K(2+3+4)}} = \frac{19,84U_1}{X_1 + 1574,52X_{секц}}. \quad (3.17)$$

Для малого контура

$$K_{T1(3)} = \frac{U_1}{e_3} = 79,37,$$

$$X_{K(2+4)} = \frac{X_1}{K_{T1(3)}^2} + X_3 = \frac{X_1 + 6299,6X_{секц}}{6299,6},$$

$$\frac{di_{k2}}{d\omega t} = \frac{79,37U_1}{X_1 + 6299,6X_{секц}}. \quad (3.18)$$

Уравнения, описывающие процессы коммутации в большом и малом контуре

$$e_2 = \frac{di_{k1}}{d\omega t} X_{K2}, \quad (3.19)$$

$$e_3 = \left(\frac{di_{k1}}{d\omega t} + \frac{di_{k2}}{d\omega t} \right) X_{K3}, \quad (3.20)$$

$$e_4 = \frac{di_{k1}}{d\omega t} X_{K4}. \quad (3.21)$$

После преобразований вышеописанной системы уравнений получена в общем виде выражение для производных токов коммутации в контурах

$$\frac{di_{k1}}{d\omega t} = \frac{e_2}{X_{K2}}, \quad (3.22)$$

$$\frac{di_{k2}}{d\omega t} = \frac{X_{K2}e_3 - X_{K3}e_2}{X_{K3}X_{K2}}. \quad (3.23)$$

Блок схема транзисторного ВИП, представлена на рисунке 3.13.

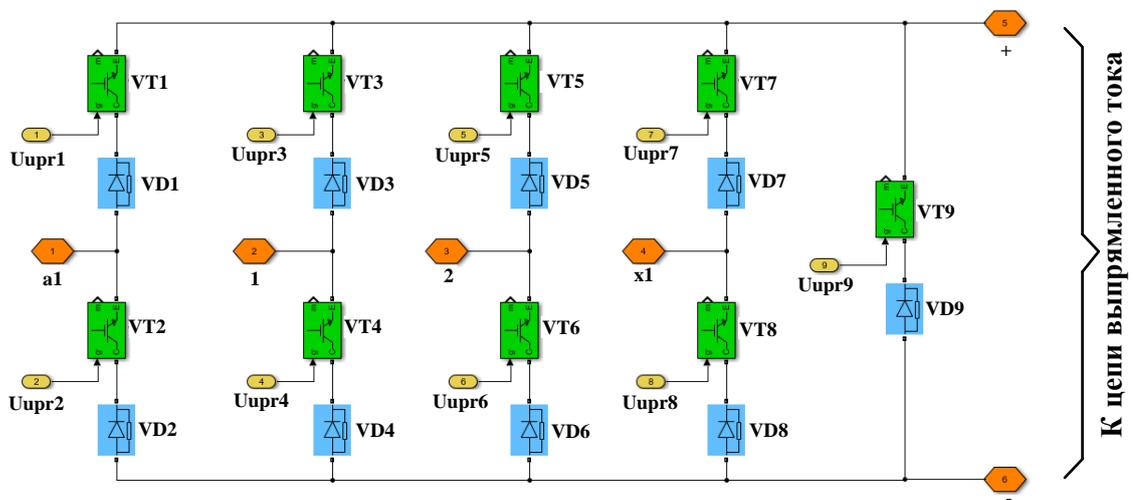


Рисунок 3.13 – Блок-схема ВИП на базе IGBT-транзисторов в редакторе Simulink

Резистор R_{on} , индуктивность L_{on} , источник постоянного напряжения U_f и ключ SW , включенные последовательно, представляют собой модель диода, рисунок 3.14.

Блок логики оказывает воздействие на работу плеча замыкая и размыкая ключ для прохождения тока через диод. При условии $U_{ak} - U_f > 0$ замыкается SW и через диод начинает протекать ток.

При условии снижения тока I_{ak} до нуля, ключ SW размыкается [109].

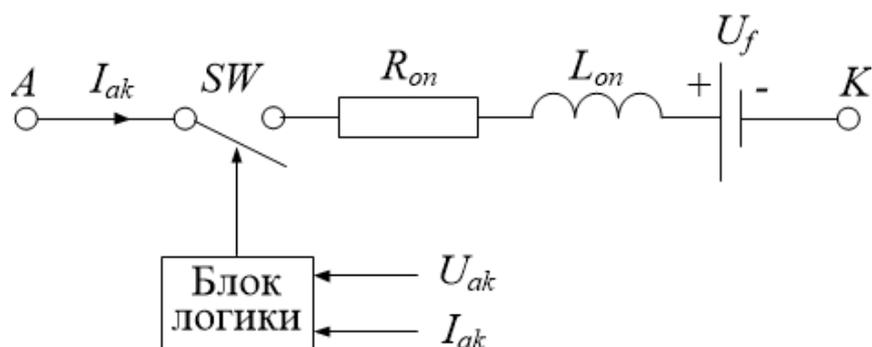


Рисунок 3.14 – Схема модели диода в редакторе *Simulink* пакета *MatLab*

Модель *IGBT*-транзистора состоит из аналогичных составляющих, описанных ранее (рисунок 3.15).

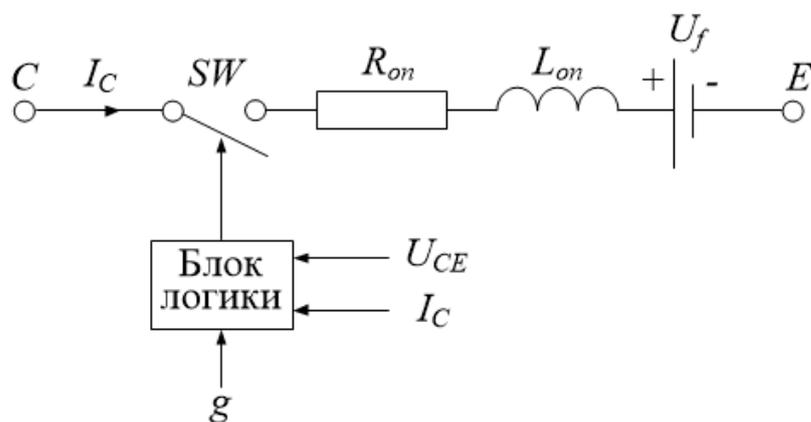


Рисунок 3.15 – Схема модели *IGBT*-транзистора в редакторе *Simulink* пакета *Matlab*

Работой ключа *SW* также управляет блок логики. При условиях $U_{CE} > 0$ и $g > 0$ блок логики замыкает ключ *SW* и через транзистор начинает протекать ток. При снижении величины сигнала на затвор транзистора до нуля $g = 0$ либо при условии $U_{CE} < 0$ блок логики размыкает ключ *SW* [109].

Модель данного преобразователя была опробована в работе согласно штатному алгоритму управления. Полученные в результате моделирования ВИП диаграммы в полной мере отражают качественное и количественное соответствие, получаемым на практике. Следовательно, можно сделать вывод о том, что модель транзисторного ВИП адекватна и будет быть использована в дальнейших расчетах при моделировании.

3.3.3 Математическая модель цепи выпрямленного тока в режиме рекуперативного торможения

В цепь выпрямленного тока каждого ВИП включены две параллельные ветви ТЭД с индивидуальным сглаживающим реактором [112].

Для адекватности работы модели цепи выпрямленного тока, она должна учитывать ряд особенностей, свойственных тяговому электродвигателю.

При разработке математической модели, цепь выпрямленного тока заменена эквивалентной схемой, содержащей эквивалентные активное сопротивление r_d , индуктивность L_d и ЭДС ТЭД. Эквивалентные индуктивные и активные сопротивления определяются следующими выражениями

$$L_{dэ} = L_{СР} + \frac{1}{2}(L_{Я} + L_{ДП} + L_{КО}), \quad (3.24)$$

$$r_{dэ} = r_{СР} + \frac{1}{2}(r_{Я} + r_{ДП} + r_{КО} + r_{б}), \quad (3.25)$$

где $L_{СР}$, $r_{СР}$ – индуктивное и активное сопротивление сглаживающего реактора;

$L_{Я}$, $r_{Я}$ – индуктивное и активное сопротивление обмотки якоря тягового электрического двигателя;

$L_{ДП}$, $r_{ДП}$ – индуктивное и активное сопротивление обмоток дополнительных полюсов тягового электрического двигателя;

$L_{КО}$, $r_{КО}$ – индуктивное и активное сопротивление компенсационной обмотки тягового электрического двигателя;

$r_{б}$ – сопротивление ББР в каждой цепи тягового электрического двигателя.

Тяговый электрический двигатель электровоза работает в границах всей магнитной характеристики, в том числе и зоне насыщения. Следовательно, зависимость магнитного потока от тока возбуждения является нелинейной, как и индуктивность обмоток тягового двигателя является переменной

(динамическая) [80]. В модели зависимость эквивалентной индуктивности цепи выпрямленного тока от величины выпрямленного тока $L_{dэ} = f(i_я)$ определяется как

$$L_{dэ} = L_d(i_я) + \frac{dL_d(i_я)}{di_я} i_я. \quad (3.26)$$

Схема замещения цепи выпрямленного тока для режима рекуперативного торможения отражена на рисунке 3.16.

В качестве прототипа модели тягового электрического двигателя принят НБ-514Б. На схеме приняты следующие обозначения:

$i_я, i_{вув}$ – ток якоря и ток возбуждения;

$r_{dэ}, L_{dэ}$ – эквивалентные активное сопротивление и индуктивность цепи выпрямленного тока;

$r_в, L_в, i_в$ – активное сопротивление, индуктивность и ток обмотки возбуждения;

$r_{пш}, i_{пш}$ – активное сопротивление и ток резистора постоянной шунтировки;

$r_о$ – активное сопротивление ББР.

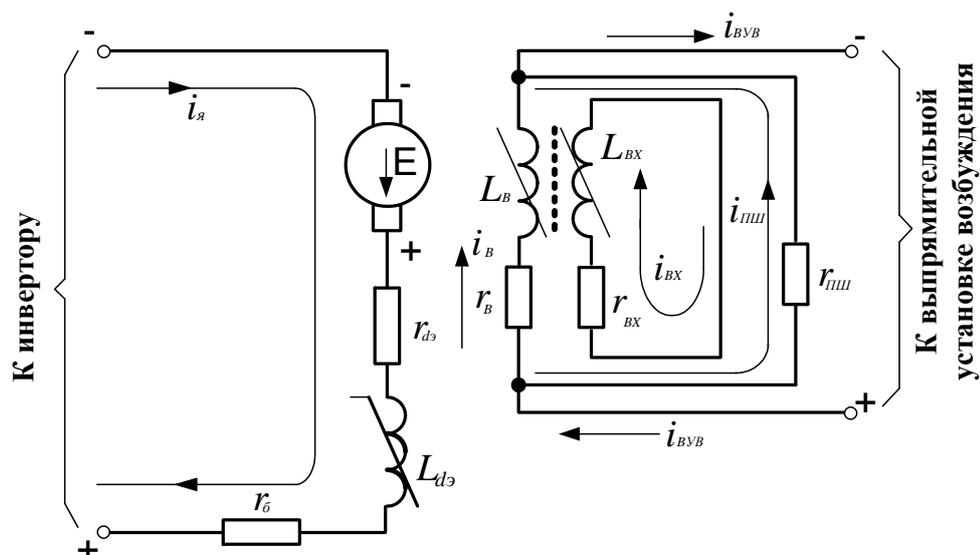


Рисунок 3.16 – Схема замещения цепи выпрямленного тока ВИП

Резистор постоянной шунтировки $r_{\text{пш}}$ включен в схему с целью снижения переменной составляющей тока возбуждения, поскольку он имеет меньшее сопротивление, чем у обмотки возбуждения. Этот резистор в свою очередь обеспечивает постоянное ослабление возбуждения в среднем на 2 %.

Влияние вихревых токов учитывается элементами $L_{\text{вх}}$ и $r_{\text{вх}}$.

По данным [112] параметры сопротивлений обмоток тягового электродвигателя НБ-514Б имеют следующие величины:

- якорная обмотка с учетом дополнительным полюсов и компенсационной обмотки $r_d = 0,0237$ Ом;

- обмотка возбуждения $r_e = 0,0069$ Ом;

Значение сопротивления ББР согласно технической документации (ББР-64) принимается $r_b = 0,144$ Ом.

Сглаживающий реактор типа РС-19 [112]. Реактор представляет собой индуктивно-активную нагрузку с параметрами:

- $r_{\text{CP}} = 0,0182$ Ом;

- $L_{\text{CP}} = 8,2$ мГн.

Параметр резистора постоянной шунтировки $r_{\text{пш}}$ определяется по формуле

$$r_{\text{пш}} = r_{\text{в}} \frac{\beta_0}{1 - \beta_0} \quad (3.27)$$

где β_0 – коэффициент постоянного ослабления возбуждения.

При $\beta_0 = 0,98$, согласно руководству по эксплуатации [112], величина резистора постоянной шунтировки $r_{\text{пш}} \approx 0,294$ Ом.

Электромагнитные процессы в цепи выпрямленного тока во время большого и малого контура описываются уравнениями:

- большой контур коммутации

$$\frac{di_{\text{я}}}{dt} = \frac{C\Phi V - i_{\text{я}}(r_2 + r_4 + r_{d3}) - e_2 - e_4 - i_{k1}(r_2 + r_4)}{L_2 + L_4 + L_{d3} - M_{12} - M_{14} + M_{23} + M_{34}}, \quad (3.28)$$

– малый контур коммутации

$$\frac{di_{\text{я}}}{dt} = \frac{C\Phi V - i_{\text{я}}(r_3 + r_{d3}) + e_3}{L_3 + L_{d3} - M_{13} + M_{23} + M_{34}}. \quad (3.29)$$

Переходные процессы в цепи обмотки возбуждения тягового электрического двигателя описываются уравнениями [10]

$$\frac{di_{\text{в}}}{dt} = \frac{r_{\text{ну}}(i_{\text{ну}} + i_{\text{к}} - i_{\text{в}}) - r_{\text{в}}i_{\text{в}}}{L_{\text{в}}}, \quad (3.31)$$

$$\frac{di_{\text{вх}}}{dt} = -\frac{i_{\text{вх}}r_{\text{вх}}}{L_{\text{вх}}}, \quad (3.32)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{r_{\text{вх}}(F - i_{\text{в}}w_{\text{в}})}{2pw_{\text{вх}}}, \quad (3.33)$$

$$F = i_{\text{в}}w_{\text{в}} + i_{\text{вх}}w_{\text{вх}}, \quad (3.34)$$

$$\Phi = f(F). \quad (3.35)$$

При моделировании приняты следующие условия:

- размагничивающее действие якоря принимается скомпенсированным, за счет включения добавочных полюсов и компенсационной обмотки ТЭД.

- ввиду того, что за время расчета скорость электроваза не успеет существенно измениться, механические процессы в тяговом приводе не учитываются [1].

В данной работе при создании модели ТЭД использовались кривые магнитной характеристики и динамической индуктивности обмоток,

предоставленные ВЭЛНИИ в протоколе ЭМ-14-85 квалификационных испытаний ТЭД пульсирующего тока. Данные кривые изображены на рисунках 3.17 и 3.18.

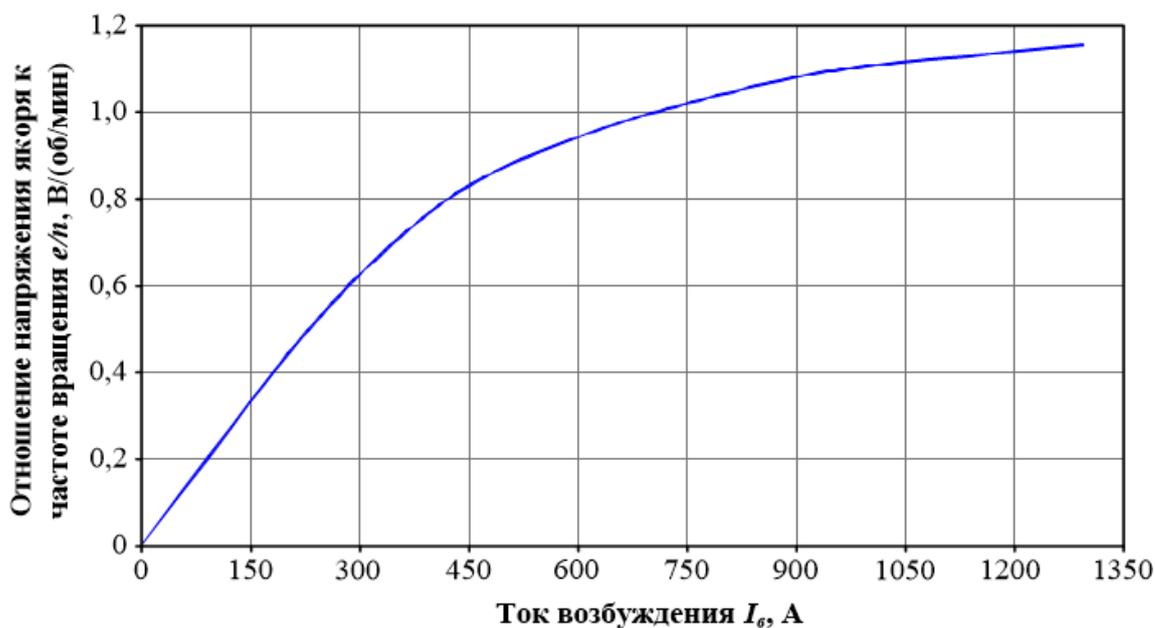


Рисунок 3.17 – Магнитная характеристика тягового электродвигателя

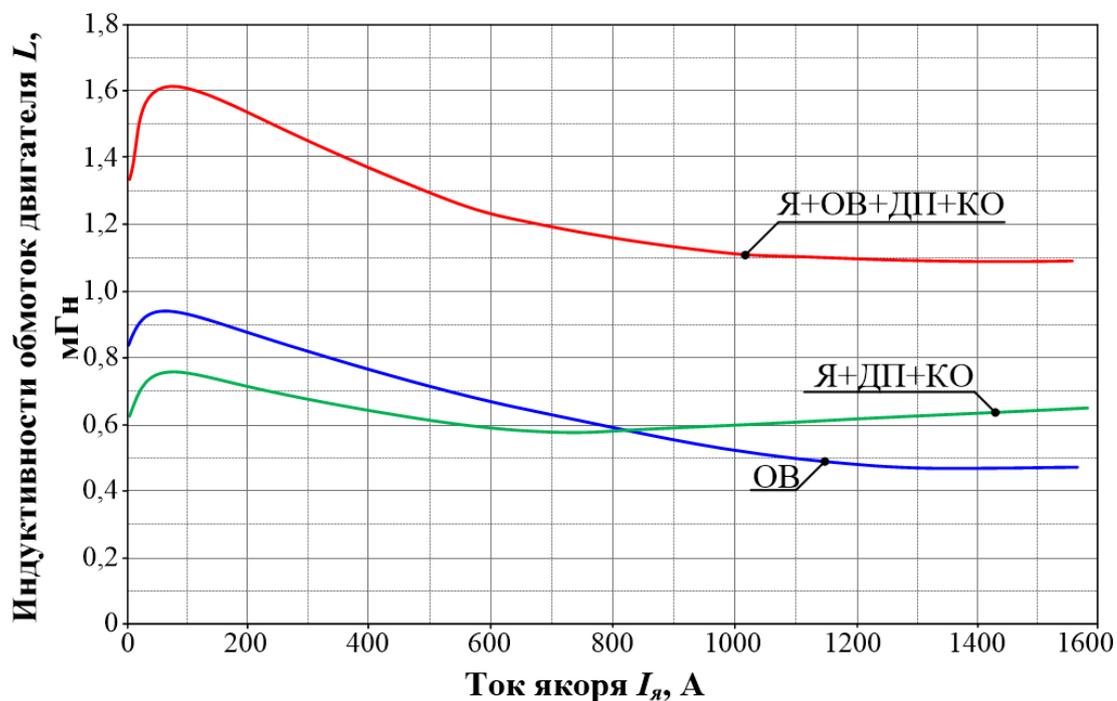


Рисунок 3.18 – График зависимости индуктивности обмоток тягового электродвигателя от величины тока якоря

Следуя методике, которая была предложена М.З. Жицем, модель тягового электродвигателя должна учитывать действие вихревых токов [22]. Согласно

данной методики, размагничивающая сила $F=i_b\omega_b$ связана с полным магнитным потоком Φ и магнитным потоком первой гармоники Φ_1 двумя уравнениями

$$\left\{ \begin{array}{l} 1,23r_{\mu 1}\Phi_1+f(\Phi)-\Phi r_{\mu 1}+L_{\mu}\frac{d\Phi_1}{dt}=F \\ 5,29r_{\mu 1}(\Phi-\Phi_1)+f(\Phi)-\Phi r_{\mu 1}+0,475\frac{d}{dt}(\Phi-\Phi_1)L_{\mu}=F \end{array} \right\} \quad (3.36)$$

где $f(\Phi) = i_{\mu}\omega$ – обратная магнитная характеристика;

Φ – полный магнитный поток;

Φ_1 – магнитный поток первой гармоники;

$\Phi - \Phi_1$ – магнитный поток высших гармоник;

$1,23r_{\mu 1}$ и $5,29r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление основному магнитному потоку и высшим гармоникам соответственно;

L_{μ} – магнитная индуктивность основного потока;

$0,475L_{\mu}$ – магнитная индуктивность высших гармоник.

Магнитная индуктивность L_{μ} определяется электропроводностью остова и сердечника главных полюсов, а также геометрическими размерами двигателя.

На основании вышеописанных особенностей тягового электродвигателя, профессором ДВГУПС Ю.М. Кулиничем была разработана модель для двигателя, учитывающая нелинейность магнитной характеристики, динамическую индуктивность и вихревые токи [35].

Разработанная и протестированная модель в пакете *Simulink* описана в работе [1].

Также значительным достоинством модели тягового электрического двигателя из библиотеки SPS реализация различных систем возбуждения и осуществление генераторного режима, в таком случае необходимо к обмотке возбуждения приложить напряжение и обеспечить вращение генератора, за счет подачи на вход w (рисунок 3.19) определенную угловую скорость [109].

На рисунке 3.19 показана схема, разработанная в пакете *Simulink* с целью исследования переходных процессов в тяговом электрическом двигателе, работающим в режиме генератора. От генератора прямоугольных импульсов на

обмотку возбуждения подается скачкообразный сигнал по напряжению, при постоянной частоте вращения. На рисунке 3.20 отражены переходные процессы, протекающие при работе генератора с обеспечением независимого возбуждения.

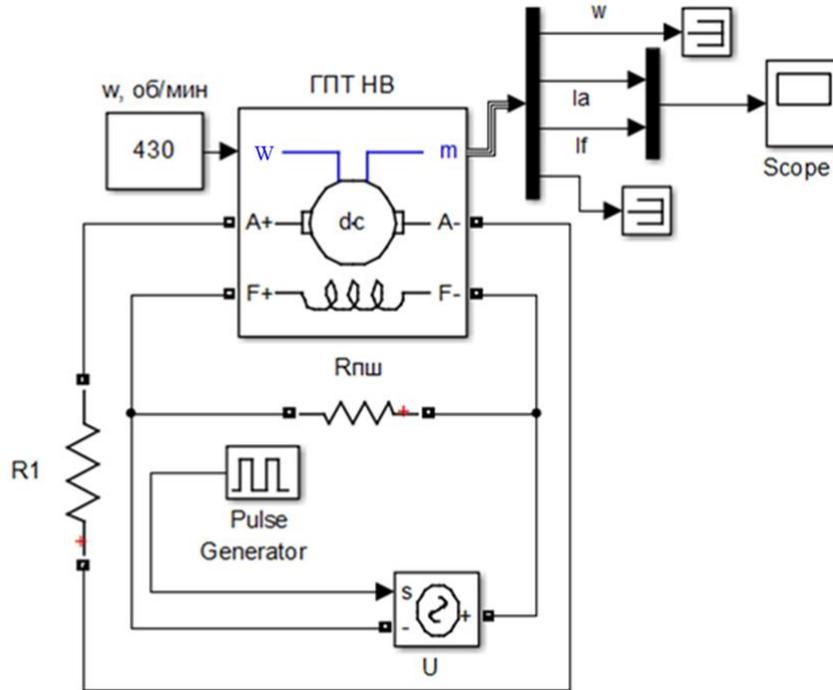


Рисунок 3.19 – Блок-схема для исследования переходных процессов в генераторе с независимым возбуждением в пакете *Simulink*

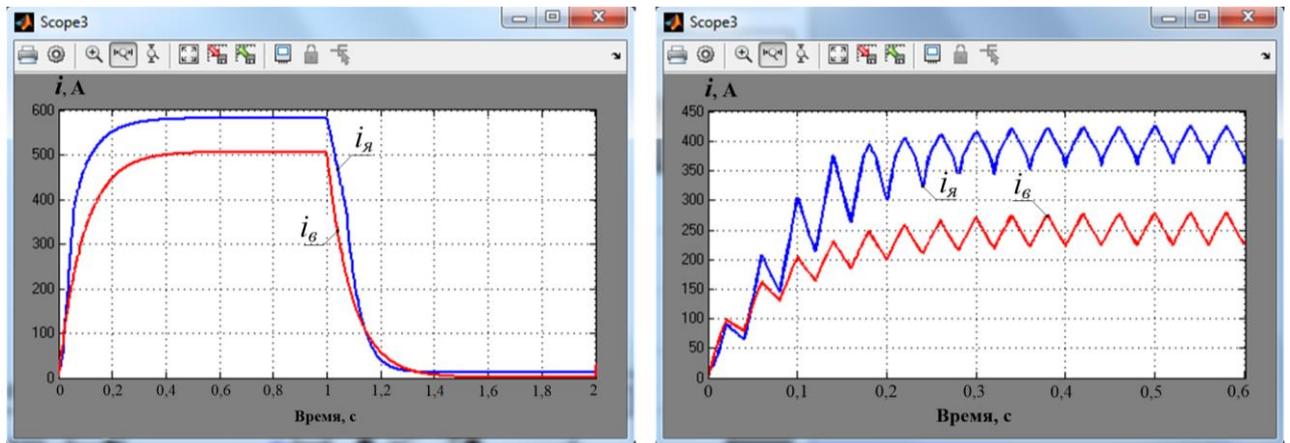
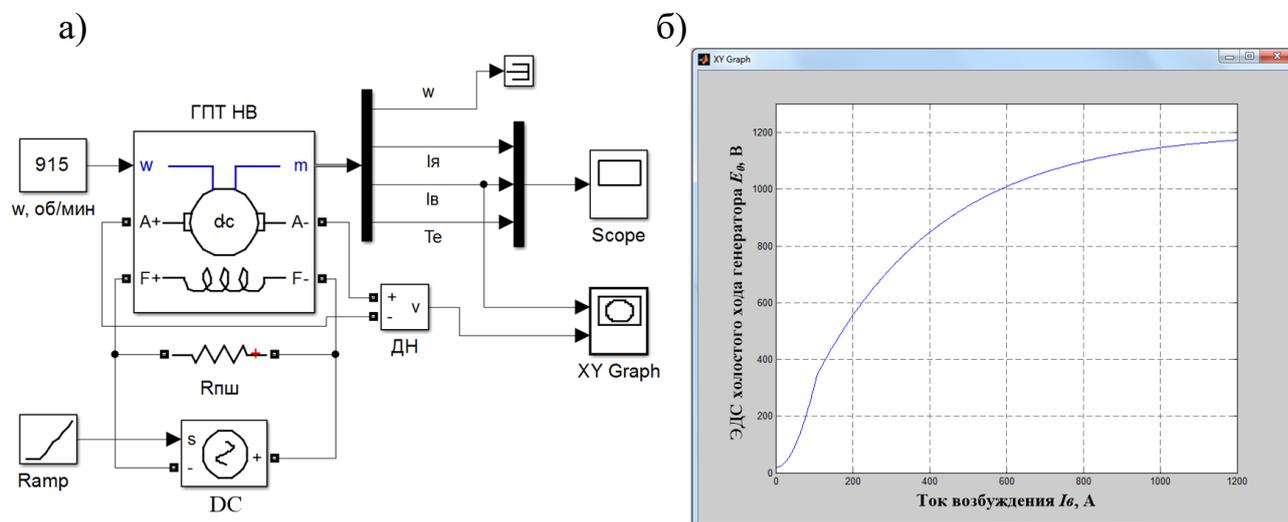


Рисунок 3.20 – Переходные процессы в генераторе с независимым возбуждением при длительности импульса напряжения 1 с и 0,02 с

Также, вдобавок при исследовании модели, был выполнен опыт холостого хода.

Для проведения данного опыта получена характеристика холостого хода, отраженная на рисунке 3.21. R_{amp} представляет собой источник линейно изменяющегося воздействия и обеспечивает изменение тока возбуждения тягового электрического двигателя.



а – блок-схема для проведения опыта; б – зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения

Рисунок 3.21 – Результаты проведения опыта холостого хода

Проведенные опыты позволяют судить об адекватности протекающих процессов в модели тягового электрического двигателя, поэтому, можно сделать вывод, что модель адекватна и может быть использована для анализа электромагнитных процессов в дальнейшем [1, 35].

3.3.4 Математическая модель выпрямительной установки возбуждения

При реализации рекуперативного торможения система возбуждения тягового двигателя переключается с последовательного на независимое от управляемого ВУВ. Данная установка представляет собой двухполупериодный выпрямитель с нулевой точкой. На рисунке 3.21 представлена схема замещения такого ВУВ.

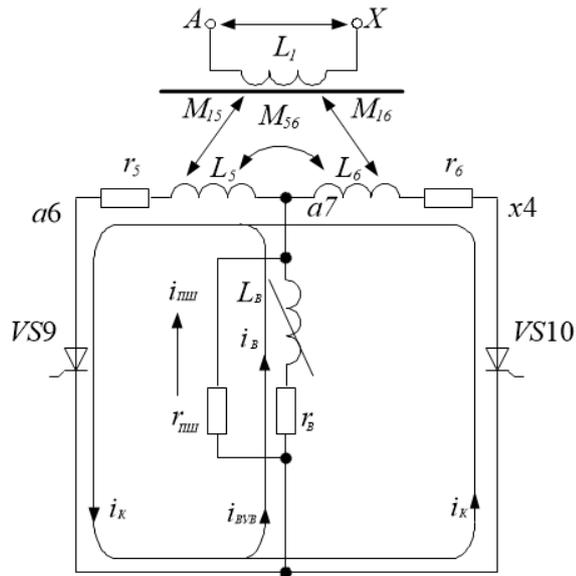


Рисунок 3.21 – Схема замещения выпрямительной установки возбуждения

Электромагнитные процессы в этом случае описываются уравнениями (3.31 – 3.35) и (3.37)

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{e_5 + e_6 - i_k(r_5 + r_6)}{L_5 + L_6 - M_{15} - M_{16} + M_{56}} \quad (3.37)$$

На рисунке 3.22 представлена блок-схема ВУВ

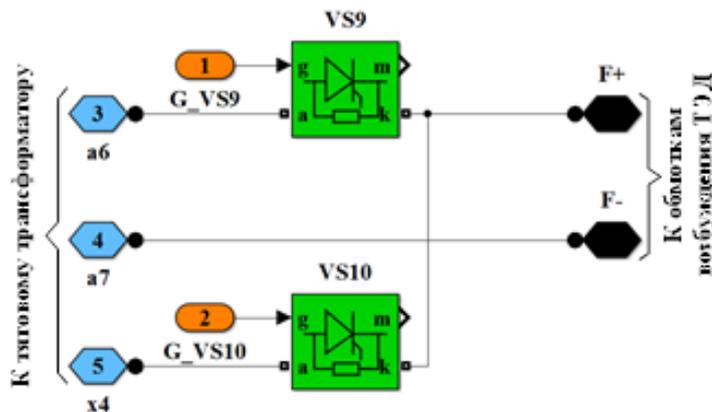


Рисунок 3.22 – Блок-схема выпрямительной установки возбуждения

С целью проверки работоспособности данной модели на рисунке 3.23 представлены диаграммы электромагнитных процессов, полученные в результате моделирование ВУВ электровоза переменного тока.

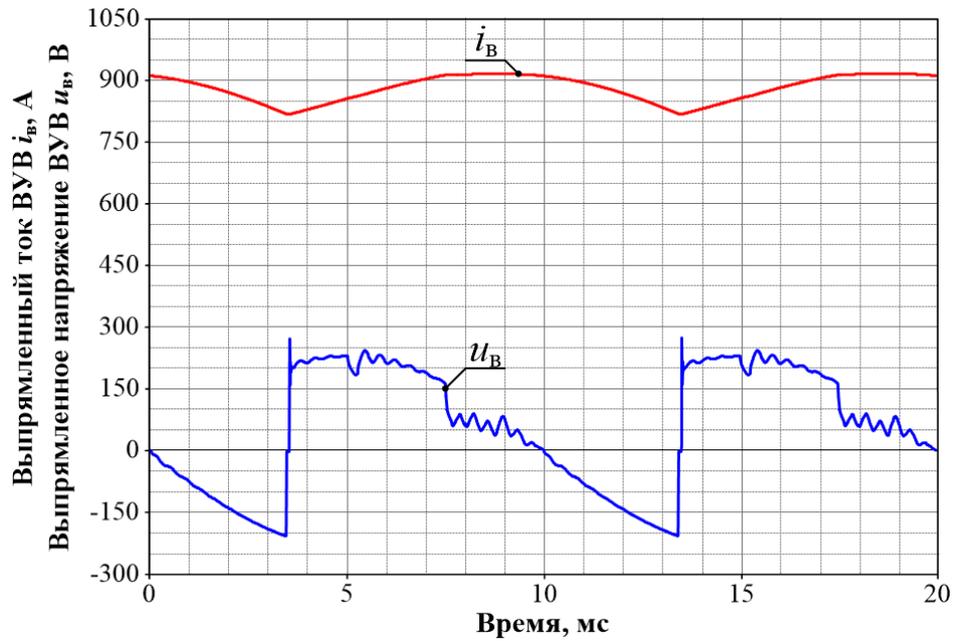


Рисунок 3.23 – Диаграммы электромагнитных процессов при работе ВУВ

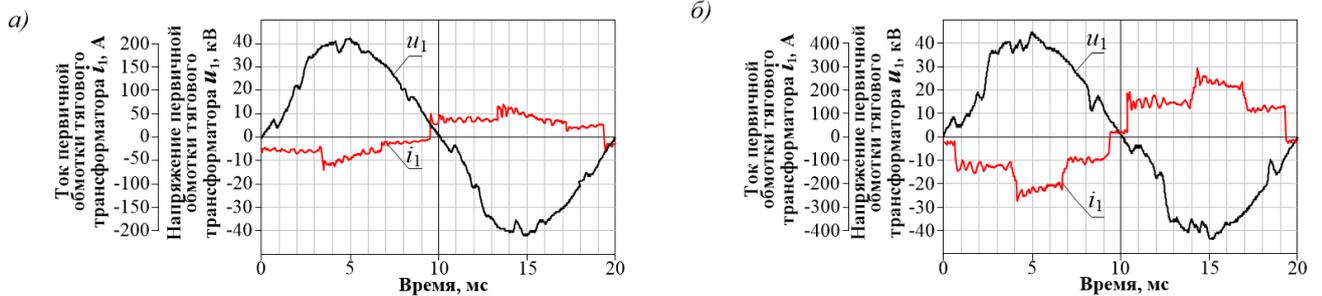
Таким образом, полученные электромагнитные процессы соответствуют теоретическим представлениям, следовательно, данная модель выпрямительной установки возбуждения работает адекватно и будет использована при моделировании в данной диссертационной работе.

3.4 Оценка адекватности электромагнитных процессов при работе физической модели электровоза с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов и в математической модели

Математическая модель должна адекватно отражать протекающие переходные и установившиеся процессы, сопоставимо с реальными – это является основным требованием. Для оценки адекватности были сопоставлены временные диаграммы токов и напряжений во время моделирования и физических исследований транзисторного выпрямительно-инверторного преобразователя на испытательном стенде в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» в

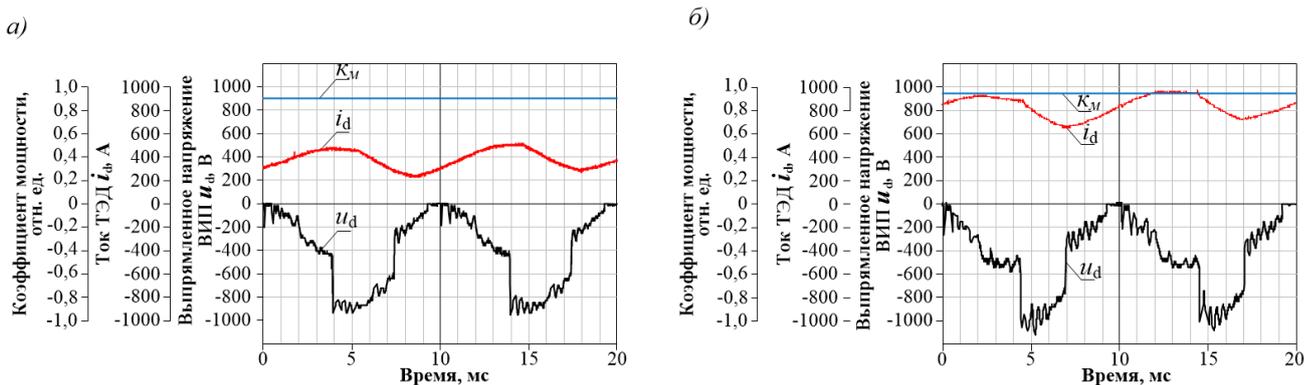
условиях напряжения контактной сети. Для определения адекватности были выбраны параметры для обоих случаев: ток тягового электродвигателя – 400 А; 1,5 зоны регулирования напряжения ВИП;

Кривые тока и напряжения для определения адекватности математической модели представлены на рисунках 3.24 и 3.25.



а – экспериментальные исследования; б – математическое моделирование

Рисунок 3.24 – Кривые тока и напряжения на первичной обмотке ТТ



а – экспериментальные исследования; б – математическое моделирование

Рисунок 3.25 – Кривые тока и напряжения на тяговом электрическом двигателе, коэффициента мощности электровоза

Критерием сравнения выступают величина угла сдвига между током и напряжением первичной обмотки ТТ φ , величина коэффициента мощности K_M , величина выпрямленного напряжения ВИП U_d , среднеквадратичная величина рекуперированного тока в контактную сеть I_1 .

Полученные данные по оценке параметров представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Критерии определения адекватности математической модели

Сравниваемый параметр	Значения при эксплуатационных испытаниях	Значения при математическом моделировании	Относительная погрешность, %
I_d , А	400	400	-
Зона регулирования ВИП	1,5	1,5	-
i_1 , А	31,8	29,2	8,2
K_m , отн. ед.	0,95	0,96	1
φ , эл. град.	9	9,8	8,1
U_d , В	412	398	3,4

Относительная погрешность при проведении моделирования не превышает 10 %, следовательно, рассмотренная математическая модель является пригодной для проведения исследований в режиме рекуперативного торможения электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением блока балластных резисторов из цепи якоря генератора.

3.5 Моделирование предлагаемого алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов при исключении блока балластных резисторов из якорной цепи тяговых электродвигателей

Для объективного исследования работоспособности системы рекуперативного торможения с применением транзисторного ВИП с исключением ББР из якорной цепи ТЭД на рисунках 3.26-3.41 представлены временные диаграммы электромагнитных процессов, полученные в результате математического моделирования. Исходными параметрами являются:

- напряжение тяговой подстанции $U_{1тп} = 27,5$ кВ;
- расстояние электровоза от тяговой подстанции $r_{тп} = 20$ км;
- номер зоны регулирования напряжения – 0,5; 1; 1,5;2; 2,5;3; 3,5.
- ток якоря ТЭД = 810 А.

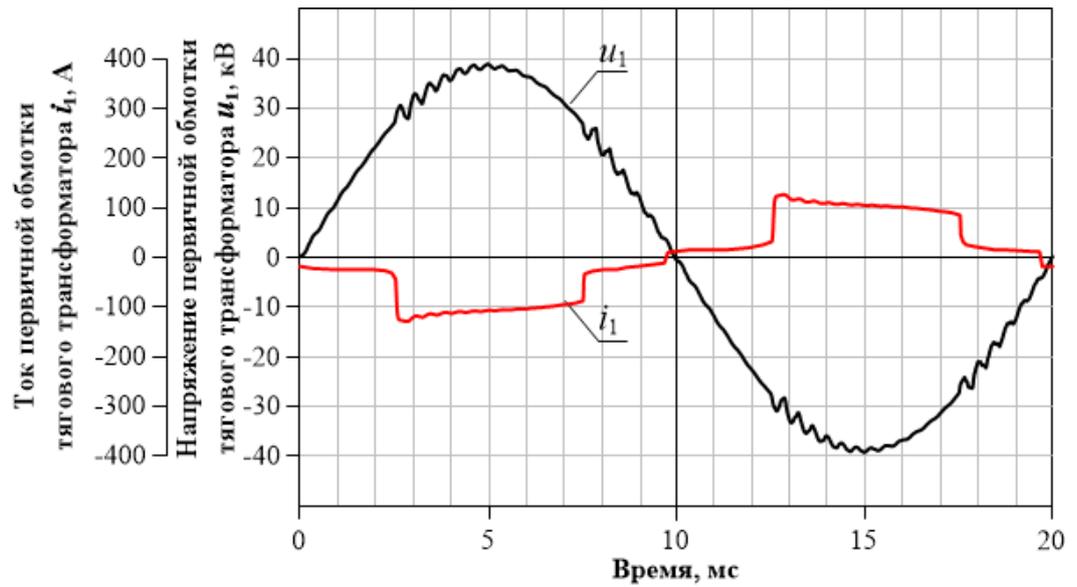


Рисунок 3.26 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 0,5 зоне регулирования напряжения

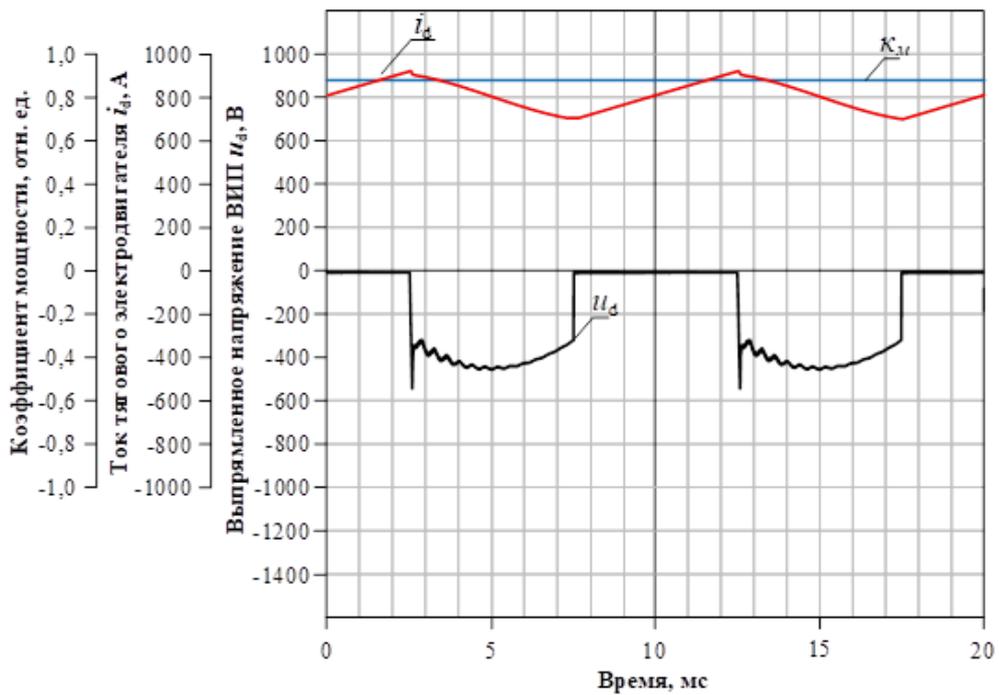


Рисунок 3.27 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_m) на 0,5 зоне регулирования напряжения

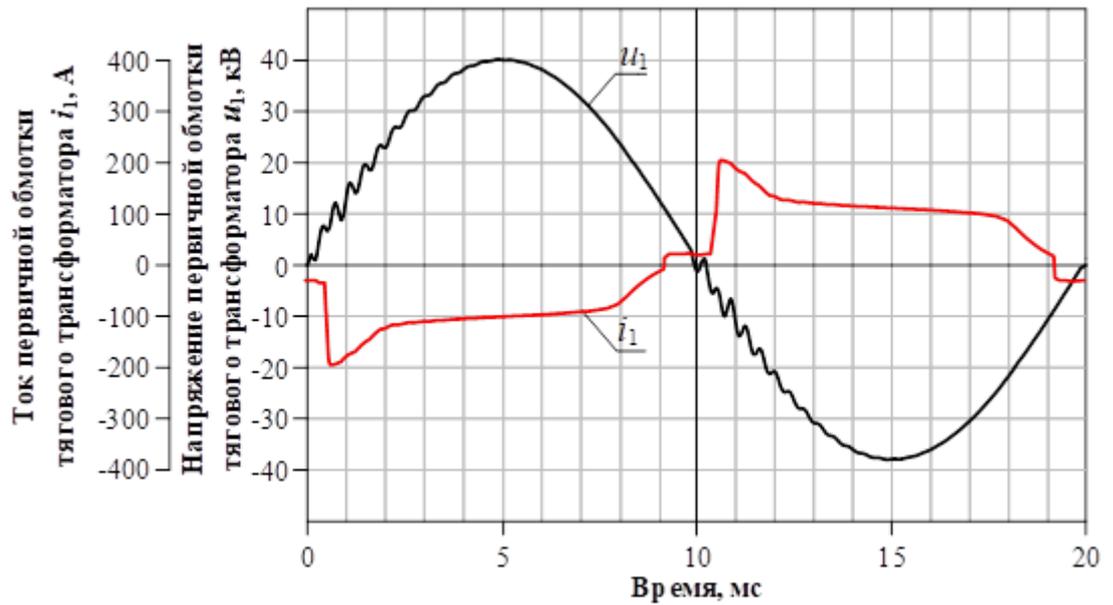


Рисунок 3.28 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 1 зоне регулирования напряжения

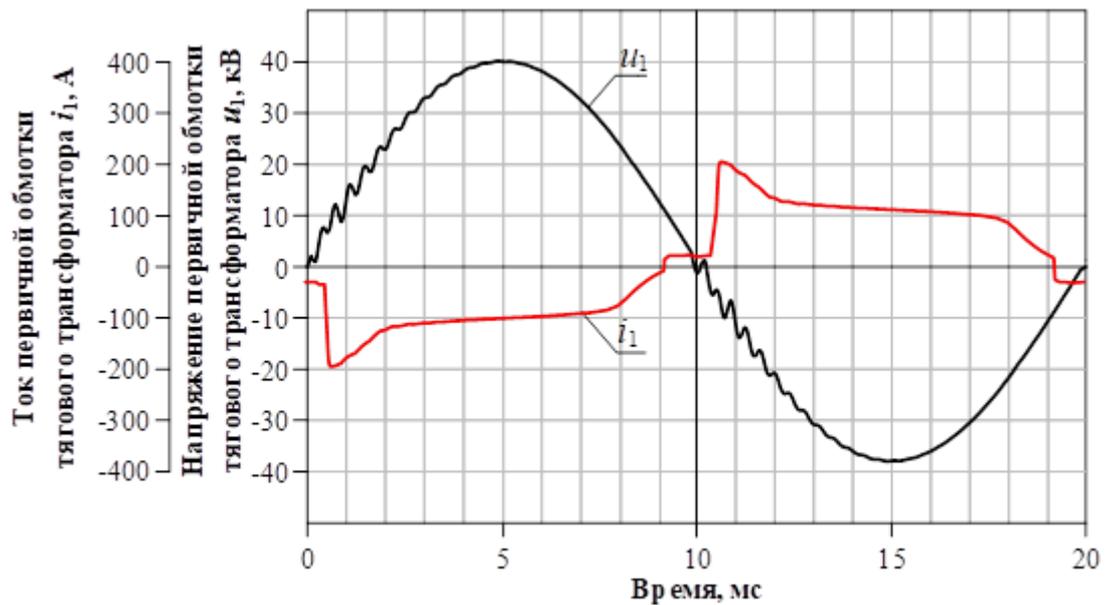


Рисунок 3.29 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_m) на 1 зоне регулирования напряжения

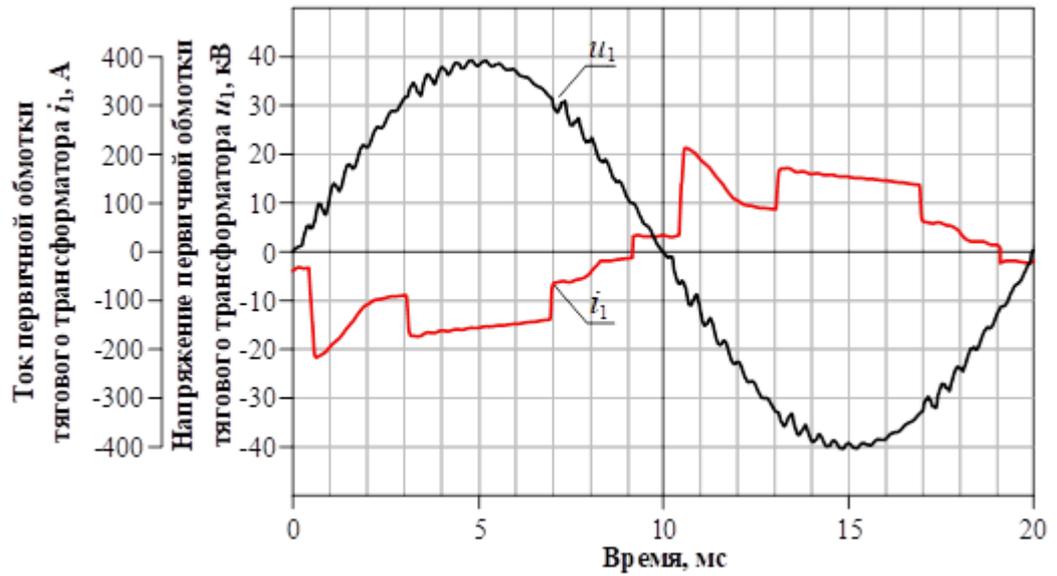


Рисунок 3.30 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электроваза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 1,5 зоне регулирования напряжения

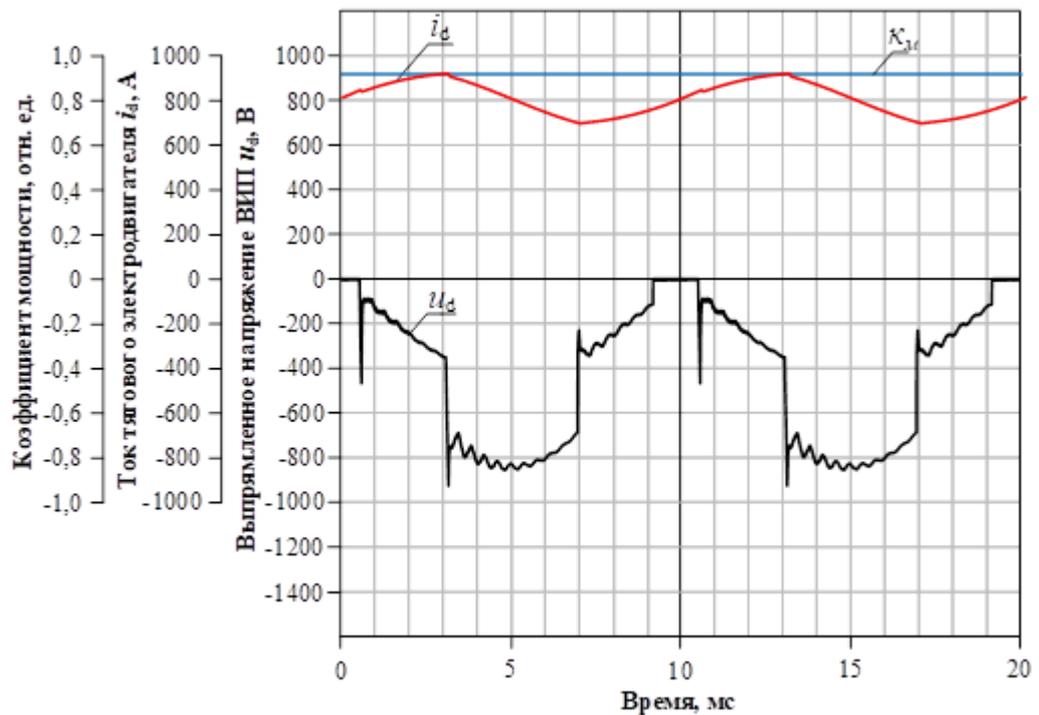


Рисунок 3.31 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_a), выпрямленный ток (i_a), коэффициент мощности (K_m) на 1,5 зоне регулирования напряжения

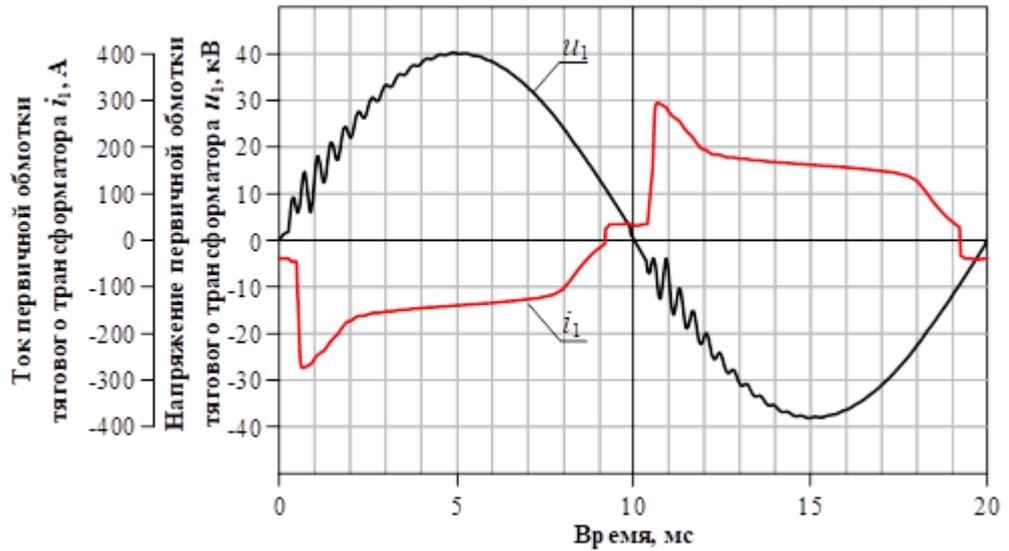


Рисунок 3.32 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 2 зоне регулирования напряжения

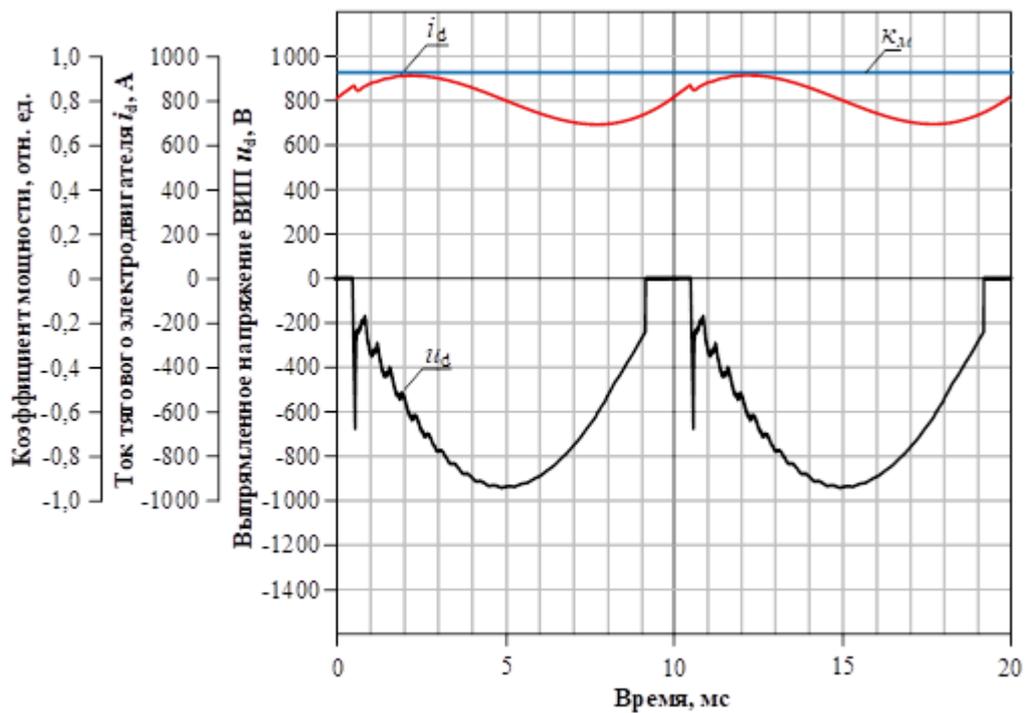


Рисунок 3.33 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_m) на 2 зоне регулирования напряжения

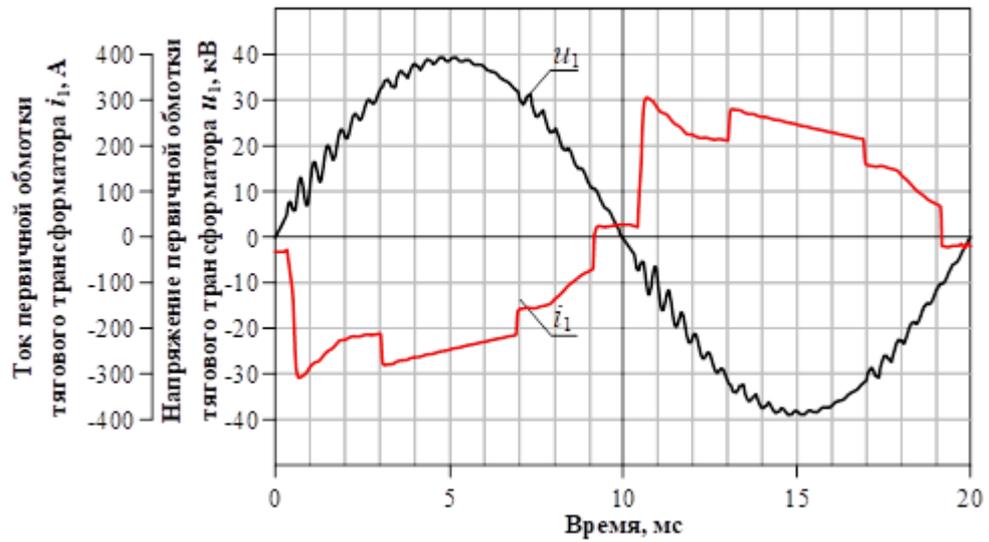


Рисунок 3.34 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 2,5 зоне регулирования напряжения

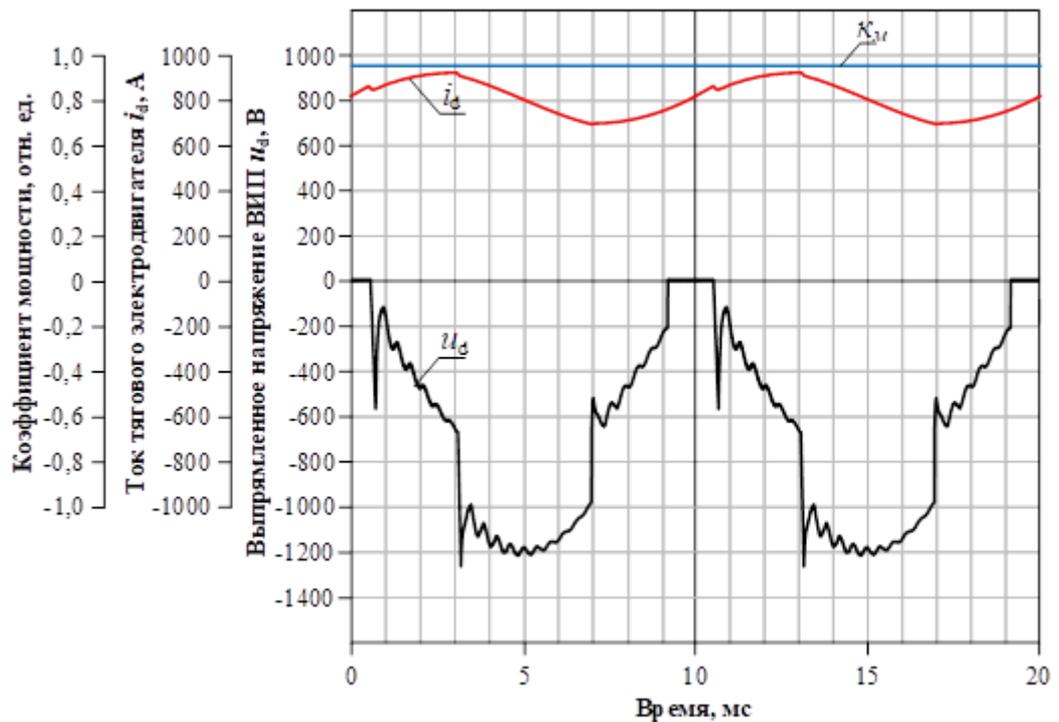


Рисунок 3.35 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_M) на 2,5 зоне регулирования напряжения

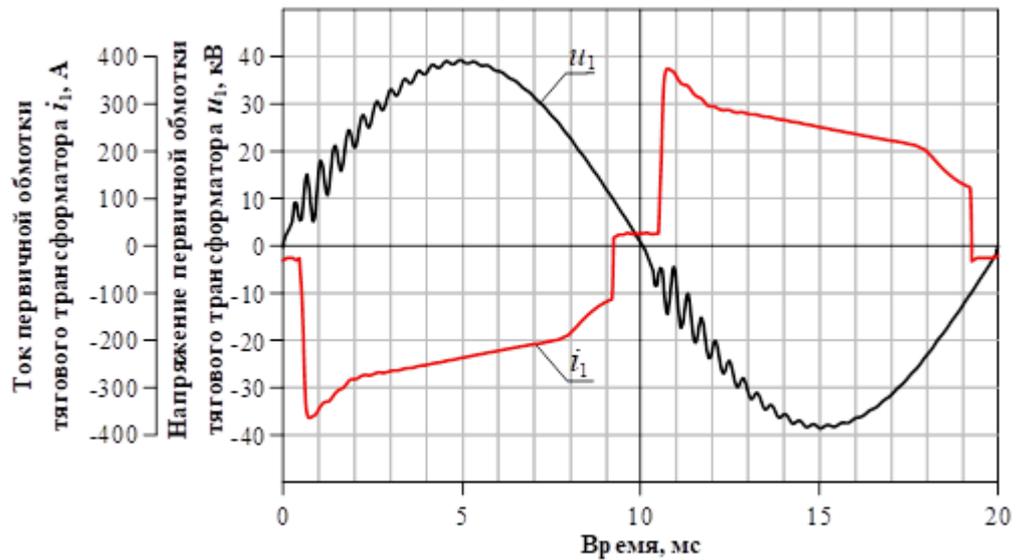


Рисунок 3.36 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 3 зоне регулирования напряжения

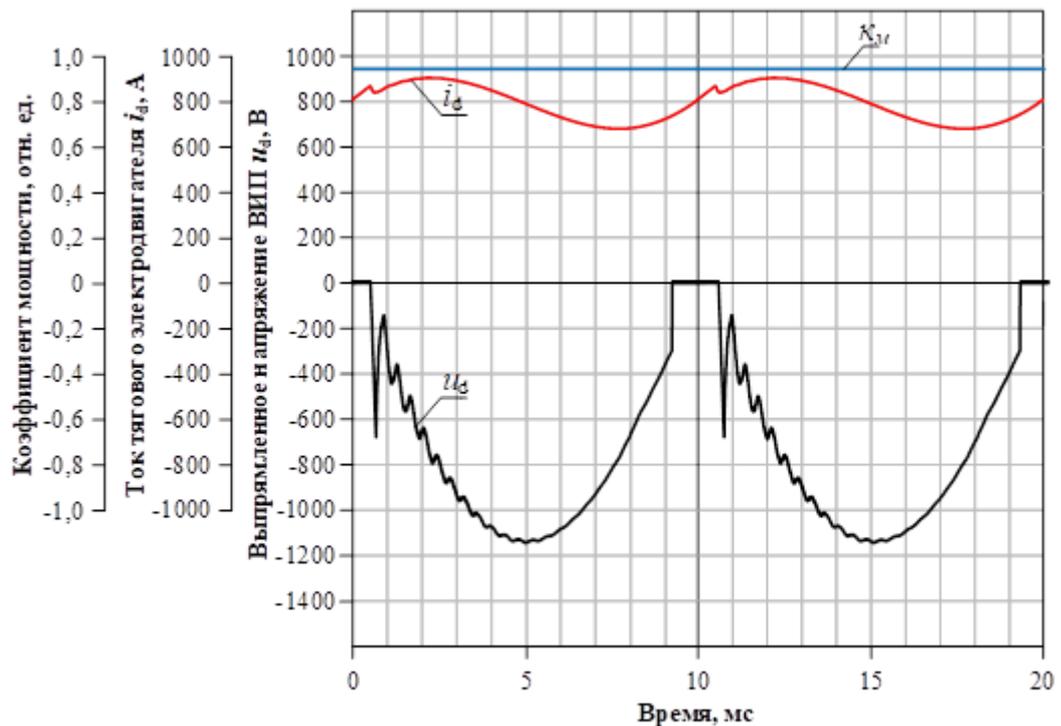


Рисунок 3.37 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_m) на 3 зоне регулирования напряжения

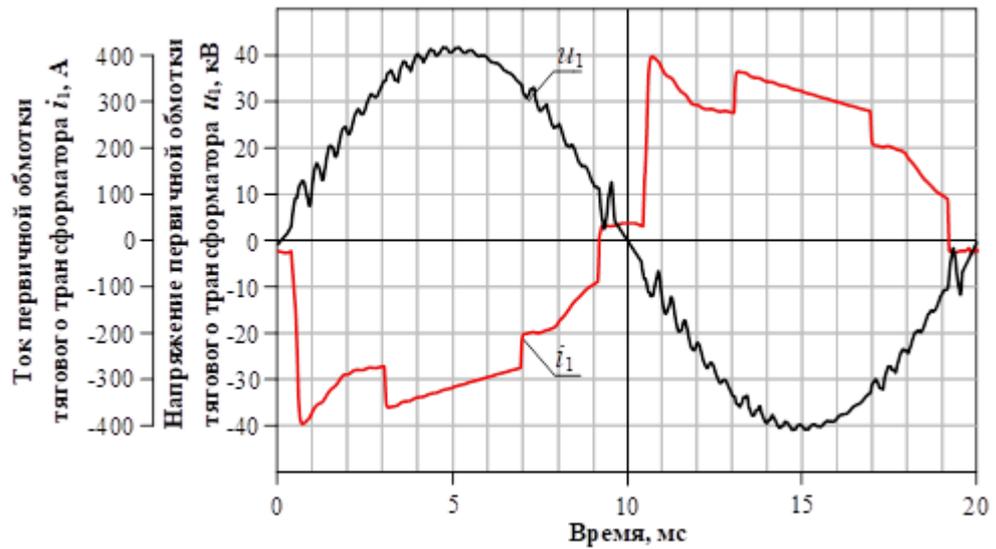


Рисунок 3.38 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электроваза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 3,5 зоне регулирования напряжения

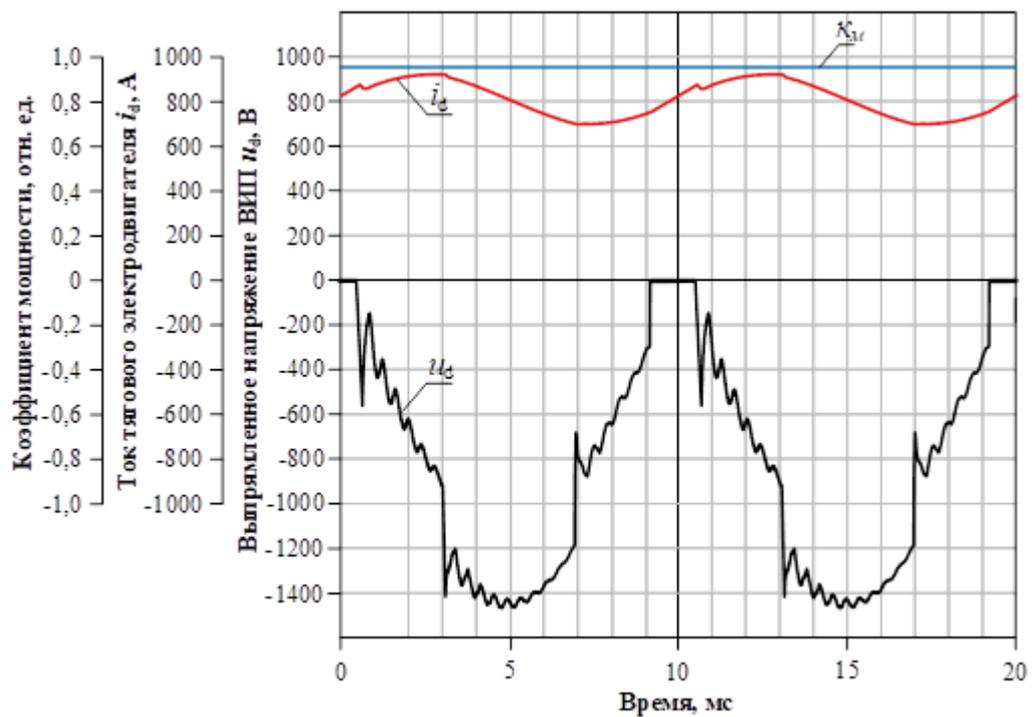


Рисунок 3.39 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_M) на 3,5 зоне регулирования напряжения

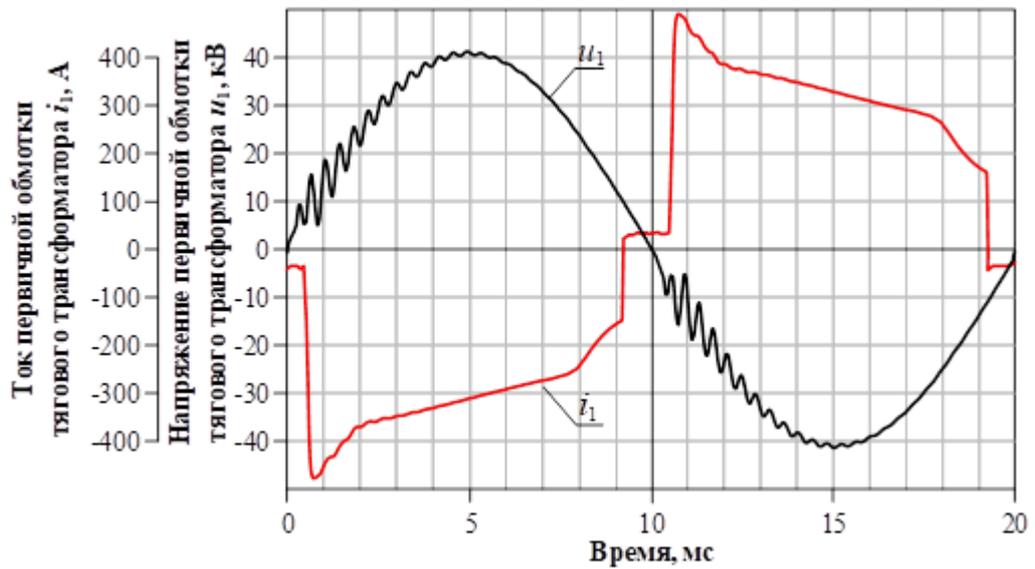


Рисунок 3.40 – Форма кривых напряжения (u_1) и тока (i_1) на первичной обмотке ТТ электровоза при работе транзисторного ВИП с исключением ББР на 4 зоне регулирования напряжения

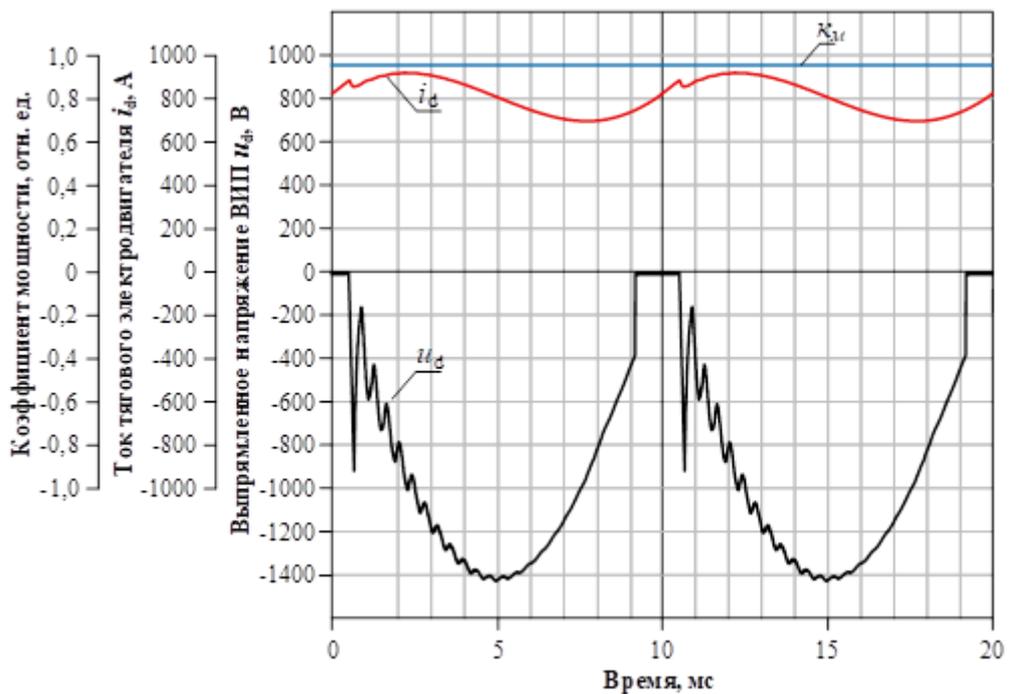


Рисунок 3.41 – Форма кривых при работе транзисторного ВИП: выпрямленное напряжение (u_d), выпрямленный ток (i_d), коэффициент мощности (K_m) на 4 зоне регулирования напряжения

Полученные диаграммы кривых электромагнитных процессов позволяют сделать вывод о работоспособности системы рекуперативного торможения с ВИП

на базе *IGBT*-транзисторов при исключении ББР из силовой цепи электровоза на всех зонах регулирования напряжения. Далее представлен анализ численных показателей, полученных в результате математического моделирования.

В таблице 3.2 представлены результаты математического моделирования работы электровоза с транзисторным ВИП и исключением ББР.

Таблица 3.2 – Результаты математического моделирования

№ зоны	Коэффициент мощности электровоза K_M , отн. ед.	Активная мощность рекуперации, P_a , кВт	Рекуперированный ток, i_p , А	Выпрямленное напряжение ВИП, U_d , В	Ток ТЭД I_d , А	Потери мощности в ББР, в расчете на один ТЭД, $\Delta P_{ББР}$, кВт	Падение напряжения на ББР, В
4	0,9775	6610,2	288,4	1079	810	94,5	116,7
3,5	0,9708	5923,8	252,3	966,5			
3	0,9641	4917,5	217,9	809,9			
2,5	0,9501	4256,8	185	699,6			
2	0,9274	3281,8	152,1	536,3			
1,5	0,9201	2604,6	123,6	425,5			
1	0,9132	1628,8	93,1	269,1			
0,5	0,9024	1154,7	47,2	196,7			

По данным таблицы 3.2 построены соответствующие зависимости, рисунок 3.50-3.52.

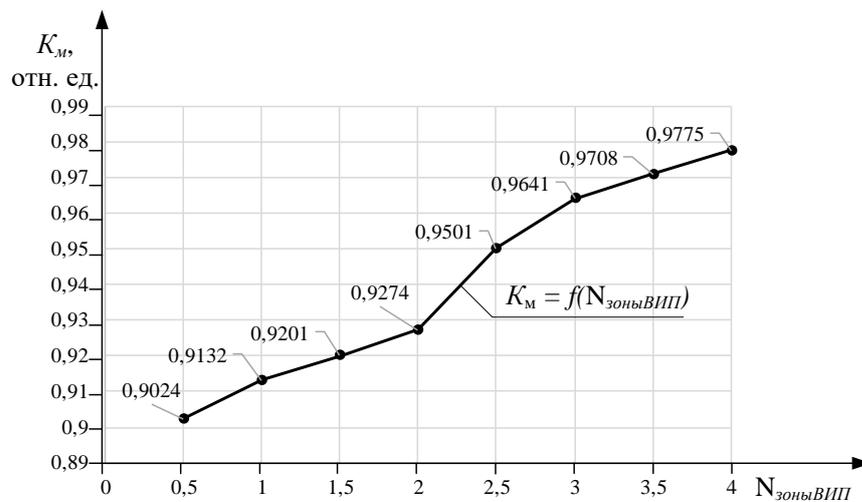


Рисунок 3.50 – Зависимость коэффициента мощности от зоны регулирования напряжения транзисторного ВИП

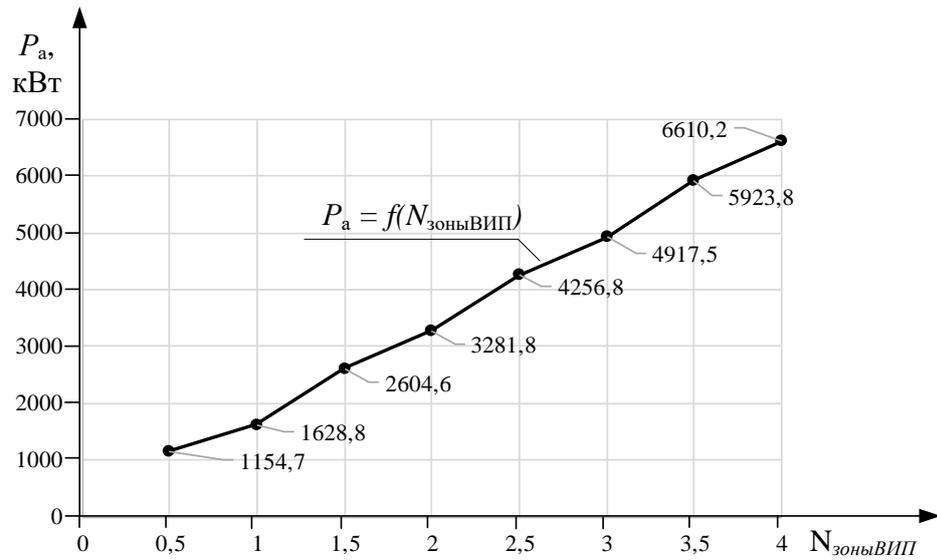


Рисунок 3.51 – Зависимость активной мощности на первичной обмотке тягового трансформатора от зоны регулирования напряжения транзисторного ВИП

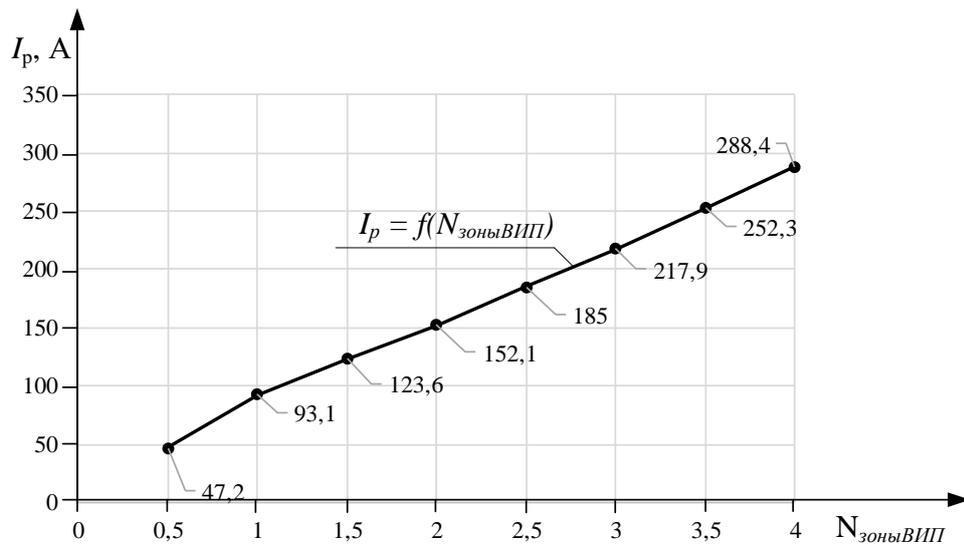


Рисунок 3.52 – Зависимость тока рекуперации от зоны регулирования напряжения транзисторного ВИП

На рисунке 3.53 показана характеристика рекуперированного тока электровозом в контактную сеть при регулировании тормозной силы по каналу ВИП. Зеленым цветом обозначена область увеличения возврата тока в контактную сеть до полной четвертой зоны регулирования напряжения ВИП.

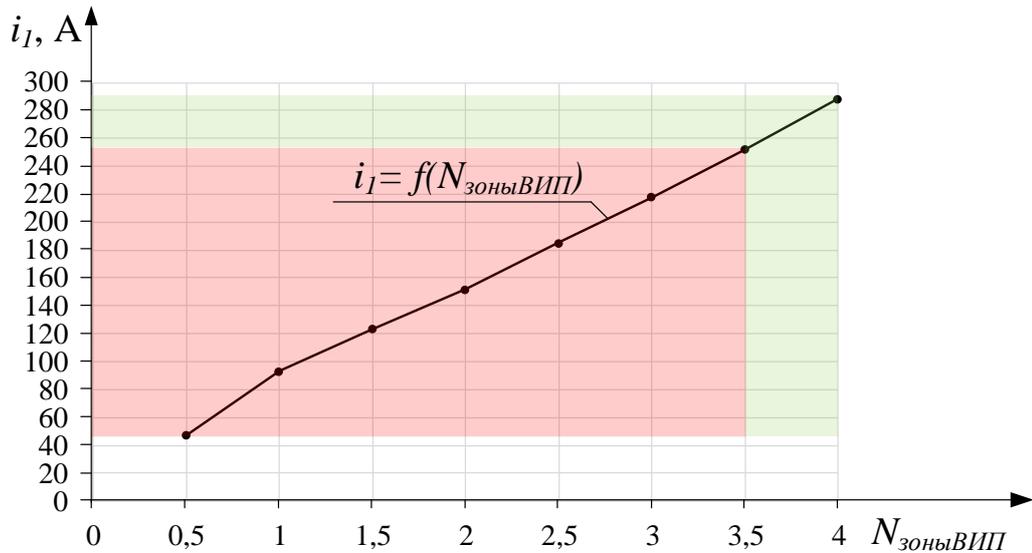


Рисунок 3.53 – Зависимость тока, рекуперуемого электровозом, от зоны регулирования напряжения выпрямительно-инверторного преобразователя

На рисунке 3.54 показана зависимость максимальной скорости движения электровоза в режиме рекуперативного торможения от номера зоны выпрямительно-инверторного преобразователя. Зеленым цветом также обозначена область увеличения максимальной скорости применения режима рекуперации при регулировании тормозной силы по каналу ВВП.

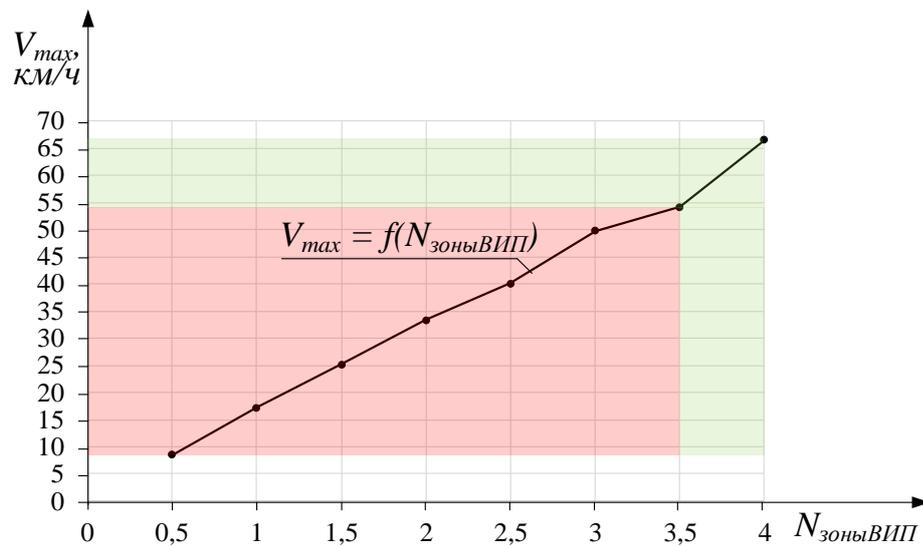


Рисунок 3.54 – Зависимость максимальной скорости движения электровоза в режиме рекуперативного торможения от зоны выпрямительно-инверторного преобразователя

3.6 Построение внешних характеристик генератора и выпрямительно-инверторного преобразователя, полученных в процессе проведения математического моделирования

В рамках моделирования были получены данные для построения внешних характеристик генератора и инвертора с целью доказательства устойчивой работоспособности системы рекуперативного торможения при его реализации без ББР. Внешние характеристики были получены с помощью блока *XY GRAPH*, рисунок 3.55.

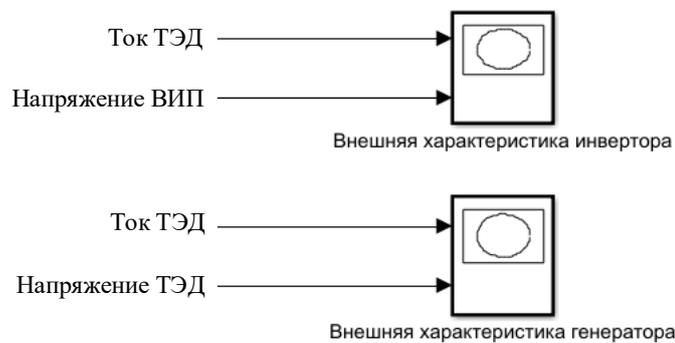


Рисунок 3.55 – Внешний вид блока *XY GRAPH* для получения внешних характеристик генератора и инвертора

Пример построения внешней характеристики вышеописанным блоком представлен на рисунке 3.56.

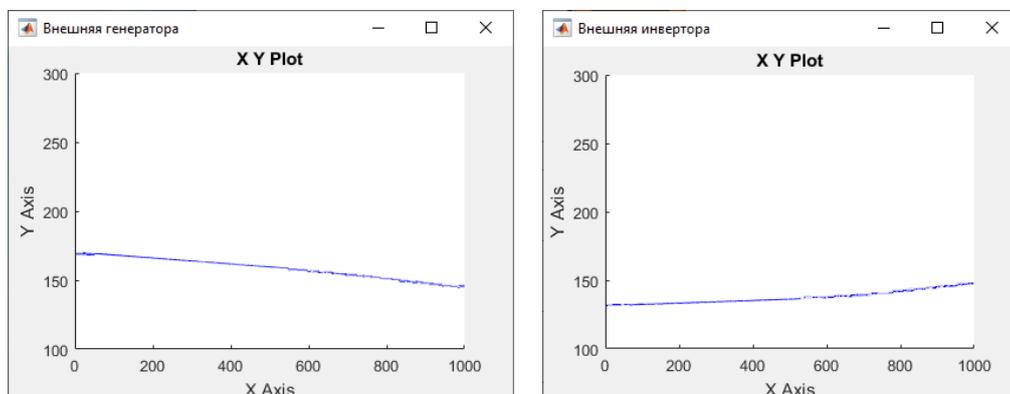


Рисунок 3.56 – Построение внешних характеристик генератора и инвертора блоком *XY GRAPH* на примере 0.5 зоны регулирования напряжения ВИП

Результаты построения внешних характеристик, полученных во время моделирования представлены на рисунке 3.57.

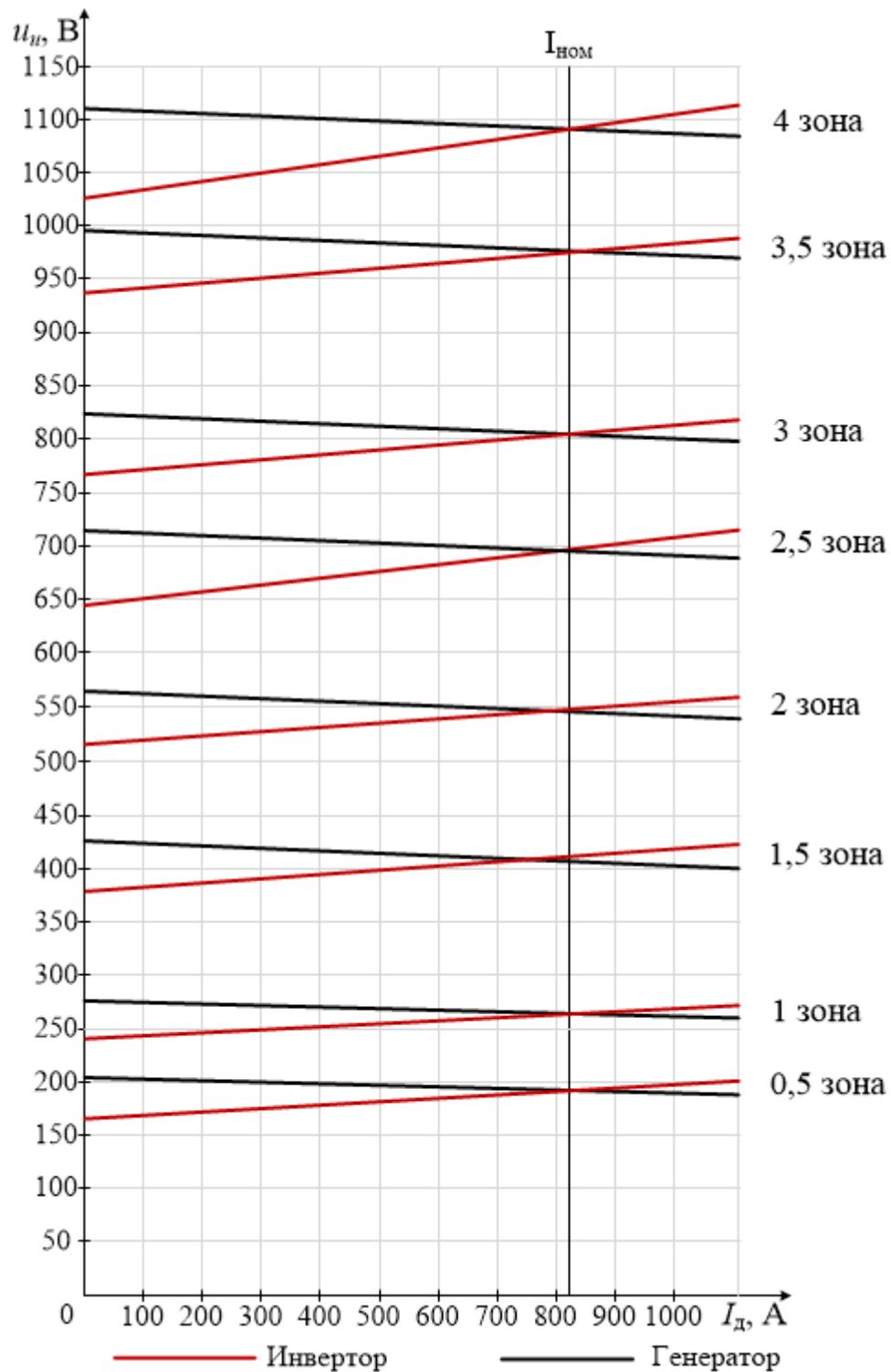


Рисунок 3.57 – Внешние характеристики генератора и инвертора при работе транзисторного ВИП с предлагаемым алгоритмом управления и исключением ББР из якорной цепи ТЭД

Внешние характеристики генератора и инвертора на базе *IGBT*-транзисторов, полученные в результате математического моделирования, также показывают, что система является статически устойчивой при исключении ББР из якорной цепи ТЭД при реализации предлагаемого алгоритма управления ВИП и в полной мере отражают качественное соответствие теоретическим представлениям, рассмотренным в разделе 2.

3.7 Выводы по разделу 3

1 Проведено математическое моделирование в среде *Matlab/Simulink* для системы «тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз» разработанного способа реализации рекуперативного торможения без ББР, в рамках которого получены временные диаграммы электромагнитных процессов, протекающих в электровозе с транзисторным ВИП, свидетельствующие об устойчивой работе системы рекуперативного торможения при исключении ББР.

2 Проведена оценка адекватности работы математической модели в сравнении с физическим экспериментальным исследованиям, погрешность при проведении моделирования не превышает 10 %.

3 На математической модели построены внешние характеристики генератора и инвертора на базе *IGBT*-транзисторов при исключении ББР из якорной цепи ТЭД.

4 За счет расширения области тормозных характеристик с 3,5 до 4-ой зоны регулирования напряжения ВИП повышается скорость электровоза в режиме рекуперативного торможения на 12 км/ч, при этом увеличивается величина рекуперированного тока в контактную сеть на 12 %, а активная мощность рекуперации на 10 %.

4 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

Для подтверждения теоретических положений предлагаемого технического решения и определения адекватности разработанной в среде *Matlab/Simulink* математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» были проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов на физической модели.

4.1 Проверка работоспособности силовой части выпрямительно-инверторного преобразователя на базе *IGBT*-транзисторов с предлагаемым способом реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов

Проверка работоспособности производилась под напряжением контактной сети на полноразмерном стенде в Сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский» филиала "Восточно-Сибирский ООО «ЛокоТех-Сервис», осуществляющем режим взаимонагрузки тяговых двигателей. Структурная схема стенда для проведения испытаний приведена на рисунке 4.1. Экспериментальные исследования проводились в условиях напряжения контактной сети ($U_{\text{кС}}$) через токоприемник. Станция включает в себя тяговый трансформатор (Т1), к выводам которого подключен тиристорный ВИП для питания тягового двигателя (ОВ1, Д1), создающего вращающий момент для второго ТЭД (ОВ2, Д2), который получает питание от опытного транзисторного ВИП.

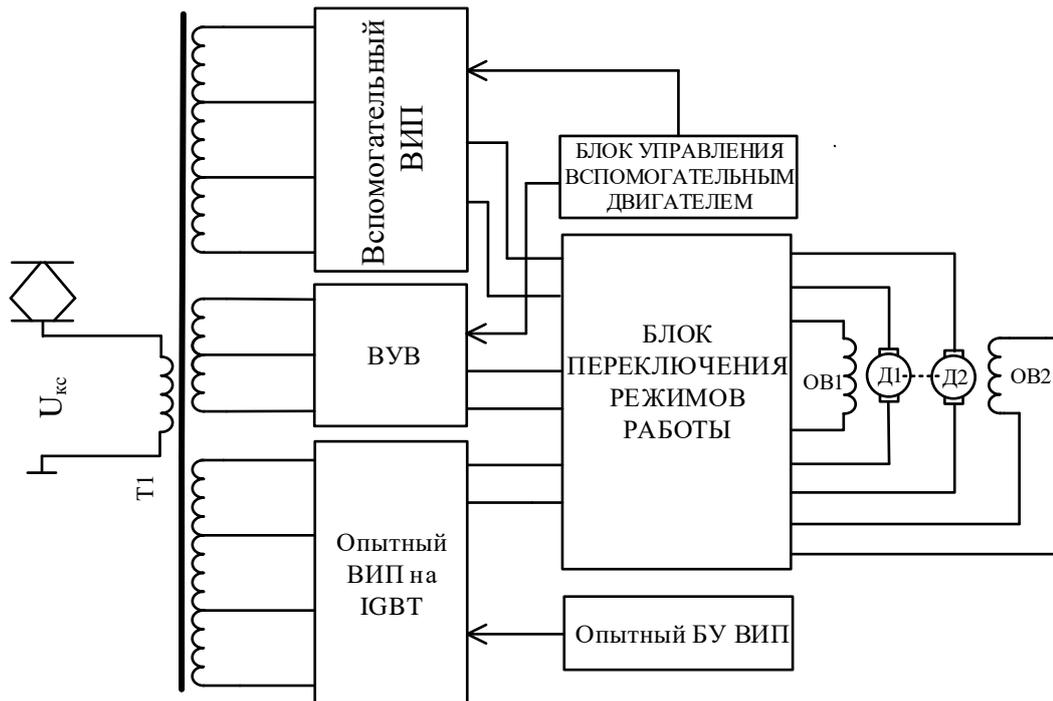
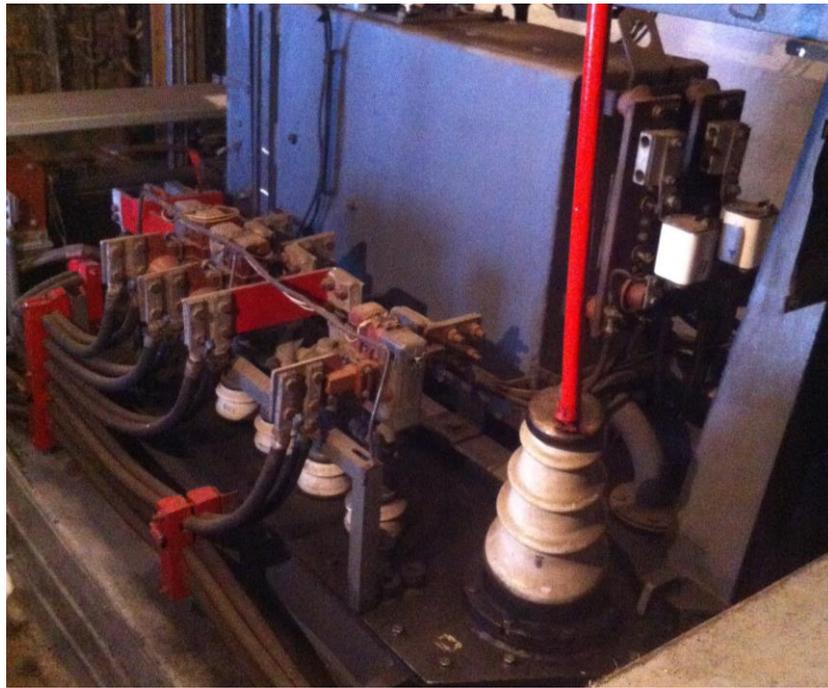


Рисунок 4.1 – Функциональная схема стенда для проведения испытаний силовой части ВИП

Фото испытательного стенда на базе СЛД «Боготол-Сибирский» представлено на рисунках 4.2 – 4.8.



Рисунок 4.2 – Токоприёмник электровоза, питание испытательного стенда от контактной сети



**Рисунок 4.3 – Тяговый трансформатор испытательной станции
СЛД «Боготол-Сибирский»**



**Рисунок 4.4 – Силовая часть испытательного стенда с измерительным трансформатором
типа ЗНОЛ-СВЭЛ-35, для замера напряжения в первичной обмотке тягового
трансформатора**



Рисунок 4.5 – Тиристорный выпрямительно-инверторный преобразователь для питания вспомогательного тягового электрического двигателя

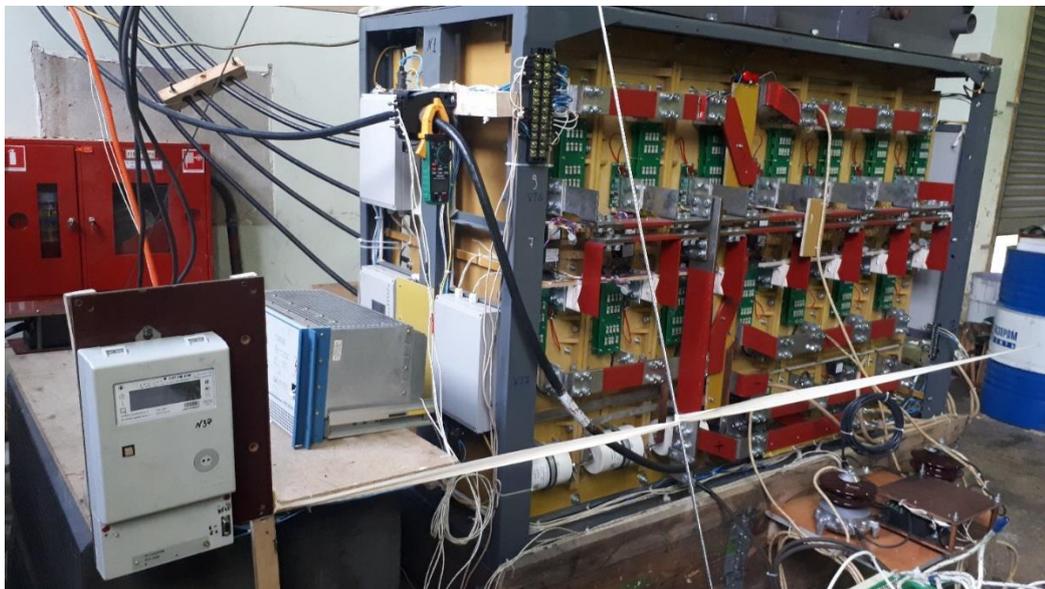


Рисунок 4.6 – ВИП на базе IGBT-транзисторов и система измерения параметров стенда

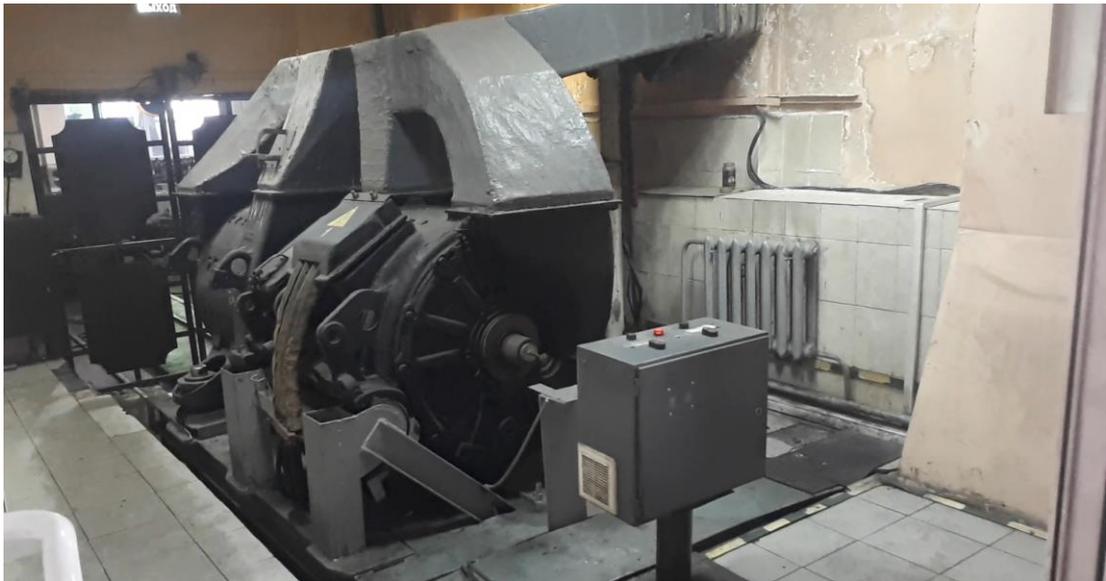
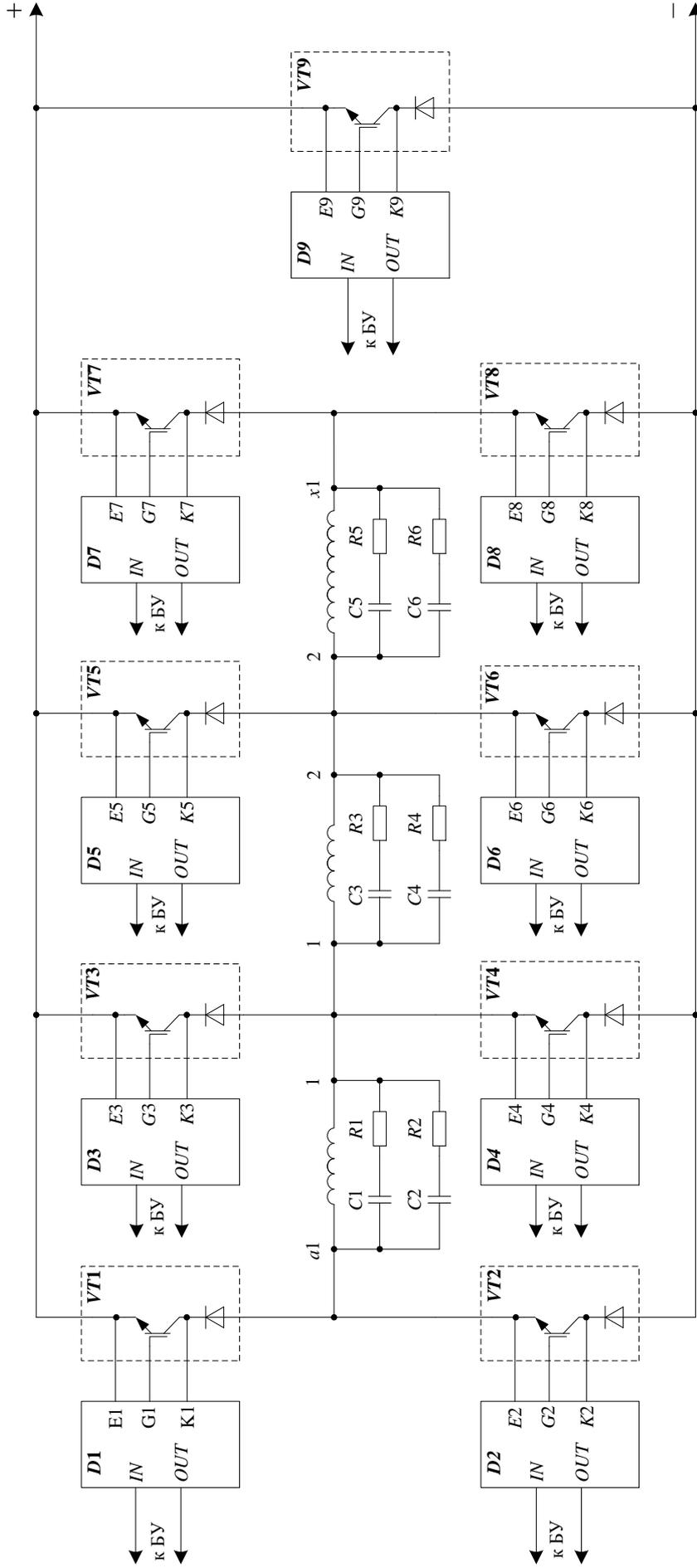


Рисунок 4.7 – Тяговые электрические двигатели, включенные методом взаимной нагрузки (нагрузка ВИП на базе *IGBT*-транзисторов)



Рисунок 4.8 – Пульт управления испытательной станцией СЛД «Боготол-Сибирский» Красноярской железной дороги

Электрическая принципиальная схема опытного ВИП на базе *IGBT*-транзисторов представлена на рисунке 4.9.



VT1-VT9 – транзисторные плечи преобразователя; БУ – блок управления; а1-1-2-х1 – выводы тягового обмотки трансформатора;

C1-C6, R1-R6 – снабберные RC-цепи; D1-D9 – драйвер IGBT-транзистора

Рисунок 4.9 – Принципиальная электрическая схема опытного транзисторного ВИП

Транзисторные плечи $VT1$, $VT2$, $VT7$, $VT8$, $VT9$ состоят из четырех параллельно включенных $IGBT$ -транзисторов, а плечи $VT3$, $VT4$, $VT5$, $VT6$ из трех параллельно подключенных транзисторов.

Принципиальная электрическая схема транзисторных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя показана на рисунках 4.10 и 4.11.

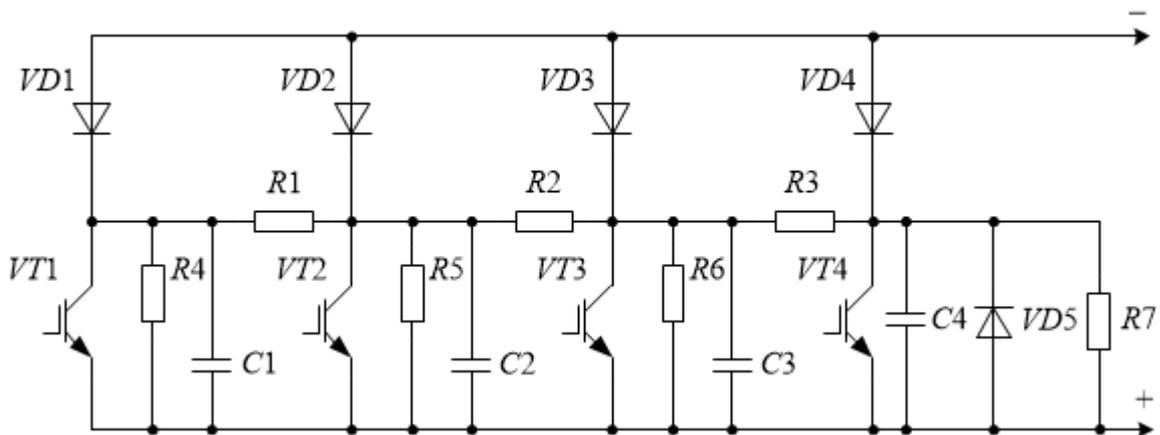


Рисунок 4.10 – Принципиальная электрическая схема транзисторных плеч $VT1$, $VT2$, $VT7$, $VT8$, $VT9$ опытного транзисторного ВИП

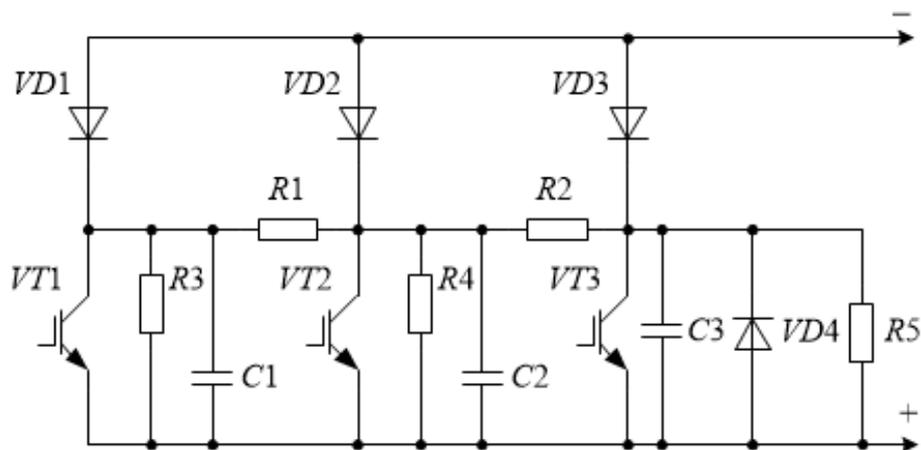


Рисунок 4.11 – Принципиальная электрическая схема транзисторных плеч $VT3$, $VT4$, $VT5$, $VT6$ опытного транзисторного ВИП

Испытуемый алгоритм управления выпрямительно-инверторным преобразователем представлен в подразделе 2.2.

4.2 Результаты проведения испытаний выпрямительно-инверторного преобразователя на базе *IGBT*-транзисторов с предлагаемым алгоритмом управления на стенде в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский»

Измерения и обработка данных осуществлялась комплектом измерительно-вычислительного оборудования, который содержит следующие приборы:

- осциллограф четырехканальный *Tektronix TDS2014C*;
- осциллограф четырехканальный *Tektronix TDS2024B*;
- цифровой вольтметр В7-34;
- трансформатор тока Т-0,66;
- датчики напряжения *LV100SP/84*;
- стенд для проведения предварительных испытаний силовой части ВИП.

Полученные осциллограммы электромагнитных процессов представлены на рисунках 4.12 – 4.17.

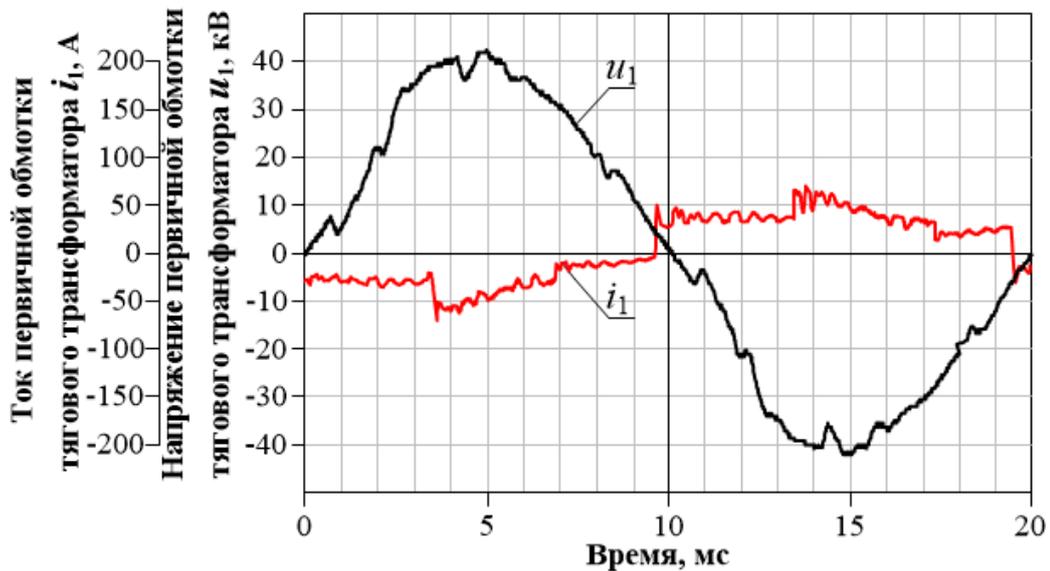


Рисунок 4.12 – Напряжение и ток в первичной обмотке тягового трансформатора для 1,5 зоны регулирования при $I_d = 400$ А

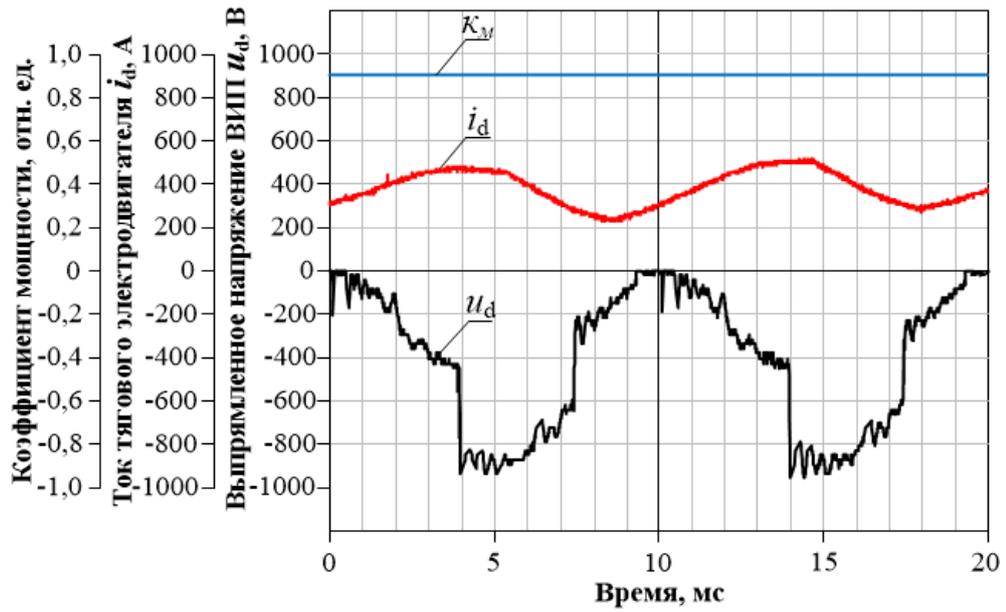


Рисунок 4.13 – Напряжение и ток тягового двигателя для 1,5 зоны регулирования при $I_d = 400$ А

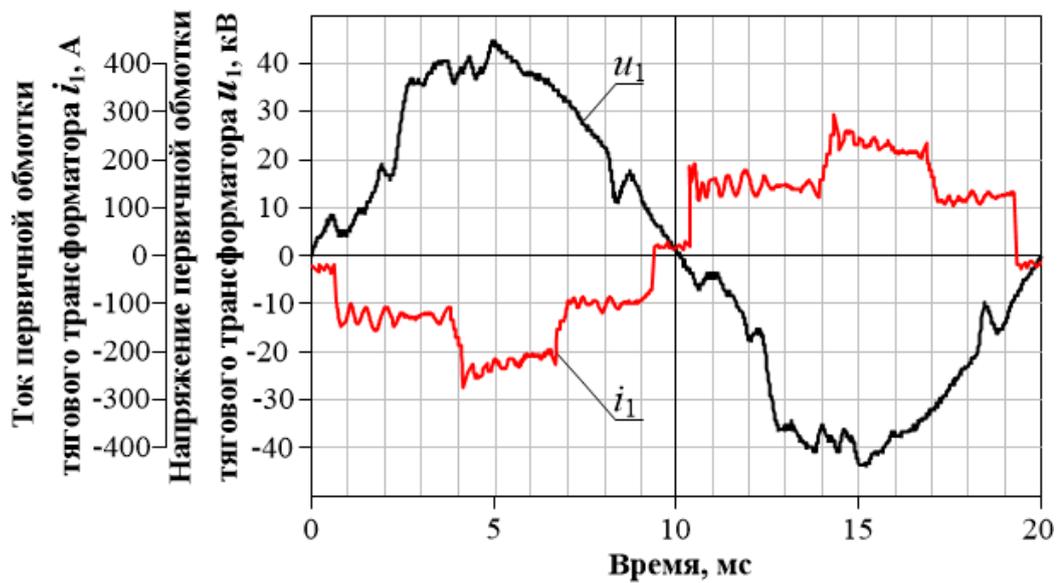


Рисунок 4.14 – Напряжение и ток в первичной обмотке тягового трансформатора для 2,5 зоны регулирования при $I_d = 810$ А

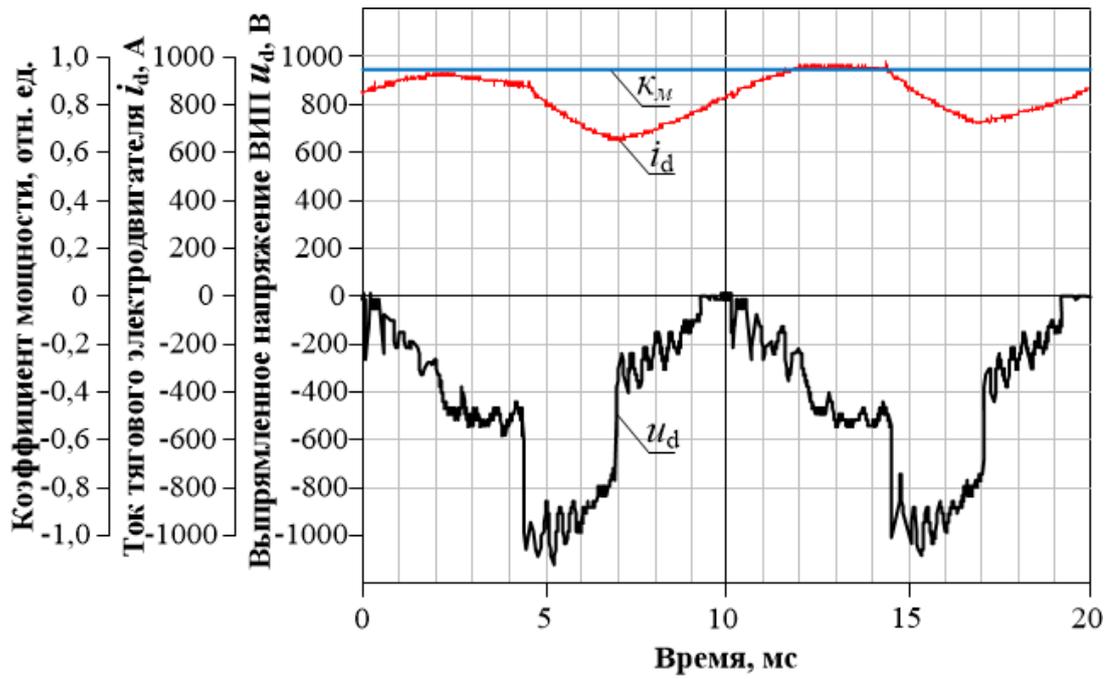


Рисунок 4.15 – Напряжение и ток тягового двигателя для 2,5 зоны регулирования при $I_d = 810$ А

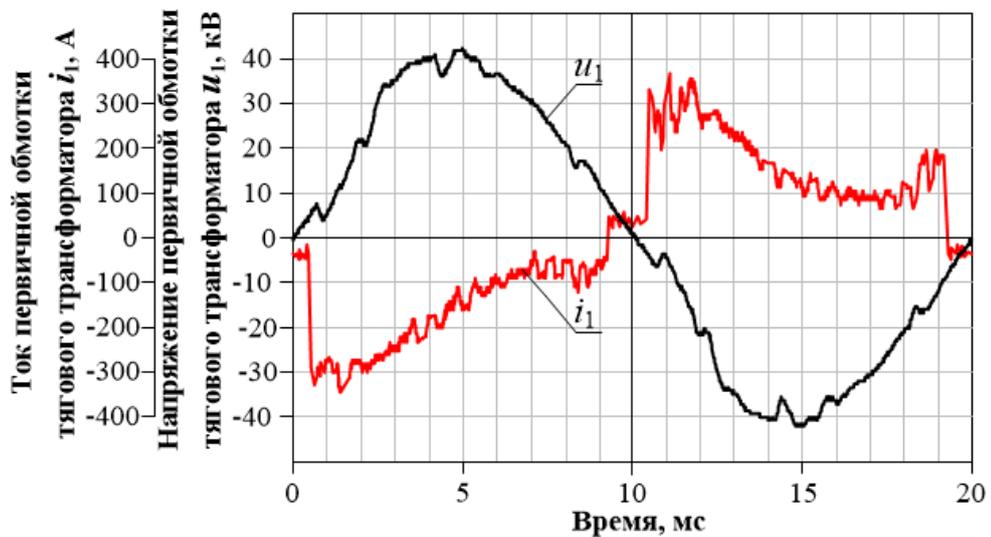


Рисунок 4.16 – Напряжение и ток в первичной обмотке тягового трансформатора для 3 зоны регулирования при $I_d = 810$ А

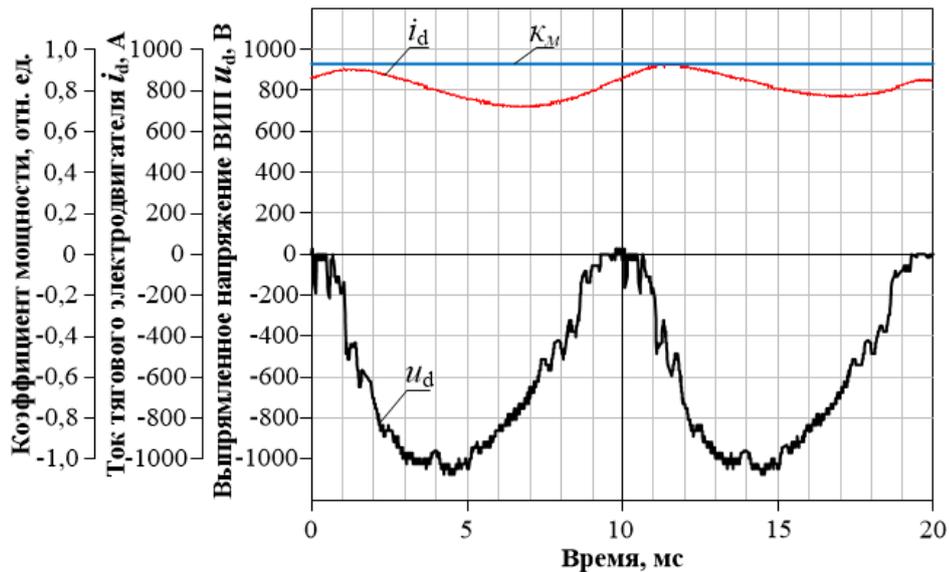


Рисунок 4.17 – Напряжение и ток тягового двигателя для 3 зоны регулирования при $I_d = 810 \text{ А}$

Испытательная станция не позволила достигнуть достаточного количества оборотов тягового электрического двигателя для реализации полной четвертой зоны регулирования напряжения транзисторного ВИП, однако, полученные диаграммы кривых электромагнитных процессов позволяют сделать вывод о работоспособности системы рекуперативного торможения с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении ББР из силовой цепи электровоза.

4.3 Техничко-экономическая оценка предлагаемого технического решения для повышения эффективности режима рекуперативного торможения

Процент увеличения рекуперации электрической энергии в тяговую сеть определяет экономическую эффективность предлагаемых мероприятий.

С целью увеличения эффективности работы системы рекуперативного торможения, предполагается замена БУ и ВИП, а также изъятие ББР из якорной

цепи электровоза. Расчет показателя годовой экономической эффективности производится на один электровоз серии 2ЭС5К.

Расчёт проведён на основании «Методических указаний по оценке инвестиционных проектов» [62]. Расчет фонда оплаты труда на модернизацию проведен согласно положению о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений ОАО «РЖД» и часовой тарифной ставке.

4.3.1 Расчет капитальных затрат на оснащение комплексным оборудованием в целях повышения эффективности режима рекуперативного торможения электровоза 2ЭС5К

Расчет затрат начинается с оценки капитальных вложений K_B на стоимость необходимого оборудования, материалов, оплаты труда работников, задействованных в усовершенствовании предлагаемой системы, а также затрат на демонтаж блоков балластных резисторов.

Стоимость комплектующих C_3 , применяемых для изготовления предлагаемого выпрямительно-инверторного преобразователя и блока управления БУ ВИП, представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сметная стоимость комплектующих

Тип оборудования	Количество, ед	Цена, руб.	Стоимость, тыс.руб.
Диод с радиатором	72	12000	864
Транзистор с радиатором	72	34400	2476,8
Драйвер транзистора	72	20000	1440
БУ ВИП	2	100000	200
Цепи защиты	72	10000	720
Медная шина, кг	569,6	590	336,064
БП ВИП	4	20000	80
Металлоконструкция	4	10000	40
Монтажный провод, м	300	2500	2,5
Итого			6159,364

В таблице 4.2 представлена тарифная ставка за сборку и монтаж предлагаемого ВИП и БУ в расчете на один электровоз.

Таблица 4.2 – Заработная плата за сборку и установку

Вид работ	Разряд работ	Трудоемкость, чел. час	Часовая тарифная ставка, руб.	Сумма, тыс. руб.
Сборка предлагаемого ВИП и блока управления БУ ВИП	6	138	117,86	16,25
Монтаж ВИП и БУ ВИП	6	240	117,86	28,21
Демонтаж ББР с одного электровоза серии 2ЭС5К	6	66	117,86	7,67
Итого				51,88

Фонд оплаты труда (ФОТ) определяется выражением (4.1)

$$\text{ФОТ} = E_{\text{озп}} + E_{\text{дзп}}, \quad (4.1)$$

где $E_{\text{озп}}$ – основная заработная плата, руб.;

$E_{\text{дзп}}$ – дополнительная заработная плата, руб..

Основная и дополнительная заработные платы определяются по выражениям (4.2) и (4.3)

$$E_{\text{озп}} = C_c \times (1 + K_{\text{пр}}) \times (1 + K_{\text{рн}} + K_{\text{св}}), \quad (4.2)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент премиальных, принимается 30 %;

$K_{\text{рн}}$ – районный коэффициент, принимается 30 %;

$K_{\text{св}}$ – северный коэффициент, принимается 30 %.

$$E_{\text{дзп}} = 0,09 \times E_{\text{озп}}. \quad (4.3)$$

$$E_{\text{озп}} = 51,88 \times 10^3 \times (1 + 0,30) \times (1 + 0,3 + 0,3) = 107,9 \text{ тыс. руб.},$$

$$E_{\text{дзп}} = 0,09 \times 107,9 \times 10^3 = 9,7 \text{ тыс. руб.}$$

Определяем фонд оплаты труда

$$\text{ФОТ} = 107,9 \times 10^3 + 9,7 \times 10^3 = 117,6 \text{ тыс. руб.}$$

Отчисления на социальные нужды $E_{\text{соц}}$ определяются по выражению (4.4)

$$E_{\text{соц}} = 0,3 \times \text{ФОТ}, \quad (4.4)$$

где 0,3 – тариф страховых взносов.

$$E_{\text{соц}} = 0,3 \times 117,6 \times 10^3 = 35,3 \text{ тыс. руб.}$$

Итого капитальные вложения определяются выражением (4.5)

$$K_B = C_9 + \text{ФОТ} + E_{\text{соц}} + \mathcal{E}_{\text{прочие}}, \quad (4.5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{прочие}}$ – прочие эксплуатационные расходы, определяются по формуле (4.6)

$$\mathcal{E}_{\text{прочие}} = 1,8 \times \text{ФОТ} \quad (4.6)$$

$$\mathcal{E}_{\text{прочие}} = 1,8 \times 117,6 \times 10^3 = 212 \text{ тыс. руб.}$$

Далее определим капитальные вложения

$$K_B = 6159,364 \times 10^3 + 117,6 \times 10^3 + 35,3 \times 10^3 + 212 \times 10^3 = 6524,264 \text{ тыс. руб.}$$

4.3.2 Расчет экономии денежных средств от увеличения возврата электрической энергии в контактную сеть

Определим годовую экономическую эффективность усовершенствованной системы рекуперативного торможения по формуле (4.7)

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{э}} + \mathcal{E}_{\text{об}}, \quad (4.7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{э}}$ – денежные средства от увеличения возвращаемой в тяговую сеть электроэнергии;

$\mathcal{E}_{\text{об}}$ – стоимость снятого оборудования.

Экономия денежных средств от повышения размера рекуперированной энергии электровозом 2ЭС5К определяется по формуле (4.8)

$$\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{э}} = A_{\text{Тг}} \times C_{\text{кВТч}} \times 1,2 - A_{\text{Тг}} \times C_{\text{кВТч}}, \quad (4.8)$$

где $A_{\text{Тг}}$ – величина рекуперированной электрической энергии в контактную сеть для типового электровоза 2ЭС5К на 2021 год кВтч;

$C_{\text{кВТч}}$ – среднесетевая стоимость электрической энергии (1кВтч);

1,2 – коэффициент увеличения размера рекуперированной электроэнергии.

Произведем расчет для одного электровоза серии 2ЭС5К

$$\mathcal{E}_{\text{эф}}^{\text{э}} = 1,12 \times 10^6 \times 3,58 \times 1,2 - 1,12 \times 10^6 \times 3,58 = 801,92 \text{ тыс.руб.}$$

Рассчитаем экономию денежных средств, от демонтированного оборудования электровоза 2ЭС5К (4.9). Усовершенствованная силовая цепь электровоза переменного тока позволит исключить 2 блока балластных резисторов (ББР-64) стоимостью 240 тыс. руб. за один блок.

$$\mathcal{E}_{об} = \sum N_i \times C_{об}, \quad (4.9)$$

где N_i – количество оборудования, снятого с электровоза 2ЭС5К;

$C_{об}$ – стоимость снятого оборудования, руб.

$$\mathcal{E}_{об} = 2 \times 240 \times 10^3 = 480 \text{ тыс.руб.}$$

Общий экономический эффект от внедрения энергосберегающего тягового преобразователя и исключения ББР за счет экономии электрической энергии и снятого оборудования составит

$$\mathcal{E}_{эфф} = 801,92 \times 10^3 + 480 \times 10^3 = 1281,92 \text{ тыс.руб.}$$

Срок окупаемости составит (4.10)

$$T_{ок} = \frac{K_B}{\mathcal{E}_{эфф} - \mathcal{E}_{доп}}, \quad (4.10)$$

где $\mathcal{E}_{доп}$ – дополнительные текущие затраты при модернизации силовой цепи в режиме рекуперативного торможения для электровоза 2ЭС5К.

Дополнительные текущие затраты составят (4.11)

$$\mathcal{E}_{доп} = \mathcal{E}_{ам} + \mathcal{E}_{то}, \quad (4.11)$$

где $\mathcal{E}_{ам}$ – амортизационные отчисления;

$\mathcal{E}_{то}$ – затраты на техническое обслуживание.

Амортизационные отчисления рассчитываются исходя из нормативного срока службы оборудования (4.12)

$$\mathcal{E}_{ам} = \frac{K_B}{t_H}, \quad (4.12)$$

где t_n – срок службы оборудования.

$$\Theta_{ам} = \frac{6524,264 \times 10^3}{30} = 217,47 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на техническое обслуживание ВИП (4.13)

$$\Theta_{то} = 0,02 \times K_v, \quad (4.13)$$

$$\Theta_{то} = 0,02 \times 6524,264 \times 10^3 = 130,48 \text{ тыс.руб.}$$

Дополнительные текущие затраты

$$\Theta_{доп} = 217,47 \times 10^3 + 130,48 \times 10^3 = 347,95 \text{ тыс.руб.}$$

Срок окупаемости составит

$$T_{ок} = \frac{6524,264 \times 10^3}{1281,92 \times 10^3 - 347,95 \times 10^3} = 7 \text{ лет.}$$

Таким образом, в ходе проведенных расчетов была получена годовая экономическая эффективность от внедрения энергосберегающего тягового преобразователя и исключения ББР с электровоза 2ЭС5К в размере 1281,92 тыс. руб. За счет данного проекта модернизации срок окупаемости предлагаемой системы рекуперативного торможения составляет 7 года в разрезе одного оборудования одного электровоза. При оборудовании всех электровозов серии «Ермак», работающих на Восточном полигоне, годовая экономия денежных средств от увеличения отдачи электроэнергии в контактную сеть без учета стоимости снятого оборудования составит 1133112,96 тыс. руб.

4.4 Выводы по разделу 4

1 С целью подтверждения теоретических положений предлагаемого технического решения и определения адекватности разработанной в среде *Matlab/Simulink* математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов на физической модели в условиях напряжения контактной сети в сервисном локомотивном депо «Боготол-Сибирский»;

2 Получены временные диаграммы электромагнитных процессов работы электровоза в режиме рекуперации с транзисторным ВИП при исключении ББР, которые имеют качественное и количественное соответствие процессам, полученным при математическом моделировании;

3 Проведена технико-экономическая оценка проекта, годовая экономическая эффективность от внедрения транзисторного ВИП и исключения ББР с электровоза 2ЭС5К в размере 1281,92 тыс. руб., срок окупаемости предлагаемой системы рекуперативного торможения составляет 7 лет. При оборудовании всех электровозов серии «Ермак», работающих на Восточном полигоне, годовая экономия денежных средств от увеличения отдачи электроэнергии в контактную сеть без учета стоимости снятого оборудования составит 1133112,96 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработан алгоритм управления ВИП на базе *IGBT*-транзисторов, который в зависимости от тока ТЭД обеспечивает подбор и регулировку угла отпирания транзисторов $\beta_w = var$ и $W_w = var$ с целью обеспечения положительного наклона внешней характеристики ВИП в режиме инвертора и статической устойчивости системы «генератор-инвертор» без применения ББР в якорной цепи ТЭД.

2 Проведен расчет внешних характеристик генератора и инвертора на базе *IGBT*-транзисторов при наличии и исключении ББР из якорной цепи ТЭД, который показал, что система имеет статическую устойчивость при исключении ББР и реализации предлагаемого алгоритма управления транзисторным ВИП на всех 4-х зонах регулирования напряжения ВИП.

3 Исключение ББР позволит расширить область тормозных характеристик электровоза с 3,5 до полной 4-ой зоны регулирования напряжения ВИП, за счет этого повышается скорость электровоза в режиме рекуперативного торможения на 12 км/ч, при этом увеличивается величина рекуперированного тока на 12 %, а активная мощность рекуперации на 10 %.

4 За счет исключения ББР повышается КПД электрической цепи электровоза переменного тока, работающего в режиме рекуперативного торможения в среднем на 8,9 % для 4-ой зоны регулирования ВИП, 11,8 % для 3-ей зоны, 19,2 % для 2-ой зоны и 54,7 % для 1-ой зоны регулирования напряжения.

5 Проведена оценка адекватности работы математической модели в сравнении с физическим экспериментальным исследованием, которая показала, что погрешность при проведении моделирования не превышает 10 %.

6 Проведено математическое моделирование в среде *Matlab/Simulink* для системы «тяговая подстанция-контактная сеть-электровоз», в рамках которого получены диаграммы кривых электромагнитных процессов, подтверждающие

работоспособность разработанного алгоритма управления транзисторным ВИП при исключении ББР, также получены данные для построения внешних характеристик системы «генератор-инвертор», которые показывают, что система является статически устойчивой при исключении ББР из якорной цепи.

7 Проведены экспериментальные исследования предлагаемого способа реализации рекуперативного торможения на экспериментальном стенде СЛД «Боготол-Сибирский», филиала Восточно-Сибирский ООО «ЛокоТех-Сервис» с целью апробирования заявленного способа, полученные диаграммы кривых электромагнитных процессов позволяют сделать вывод о работоспособности системы рекуперативного торможения с ВИП на базе *IGBT*-транзисторов при исключении ББР из силовой цепи электровоза.

8 Разработанный способ реализации рекуперативного торможения рекомендуется к применению на ЭПС переменного тока с коллекторным приводом, оборудованном ВИП на базе *IGBT*-транзисторов. Проведена технико-экономическая оценка, годовой экономический эффект от внедрения транзисторного ВИП и исключения ББР с электровоза 2ЭС5К в размере 1281,92 тыс. руб., срок окупаемости предлагаемой системы рекуперативного торможения составляет 7 лет. При оборудовании всех электровозов серии «Ермак», работающих на Восточном полигоне, годовая экономия денежных средств от увеличения отдачи электроэнергии в контактную сеть без учета стоимости снятого оборудования составит 1133112,96 тыс. руб.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка чувствительности и быстродействия алгоритма управления выпрямительно-инверторным преобразователем на базе *IGBT*-транзисторов при реализации предлагаемого способа обеспечения электрической устойчивости рекуперативного торможения при бросках тока и напряжения в контактной сети при аварийных режимах работы, а также при пониженном и повышенном напряжении в контактной сети.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ББР – блок балластных резисторов

БУ – блок управления

ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь

КПД – коэффициент полезного действия

КРМ – компенсатор реактивной мощности

ВУВ – выпрямительная установка возбуждения

ТТ – тяговый трансформатор

ТЭД – тяговый электрический двигатель

ЭПС – электроподвижной состав

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием : монография. // Ю.М. Кулинич. – Хабаровск: изд-во ДВГУПС, 2001. – 153 с.

2 Алексеев, А.С. Система автоматического регулирования тока коллекторных тяговых двигателей электровоза : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Алексеев Алексей Сергеевич ; Российский университет транспорта. - Москва, 2009. - 302 с.

3 Бабков, Ю.В. Модернизация электропривода тепловозов и электровозов с тяговыми электродвигателями постоянного тока / Ю.В. Бабков, К.С. Перфильев, В.Ю. Евсеев, В.В. Грачев, Д.Н. Курилкин. – Текст: непосредственный // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов : материалы третьей международной научно-практической конференции ; под ред. И.К. Лакина. – Москва, 2018. – с. 114-120.

4 Бакланов, А.А. Повышение эффективности и надежности рекуперативного торможения электроподвижного состава / А.А. Бакланов, С.В. Швецов, В.О. Мельк, А.В. Раздобаров. – Текст: непосредственный // Вестник ВЭЛНИИ. – 2008. – №2(56) – с. 307-312.

5 Бакран, М.М. Применение тяговых преобразователей на базе транзисторов *IGBT* / М.М. Бакран. – Текст: непосредственный // Железные дороги мира. - 2002. – № 5 – с. 34-38.

6 Боршуков, Е. Тиристорный преобразователь с одноконденсаторной схемой искусственной коммутации и его применение для целей тяги / Е. Боршуков. –Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 5 – с. 16–20.

7 Буняева, Е.В. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения электровозов переменного тока : специальность

05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Буняева Екатерина Викторовна ; ДВГУПС. – Хабаровск., 2013. – 158 с.

8 Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: учебник для вузов железнодорожного транспорта / А.Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с. – Текст: непосредственный.

9 Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов: учебное пособие / С.Б. Васютинский. – Л.: Энергия, 1970. – 432 с. – Текст: непосредственный.

10 Власьевский, С.В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов однофазно-постоянного тока с рекуперативным торможением : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Власьевский Станислав Васильевич // – М.: Изд-во МГУПС (МИИТ), 2001. – 48 с.

11 Власьевский, С.В. Повышение эффективности выпрямительно-инверторных преобразователей электровозов переменного тока с рекуперативным торможением : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Власьевский Станислав Васильевич ; ДВГУПС. – Хабаровск., 2001. – 396 с.

12 Власьевский, С.В. Электрическое рекуперативное торможение на электровозах переменного тока магистральных железных дорог. Проблемы и эффективность его применения / С.В. Власьевский. – Текст: непосредственный // ЭЭТ. – 2006. – № 1 – с. 21-24.

13 Власьевский, С.В. Эффективность и проблемы применения рекуперативного торможения на электровозах переменного тока / С.В. Власьевский, В.В. Кравчук. – Текст: непосредственный // Вестник ВЭЛНИИ. – 2005. – № 2(49) – с. 147-158.

14 Власьевский, С.В. Эффективность применения рекуперативного торможения на Дальневосточной железной дороге / С.В. Власьевский, В.В.

Кравчук, А.М. Палихов. –Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1975 – № 8 – с. 5-7.

15 Герман-Галкин, С.Г. *Matlab & Simulink*. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

16 Грачев, В.В. Интеллектуальная система управления тяговым приводом постоянного тока / В.В. Грачев, Д.Н. Курилкин, А.В. Грищенко, В.А. Кручек, Ю.В. Бабков, К.С. Перфильев, В.Ю. Евсеев. –Текст: непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта, № 5, 2019. с. 34-37.

17 Грачев, В.В. Усовершенствованный тяговый привод электровозов переменного тока с коллекторными двигателями / В.В. Грачев. – Текст: непосредственный // Ежемесячный производственно-технический и научно-популярный журнал «Локомотив» № 8 (764), август 2020. с. 26-28.

18 Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. №466-р. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/553927831>. – Текст: электронный. (Дата обращения: 13.05.2022).

19 Донской, Д.А. Повышение эффективности электрической тяги электровозов на переменном токе / Д.А. Донской. – Текст: непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2006. – № 5. – с. 19-21.

20 Дьяконов, В.П. *MATLAB 7.*/R2006/R2007: самоучитель* / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с. . – Текст: непосредственный.

21 Ефимов, А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А.А. Ефимов, Р.Т. Шрейнер. – Текст: непосредственный.; под. ред. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.

22 Жиц, М.З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М.З. Жиц. – М.: Энергия, 1974. – 118 с. . – Текст: непосредственный.

23 Засорин, С.Н. Электронная и преобразовательная техника: учебник для вузов железнодорожного транспорта / С.Н. Засорин, В.А. Мицкевич, К.Г.

Кучма; под. ред. С.Н. Засорина. М.: Транспорт. – 1981. – 319 с. . – Текст: непосредственный.

24 Захаревич, С.В. Переходные и установившиеся процессы в схемах электроподвижного состава выпрямительного типа / С.В. Захаревич. – Текст: непосредственный. – Л.: Наука, 1966. – 240 с.

25 Иванов, В.В. Пути повышения энергетических показателей зонных выпрямителей / В.В. Иванов, С.В. Мятёж и др. – Текст: непосредственный. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9. – С. 1441-1445.

26 Иванов, В.С. Повышение коэффициента мощности моторвагонного подвижного состава переменного тока в режиме рекуперативного торможения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванов Владислав Сергеевич ; ДВГУПС. – Хабаровск., 2020. – 202 с.

27 Кабалык, Ю.С. Снижение влияния электровозов переменного тока на форму напряжения в тяговой сети электрифицированных железных дорог : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кабалык Юрий Сергеевич ; ДВГУПС. – Хабаровск, 2010. – 177 с.

28 Каменев, А.В. Анализ внешней характеристики инвертора системы РИФ для электроподвижного состава переменного тока / А.В. Каменев, Б.К. Бурдасов. – Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1982. – № 4 – с. 18-21.

29 Каменев, А.В. Импульсные преобразователи для электроподвижного состава переменного тока / А.В. Каменев. – Текст: непосредственный. – Вестник ВНИИЖТ, 1977, №5, с. 13-18.

30 Каменев, А.В. Особенности рекуперативного торможения электроподвижного состава переменного тока системы РИФ-2 / А.В. Каменев,

Б.К. Бурдасов. – Текст: непосредственный. // Вестник ВНИИЖТ. – 1981. – № 5 – с. 23-26.

31 Каменев, А.В. Энергетические показатели рекуперативного торможения электровозов переменного тока системы РИФ / А.В. Каменев, Б.К. Бурдасов. – Текст: непосредственный. // Вестник ВНИИЖТ. – 1983. – № 3 – с. 15–19.

32 Климаш, В.С. Построение преобразователей фазы и регуляторов качества электроэнергии на основе преобразователей частоты / В.С. Климаш. – Текст: непосредственный // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – Т.1. – № 2. – с. 21-23.

33 Коласс, А. Применение транзисторов *IGBT* на железнодорожном подвижном составе / А. Коласс, Ж.Э. Маслю. – Текст: непосредственный // Железные дороги мира. – 2001. – №2 – с. 37-41.

34 Копанев, А.С. Переходные процессы в силовой цепи электровоза переменного тока в тиристорными преобразователями в инверторном режиме / А.С. Копанев, Б.И. Хоменко. – Текст: непосредственный. // Электричество, 1974, № 1, с. 60-65.

35 Кулинич, Ю.М. Компенсирующий эффект нового преобразователя / Ю.М. Кулинич, Ю.С. Кабалык. – Текст: непосредственный. // Мир транспорта. – 2009. - № 2. – с. 48-50.

36 Кулинич, Ю.М. Повышение качества электрической энергии, потребляемой электровозом переменного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Кулинич Юрий Михайлович.; МГУПС (МИИТ). - Москва, 2002. – 48 с.

37 Кулинич, Ю.М. Повышение качества электрической энергии, потребляемой электровозом переменного тока, на основе применения гибридного компенсатора реактивной мощности : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой

степени доктора технических наук / Кулинич Юрий Михайлович.; МГУПС (МИИТ). - Москва, 2002. – 252 с. 83.

38 Кулинич, Ю.М. Повышение энергетической эффективности пассивного компенсатора электровоза переменного тока / Ю.М. Кулинич, В.К. Духовников. – Текст: непосредственный. // Учёные записки КНАГТУ. – 2013. - № IV-1(16) – с. 20-28.

39 Кучумов, В.А. Компенсация реактивной мощности на электроподвижном составе переменного тока / В.А. Кучумов, В.Б. Похель // М.: Интекст, 2001. – 88 с. – Текст: непосредственный.

40 Кучумов, В.А. Электромагнитные процессы в тяговой сети с распределенной емкостью при коммутации и выпрямлении тока в преобразователе электроподвижного состава / В.А. Кучумов, Н.Н. Широченко. – Текст: непосредственный. // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – № 1. – с. 19–23.

41 Ласка, Б. Развитие тяговых преобразователей на транзисторах *IGBT* / Б. Ласка. – Текст: непосредственный. // Железные дороги мира. – 2003. – № 11 – с. 32-39.

42 Линьков, А.О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения дорог : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Линьков Алексей Олегович; ИрГУПС – Иркутск., 2015. – 177 с.

43 Лисунов, В.Н. Применение рекуперативного торможения на участках переменного тока / В.Н. Лисунов, В.М. Бабич, Б.С. Барковский, Л.В. Бычков. – Текст: непосредственный. // ЭТТ. – 1970. – № 7 – с. 10–11.

44 Литовченко, В.В. Регулируемый компенсатор реактивной мощности / В.В. Литовченко, А.М. Кривной. – Текст: непосредственный. // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9. – с. 30-31.

45 Лозановский, А.Л. Энергетические характеристики отечественных электровозов переменного тока / А.Л. Лозановский. – Текст: непосредственный. //

Электровозостроение: Сборник научных трудов Всесоюзного научно-исследовательского, проектно-конструкторского и технологического института электровозостроения. – Новочеркасск. : Изд-во ВЭЛНИИ, 1984. – Т. 25 – с. 58–68.

46 Люттин, Т. Тяговый преобразователь большой мощности на транзисторах *IGBT* / Т. Люттин. – Текст: непосредственный. // Железные дороги мира. – 2001. – №3 – с. 32-33.

47 Мельниченко, О.В. Адаптивная система разнофазного управления тиристорными преобразователями / О.В. Мельниченко, Ю.В. Газизов. – Текст: непосредственный. // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 2. – с. 43-44.

48 Мельниченко, О.В. ВИП электровоза на *IGBT* модулях для 1-ой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения / О.В. Мельниченко, Д.А. Яговкин, А.Ю. Портной. – Текст: непосредственный. // Вестник института тяги и подвижного состава: межвузовский сборник научных трудов / под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. ДВГУПС. – 2013. – № 9. – с. 44-47.

49 Мельниченко, О.В. Выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с использованием *IGBT* модулей в режиме рекуперативного торможения / О.В. Мельниченко, Д.А. Яговкин. – Текст: непосредственный. // Электропривод на транспорте и в промышленности. Труды всероссийской научно-практической конференции. ДВГУПС. – 2013. – с. 191-192.

50 Мельниченко, О.В. Выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с использованием *IGBT* модулей в режиме тяги / О.В. Мельниченко, Д.А. Яговкин. – Текст: непосредственный. // Электропривод на транспорте и в промышленности. Труды всероссийской научно-практической конференции. ДВГУПС. – 2013. – с. 196-197

51 Мельниченко, О.В. Испытание адаптивной системы разнофазного управления электровоза ВЛ80Р / О.В. Мельниченко, Ю.В. Газизов. – Текст: непосредственный. // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. ДВГУПС – 2011. – Т.1. – с. 18-23.

52 Мельниченко, О.В. Лабораторные исследования модели инвертора электровоза с включением диодного плеча параллельно цепи выпрямленного тока / О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, С.Г. Шрамко. – Текст: непосредственный. // Проблемы транспорта Восточной Сибири. Сборник трудов Третьей всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. ИрГУПС. – Иркутск. – 2013. – Т.1. – с. 31-36.

53 Мельниченко, О.В. Новый алгоритм управления силовой электроникой электровоза / О.В. Мельниченко, Ю.В. Газизов. – Текст: непосредственный. // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы 9-й международной научно-технической конференции. НГТУ. – 2008. – Т.7. – с. 65-69.

54 Мельниченко, О.В. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для тягового подвижного состава переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режиме тяги / О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной, Д.А. Яговкин, С.Г. Шрамко. – Текст: непосредственный. // Наука и техника транспорта. – 2014. – № 3. – с. 46-51.

55 Мельниченко, О.В. Новый выпрямительно-инверторный преобразователь для электровозов переменного тока с повышенными энергетическими характеристиками в режимах тяги и рекуперативного торможения / О.В. Мельниченко, Д.А. Яговкин, А.Ю. Портной, С.Г. Шрамко. – Текст: непосредственный. // Транспортная инфраструктура сибирского региона: материалы III межвузовской научнопрактической конференции. ИрГУПС. – 2012. – Т.2. – с. 539-543.

56 Мельниченко, О.В. Повышение энергетических показателей электровозов переменного тока с тиристорными преобразователями при апробации предлагаемых технических решений на участке Большой Луг-Слюдянка ВСЖД / О.В. Мельниченко, Ю.В. Газизов. – Текст: непосредственный. // Сборник научных трудов: «Проблемы, решения, инновации транспорта Российской Федерации» научно-практическая конференция молодых учёных, посвященная 35-ти летию ИрГУПС. ИрГУПС. – Иркутск. – 2010. – с. 56-63.

57 Мельниченко, О.В. Повышение энергетической эффективности тяговых электроприводов электровозов переменного тока : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Мельниченко Олег Валерьевич; ДВГУПС. – Хабаровск., 2015. – 392 с.

58 Мельниченко, О.В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения с помощью разнофазного управления инверторами на первой зоне регулирования / О.В. Мельниченко, С.В. Власьевский. – Текст: непосредственный. // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 7(90). – с. 93-99.

59 Мельниченко, О.В. Повышение энергетической эффективности электровоза переменного тока за счёт разнофазного управления инверторами на высших зонах регулирования / О.В. Мельниченко, С.В. Власьевский. – Текст: непосредственный. // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 5. – с. 29-35.

60 Мельниченко, О.В. Разработка нового энергосберегающего алгоритма управления ВИП электровоза на *IGBT* модулях / О.В. Мельниченко, Д.А. Яговкин, А.Ю. Портной. – Текст: непосредственный. // Вестник института тяги и подвижного состава: межвузовский сборник научных трудов / под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. ДВГУПС. – 2013. – № 9. – с. 17-24.

61 Мельниченко, О.В. Техничко-экономическая оценка эффективности разработанных технических решений в дипломном проектировании : учебное пособие / О.В. Мельниченко, Т.А. Булохова, Т.Н. Мельниченко. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2008. – 48 с. – Текст: непосредственный.

62 Мироновский, Л.А. Введение в *MATLAB*: учебное пособие / Л.А. Мироновский, К.Ю. Петрова. – СПбГУАП. СПб., 2005. 164 с. – Текст: непосредственный.

63 Осипов, С.И. Теория электрической тяги: учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов – М.: УМК МПС РФ, 2000. – 592 с. – Текст: непосредственный.

64 Патент № 2232085 Российская Федерация, МПК7 В60L9/12. Устройство для автоматического регулирования реактивной мощности: № 2002122780/11; заявл. 27.08.2002; опубл. 10.07.2004 / Литовченко В.В., Кривной А.М., Кондратенко А.Н., Донской А.Л., Рабинович М.Д.; заявитель ООО «ЖЕЛДОРКОНСАЛТИНГ». – 7 с. : ил. Текст – непосредственный.

65 Патент № 2310962 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/01. Устройство для преобразования формы напряжения потребителя : № 2008152854/09; заявл. 30.12.2008; опубл. 20.02.2010 / Кулинич Ю.М., Кабалык Ю.С.; заявитель ГОУ ВПО ДВГУПС. – 10 с. : ил. Текст – непосредственный.

66 Патент № 2418354 Российская Федерация, МПК Н02М5/12. Зависимый многозонный инвертор однофазно переменного тока: № 2010113666/07; заявл. 07.04.2010; опубл. 10.05.2011 / Буняева Е.В., Власьевский С.В., Скорик В.Г., Фокин Д.С.; заявитель ГОУ ВПО ДВГУПС. – 16 с. : ил. Текст – непосредственный.

67 Патент № 2459717 Российская Федерация, МПК В60L3/00. Электронное устройство токовой защиты ББР электровозов серии ВЛ80р: №2011114345/11; заявл. 13.04.11; опубл. 27.08.2012 / Шрамко С.Г., Мельниченко О.В., Портной А.Ю.; заявитель ОАО «РЖД». - 8 с. : ил. Текст – непосредственный.

68 Патент № 2475374 Российская Федерация, МПК G01R 34/31. Способ повышения коэффициента мощности при рекуперативном торможении электровоза переменного тока и устройство для его реализации: № 2010144087/11, заявл. 27.10.10; опубл. 10.05.2012 / Шрамко С.Г., Мельниченко О.В., Портной А.Ю.; заявитель ФГБОУ ВПО ИрГУПС. – 7 с. : ил. Текст – непосредственный.

69 Патент № 2498490 Российская федерация, МПК G01L1/100. Многозонный выпрямительно-инверторный преобразователь и способ управления преобразователем : № 2012114982/07; заявл. 16.04.2012; опубл. 10.11.2013 / Мельниченко О.В., Портной А.Ю., Шрамко С.Г.; заявитель ФГБОУ ВПО ИрГУПС. – 7 с. : ил. Текст – непосредственный.

70 Патент № 2539323 Российская Федерация, МПК H02M1/088. Способ фазового управления тиристорными преобразователями, одновременно работающими на индивидуальные нагрузки: № 2013106299/07; заявл. 13.02.2013; опубл. 20.01.2015, Бюл. № 2. / Мельниченко О. В., Портной А. Ю., Яговкин Д. А., Шрамко С. Г.; заявитель ФГБОУ ВПО ИрГУПС. – 5 с. : ил. Текст – непосредственный.

71 Патент № 2561913 Российская Федерация, МПК H02P7/292. Способ управления многозонным выпрямительно-инверторным преобразователем однофазно переменного тока: № 2014115762/07; заявл. 18.04.2014; опубл. 10.09.2015 / Семченко В.В., Мельниченко О.В., Власьевский С.В.; заявитель Власьевский С.В. – 14 с. : ил. Текст – непосредственный.

72 Патент № 2677971 Российская Федерация, МПК МПК В60L 11/06, В60L 15/20, В60L 7/04. Тяговый электропривод локомотива: №2018103870; заявл. 01.02.2018; опубл. 22.01.2019 / Клименко Ю.И., Кузнецов Н.А., Перфильев К.С., Чупин Я.В., Евсеев В.Ю.; заявитель акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава». – 9 с. : ил. Текст – непосредственный.

73 Патент № 2721084 Российская Федерация, МПК H02P 7/292. Способ реализации рекуперативного торможения без балластных резисторов на электровозах переменного тока: № 2019134725; заявл. 29.10.2019; опубл. 15.05.2020 / Мельниченко О. В., Томилов В.С., Шрамко С.Г., Портной А. Ю., Линьков А.О., Волчек Т.В; заявитель ФГБОУ ВО ИрГУПС. – 12 с. : ил. Текст – непосредственный.

74 Плакс, А.В. Системы управления электрическим подвижным составом: учебник для вузов железнодорожного транспорта – М.: Маршрут, 2005. – 360 с. Текст – непосредственный.

75 Похель, В.Б. Выбор параметров компенсатора реактивной мощности грузового электровоза с учетом среднеэксплуатационного баланса потребления активной и реактивной энергии / В.Б. Похель, С.В. Покровский., Н.Н. Широченко. Текст – непосредственный. // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – №4.

– с. 21-26.

76 Процессы коммутации тока вентилях в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока : монография / С.В. Власьевский // Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2000. – 112 с. – Текст – непосредственный.

77 Распоряжение ОАО «РЖД» от 11.02.2008 г., № 269р «Об энергетической стратегии ОАО "РЖД" на период до 2030 года» Москва., 2019. – Режим доступа: <http://doc.rzd.ru>. Текст – электронный.

78 Ротанов, Н.А. Проектирование систем управления электроподвижным составом / под. ред. Н.А. Ротанова – М.: Транспорт, 1986. – 327 с. Текст – непосредственный.

79 Рутштейн, А.М. Тенденции развития выпрямительных установок возбуждения тяговых двигателей / А.М. Рутштейн, Т.Н. Палагута. Текст – непосредственный. // Вестник ВЭЛНИИ. – 2009. – № 2(58) – с. 242–249.

80 Савоськин, А.Н. Математическое моделирование электромагнитных процессов в динамической системе контактная сеть – электровоз / А.Н. Савоськин, Ю.М. Кулинич, А.С. Алексеев. Текст – непосредственный. // Электричество. – 2002. - № 2. – с. 29-35.

81 Стратегия научно-технического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) №769/р от 17.04.2018 г. Режим доступа: <https://company.rzd.ru/ru/9263/page/105104?id=33>. . Текст – электронный. (Дата обращения: 13.05.2022).

82 Тайгелькеттер, Й. Тяговый преобразователь фирмы *Siemens* на транзисторах *IGBT* / Й. Тайгелькеттер, Д. Шпренгер. Текст – непосредственный. // Железные дороги мира. – 1999. – № 12 – с. 38-39.

83 Тихменев, Б.Н. Импульсно-фазовое регулирование напряжения на э.п.с. переменного тока / Б.Н. Тихменев, А.В. Каменев., З.М. Рубчинский. Текст – непосредственный. // Труды ВНИИЖТ, 1978, № 596, с. 4-14.

84 Тихменев, Б.Н. Исследование способов демпфирования высокочастотных колебаний в тиристорных преобразователях / Б.Н. Тихменев,

В.Д. Кондрашов, Н.Н. Горин, В.А. Кучумов, А.П. Петровичев. Текст – непосредственный. // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1982. – № 642. – с.94-115.

85 Тихменев, Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог / Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман // М.: Транспорт, 1980. – 471 с. Текст – непосредственный.

86 Тихменев, Б.Н. Применение емкостной компенсации реактивной мощности преобразователей электровозов / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов, В.А. Татарников, В.А. Толстых. Текст – непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1987. – № 5 – с. 21–24.

87 Тихменев, Б.Н. Система импульсно-фазового преобразования и регулирования электроподвижного состава переменного тока / Б.Н. Тихменев, А.В. Каменев, З.М. Рубчинский. Текст – непосредственный. // Вестник ВНИИЖТ, 1980, № 7, с. 1-7. . Текст – непосредственный.

88 Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов // М.: Транспорт, 1988. – 311 с. Текст – непосредственный.

89 Тихменев, Б.Н. Электровозы переменного тока со статическими преобразователями / Б.Н. Тихменев. – М.: «Гострансжелдориздат», 1958. – 268 с. . Текст – непосредственный.

90 Томилов, В. С. Повышение энергетической эффективности работы электровозов переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, С.А. Богинский. Текст – непосредственный. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65 № 1. – с. 172–182.

91 Томилов, В.С. Proposals for Introduction of Modern Power Semiconductor Devices Into Converter-Fed Commutator Motor Locomotives of Russian Railways / В.С. Томилов, Т.В. Волчек, И.А. Баринев. Текст – электронный. // Пром-Инжиниринг: Материалы международной научно-технической конференции(англ. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM). – 2020 . Оpubл. в IEEE Xplore Digital

Library, изд-во Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE. – Режим доступа (DOI): 10.1109/icieam48468.2020.9112012. – Яз. англ.

92 Томилов, В.С. Анализ способов и технических решений повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, С.В. Власьевский. Текст – непосредственный. // Сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции: Транспортная инфраструктура Сибирского региона.; – ИрГУПС. – Иркутск. 2018 г. – с. 448-452.

93 Томилов, В.С. Анализ способов и устройств защиты тиристорных преобразователей электроподвижного состава переменного тока. / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Р.И. Устинов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 4 (10). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/410-2020>. Текст – электронный. (Дата обращения: 13.05.2022).

94 Томилов, В.С. Как повысить надежность режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Т.В. Волчек. Текст – непосредственный. // Ежемесячный производственно-технический и научно-популярный журнал «Локомотив». - №7 (763), июль 2020. с. 20-22.

95 Томилов, В.С. Математическое моделирование электромагнитных процессов электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения без применения блоков балластных резисторов в силовой цепи электровоза. / В.С. Томилов, С.Е. Письменных, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко. Текст – непосредственный. // «Scientific Research»: сборник трудов Четвертой Международной научно-практической конференции (ноябрь 2018) – Чехия, Карловы Вары, 2018 г. – с. 204-211.

96 Томилов, В.С. Моделирование работы электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В.С. Томилов. Текст – непосредственный. // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. № 2 (50). 2021. с. 106-114.

97 Томилов, В.С. Модернизация силовой цепи электровоза переменного

тока в режиме рекуперативного торможения. / В.С. Томилов, Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко. Текст – непосредственный. // «Наука и молодежь»: сборник трудов Четвертой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.; - ИрГУПС. – Иркутск. – 2018 г. – с. 148-152.

98 Томилов, В.С. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет исключения из силовой цепи ББР. / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко. Текст – непосредственный. // «Наука и молодежь»: сборник трудов Третьей Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.; – ИрГУПС. – Иркутск. – 2017 г.. – с. 33-36.

99 Томилов, В.С. Повышение эффективности режима рекуперативного торможения электровозов переменного тока за счет исключения балластного сопротивления из его силовой цепи / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Р.И. Устинов. Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2020. – № 4 (10). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/toma/410-2020>. (Дата обращения: 13.05.2022).

100 Томилов, В.С. Повышение эффективности рекуперативного торможения на отечественных электровозах переменного тока / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко. Текст – непосредственный. // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век : материалы VII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г. – СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. – с. 140-146.

101 Томилов, В.С. Реализация рекуперативного торможения на отечественных электровозах переменного тока без блоков балластных резисторов / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, Т.В. Волчек. Текст – непосредственный. // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Эксплуатация и обслуживание электронного и микропроцессорного оборудования тягового подвижного состава», – Красноярск, 24-25 марта 2020г. с. 333-338.

102 Томилов, В.С. Совершенствование силовой цепи электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В.С. Томилов, И.А.

Баринов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков. Текст – непосредственный. // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2019. - Т.23. № 2. с. 346–355.

103 Томилов, В.С. Способ реализации рекуперативного торможения без блока балластных резисторов на электровозах переменного тока. / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко. Текст – непосредственный. // «Science and Practice: New Discoveries»: сборник трудов Третьей Международной научной конференции - Чехия, Карловы Вары, 2017 г. – с. 159-165.

104 Томилов, В.С. Способ реализации рекуперативного торможения на электровозах переменного тока серии «Ермак» без блоков балластных резисторов / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко. Текст – непосредственный. // «Resonances science»: сборник трудов Третьей Международной научно-практической конференции (ноябрь 2018 г.) – Чехия, Карловы Вары, 2018. – с. 153-161.

105 Томилов, В.С. Увеличение отдачи электроэнергии электровозом переменного тока и расширение области его тормозных характеристик при реализации рекуперативного без блоков балластных резисторов / В.С. Томилов, О.В. Мельниченко. Текст – непосредственный. // «Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона» № 3(20) – ДВГУПС, Хабаровск, 2019, с. 26.-29.

106 Трахтман, Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава / Л.М. Трахтман // М.: Транспорт, 1965. – 204 с. Текст – непосредственный.

107 Указ Президента РФ от 01 декабря 2016 г., № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». - Москва, администрация Президента России, 2019. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru>. Текст – электронный. (Дата обращения: 13.05.2022).

108 Фокин, Д.С. Повышение коэффициента мощности зависимого инвертора электровоза переменного тока режиме рекуперативного торможения : специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата

технических наук / Фокин Дмитрий Сергеевич.; ДВГУПС. – Хабаровск. – 2012. – 172 с.

109 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB*, *SinPowerSystem* и *Simulink* / И.В. Черных //– М.: ДМК Пресс; СПб.: 2008. – 288с. Текст – непосредственный.

110 Шрамко, С.Г. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения за счет изменения параметров балластных резисторов : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шрамко Сергей Геннадьевич.; КНАГТУ – Комсомольск-на-Амуре., 2016. – 142с.

111 Шрамко, С.Г. Способ повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / С.Г. Шрамко, О.В. Мельниченко, А.Ю. Портной. Текст – непосредственный. // Вестник Института тяги и подвижного состава / под ред. А.Е. Стецюка и Ю.А. Гамоли. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – № 9. с. 4-7.

112 Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) : в 2 т. : руководство по эксплуатации, разработчик и изготовитель – НЭВЗ / Новочеркасск. – 2007. – т.1 – 635 с., Т.2 – 640 с.