

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
(РУТ (МИИТ))

На правах рукописи



ЕВСЕЕВ ВЯЧЕСЛАВ ЮРЬЕВИЧ

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ТЕПЛОВЗОВ
С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЯГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор А. Н. Савоськин

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ.....	10
1.1 Анализ основных схем тягового привода локомотивов с коллекторными тяговыми электродвигателями.....	10
1.1.1 Анализ схем коллекторного тягового привода тепловозов	10
1.1.2 Анализ схем коллекторного тягового привода электровозов переменного тока.....	13
1.1.3 Анализ схем коллекторного тягового привода электровозов постоянного тока	17
1.2 Основные направления совершенствования коллекторного тягового привода	21
1.3 Предложения по совершенствованию коллекторного тягового привода тепловозов	23
1.4 Анализ выполненных работ в области систем тягового привода и полупроводниковых преобразователей для локомотивов с коллекторными тяговыми двигателями.....	25
1.5 Постановка цели и задач исследования	28
2 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА	30
2.1 Разработка структурной схемы полупроводникового преобразователя	30
2.1.1 Описание общей структуры и принципа работы полупроводникового преобразователя.....	30
2.1.2 Разработка электрической структурной схемы полупроводникового преобразователя и выбор типа полупроводников	34
2.2 Разработка структурной схемы усовершенствованного тягового привода тепловоза с использованием полупроводникового преобразователя.....	38
2.3 Выводы по разделу 2.....	40

3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ТЕПЛОВОЗА.....	42
3.1 Общие принципы построения систем автоматического управления тяговым приводом тепловозов.....	42
3.2 Разработка системы автоматического управления тяговым приводом для режима тяги.....	45
3.2.1 Разработка общей структуры	45
3.2.2 Разработка регулятора мощности.....	47
3.2.3 Разработка регуляторов тока.....	50
3.2.4 Определение критерия перехода на ослабленное возбуждение	55
3.2.5 Разработка алгоритма управления напряжением тягового генератора.....	57
3.3 Разработка системы автоматического управления тяговым приводом для режима электрического торможения	61
3.3.1 Разработка общей структуры	61
3.3.2 Разработка регулятора силы торможения	66
3.3.3 Обеспечение устойчивости режима электрического торможения	68
3.3.4 Разработка блока управления тормозным импульсным регулятором.....	69
3.4 Выводы по разделу 3.....	71
4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ТЕПЛОВОЗА	72
4.1 Выбор программного пакета и методики исследования	72
4.2 Математическая и компьютерная модели коллекторного тягового электродвигателя с учётом отдельного влияния вихревых токов, создаваемых обмотками главных и дополнительных полюсов	73
4.3 Математическая и компьютерная модели полупроводникового преобразователя.....	81
4.4 Компьютерная имитационная модель усовершенствованного тягового привода тепловоза	83
4.5 Выводы по разделу 4.....	87

5	КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ	
	УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ТЕПЛОВОЗА	88
5.1	Результаты моделирования для режима тяги.....	88
5.1.1	Анализ работы регуляторов тока.....	88
5.1.2	Анализ работы регуляторов мощности.....	95
5.2.	Результаты моделирования для режима электрического торможения.....	102
5.3	Выводы по разделу 5.....	108
6	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ.....	110
6.1	Описание экспериментального стенда.....	110
6.2.	Описание полупроводникового преобразователя.....	112
6.3	Результаты испытаний полупроводникового преобразователя	118
6.3.1	Методика испытаний и используемое оборудование	118
6.3.2	Экспериментальное исследование работы регуляторов тока.....	120
6.3.2	Экспериментальное исследование работы преобразователя в целом	124
6.4	Выводы по разделу 6.....	131
7	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ.....	133
7.1	Оценка технической эффективности	133
7.2	Оценка экономической эффективности.....	135
7.2.1	Расчет экономии топливно-энергетических ресурсов	135
7.2.2	Оценка инвестиционных затрат.....	140
7.2.3	Расчет чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости	141
7.3	Выводы по разделу 7.....	143
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	146
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	161
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	178
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	180
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	181

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Железнодорожный транспорт с момента его появления выступает как основа транспортной системы, связывает воедино промышленность, экономику и общество нашей страны. Устойчивое развитие данной отрасли является необходимым условием роста экономики, а также повышения экономической безопасности государства.

Основные направления развития отрасли до 2030 года описаны в «Белой книге ОАО «РЖД» [1], с учетом которых в холдинге были сформированы требования к новым локомотивам [2]. В части тягового привода локомотивов можно выделить следующие приоритетные цели развития:

- повышение тяговых свойств за счет поосного регулирования силы тяги и эффективной противобуксовочной защиты;
- снижение расходов на дизельное топливо и электрическую энергию, а также на техническое обслуживание и ремонт;
- унификация по основному оборудованию.

Для достижения указанных выше целей наиболее перспективным направлением развития тягового привода является использование асинхронных тяговых электродвигателей (АТД), имеющих более высокую габаритную мощность и надежность. Однако, на сети ОАО «РЖД» эксплуатируется большое число (более 1000 шт.) локомотивов 2ТЭ116(У, УД), 3ТЭ116У, 2ТЭ25К, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М, 2ТЭ70, 3ТЭ28 с коллекторными тяговыми электродвигателями (ТЭД), а на тепловозостроительных заводах продолжается их производство [3, 4]. Данный факт обусловлен в первую очередь простотой и отлаженностью используемых технических решений, а также ограниченной мощностью силовой установки тепловозов, что делает использование АТД экономически нецелесообразным, учитывая высокую стоимость и сложность тягового преобразователя.

Все современные отечественные магистральные тепловозы имеют разработанную в 90-х годах прошлого века систему поосного регулирования силы

тяги [5, 6], которая, на то время, стала инновационным решением, позволяющим существенно повысить тяговые свойства тепловозов.

Однако при разработке данного типа электропривода использовалась доступная на тот момент силовая полупроводниковая элементная база, которая не позволяет полностью использовать его потенциальные возможности. По этой причине существующая схема тягового привода тепловозов обладает рядом особенностей, описанных более подробно в разделе 1, которые не позволяют ныне выпускаемым локомотивам с коллекторными ТЭД полностью соответствовать предъявляемым к ним требованиям [2]. Также следует отметить большое количество тепловозов серии 2ТЭ10 (в/и), находящихся в эксплуатации и выполняющих большой объем работы, на которые не возможна установка такой системы [7].

Таким образом, задача по разработке нового полупроводникового преобразователя и создания на его базе усовершенствованного коллекторного тягового привода, обусловленная массовым использованием на путях указанных выше тепловозов и необходимостью повышения их технической и экономической эффективности для достижения целей, поставленных ОАО «РЖД» для локомотивного комплекса на ближайшее время, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Исследованиями в области совершенствования коллекторного тягового привода тепловозов и электровозов, внедрения преобразователей на *IGBT*-транзисторах, систем импульсного регулирования в разное время занимались такие ученые, как В.А. Баранов, Т.В. Волчек, А.М. Евстафьев, Ю.И. Клименко, А.И. Кузнецов, В.Д. Мацнев, О.В. Мельниченко, А.Н. Савоськин, В.С. Томилов, Ко Ко Хтет, А.А. Чучин, Д.А. Яговкин и другие ученые.

Однако проблема разработки импульсного полупроводникового преобразователя на современной элементной базе для совершенствования коллекторного тягового привода тепловозов в настоящее время не решена.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности

работы тяговой электропередачи тепловозов с коллекторными ТЭД путем использования нового тягового преобразователя, построенного на основе современных полупроводниковых приборов – *IGBT*- транзисторов.

В работе решены следующие задачи:

– проведен обзор и анализ существующих схем тепловозов и электровозов постоянного тока, определены функциональные требования к новому тяговому преобразователю;

– разработаны структурные схемы нового тягового преобразователя и усовершенствованного тягового привода тепловоза на базе нового преобразователя;

– разработана система автоматического управления (САУ) усовершенствованным тяговым приводом;

– разработана математическая и компьютерная имитационная модели усовершенствованного тягового привода тепловоза;

– выполнено компьютерное моделирование работы усовершенствованного тягового привода тепловоза с новым преобразователем под управлением предложенной САУ;

– выполнена экспериментальная проверка предлагаемого решения на стенде;

– разработано технико-экономическое обоснование (ТЭО) предлагаемого решения.

Научная новизна

1 Предложена новая схема тягового преобразователя и алгоритмы работы САУ для обеспечения плавного управления двигателем постоянного тока тепловоза в режимах тяги и электрического торможения. В том числе реализовано плавное повышение и ослабление возбуждения или, иными словами, независимое управление возбуждением двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

2 Разработана математическая модель тягового двигателя постоянного тока, отдельно учитывающая влияние вихревых токов от главных и добавочных полюсов в связи с отдельным управлением током якоря и током возбуждения.

3 Исследованы электромагнитные процессы в тяговом приводе при работе от нового преобразователя, как с использованием компьютерного моделирования, так и экспериментально.

4 Предложен способ обеспечения электрической устойчивости двигателя последовательного возбуждения в режиме электрического торможения (ЭТ) в предложенной схеме при высоких скоростях движения.

Теоретическая и практическая значимость работы

1 Разработан алгоритм работы и программное обеспечение для тягового преобразователя, обеспечивающие:

- режим тяги с поддержанием заданной выходной мощности и плавным автоматическим ослаблением возбуждения;
- ограничение тока двигателя и коэффициента возбуждения на заданном уровне;
- режим электрического торможения с самовозбуждением и сохранением эффективности торможения до скорости $\sim 2 \text{ км/ч}$.

2 Разработаны компьютерная имитационная модель тягового привода тепловоза и экспериментальный стенд, позволяющие исследовать различные режимы работы привода при питании от полупроводникового преобразователя.

3 Предложен способ задания напряжения тягового генератора, позволяющий повысить его коэффициент полезного действия (КПД) и обеспечить экономию энергетических ресурсов.

Методология и методы исследования

Поставленные задачи решены с использованием методов электротехники и электроники, теории электрических машин, теории автоматического управления, теории тягового электропривода. Имитация различных режимов работы привода осуществлялась методами компьютерного моделирования в среде *Matlab Simulink* с использованием подсистемы имитационного моделирования *SymPowerSystems*. Для проведения натурного эксперимента был разработан специальный стенд, состоящий из опытного образца преобразователя и тепловозных тяговых двигателей постоянного тока.

Положения, выносимые на защиту

1 Структурная схема полупроводникового преобразователя для индивидуального поосного управления тяговыми двигателями тепловозов и его системы автоматического управления.

2 Математическая и компьютерная имитационная модель тягового привода тепловоза с предложенным полупроводниковым преобразователем.

3 Результаты экспериментальных исследований работы преобразователя.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается удовлетворительным совпадением результатов, полученных при натурном эксперименте и при расчете на имитационной компьютерной модели с параметрами тяговой передачи тепловоза 2ТЭ25КМ, а также обоснованностью принятых допущений при анализе электромагнитных процессов.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях научно-технического совета АО «ВНИКТИ», на заседаниях кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (МИИТ), а также на научно – технических конференциях: VI Международная научно-техническая конференция «Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век» (13-15 ноября 2018г., г. Санкт-Петербург), III Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов» (11-12 октября 2018г., г. Москва), Международная научная конференция «Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта» (22 июня 2021 г. Коломна). Автор является финалистом конкурса молодежных проектов ОАО «РЖД» «Новое звено» в 2021г. с проектом «Модернизация коллекторного тягового привода магистральных тепловозов».

Результаты исследования использованы при разработке тягового двухканального преобразователя по проекту 27.Т.768.00.00.000 и концепции построения тягового привода для перспективных маневровых тепловозов ТЭМ29 и ТЭМ18СПГ.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛОКОМОТИВОВ С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ТЯГОВЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

1.1 Анализ основных схем тягового привода локомотивов с коллекторными тяговыми электродвигателями

1.1.1 Анализ схем коллекторного тягового привода тепловозов

Электрическая передача переменного-постоянного тока является наиболее распространенным видом тяговой передачи магистральных тепловозов. В нашей стране данный тип электропередачи появился в 1970-х годах на тепловозах 2ТЭ116 благодаря появлению тяговых генераторов переменного тока. В конце 1990-х годов прошлого века на отечественных локомотивах началось постепенное внедрение микропроцессорных систем управления. Это позволило реализовать более сложные алгоритмы управления и привело к появлению тепловозов 2ТЭ116У с поосным регулированием силы тяги [5, 6].

По этому же принципу строится тяговый электропривод современных российских тепловозов с электрической передачей переменного-постоянного тока [8, 9] 2ТЭ25КМ, 2ТЭ70, 2ТЭ116У, 3ТЭ25К2М, 3ТЭ28 (рисунок 1.1).

Питание с обмоток тягового синхронного генератора ТГ поступает на входы трехфазных управляемых выпрямителей УВ1 – УВ6. С выходов УВ напряжение поступает на якоря М1 - М6 ТЭД, поездные контакторы П1 – П6 служат для отключения ТЭД от цепи питания. Обмотки возбуждения ОВ1 – ОВ6 каждого двигателя включены последовательно с якорем. Для смены направления вращения используется реверсор Р, при помощи которого изменяется направление тока в обмотках возбуждения. Для защиты УВ от токов короткого замыкания установлены трехфазные предохранители *FU1 – FU6*.

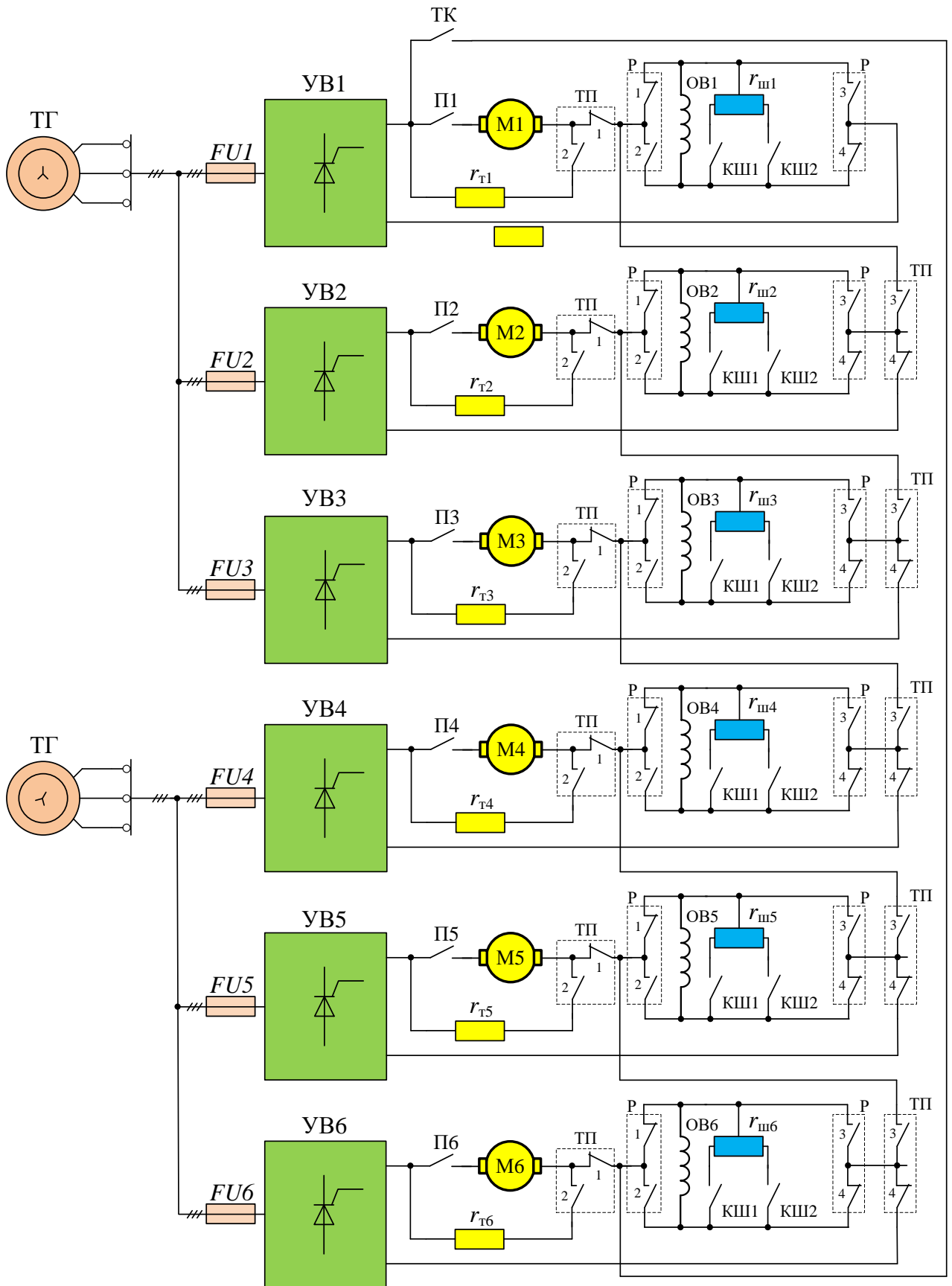


Рисунок 1.1 – Структурная схема тягового привода современных магистральных тепловозов

Регулирование силы тяги и, соответственно, скорости движения тепловоза осуществляется при помощи изменения напряжения на двигателе. По мере разгона напряжение генератора увеличивается для поддержания постоянной мощности дизеля. При определенной скорости наступает ограничение по напряжению. Для возврата характеристики дизель-генератора в зону нагрузки применяется двухступенчатое ослабление возбуждения тяговых электродвигателей при помощи групповых контакторов КШ1 и КШ2 и двухсекционных резисторов $r_{ш1} - r_{ш6}$ ослабления возбуждения, которые подключены параллельно обмоткам ОВ1 – ОВ6.

Данный способ ослабления возбуждения имеет известные недостатки: включение и выключение контакторов ослабления возбуждения ТЭД происходит одновременно на всех осях локомотива и возможны рывки силы тяги и нежелательные переходные процессы в электрической цепи тяговый генератор - тяговый электродвигатель. Это может привести к повреждению электрических машин и аппаратов. Также, из-за рывков и толчков, возможны повреждения и в экипажной части тепловоза. Даже учитывая снижение напряжение генератора в момент перехода системой управления, из-за разброса временных параметров контакторов осуществить плавный переход на ослабление поля и обратно достаточно сложно. Существует способ снижения ударных нагрузок на узлы локомотива, описанный в [10]. Но полностью избежать нежелательных эффектов не удастся.

Для использования электрического торможения в силовой схеме присутствуют тормозные резисторы $r_{т1} - r_{т6}$ (индивидуально на каждый ТЭД) и тормозной контактор ТК и переключатель ТП. При переходе в режим ЭТ происходит замыкание ТК и переключение ТП. Тем самым происходит подключение тормозных резисторов к якорям ТЭД и отключение от них обмоток возбуждения.

В тормозном режиме возбуждение ТЭД независимое, обмотки возбуждения ОВ1 – ОВ6 соединены последовательно и питаются от тягового генератора через УВ1. Регулирование тормозной силы происходит за счет изменения тока в

обмотках возбуждения тяговых электродвигателей.

Основным преимуществом рассматриваемого решения является возможность поосного управления силой тяги при сравнительно простом построении тяговой схемы.

Однако данное решение также обладает следующими недостатками:

- силовая схема содержит большое число полупроводниковых приборов - тиристоров;
- из-за технологического разброса параметров силовых тиристоров имеет место неравномерность токов тяговых электродвигателей в эксплуатации при реостатных испытаниях [11];
- применяемые в большом количестве электромеханические коммутационные аппараты требуют периодического технического обслуживания и регулировки;
- ступенчатое ослабление возбуждения тяговых электродвигателей;
- требуется источник энергии для питания обмоток возбуждения в режиме электрического торможения, что уменьшает экономичность локомотива;
- невозможно выполнить поосное управление силой торможения;
- при скорости движения менее 15км/ч электрический тормоз не эффективен.

1.1.2 Анализ схем коллекторного тягового привода электровозов переменного тока

Российские электровозы переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями типа 2ЭС5К, пришедшие на смену ВЛ80 и ВЛ85, имели последовательное возбуждение ТЭД с потележечным управлением силой тяги. При рекуперативном торможении возбуждение ТЭД было независимым с питанием обмоток возбуждения от отдельного источника – выпрямительной установки возбуждения (ВУВ).

Однако, как показали экспериментальные исследования, проведённые ещё в 80-е годы на опытных электровозах, оборудованных различными системами независимого возбуждения, увеличение силы тяги и торможения достигает 15-20% по сравнению с серийно выпускаемыми машинами с последовательным возбуждением ТЭД. При этом наилучшими противобоксовочными свойствами обладает групповая схема питания тяговых двигателей с поосным регулированием возбуждения каждого ТЭД по сравнению с индивидуальным регулированием напряжения на якорных обмотках и групповом питании обмоток возбуждения ТЭД [12 – 15].

Применение микропроцессорных управляющих систем в 2000-х годах позволило реализовать на электровозах 4ЭС5К коллекторный тяговый привод с независимым возбуждением (рисунок 1.2) и возможностью индивидуальной подрегулировки возбуждения каждого ТЭД для обеспечения поосного регулирования силы тяги и торможения [16].

Схема на рисунке 1.2 включает в себя тяговый трансформатор ТТ, имеющий две секционированные вторичные тяговые обмотки ($a1-1-2-x1$ и $a2-3-4-x2$), подключенные выпрямительно-инверторным преобразователям ВИП1 и ВИП2. Каждый ВИП содержит в себе два независимых канала К1 и К2. Каждый канал ВИП содержит 4 тиристорных выпрямительных полумоста, к которым подключаются выводы тяговой обмотки трансформатора. Секционирование тяговой обмотки ТТ (дополнительные выводы 1,2 и 3,4) с подключением каждого из выводов к отдельному полумосту в ВИП обеспечивает плавное четырехзонное регулирование выходного напряжения. При этом форма регулировочной характеристики ВИП при усреднении близка к линейной.

К выходу каждого из каналов ВИП1 и ВИП2 подключены якоря тяговых двигателей М1 – М4, для уменьшения пульсаций тока которых используются сглаживающие дроссели СД1 – СД2. Для защиты якорей ТЭД от токов короткого замыкания используются автоматические выключатели $QF1 - QF4$.

Обмотки возбуждения ОВ1 – ОВ4 ТЭД соединены последовательно и подключены к управляемому двухполупериодному выпрямителю возбуждения со

средней точкой ВУВ, который запитан от вторичной обмотки собственных нужд трансформатора ($a3 - x3$). Для сглаживания пульсаций тока возбуждения используется сопротивление постоянного шунтирования $r_{ш}$.

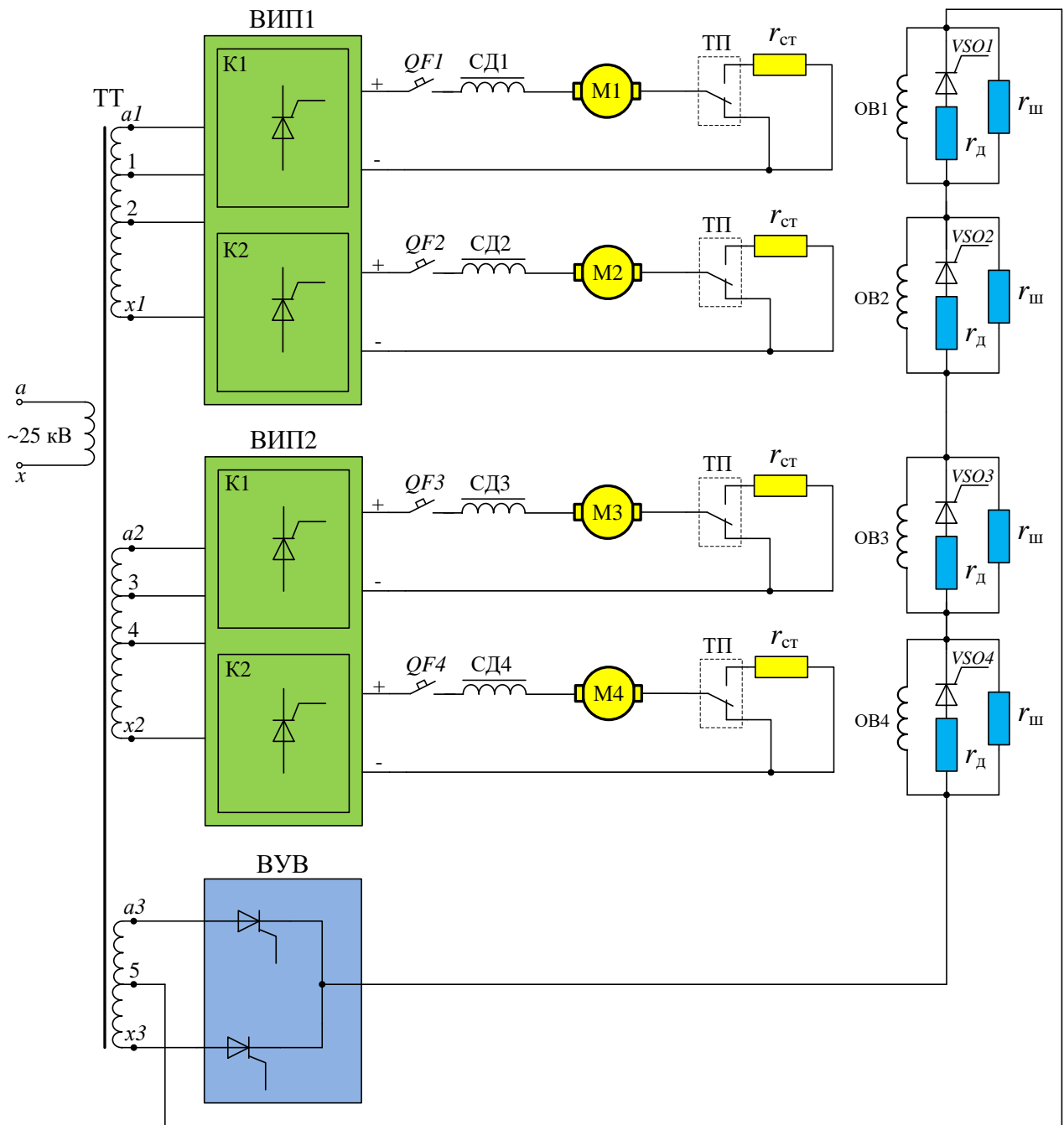


Рисунок 1.2 – Структурная схема тягового привода электровоза 4ЭС5К с поосным регулированием силы тяги и независимым возбуждением ТЭД

Распределение нагрузок для каждого ТЭД производится путем индивидуальной подстройки возбуждения при помощи шунтирующих тиристоров $VSO1 - VSO4$, которые в широтно-импульсном режиме с частотой пульсации

выпрямленного тока и производят ослабление тока возбуждения, воздействуя, таким образом, на ток якоря и силу тяги соответствующего ТЭД. На случай пробоя тиристоров $VSO1 - VSO4$, а также для линеаризации их регулировочной характеристики применены добавочные сопротивления r_d .

В режиме рекуперативного торможения с помощью тормозного переключателя ТП в цепи якорей ТЭД вводятся балластные резисторы $r_{ст}$, которые необходимы для стабилизации токов якорей ТЭД.

Основным преимуществом данной схемы тягового привода является независимое возбуждение ТЭД во всех режимах работы с возможностью индивидуальной подстройки тока возбуждения и, соответственно, момента на валу ТЭД, что обеспечивает повышение тяговых свойств локомотива при ухудшенных условиях сцепления.

Однако данное решение обладает следующими недостатками:

- требуется отдельный источник для питания обмоток возбуждения;
- для обеспечения плавного зонного регулирования выходного напряжения в ВИП применяется большое число силовых тиристоров – 32 штуки на секцию локомотива. При этом, в зависимости от выходного напряжения, одновременно работает только половина из указанного количества. Иными словами, эффективность использования полупроводниковых приборов в ВИП составляет не более 50 %;
- повышенные потери в системе электроснабжения из-за низкого коэффициента мощности ВИП;
- применяемые в большом количестве электромеханические коммутационные аппараты требуют периодического технического обслуживания и регулировки;
- подрегулировка возбуждения возможна только в сторону ослабления, что исключает возможность индивидуального повышения тока возбуждения для эффективного подавления буксования колесной пары;
- из-за пониженного, по сравнению с последовательным возбуждением, значения постоянной времени якорной цепи требуется применение

быстродействующих защитных устройств, а также дополнительных стабилизирующих резисторов для якоря;

- отказ выпрямителя возбуждения может вызвать повреждение ТЭД из-за последующего резкого снижения электродвижущей силы (ЭДС).

1.1.3 Анализ схем коллекторного тягового привода электровозов постоянного тока

Электровозы типа ЭС6 являются наиболее современными электровозами постоянного тока, выпускаются в двух, трех и четырехсекционном исполнении (2ЭС6, 3ЭС6 и 4ЭС6) и имеют независимое возбуждение тяговых электродвигателей с питанием от полупроводниковых преобразователей (рисунок 1.3).

Питание тяговой цепи электровоза происходит от контактной сети постоянного тока через токоприемник $XA1$, защитный автоматический выключатель $QF1$ и сглаживающий дроссель $CD1$. Для плавного разгона электровоза установлен пусковой реостат $r_{п}$.

Соединение тяговых двигателей групповое – два якоря и две обмотки возбуждения соединены последовательно. Питание обмоток возбуждения независимое и осуществляется от управляемых выпрямителей $УВВ1$ и $УВВ2$, которые входят в состав преобразователя собственных нужд электровоза.

Для сглаживания пульсаций тока возбуждения применены сопротивления шунтирования $r_{ш}$. Для защиты якорей ТЭД от тока короткого замыкания в случае нештатных ситуаций установлены быстродействующие контакторы $КА1$ и $КА2$.

Токи якоря $i_{я}$ и обмотки возбуждения $i_{в}$ (рисунок 1.4) протекают одновременно через дроссель $CD2$, шунтированный резистором $r_{д}$. Таким образом, дроссель $CD2$ оказывается одновременно включенным в цепь якоря и цепь обмотки возбуждения, что позволяет при управлении возбуждением ТЭД получить динамическую обратную связь по току якоря [17].

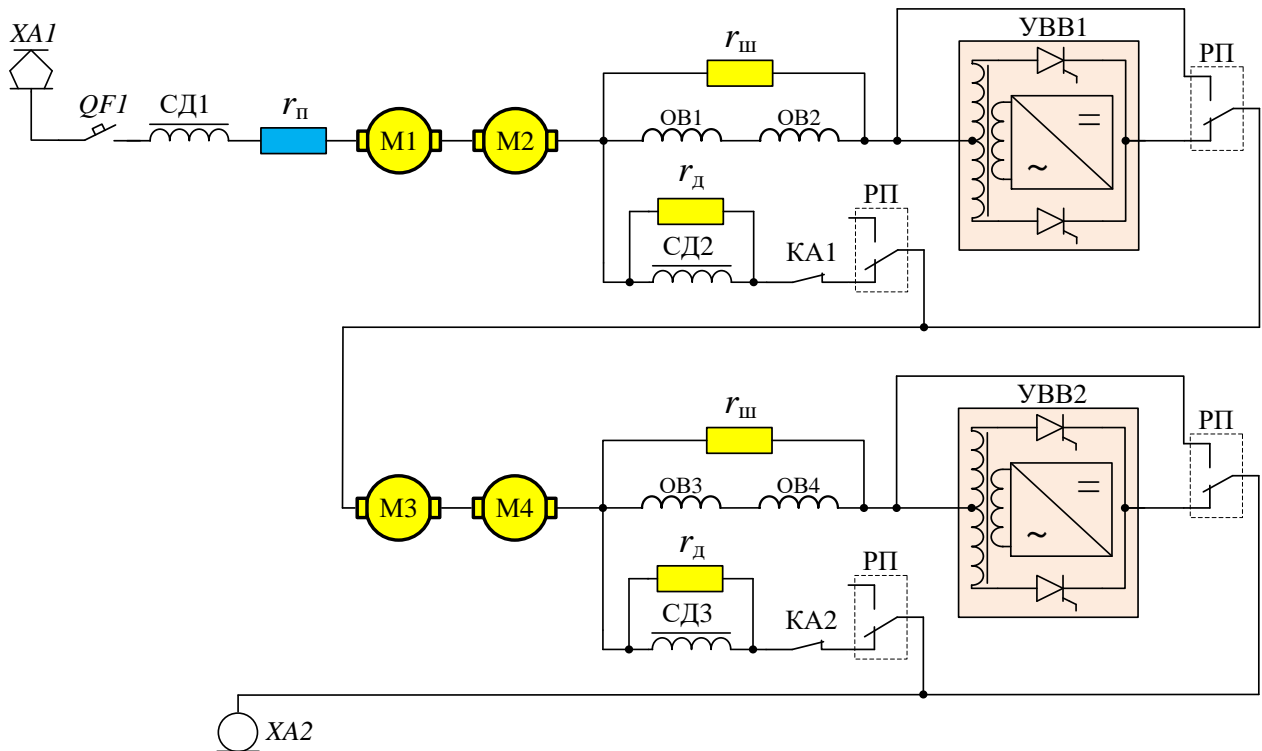


Рисунок 1.3 – Структурная схема тягового привода электровоза 2ЭС6 с независимым возбуждением ТЭД

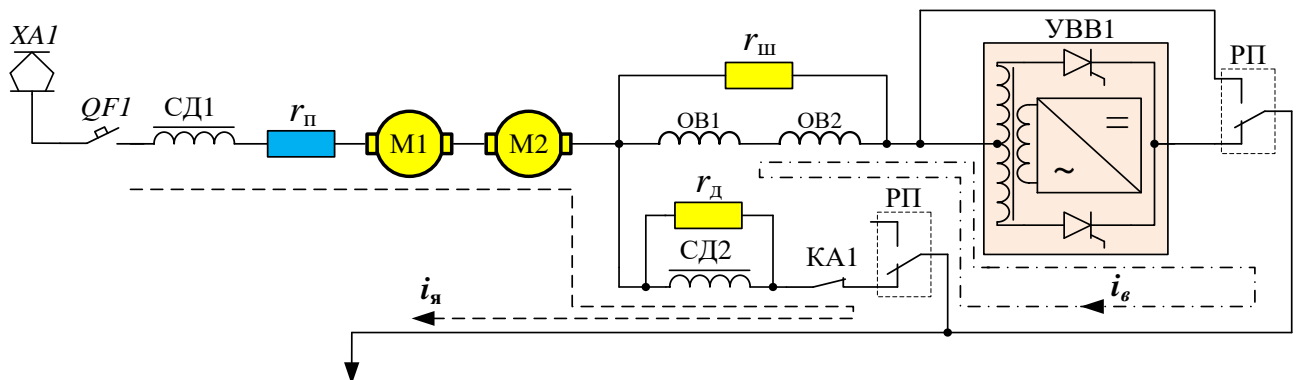


Рисунок 1.4 – Контуры токов обмотки якоря и обмотки возбуждения в тяговом приводе электровоза 2ЭС6

Ток возбуждения изменяется по формуле:

$$i_{\text{в}} = i_{\text{в0}} + k i_{\text{я}}, \quad (1.1)$$

где $i_{\text{в0}}$ - заданный минимальный ток возбуждения, A ;

k - коэффициент обратной связи по току якоря;

$i_{\text{я}}, i_{\text{в}}$ - ток якоря и обмотки возбуждения, A .

Для последовательного возбуждения с помощью режимных переключателей

РП цепь обмоток возбуждения последовательно включается в цепь якорей ТЭД. В данном варианте невозможно регулировать ток возбуждения отдельно от тока якоря и реализовать режим электрического торможения.

Скорость движения электровоза может регулироваться следующими способами:

- ступенчатым изменением сопротивления пускового резистора $r_{п}$;
- изменением тока возбуждения ТЭД с помощью УВВ1 и УВВ2;
- изменением схемы соединения групп тяговых двигателей.

На рисунке 1.3 показано последовательное соединение двух групп тяговых двигателей, что соответствует 24 позиции. На первой позиции две последовательно соединенные группы одной секции соединяются последовательно такими же группами второй секции (рисунок 1.5). Начиная с 45 позиции, каждая группа из двух ТЭД включается параллельно в каждой секции (рисунок 1.6).

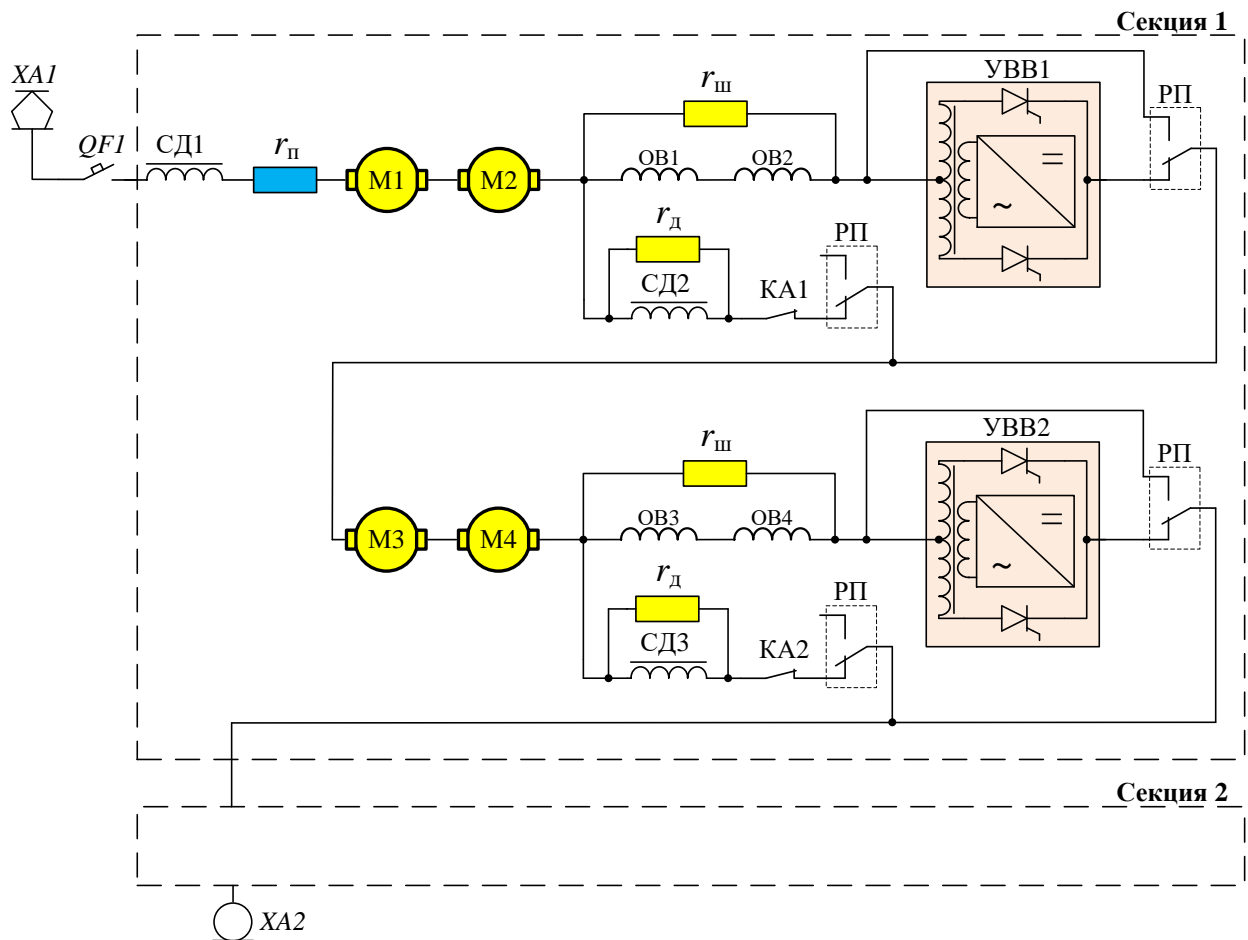


Рисунок 1.5 – Схема соединения ТЭД на первой позиции электровоза 2ЭС6

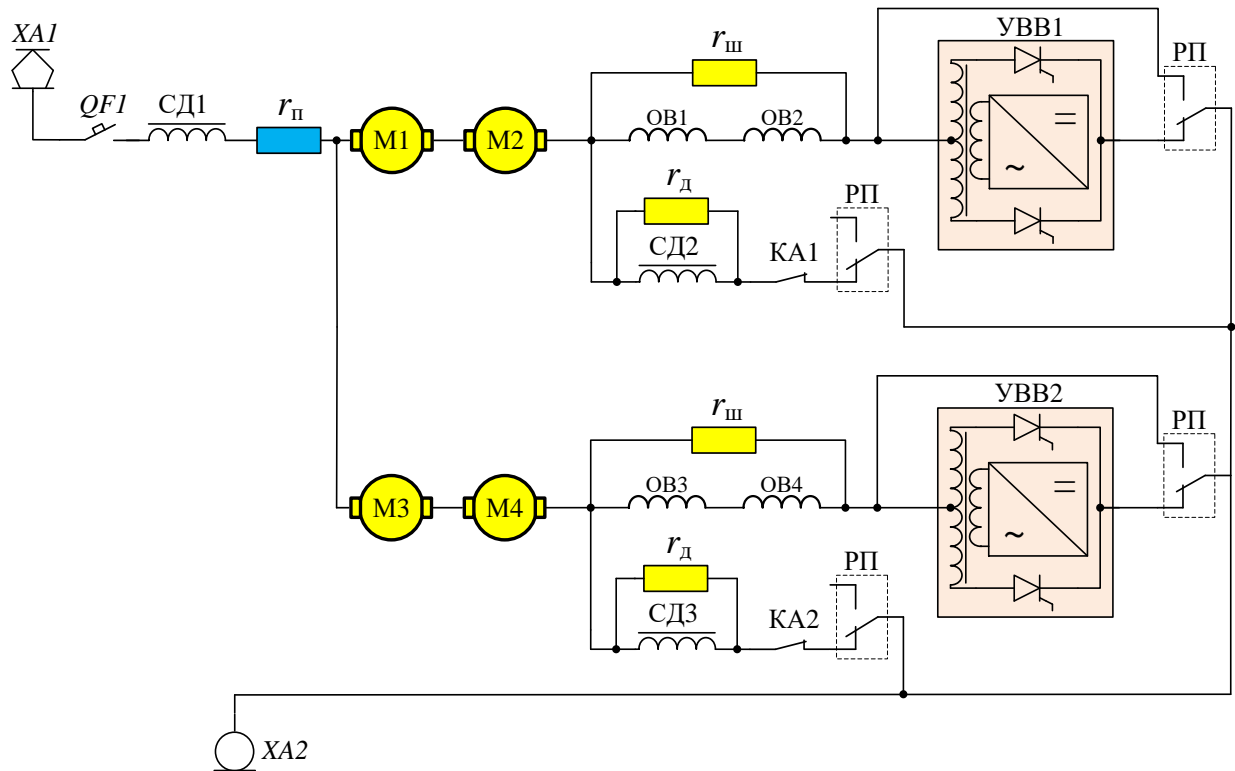


Рисунок 1.6 – Схема соединения ТЭД, начиная с 45 позиции электровоза 2ЭС6

Основным преимуществом данной схемы тягового привода является независимое возбуждение ТЭД, что позволяет изменять жесткость тяговых характеристик электровоза в процессе движения и, тем самым, повышает его тяговые свойства.

Однако данное решение обладает следующими недостатками:

- требуется отдельный источник для питания обмоток возбуждения;
- большое число контакторов и переключателей;
- потери энергии в пусковом реостате;
- невозможна подрегулировка возбуждения каждого ТЭД в отдельности для выравнивания сил тяги по каждой оси. Как следствие возникает неравномерность силы тяги по осям электровоза, что усугубляется групповым последовательным включением якорей при независимом возбуждении;
- переключение способа возбуждения или соединения ТЭД происходит с разрывом силовой цепи;
- из-за пониженного, по сравнению с последовательным возбуждением, значения постоянной времени якорной цепи требуется применение

быстродействующих защитных устройств;

- отказ выпрямителя возбуждения может вызвать повреждение ТЭД из-за последующего резкого снижения ЭДС.

1.2 Основные направления совершенствования коллекторного тягового привода

Для определения основных направлений совершенствования коллекторного тягового привода локомотивов следует рассмотреть основные тенденции развития железнодорожной отрасли в целом, которые определены в [1, 2, 18 – 20]. Согласно [1], целевыми задачами при создании новых локомотивов являются повышение эффективности пассажирских и грузовых перевозок за счет увеличения маршрутных скоростей, снижения энергозатрат в эксплуатации, уменьшение стоимости жизненного цикла, повышение показателей функциональной безопасности и надежности.

В соответствии с долгосрочным планом развития ОАО «РЖД» до 2025 года [20], необходимо достигнуть следующих параметров эффективности:

1 Увеличение производительности локомотива на 11,7 % при росте объема работы на 49 % и одновременном сокращении неэксплуатируемого парка

2 Необходимо существенно снизить уровень энергоемкости перевозок, а именно:

- снизить удельный расход электроэнергии на 3,3 %;
- снизить удельный расход дизельного топлива на 11,2 %.

В настоящее время в ОАО «РЖД» сформированы требования к новым локомотивам [2], в частности:

- модульный принцип конструкции;
- эффективная противобоксовочная защита;
- поосное регулирование силы тяги;
- унификация по основному тяговому и силовому оборудованию.

При формировании программы научных исследований и разработок предусматривается проведение комплекса исследовательских работ для оценки эффективности применения следующих технических решений:

- силовые преобразователи энергии с использованием электронных компонентов нового поколения и отечественного производства;
- тяговый электропривод с индивидуальным регулированием силы тяги, позволяющий максимально реализовать тяговую характеристику в зоне ограничения по сцеплению и обеспечить постоянство мощности в зоне средних скоростей;
- эффективная система рекуперации электроэнергии в контактную сеть;
- применение гибридного привода и накопителей электрической энергии торможения.

Основываясь на вышесказанном, можно определить основные направления развития коллекторного тягового привода, которые будут обеспечивать соответствие локомотивов с таким типом привода предъявляемым к ним требованиям:

- уменьшение количества релейно-контакторной аппаратуры (особенно для электровозов), что позволит упростить электрическую схему, повысить надежность локомотива и снизить стоимость его жизненного цикла за счет уменьшения объема технического обслуживания и ремонта;
- повышение энергоэффективности за счет исключения резисторов ослабления поля, добавочных резисторов, дополнительных источников питания для обмоток возбуждения ТЭД;
- снижение расхода электроэнергии и потерь в сети электроснабжения за счет повышения коэффициента мощности электровозов, а также снижения расхода топлива тепловозов за счет повышения эксплуатационного КПД тягового генератора;
- снижение износа тормозных колодок за счет реализации эффективного рекуперативного или реостатного торможения с сохранением тормозной силы практически до полной остановки локомотива;

- снижение количества отказов ТЭД за счет плавного ослабления возбуждения или применения способа возбуждения без разрыва силовой электрической цепи.

Следует понимать, что совершенствование коллекторного тягового привода локомотивов является комплексной задачей и невозможно без инновационного развития, внедрения новых и совершенствования существующих технических средств и технологий.

1.3 Предложения по совершенствованию коллекторного тягового привода тепловозов

Применяемые в настоящее время системы поосного регулирования силы тяги, выполненные на основе тиристоров и обеспечивающие преобразование переменного напряжения в постоянное с возможностью его регулировки, имеют ряд недостатков, описанных выше.

После появления полностью управляемых силовых ключей на основе *IGBT*-транзисторов стало возможным построение систем электропривода на основе двухзвенных преобразователей [21 – 23]. Такие преобразователи состоят из двух звеньев - выпрямителя и преобразователя постоянного напряжения в постоянное, выполненного на силовом ключе (рисунок 1.7).

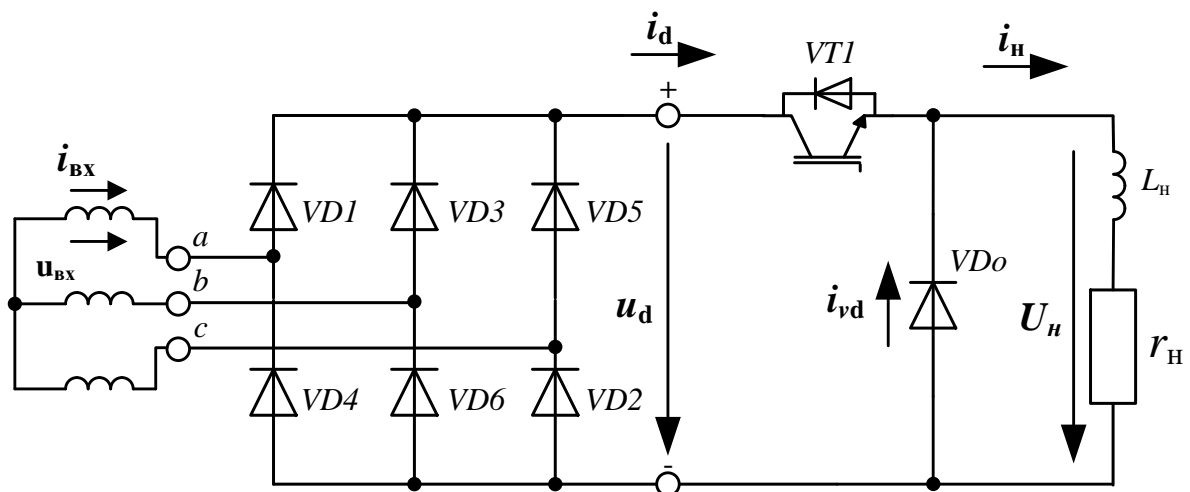


Рисунок 1.7 – Структурная схема двухзвенного преобразователя

Для преобразования переменного напряжения в постоянное используется трехфазный мостовой выпрямитель, состоящий из диодов $VD1 - VD6$ (также в зависимости от типа источника переменного напряжения может использоваться однофазный или активный $4QS$ выпрямитель). Для регулирования выходного напряжения используется $IGBT$ -транзистор $VT1$, состоящий из собственно транзистора и диода, защищающего транзистор от обратного напряжения. Применение $IGBT$ -транзистора позволяет применить способ импульсного регулирования. За счет высокой частоты коммутации $IGBT$ -транзистора и индуктивности L_H нагрузки в ней обеспечивается непрерывное протекание тока i_H с допустимой пульсацией: при включении транзистора $VT1$ ток в цепи RL -нагрузки под действием напряжения u_d аperiodически возрастает. В выключенном состоянии $VT1$ ток спадает через диод VDo под действием ЭДС самоиндукции индуктивности L_H .

Среднее значение напряжения на нагрузке U_H определяется по формуле:

$$U_H = \frac{t_{и}}{T} U_d = k_3 U_d, \quad (1.2)$$

где U_d - среднее значение выпрямленного напряжения, В;

$t_{и}$ – длительность импульса включения транзистора, с;

T – период следования импульсов, с;

k_3 – коэффициент заполнения, равный $t_{и}/T$.

Системы с импульсным регулированием, в том числе на основе $IGBT$ -транзисторов, в настоящее время находят широкое применение на подвижном составе [23 – 30]. Использование двухзвенных преобразователей [31] позволит улучшить энергетические показатели подвижного состава в стационарных и динамических режимах, унифицировать конструктивные, схемные и программные решения, что сделает возможным совершенствовать не только тепловозы, но и электровозы [32 – 34], доля которых постоянно увеличивается.

На основании проведенного анализа сделать вывод, что наиболее перспективным решением для совершенствования коллекторного тягового привода является разработка и внедрение двухзвенного полупроводникового тягового преобразователя на $IGBT$ -транзисторах.

1.4 Анализ выполненных работ в области систем тягового привода и полупроводниковых преобразователей для локомотивов с коллекторными тяговыми двигателями

В основу тягового привода современных отечественных тепловозов с электропередачей переменного-постоянного тока 2ТЭ25К, 2ТЭ25КМ, 2ТЭ25К2М, 3ТЭ28, 2ТЭ70, 2ТЭ116У (п.1.2.1) легли результаты исследований, приведенные в [6]. Автором установлены возможности оптимизации алгоритмов динамического перераспределения касательной силы тяги между колесными парами при буксовании, а также разработаны конструктивные и схемные решения системы управления тяговым электроприводом тепловоза, позволяющие повысить его тяговые при неблагоприятных условиях сцепления на 15 %.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность и эффективность технических решений. Однако при разработке данного тягового электропривода использовалась доступная на тот момент силовая полупроводниковая элементная база (тиристоры), которая не позволяет использовать некоторые существующие способы улучшения тяговых и тормозных характеристик локомотивов с коллекторными тяговыми двигателями, например, подрегулировку возбуждения ТЭД, плавное ослабление и повышение возбуждения, поосное управление тормозной силой с сохранением эффективности при низких скоростях движения.

В работе [35] автор описывает преимущества использования импульсных преобразователей на базе *GTO*-тириستоров в тяговых электроприводах постоянного тока электропоездов. Выполнено обобщение известных методов расчета импульсных электромеханических систем и формулировании на этой основе унифицированного метода для анализа квазистационарных процессов в электромеханической системе тягового электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Приведены основные схемы импульсного регулирования ТЭД, в том числе описаны схемы и получены аналитические выражения для режима плавного бесконтактного регулирования коэффициента ослабления возбуждения.

Выполнен анализ устойчивости рекуперативного торможения в тяговом электроприводе с импульсным регулированием, в ходе которого сделан вывод, что, при импульсном регулировании имеется существенное усложнение алгоритма работы электропривода по сравнению с традиционной схемой, но при этом расширяется диапазон действия рекуперации в сторону низких скоростей.

Автором показан пример реализации двухконтурной системы автоматического регулирования электропоезда с импульсным преобразователем. Отмечено, что применение импульсного регулирования целесообразно в первую очередь на модернизируемых электропоездах с двигателями постоянного тока. Однако перспективные разработки следует вести по тяговым электроприводам с АД.

Следует отметить, что результаты исследований, приведенные в [35], применимы в основном к электропоездам с питанием от контактной сети постоянного тока, схемы импульсного регулирования выполнены на базе устаревших в настоящее время *GTO*-тиристоров, также не приведены принципиальные схемные решения по импульсным преобразователям. Поэтому для целей настоящей диссертации требуется адаптация решений, предложенных в [35], применительно к тепловозам с использованием современных силовых полупроводниковых приборов (*IGBT* – транзисторов).

В работе [36] автор исследует эффективность применения режима повышения возбуждения тяговых двигателей магистральных электровозов постоянного тока с целью улучшения их тяговых свойств. Предложены схемотехнические решения, позволяющие реализовать режим повышенного возбуждения без применения дополнительного источника энергии. Автором предложено использовать импульсный преобразователь, осуществляющий плавное регулирование сопротивления цепи шунтирования обмотки возбуждения. Данное решение позволяет получить более широкие регулировочные возможности и добиться уменьшения интервала между ходовыми позициями. Для уменьшения разности токов двух параллельных ветвей якорей ТЭД автором предложено включение в их цепь стабилизирующих резисторов.

Приведены результаты исследований режимов работы тяговых двигателей

при различных способах возбуждения (последовательном и повышенном) с использованием методов математического моделирования. По результатам сделан вывод об отсутствии факторов, ухудшающих условия работы тяговых двигателей в режиме повышенного возбуждения.

Выполнена экспериментальная проверка предложенных решений на опытном электровозе, по результатам которой подтверждено увеличение до 15 – 17 % развиваемой электровозом силы тяги при улучшении его противобуксовочных свойств за счет повышения жесткости тяговых характеристик. Таким образом, предложенное в работе [36] повышение возбуждения током якорей дает возможность реализовывать тяговые характеристики, идентичные характеристикам тяговых двигателей при последовательно-независимом и независимом возбуждении.

Однако, как и в [35], результаты исследования применимы в основном к электропоездам с питанием от контактной сети постоянного тока, а схемы импульсного регулирования выполнены на базе устаревших в настоящее время *GTO*-тиристоров, а использование стабилизирующих и шунтирующих резисторов ухудшает энергетические показатели тягового привода.

На основе выполненного сравнительного анализа можно сделать вывод, что проблема разработки импульсного полупроводникового преобразователя на современной элементной базе для совершенствования коллекторного тягового привода тепловозов в настоящее время не решена. Однако уже на данном этапе можно определить основные функциональные требования к нему:

- возможность индивидуального управления каждым тяговым двигателем (многоканальность);
- возможность реализации режимов плавного повышения и ослабления возбуждения ТЭД;
- отсутствие в схеме тепловоза добавочных и шунтирующих резисторов, уменьшение количества релейно-контакторной аппаратуры;
- отсутствие дополнительного источника для питания обмотки возбуждения;

- расширение диапазона действия электрического тормоза;
- простота внедрения на существующих тепловозах и минимальные изменения, вносимые в их электрическую схему и конструкцию.

1.5 Постановка цели и задач исследования

В данном разделе выполнен анализ основных, используемых в настоящий момент, схем электропривода и выполненных научных работ в области тягового привода, как тепловозов, так и электровозов. На основе проведенного анализа можно сделать вывод, что каждая из рассмотренных схем имеет как преимущества, так и определенные недостатки. В большинстве случаев данные недостатки обусловлены использованием устаревшей элементной базы и резисторно-контакторной аппаратуры. На тепловозах и электровозах до сих пор применяются технические решения, которые были впервые внедрены от 50 до 100 лет назад (например, ступенчатое ослабление поля с помощью резисторов [37]). Также были определены основные направления совершенствования, как локомотивов в целом, так и коллекторного тягового привода в частности.

Как уже говорилось выше, используя современные наработки и передовую элементную базу в области преобразовательной техники, можно усовершенствовать тяговый привод тепловозов с коллекторными ТЭД для того, чтобы данные локомотивы наиболее полно соответствовали предъявляемым со стороны ОАО «РЖД» требованиям, также приведенным в данном разделе.

В соответствие с этим была определена цель данной диссертационной работы, формулировка которой приведена во введении.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведен обзор и анализ существующих схем тепловозов и электровозов постоянного тока, определены требования к новому тяговому преобразователю.
- разработаны структурные схемы нового тягового преобразователя и усовершенствованного тягового привода тепловоза на базе нового

преобразователя.

– разработана система автоматического управления усовершенствованным тяговым приводом;

– разработана математическая имитационная модель усовершенствованного тягового привода тепловоза;

– выполнено компьютерное моделирование работы привода тепловоза с новым преобразователем под управлением предложенной САУ.

– выполнена экспериментальная проверка предлагаемого решения.

– разработано технико-экономическое обоснование предлагаемого решения.

В качестве **объекта исследования** и прототипа для совершенствования выбран грузовой магистральный тепловоз 2ТЭ25КМ. На момент написания диссертации данные локомотивы активно эксплуатируются на путях ОАО «РЖД» в количестве более 600 шт., а география их использования постоянно расширяется [38].

2 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЕПЛОВОЗА

2.1 Разработка структурной схемы полупроводникового преобразователя

2.1.1 Описание общей структуры и принципа работы полупроводникового преобразователя

На рисунке 2.1 приведена структурная схема тягового привода тепловоза для одной оси с использованием предлагаемого полупроводникового преобразователя на *IGBT*-транзисторах [30 – 32, 39 – 41] для режима тяги.

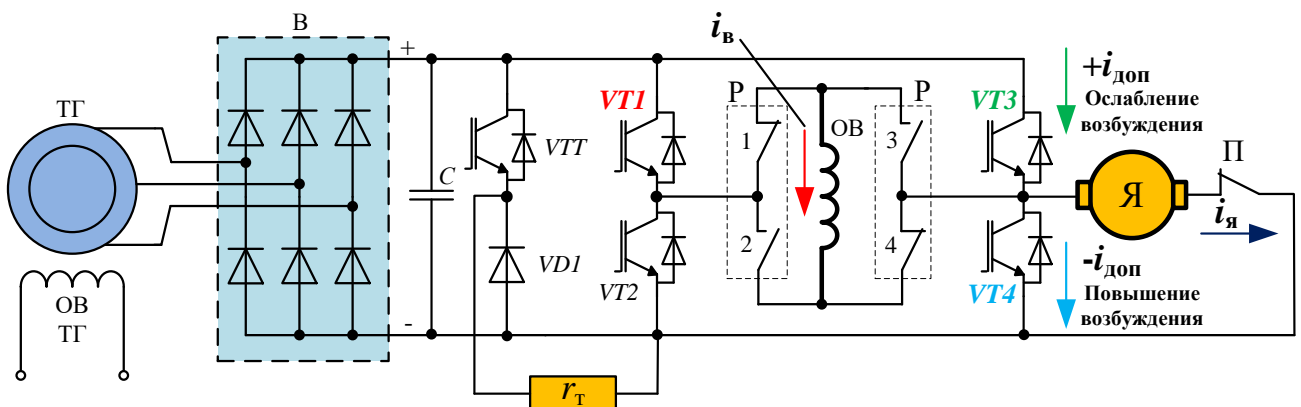


Рисунок 2.1 – Структурная схема тягового привода тепловоза, выполненная на базе полупроводникового преобразователя (режим тяги)

Переменное напряжение с обмотки тягового генератора ТГ поступает на вход неуправляемого выпрямителя В, с выхода которого постоянное напряжение поступает в канал тягового преобразователя, состоящий из *IGBT*-транзисторов *VT1* – *VT4*, *VTT*, диода *VD1* и конденсатора фильтра *C*.

В режиме тяги через силовой ключ *VT1* напряжение поступает на обмотку возбуждения ОВ ТЭД, которая включена последовательно с якорем. Для смены направления вращения используется реверсор Р. Для отключения якоря тягового двигателя от силовой схемы используется поездной контактор П.

Работа ключа $VT1$ возможна в полностью открытом и импульсном режимах. В первом режиме изменение напряжения на двигателе осуществляется только за счет изменения напряжения тягового генератора, как это реализовано в существующих системах [6]. Равномерное распределение силы тяги между осями при этом осуществляется путем плавного изменения коэффициента возбуждения за счет работы ключей $VT3$ и $VT4$:

- ослабление возбуждения ТЭД осуществляется при помощи транзистора $VT3$, работающего в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В этом случае часть тока якоря будет протекать минуя обмотку возбуждения. Изменяя коэффициент заполнения ШИМ-сигнала управления ключом $VT3$ можно регулировать коэффициент ослабления возбуждения в широких пределах. Регулировочные характеристики предложенной схемы ослабления аналогичны, приведенным в [35];

- повышение возбуждения ТЭД осуществляется при помощи ключа $VT4$, также работающего в режиме ШИМ. В этом случае часть тока обмотки возбуждения протекает минуя якорь.

Таким образом, работа силовых ключей $VT3$ или $VT4$ позволит тяговому приводу работать в режиме условно независимого (квазинезависимого) возбуждения при постоянном последовательном соединении обмотки возбуждения и якоря. Подробное теоретическое описание электромагнитных процессов, протекающих в двигателе при питании от полупроводникового преобразователя, приведено в Приложении А.

Импульсный режим работы ключа $VT1$ используется для подавления разносного боксования колесной пары, а также для индивидуального регулирования напряжение на двигателе по следующей формуле:

$$U_{дв} = U_{d.ср} \gamma_{VT1}, \quad (2.1)$$

где $U_{d.ср}$ – среднее напряжение звена постоянного тока преобразователя, В;

$U_{дв}$ – среднее напряжение на тяговом двигателе, В;

γ_{VT1} – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала управления $VT1$.

В этом случае работа привода возможна при более высоких значениях напряжения тягового генератора, что снижает его нагрев за счет уменьшения выходного тока. При этом требуемый ток ТЭД обеспечивается преобразователем.

Силовые ключи $VT2$ и VTT и тормозной резистор r_T предназначены для реализации режима электрического торможения.

В существующих решениях (рисунок 1.1) при ЭТ применяют независимое возбуждение ТЭД. Использование же предложенной схемы (рисунок 2.2) позволяет реализовать режим электрического торможения с последовательным возбуждением тяговых двигателей, как это выполнено на электровозах ЧС2Т, ЧС6, ЧС7 [42, 43]. Для этого реверсор P предварительно переводится в противоположное двигательному режиму состояние.

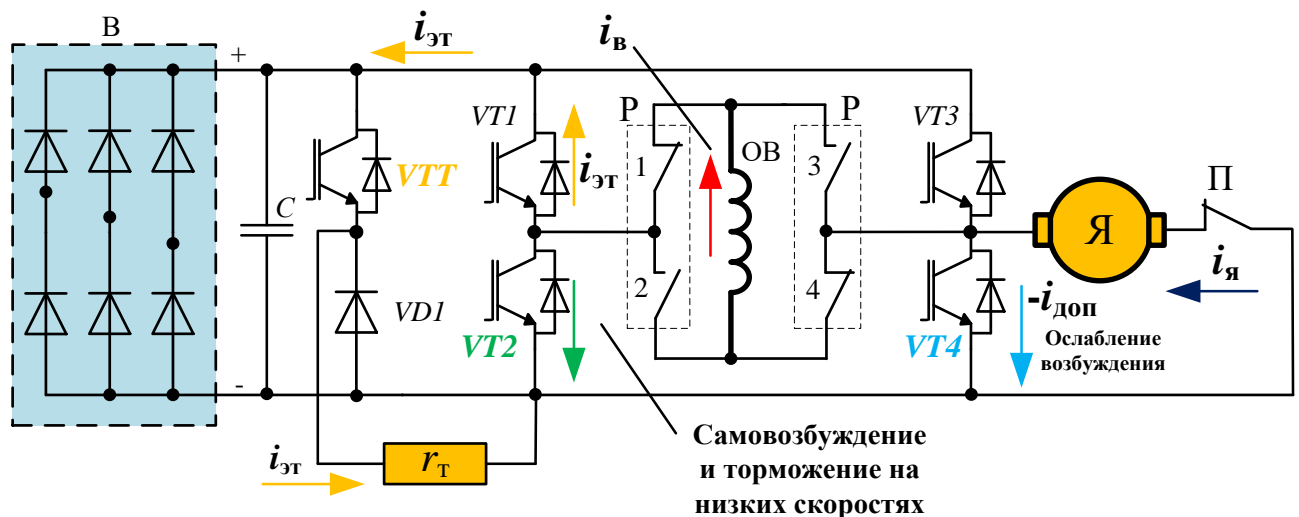


Рисунок 2.2 – Структурная схема тягового привода тепловоза, выполненная на базе полупроводникового преобразователя (режим ЭТ)

За счет остаточной магнитного потока в обмотке якоря наводится небольшая по значению ЭДС e_0 . Путем включения ключа $VT2$ происходит процесс самовозбуждения ТЭД по цепи: якорь Y – OB – ключ $VT2$, и ток возбуждения i_B возрастает до установившегося значения. Последующая работа ключей преобразователя зависит от скорости движения, аналогично описанному в [35] для электропоездов с импульсным регулированием.

В зоне низких скоростей движения преимущественно работает ключ $VT2$, который импульсно закорачивает цепь тормозного резистора, обеспечивая

заданную тормозную силу до скорости, близкой к нулю. Тем самым существенно расширяется диапазон скоростей, в котором возможно использование электрического тормоза. Похожее решение используется на тепловозах ТЭМ7А и ТЭМ14 [44, 45]. В этом случае эквивалентное сопротивление тормозного резистора будет определяться по формуле:

$$r_{\text{Т.ЭКВ}} = r_{\text{Т}}(1 - \gamma_{VT2}), \quad (2.2)$$

где $r_{\text{Т}}$ – номинальное сопротивление тормозного резистора, Ом;

$r_{\text{Т.ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление тормозного резистора, Ом;

γ_{VT2} – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала управления ключом VT2.

На высокой скорости встает вопрос обеспечения устойчивости электрического торможения, которая определяется неравенством [43]:

$$\frac{de}{di_{\text{ЭТ}}} < \frac{d}{di_{\text{ЭТ}}} [i_{\text{ЭТ}}(r_{\text{Т}} + r_{\text{ДВ}})], \quad (2.3)$$

где $r_{\text{ДВ}}$ – сопротивление обмоток двигателя, Ом;

$i_{\text{ЭТ}}$ – ток двигателя в режиме ЭТ, А;

e – ЭДС двигателя, В.

Из формулы (2.3) следует, что увеличение $e = C_E n \Phi$ (где C_E – конструктивная постоянная двигателя; n – частота вращения; Φ – магнитный поток главных полюсов) с увеличением тока $i_{\text{ЭТ}}$ должно быть меньше падения напряжения $i_{\text{ЭТ}}(r_{\text{Т}} + r_{\text{ДВ}})$. Данное неравенство (2.3) выдерживается в точке установившегося режима, которая при высоких скоростях движения может иметь критические значения тока и ЭДС электрической машины:

$$e = i_{\text{ЭТ}}(r_{\text{Т}} + r_{\text{ДВ}}). \quad (2.4)$$

В предложенной схеме (рисунок 2.2) изменять точку установившегося режима при постоянной скорости движения возможно путем изменения величины тормозного резистора $r_{\text{Т}}$ в большую сторону за счет работы ключа VTT в режиме ШИМ. При этом диод VDI предназначен для шунтирования тормозного резистора $R_{\text{Т}}$ при отключении транзистора VTT. Эквивалентное сопротивление тормозного резистора будет определяться по формуле:

$$r_{\text{Т.ЭКВ}} = \frac{r_{\text{Т}}}{\gamma_{VTT}}, \quad (2.5)$$

где $\gamma_{VTТ}$ – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала управления ключом $VTТ$.

Тогда, с учетом формул (2.2) и (2.5), можно записать:

$$r_{Т.ЭКВ} = \frac{r_{Т}(1-\gamma_{VTТ})}{\gamma_{VTТ}}. \quad (2.6)$$

Однако слишком высокое сопротивление тормозного резистора сопряжено с появлением больших ЭДС, что может привести к появлению кругового огня на коллекторе. Для исключения данного фактора следует применить ослабление возбуждения, что возможно за счет работы ключа $VT4$ в режиме ШИМ. Условия перехода на ослабленное возбуждение будут приведены в разделе 3 настоящей работы.

Таким образом, реализация ЭТ с последовательным возбуждением по схеме, приведенной на рисунке 2.2, возможна.

2.1.2 Разработка электрической структурной схемы полупроводникового преобразователя и выбор типа полупроводников

Тяговый генератор тепловоза 2ТЭ25КМ имеет две трехфазные обмотки, сдвинутые друг относительно друга на 30 эл. градусов [46]. Поэтому с целью повышения надежности локомотива и возможности частичного резервирования при отказе оборудования, подключенного к одной из обмоток, тяговый преобразователь целесообразно выполнить с двумя отдельными выпрямителями, как показано на рисунке 2.3.

К каждому из выпрямителей В1 и В2 подключается по три идентичных выходных канала К1 – К3 и К4 – К6. Каждая группа каналов питает соответствующие тяговые двигатели первой и второй тележек тепловоза. При неисправности в одной из выходных групп преобразователя вторая может продолжать функционировать. К выходу выпрямителей В1 и В2 подключены датчики напряжения ДН1 и ДН2, предназначенные для измерения напряжения звена постоянного тока преобразователя (шины «+» и «-»), а также тормозные импульсные регуляторы ТИР1 и ТИР2.

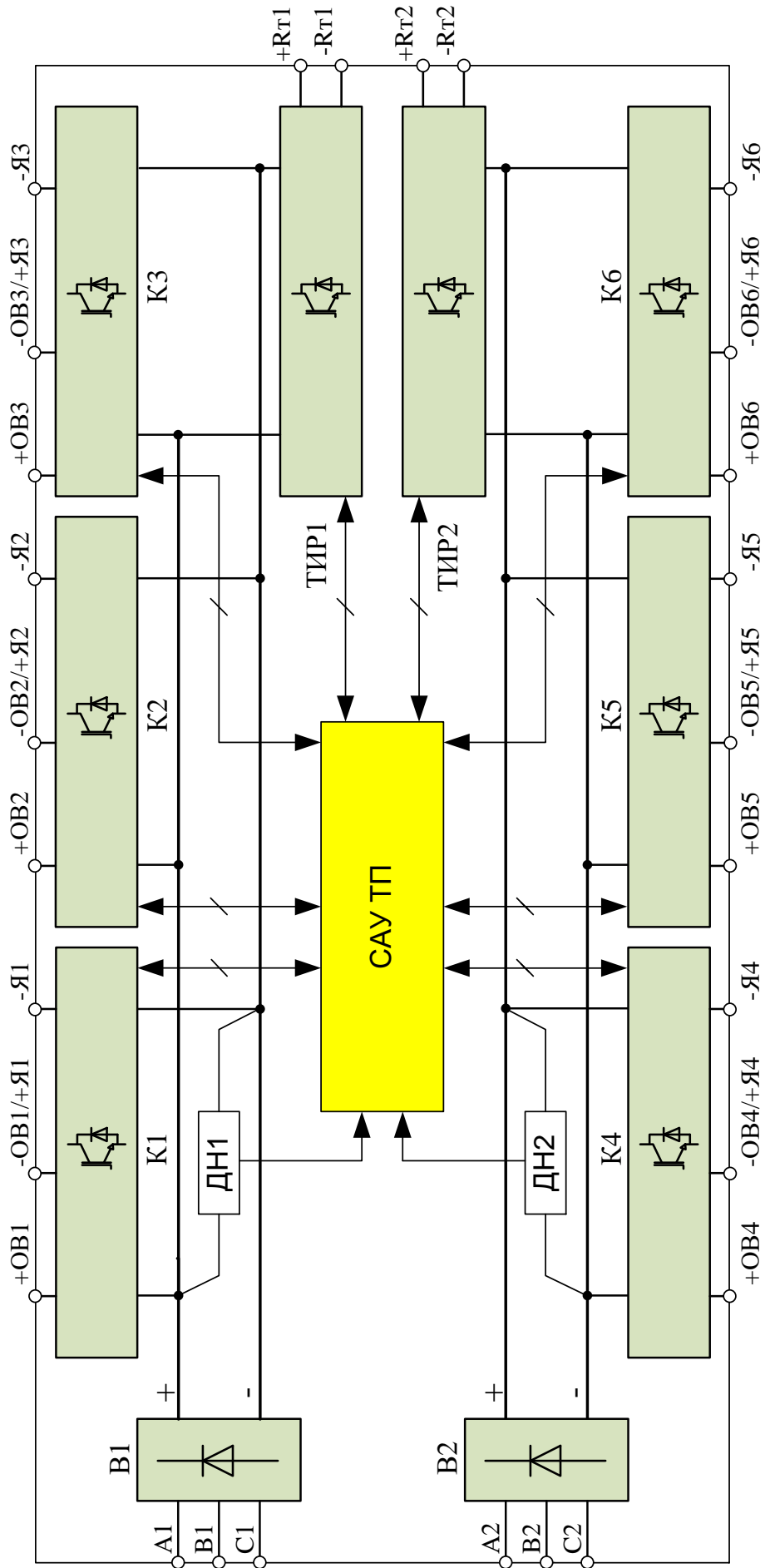


Рисунок 2.3 – Структурная схема полупроводникового преобразователя

ТИР предназначены для коммутации и регулирования тока через тормозные резисторы тепловоза. За счет работы ТИР обеспечивается регулируемое ЭТ, а также реостатные испытания дизель-генератора с нагружением его на собственные тормозные резисторы. Управление работой каналов преобразователя осуществляется посредством системы автоматического управления тяговым приводом (САУ ТП), которая выполняет обработку сигналов с датчиков и формирует управляющие воздействия на силовые полупроводниковые приборы преобразователя.

Преобразователь имеет шесть идентичных выходных каналов К1 – К6. Каждый выходной канал преобразователя (рисунок 2.4) содержит в себе батарею фильтровых конденсаторов C и четыре транзистора $VT1 - VT4$ с обратными диодами $VD1 - VD4$.

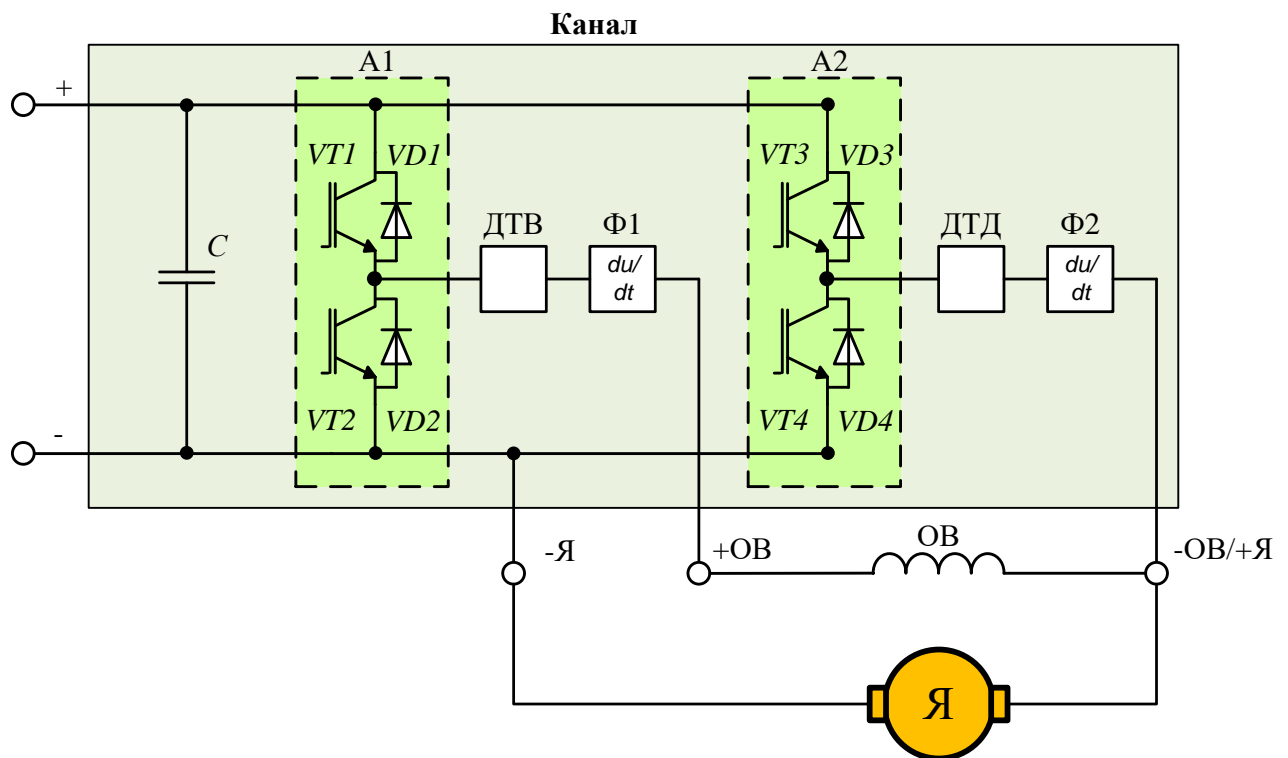


Рисунок 2.4 – Структурная схема канала полупроводникового преобразователя

Согласно [47] наиболее перспективными приборами силовой электроники для схем преобразователей являются *MOSFET*, *IGBT* и *IGCT*. В рассматриваемой схеме рабочее напряжение не превышает 1kV , поэтому в качестве силовых полупроводниковых приборов целесообразно использовать полумостовые *IGBT*-

модули $A1$ и $A2$ в корпусе *PrimePack*, каждый из которых содержит в себе пару *IGBT*-транзисторов со встроенными обратными диодами. Преимущества данного решения [48]:

- компактность конструкции и низкая паразитная индуктивность выводов, высокая удельная мощность и повышенная надежность;
- согласованные динамические характеристики *IGBT*-модуля и обратного диода [49], возможность наращивания выходной мощности за счет параллельного включения модулей.

Положительный вывод обмотки возбуждения OB ТЭД подключается к выходу модуля $A1$ через датчик тока возбуждения ДТВ и фильтр du/dt $\Phi 1$ (вывод «+OB»). Отрицательный вывод OB и положительный вывод якоря $Я$ подключаются к выходу модуля $A2$ через датчик дополнительного тока ДТД и фильтр du/dt $\Phi 2$ (вывод «-OB/+Я»). Отрицательный вывод якоря подключается к шине «-» звена постоянного тока (вывод «-Я»). Каждый канал подключается к общему звену постоянного тока преобразователя (выходу выпрямителя) через выводы «+» и «-».

В связи с работой транзисторов $VT1 - VT4$ в ключевом режиме к обмоткам двигателя будет прикладываться импульсное напряжение с высокой скоростью нарастания фронтов (du/dt), что будет негативно сказываться на электрической изоляции ТЭД, ускоряя её старение. Фильтры $\Phi 1$ и $\Phi 2$ предназначены для уменьшения скорости нарастания напряжения на обмотках двигателя до безопасных значений, указанных в [50].

Структурная схема тормозного импульсного регулятора преобразователя представлена на рисунке 2.5. ТИР подключается к общему звену постоянного тока преобразователя (выходу выпрямителя) через выводы «+» и «-» и содержит в себе снабберный конденсатор C , тормозной транзистор $VT1$ с обратным диодом $VD1$ и шунтирующий диод $VD2$ (соответствуют транзистору VTT и диоду $VD1$ на рисунке 2.2). В качестве силового полупроводникового прибора целесообразно использовать чопперный (англ. *chopper*) *IGBT*-модуль $A1$ [49], имеющий те же преимущества, что описывались выше.

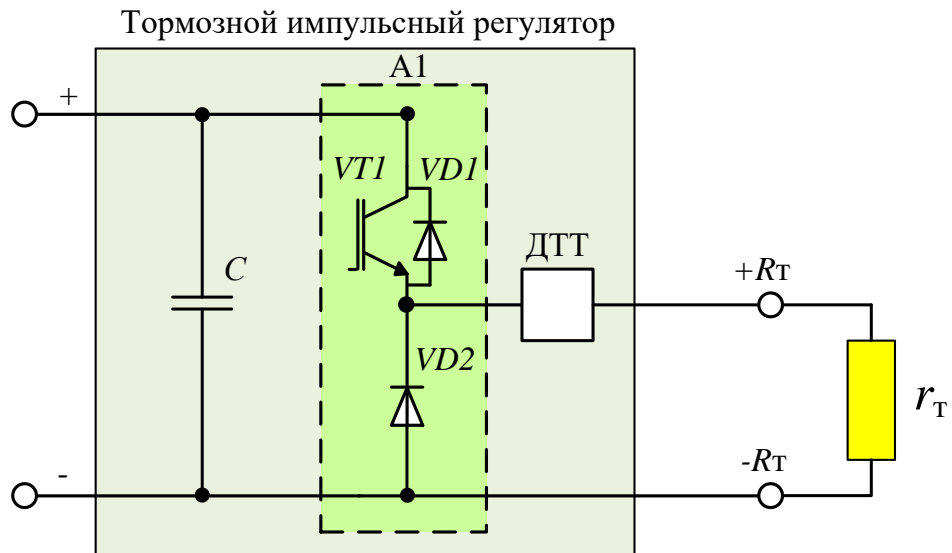


Рисунок 2.5 – Структурная схема тормозного импульсного регулятора

Выпрямители В1 и В2 преобразователя выполнены по мостовой шестипульсовой схеме (рисунок 1.7). Каждый выпрямитель содержит в себе по шесть диодов, в качестве которых можно использовать одно или двухпозиционные диодные модули с изолированным основанием, что позволит упростить конструкцию охладителя.

2.2 Разработка структурной схемы усовершенствованного тягового привода тепловоза с использованием полупроводникового преобразователя

На рисунке 2.6 приведена структурная схема усовершенствованного тягового привода тепловоза с новым полупроводниковым преобразователем, которая выполнена на основе электрической схемы магистрального тепловоза 2ТЭ25КМ [51]. Переменное напряжение с обмоток тягового генератора ТГ поступает на входы неуправляемых выпрямителей В1 и В2 тягового преобразователя ТП, а также на электроприводы собственных нужд тепловоза. Для защиты выпрямителей от токов короткого замыкания и возможности их отключения от ТГ установлены автоматические выключатели *QF1*, *QF2*.

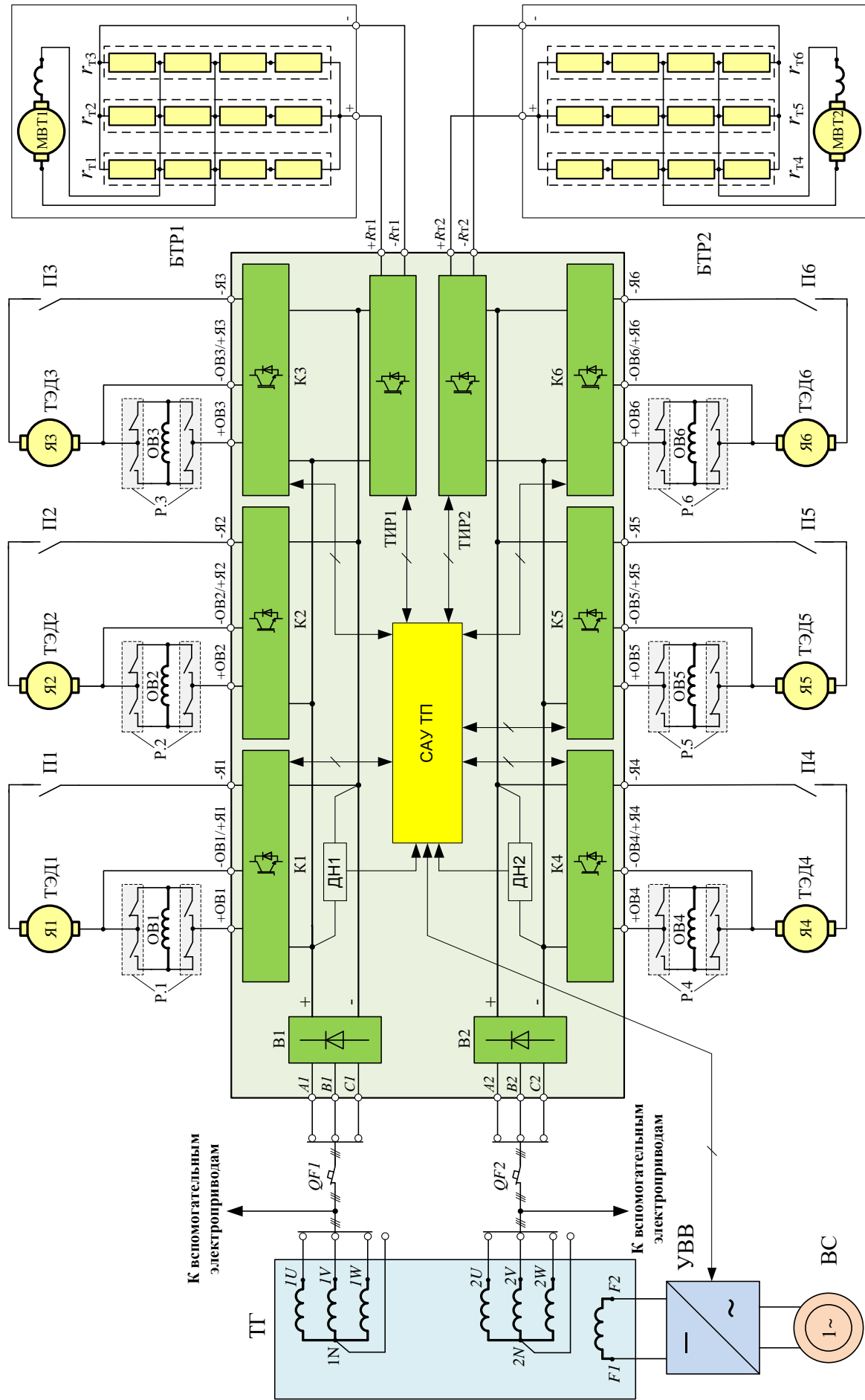


Рисунок 2.6 – Структурная схема усовершенствованного коллекторного тягового привода тепловоза

К каналам тягового преобразователя К1 – К6 подключены обмотки возбуждения ОВ1 – ОВ6 и якоря Я1 – Я6 тяговых электродвигателей. Реверсор на шесть групп (Р.1 – Р.6) используется для смены направления вращения, а поездные контакторы (П1 – П6) предназначены для отключения ТЭД от цепей питания.

К выходу тормозных импульсных регуляторов ТИР1 и ТИР2 подключены два блока тормозных резисторов (БТР1, БТР2). Каждый БТР состоит из трех групп тормозных резисторов $r_{т1} - r_{т3}$ и $r_{т4} - r_{т6}$ включенных параллельно. От их отпаек получают питание мотор-вентиляторы охлаждения тормозных резисторов МВТ1 и МВТ2 (аналогично существующей схеме).

Питание обмотки возбуждения ТГ осуществляется по штатной схеме: обмотка возбуждения (выводы «F1» и «F2») подключена к управляемому выпрямителю возбуждения УВВ, который в свою очередь получает питание от однофазного синхронного возбудителя ВС.

В сравнении со схемой, приведенной на рисунке 1.1, новая структурная схема тягового привода содержит меньшее количество контакторно-резисторной аппаратуры: исключены резисторы и контакторы ослабления поля (КШ1, КШ2 и Rш1 – Rш6), тормозной контактор ТК, тормозной переключатель ТП, предохранители FU1 – FU6 заменены двумя автоматическими выключателями.

2.3 Выводы по разделу 2

1 Новый тяговый преобразователь состоит из двух неуправляемых выпрямителей и шести идентичных каналов регулирования. Каждый канал содержит батарею фильтровых конденсаторов, датчики тока и может быть выполнен на двух полумостовых IGBT-модулях, обеспечивающих заданные функциональные возможности. На выходе каналов преобразователя необходимо предусмотреть фильтры du/dt для защиты изоляции тягового электродвигателя.

2 Преобразователь подключается к существующей схеме тепловоза с минимальными изменениями, при этом происходит её упрощение за счет исключения некоторого количества контакторно-резисторной аппаратуры.

3 Теоретически обоснована (Приложение А) возможность плавного ослабления и повышения возбуждения с использованием предлагаемого полупроводникового преобразователя.

3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ТЕПЛОВОЗА

3.1 Общие принципы построения систем автоматического управления тяговым приводом тепловозов

Система автоматического управления тяговым приводом (САУ ТП) тепловоза неразрывно связана с объединенным регулятором мощности и частоты вращения (ОРМЧВ) дизеля, задачей которого является формирование оптимальных характеристик дизеля в зависимости от мощности нагрузки и частоты вращения коленчатого вала [52 – 56]. Входным сигналом ОРМЧВ (рисунок 3.1) является заданная тяговая позиция N , поступающая с контроллера машиниста (КМ) на функциональный преобразователь ФП1.

Этот преобразователь формирует на своем выходе заданную частоту вращения коленчатого вала дизеля n_z для каждого значения N . Сигнал фактической частоты вращения n_ϕ формируется при помощи датчика частоты вращения (ДЧВ) и поступает на сумматор 1 и функциональные преобразователи ФП2 – ФП4. Регулятор частоты вращения (РЧВ) формирует сигнал управления углом подачи топлива H_ϕ для топливной аппаратуры дизеля.

На выходе функционального преобразователя ФП2 по значению сигнала n_ϕ формируется сигнал заданного значения угла подачи топлива H_z . Сигнал отклонения фактического угла подачи топлива от заданного ΔH_z поступает на регулятор свободной мощности (РСВ). Задачей РСВ является поддержание угла подачи топлива на заданном уровне для обеспечения работы дизеля в оптимальном режиме и экономии топлива. Выходом РСВ является значение свободной мощности дизеля $P_{св}$, которая может быть использована на тягу. Значение $P_{св}$ может меняться в зависимости от климатических условий, состояния дизеля и мощности, потребляемой вспомогательными нагрузками $P_{всп}$.

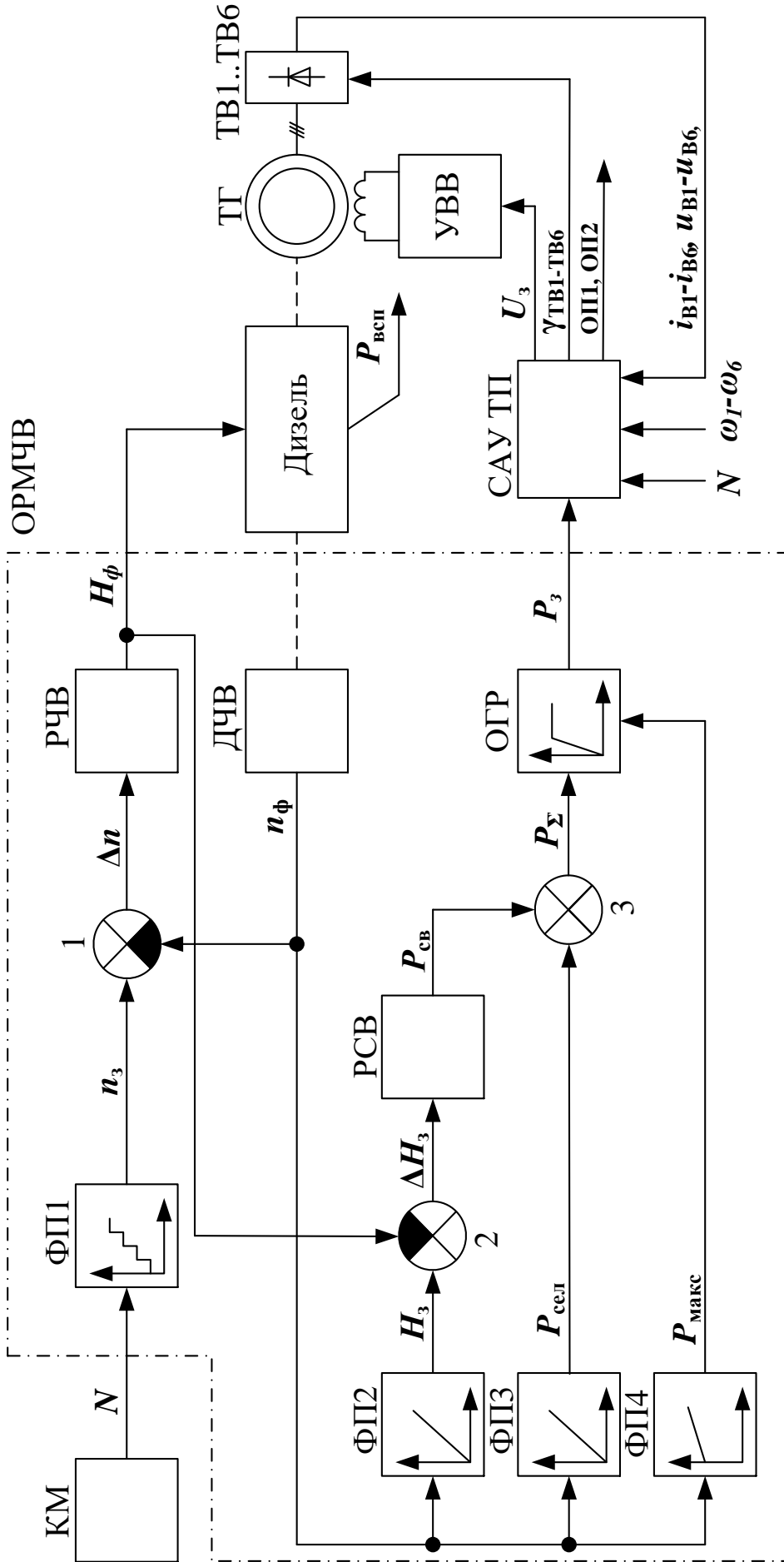


Рисунок 3.1 - Структурная схема ОРМЧВ дизеля тепловоза

Напротив, значение селективной мощности $P_{\text{сел}}$, формируемое функциональным преобразователем ФПЗ, является постоянной величиной для каждого значения $n_{\text{ф}}$. Заданная мощность P_3 на каждой позиции КМ в зависимости от величины свободной мощности $P_{\text{св}}$ может изменяться в пределах от минимального значения, определяемого селективной мощностью $P_{\text{сел}}$, до максимального значения $P_{\text{макс}}$, формируемого функциональным преобразователем ФП4.

Элементы тягового привода на рисунке 3.1 включают в себя: тяговый генератор (ТГ) с обмоткой возбуждения (ОВ), управляемый выпрямитель возбуждения (УВВ), тяговые выпрямители (ТВ1 – ТВ6), к выходам которых подключены тяговые электродвигатели (на рисунке 3.1 не показаны).

При этом САУ ТП управляет тяговым приводом; для этого на её входы поступают значения следующих сигналов: заданная мощность P_3 , текущая тяговая позиция N , а также токи $i_{\text{в1}} - i_{\text{в6}}$ и напряжения $u_{\text{в1}} - u_{\text{в6}}$ на выходе тяговых выпрямителей ТВ1-ТВ6 и частоты вращения тяговых электродвигателей $\omega_1 - \omega_6$.

Выходными сигналами САУТП являются:

- заданное напряжение на выходе тягового генератора U_3 ;
- углы управления тяговыми выпрямителями $\gamma_{\text{ТВ1}} - \gamma_{\text{ТВ6}}$;
- сигналы включения ступеней ослабления поля ТЭД ОП1, ОП2.

Регулирование заданной мощности осуществляется путем управления выходным напряжением тягового генератора через УВВ, а также включением и (или) отключением ступеней ослабления поля.

3.2 Разработка системы автоматического управления тяговым приводом для режима тяги

3.2.1 Разработка общей структуры

Укрупненная структурная схема новой САУ ТП тепловоза с использованием предлагаемого полупроводникового преобразователя (рисунок 3.2) состоит из следующих основных функциональных блоков:

- блока распределения нагрузок (БРН);
- регуляторов мощности (РМ1 – РМ6);
- функционального преобразователя ФП1, предназначенного для формирования заданного напряжения U_3 тягового генератора ТГ.

Блок распределения нагрузок предназначен для распределения заданной мощности P_3 между ТЭД с учетом сцепного веса каждой оси, изменяющегося в зависимости касательной силы тяги локомотива, а также для формирования уровней ограничения токов ТЭД при ограничении сцепления или при трогании. На вход БРН поступают следующие сигналы:

- сигнал текущей тяговой позиции N от контроллера машиниста КМ;
- сигнал заданной мощности на тягу P_3 от ОРМЧВ;
- сигнал скорости движения локомотива v и значения диаметров бандажей колесных пар $D_1 – D_6$ от системы управления верхнего уровня;
- сигналы частот вращения якорей ТЭД ($\omega_1 – \omega_6$) от датчиков частоты вращения ДЧВ1 – ДЧВ6;
- сигналы измеренных мощностей на выходах каналов тягового преобразователя ($P_1 – P_6$).

Выходом БРН являются заданные мощности ($P_{31} – P_{36}$) и уровни ограничений тока якоря ($I_{я.огр1} – I_{я.огр6}$), которые поступают на регуляторы мощности РМ1 - РМ6 каждого из каналов ТП.

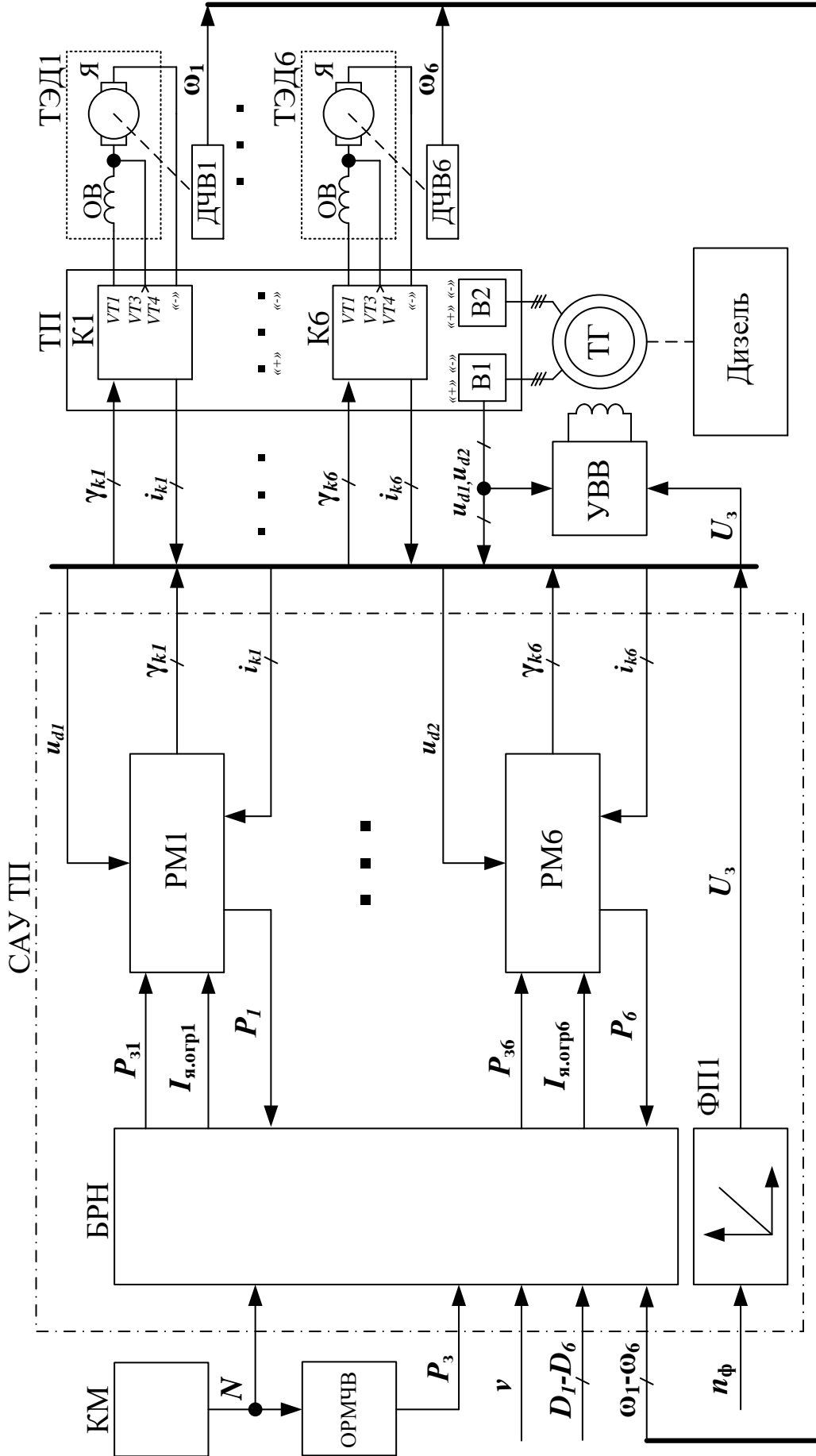


Рисунок 3.2 – Структурная схема САУ ТП для режима тяги

Тяговый преобразователь представлен на рисунке 3.2 шестью каналами К1 – К6, к которым подключены тяговые двигатели ТЭД1 – ТЭД6 и выпрямителями В1 и В2, каждый из которых питает по три канала преобразователя. Тормозной импульсный регулятор в режиме тяги не используется.

Регуляторы мощности РМ1 – РМ6 предназначены для формирования сигналов управления ($\gamma_{k1} - \gamma_{k6}$) силовыми ключами $VT1$, $VT3$ и $VT4$ каналов К1 - К6 тягового преобразователя на основе следующих входных параметров:

- заданного значения выходной мощности ($P_{з1} - P_{з6}$);
- уровня ограничения тока якоря ($I_{я.огр1} - I_{я.огр6}$);
- среднего значения напряжения в звене постоянного тока преобразователя u_{d1} (для РМ1 – РМ3) и u_{d2} (для РМ4 – РМ6);
- выходных токов канала ТП ($i_{k1} - i_{k6}$), включающих в себя ток обмотки возбуждения ($i_{в1} - i_{в6}$) и дополнительный ток ($i_{доп1} - i_{доп6}$).

Также на рисунке 3.2 также показан управляемый выпрямитель возбуждения УВВ, который, воздействуя на обмотку возбуждения ТГ, поддерживает его напряжение на заданном уровне $U_з$.

Предметом разработки в настоящей диссертации является регулятор мощности РМ и его внутренние блоки, а в качестве БРН может быть использован аналогичный блок, описанный в работе [57].

3.2.2 Разработка регулятора мощности

Структурная схема (рисунок 3.3) регулятора мощности (для одного канала ТП) показывает, что её входным сигналом является заданная мощность $P_з$, поступающая от внешнего контура управления на сумматор 1, где из него вычитается измеренное значение мощности $P_{изм}$ на выходе тягового преобразователя, рассчитываемое в блоке вычисления мощности БВМ. Разность $\Delta P_з$ поступает на вход регулятора мощности Р, выходным сигналом которого является задание на ток якоря, так как мощность ТЭД $P_{тэд}$ в основном

определяется произведением тока якоря $i_{я}$ и его ЭДС e :

$$P_{тэд} \approx i_{я} e . \quad (3.1)$$

Сигнал с выход регулятора P поступает на вход блока ограничения ОГР, где ограничивается на уровне сигнала $I_{я.огр}$, формируемого внешним контуром управления (блоком распределения нагрузок).

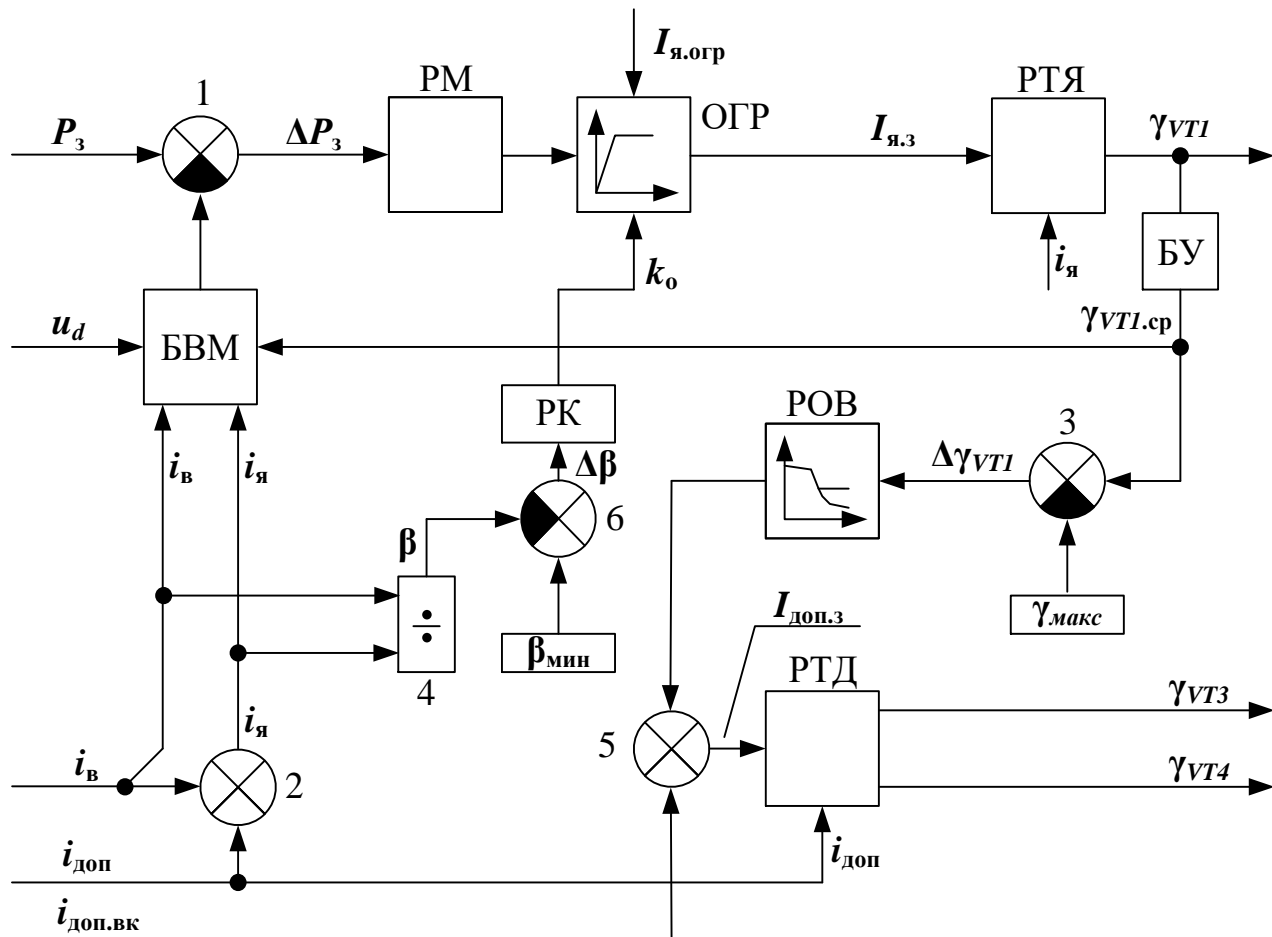


Рисунок 3.3 – Структурная схема регулятора мощности канала полупроводникового преобразователя

Далее сигнал заданного тока якоря $I_{я.з}$ поступает на вход регулятора тока якоря РТЯ, как и измеренное значение этого тока $i_{я}$. Выходом РТЯ является сигнал управления γ_{VT1} силовым ключом $VT1$ преобразователя.

Сигнал γ_{VT1} также поступает на блок усреднения БУ, на выходе которого формируется среднее значение $\gamma_{VT1.ср}$ коэффициента заполнения сигнала управления ключом $VT1$. Затем этот сигнал поступает в БВМ и на сумматор 3, где из него вычитается сигнал $\gamma_{макс}$, представляющий собой максимальный

коэффициент заполнения сигнала γ_{VT1} , при котором начинается процесс ослабления возбуждения ТЭД.

Разность $\Delta\gamma_{VT1}$ поступает на вход регулятора ослабления возбуждения РОВ, выходом которого является задание на величину дополнительного тока, которое затем складывается в сумматоре 5 со значением $i_{\text{доп.вк}}$, формируемым внешним контуром управления (БРН) и предназначенным для обеспечения режима повышенного возбуждения при трогании поезда. Сигнал заданного дополнительно тока $I_{\text{доп.з}}$ поступает на вход регулятора дополнительного тока РТД, выходом которого являются сигналы управления γ_{VT3} и γ_{VT4} силовыми ключами $VT3$ и $VT4$ преобразователя.

Сигнал текущего значения тока якоря $i_{\text{я}}$ формируется как сумма сигналов $i_{\text{в}}$ и $i_{\text{доп}}$, поступающих с датчиков тягового преобразователя:

$$i_{\text{я}} = i_{\text{в}} + i_{\text{доп}} . \quad (3.2)$$

Вычисление мощности $P_{\text{изм}}$ на выходе тягового преобразователя осуществляется в блоке БВМ по следующей формуле:

$$P_{\text{изм}} = u_{\text{в}} i_{\text{в}} + u_{\text{я}} i_{\text{я}} , \quad (3.3)$$

где $u_{\text{в}}$ – напряжение на обмотке возбуждения, В;

$u_{\text{я}}$ – напряжение на якоре, В.

Напряжения $u_{\text{в}}$ и $u_{\text{я}}$ определяются следующим образом:

$$u_{\text{в}} = r_{\text{в}} i_{\text{в}} , \quad (3.4)$$

$$u_{\text{я}} = u_d \gamma_{VT1.\text{ср}} - u_{\text{в}} , \quad (3.5)$$

где $r_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

u_d – напряжение в звене постоянного тока преобразователя, В.

Подставив формулы (3.4) и (3.5) в формулу (3.3) получим итоговое выражение для определения мощности $P_{\text{изм}}$:

$$P_{\text{изм}} = r_{\text{в}} i_{\text{в}}^2 + (u_d \gamma_{VT1.\text{ср}} - r_{\text{в}} i_{\text{в}}) i_{\text{я}} = r_{\text{в}} (i_{\text{в}}^2 - i_{\text{в}} i_{\text{я}}) + u_d \gamma_{VT1.\text{ср}} i_{\text{я}} . \quad (3.6)$$

Ограничение минимального значения коэффициента ослабления возбуждения β осуществляется при помощи регулятора РК. В случае уменьшения указанного коэффициента β ниже значения ограничения $\beta_{\text{мин}}$ положительная

разность с сумматора 6 поступает на вход регулятора РК, выходом которого является коэффициент $k_0 \leq 1$, уменьшающий значение тока якоря $I_{я.з}$ в блоке ОГР.

3.2.3 Разработка регуляторов тока

Обычно для управления силовыми ключами в преобразовательной технике используется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ). При этом частота сигнала управления является постоянной величиной, а изменяется коэффициент заполнения этого сигнала, значение которого является выходом функционального регулятора [58]. Наиболее часто используемым типом регулятора является линейный П (пропорциональный) или ПИ (пропорционально-интегральный) регулятор.

Упрощенная структурная схема регулятора тока импульсного полупроводникового преобразователя постоянного напряжения в постоянное, выполненная на базе ПИ-регулятора, приведена на рисунке 3.4.

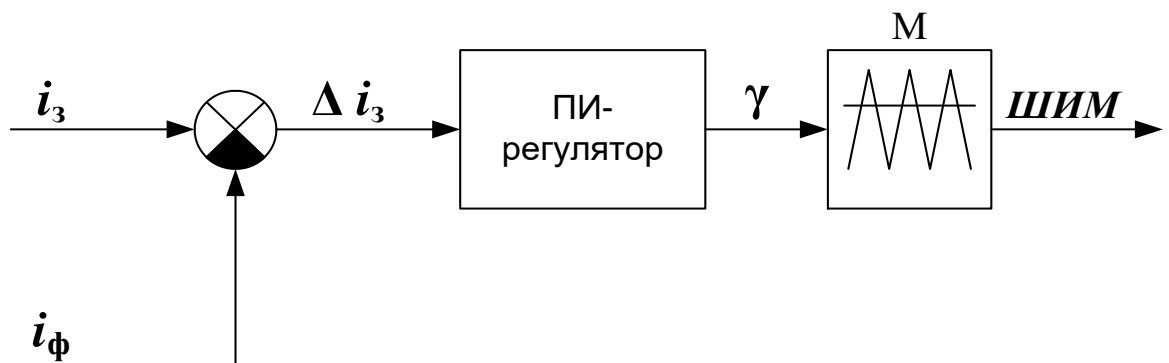


Рисунок 3.4 – Структурная схема регулятора тока импульсного полупроводникового преобразователя на базе ПИ-регулятора

На вход ПИ-регулятора поступает задание Δi_z , рассчитанное как разность заданного i_z , и фактического i_ϕ , токов. Выходом ПИ-регулятора является коэффициент заполнения γ ШИМ-сигнала управления силовым транзистором. Значение γ поступает на модулятор М, где происходит сравнение γ с

треугольным сигналом заданной частоты. Таким способом на выходе модулятора М получается ШИМ-сигнал управления силовым ключом. У рассмотренного выше регулятора тока имеются определенные недостатки:

- требуется настройка коэффициентов ПИ-регулятора, а также их динамическая подстройка в процессе работы вследствие внешнего возмущающего воздействия (например, изменения входного напряжения);

- фактически происходит регулирование среднего значения тока, которое обычно измеряется в середине импульса управления. При этом пульсации тока не контролируются, их величина обеспечивается выбором частоты модуляции и зависит от величины напряжения в звене постоянного тока преобразователя, а также от индуктивности нагрузки (в данном случае - обмоток ТЭД). В некоторых случаях такой регулятор не сможет обеспечить требуемое качество управления. Например, в случае повышенных пульсаций питающего напряжения или при входе магнитопровода в насыщение, пульсации (амплитуда) тока могут возрасти до опасных значений, а среднее значение будет соответствовать заданному;

- регулятор обладает некоторой инерционностью и в случае быстрых переходных процессов возможна ситуация, когда ток нагрузки превысит допустимый уровень. Для защиты от таких ситуаций требуется введение дифференциальной составляющей, что усложняет настройку регулятора;

- как указано в [35], в режиме ослабления возбуждения зависимость коэффициента ослабления поля от коэффициента заполнения ШИМ-сигнала управления $\beta(\gamma)$ обладает существенно нелинейной характеристикой. Это осложняет функционирование в динамических режимах системы автоматического управления. В этом случае требуется введение корректирующей функции в регулятор или установка добавочных резисторов в цепь дополнительного тока.

С развитием микропроцессорной техники и широким внедрением сигнальных DSP – процессоров стало возможным использовать релейный регулятор тока на базе гистерезисного компаратора, который нашел широкое применение в инверторах напряжения [59 – 62].

Структурная схема релейного регулятора показана на рисунке 3.5.

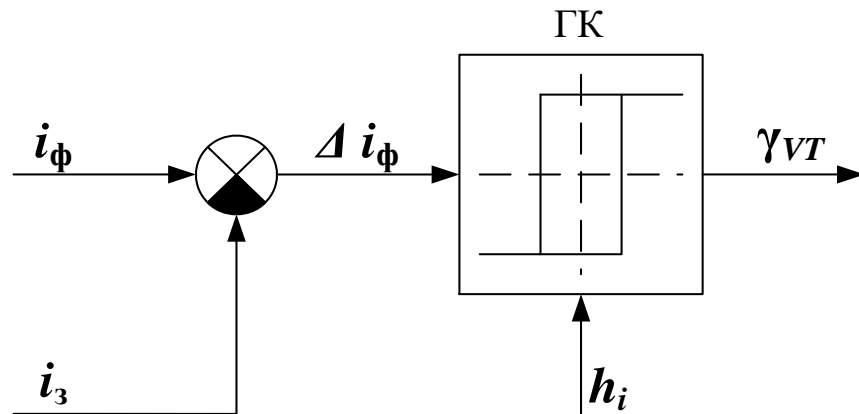


Рисунок 3.5 – Структурная схема релейного регулятора тока

На первый вход гистерезисного компаратора ГК поступает значение отклонения Δi_ϕ , которое является разностью между фактическим i_ϕ и заданным токами i_3 . Кроме того, на другой его вход поступает величина гистерезиса h_i или, иными словами, уровень максимального отклонения тока от заданного значения. Состояние выхода ГК γ_{VT} может принимать два значения - 0 (ключ выключен) и 1 (ключ включен) и определяется в соответствии с таблицей 3.1.

Таблица 3.1 – Функциональные состояния ГК

Результат сравнения токов	Сигнал на выходе ГК (γ_{VT_i})
$\Delta i_\phi > h_i$	0
$-h_i \leq \Delta i_\phi \leq h_i$	Сохраняется предыдущее состояние ($\gamma_{VT_{i-1}}$)
$\Delta i_\phi < -h_i$	1

Диаграмма работы гистерезисного компаратора в соответствии с таблицей 3.1 представлена на рисунке 3.6, из которого видно, что частота переключения силового ключа не является постоянной величиной. Для рассматриваемого в настоящей диссертации случая частота переключения будет зависеть от четырех величин: напряжения в звене постоянного тока преобразователя, индуктивности нагрузки (обмоток ТЭД), ЭДС якоря и величины гистерезиса h_i . Размах

пульсаций тока во всех режимах работы не будет превышать величины $2h_i$.

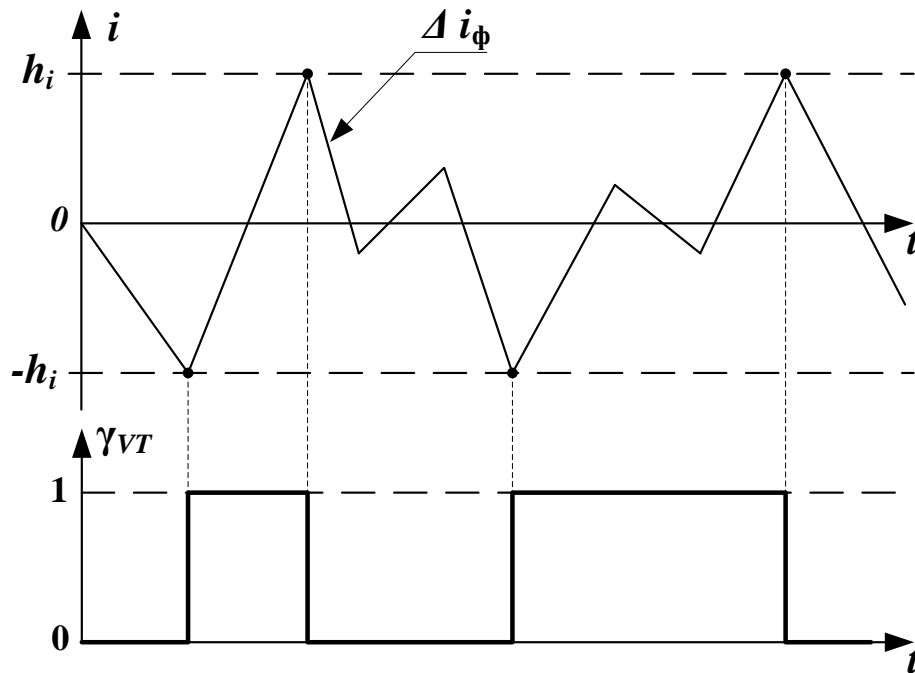


Рисунок 3.6 – Диаграмма работы гистерезисного компаратора

Рассмотренный выше способ регулирования тока в импульсных преобразователях прост в реализации и обладает следующими преимуществами:

- не требуется расчет, настройка и динамическая коррекция коэффициентов регулятора, как в случае с ПИ(Д)-регулятором;
- обеспечивается высокая точность регулирования заданного тока в условиях внешних воздействий: изменения напряжения в звене постоянного тока преобразователя, индуктивности обмоток или ЭДС якоря;
- реализуется высокое быстродействие, что позволяет более полно раскрыть потенциал *IGBT*-транзисторов;
- появляется возможность ограничения пикового тока, что особенно важно в аварийных режимах работы (например, при круговом огне по коллектору или коротком замыкании обмоток).

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что регуляторы тока для новой САУ ТП целесообразно выполнить на базе гистерезисных компараторов (рисунок 3.7).

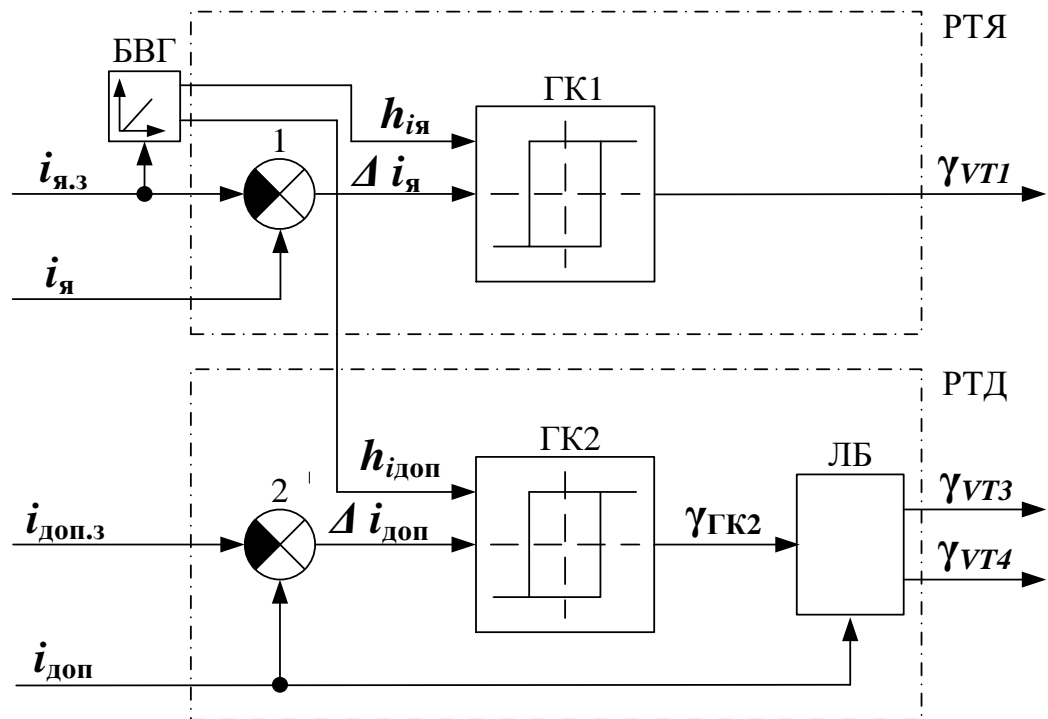


Рисунок 3.7 – Структурные схемы регуляторов тока для новой САУ ТП

Сигнал управления силовым ключом $VT1$ полупроводникового преобразователя γ_{VT1} формируется на выходе гистерезисного компаратора ГК1 регулятора тока якоря РТЯ. На вход ГК1 поступают значения заданного гистерезиса тока якоря $h_{i_я}$ и отклонение тока $\Delta i_я$ с выхода сумматора 1:

$$\Delta i_я = i_я - i_{я.з} . \quad (3.7)$$

На вход гистерезисного компаратора ГК2 РТД поступают значения заданного гистерезиса дополнительного тока $h_{i_{доп}}$ и отклонение $\Delta i_{доп}$ с выхода сумматора 2:

$$\Delta i_{доп} = i_{доп} - i_{доп.зад} . \quad (3.8)$$

Сигнал $\gamma_{ГК2}$ с выхода ГК2 поступает на вход логического блока (ЛБ), который в зависимости от знака заданного дополнительного тока $i_{доп.з}$ направляет свой входной сигнал на выходы $\gamma_{VT3} / \gamma_{VT4}$ как описано в таблице 3.2.

Режим ослабления возбуждения ($i_{доп.з} > 0$) реализуется силовым ключом $VT3$, а режим повышения возбуждения ($i_{доп.з} < 0$) - силовым ключом $VT4$: в этом режиме при включении $VT4$ дополнительный ток расчет по абсолютной

величине, но уменьшается относительно заданного значения, что требует изменения логики работы гистерезисного компаратора на инверсную.

Таблица 3.2 – Функциональные состояния ЛБ

Значение тока $i_{\text{доп.з}}$	Сигнал на выходах ЛБ	
	Y_{VT3}	Y_{VT4}
$i_{\text{доп.з}} > 0$	$Y_{ГК2}$	0
$i_{\text{доп.з}} = 0$	0	0
$i_{\text{доп.з}} < 0$	0	$\overline{Y_{ГК2}}$

Величина гистерезиса $h_{iя}$ рассчитывается в блоке вычисления гистерезиса БВГ. При этом критерием для расчета является качество регулирования выходного тока – соотношение величины пульсаций по отношению к заданному значению тока:

$$h_{iя} = \frac{A_{iя}}{100\%} i_{я.зад}, \quad (3.9)$$

где $A_{iя}$ – заданная амплитуда пульсаций тока якоря, %.

Учитывая, что, согласно уравнению (3.2), ток якоря прямо пропорционален дополнительному току, величину $h_{iдоп}$ целесообразно принять больше чем $h_{iя}$ на 10 – 15 %, учитывая наличие пульсаций в токе возбуждения.

3.2.4 Определение критерия перехода на ослабленное возбуждение

Согласно предложенной схеме регулятора мощности (рисунок 3.3) работа регулятора ослабления возбуждения РОВ начинается в момент достижения коэффициентом заполнения сигнала Y_{VT1} максимального уровня $Y_{\text{макс}}$.

Величина $Y_{\text{макс}}$ определяет максимальное напряжения $U_{\text{вых}}$, которое может быть приложено к тяговому двигателю со стороны преобразователя:

$$U_{\text{вых}} = U_{d.cр} Y_{\text{макс}}, \quad (3.10)$$

где $U_{d.cр}$ – среднее значение напряжения в звене постоянного тока

преобразователя, B .

Согласно уравнению (А.7) в Приложении А возможность удержания тока якоря и возбуждения на заданных уровнях сохраняется при условии, что мгновенное значение напряжения в звене постоянного тока преобразователя u_d больше чем падение напряжения $u_{дв}$ в цепи тягового двигателя:

$$u_{дв} = e + r_v i_v + r_{д+я} i_я . \quad (3.11)$$

Если же условие согласно формулы (А.7) в Приложении А не выполняется, то токи двигателя будут неконтролируемо спадать. Данное явление возможно при среднем значении γ_{VT1} близком к 1 из-за наличия пульсаций (рисунок 3.8) напряжения u_d , которое образуется путем выпрямления входного трехфазного переменного напряжения. При этом пульсации имеют место быть даже при наличии конденсаторов фильтра.

Максимальное мгновенное напряжение в звене постоянного тока преобразователя $u_{d.макс}$ равно амплитуде $e_{мл}$ входного линейного переменного напряжения преобразователя (при этом падение напряжения на диодах выпрямителя не учитывается).

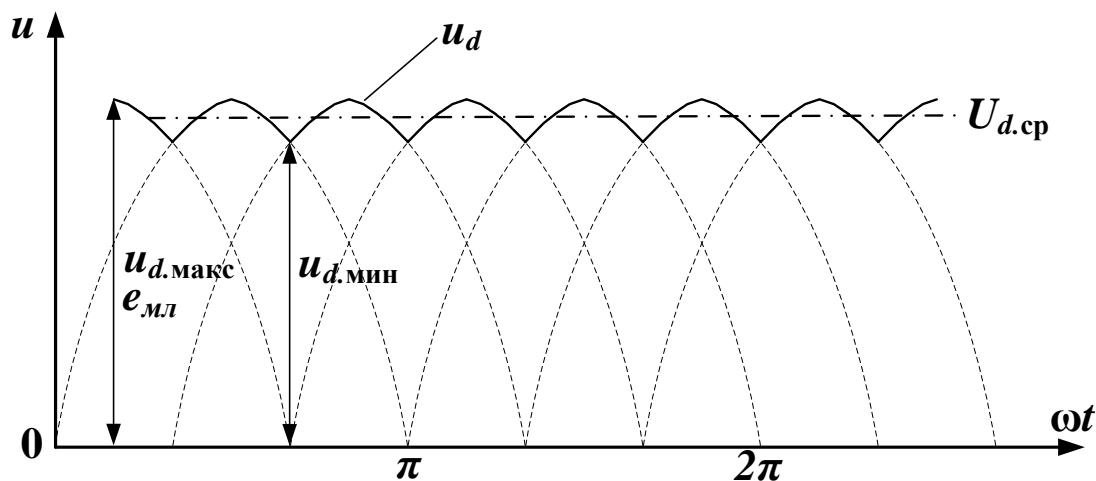


Рисунок 3.8 – Форма напряжения в звене постоянного тока преобразователя

Среднее значение $U_{d.ср}$ согласно [23] определяется по формуле (без учета конденсатора фильтра):

$$U_{d.ср} = \frac{3}{\pi} e_{мл} = 0,955 e_{мл} . \quad (3.12)$$

Минимальное значение выпрямленного напряжения $u_{d.\text{мин}}$ можно найти как (без учета конденсатора фильтра):

$$u_{d.\text{мин}} = e_{\text{мл}} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) = 0,866 e_{\text{мл}}. \quad (3.13)$$

На основе уравнений (3.12) и (3.13) можно определить соотношение между средним и минимальным мгновенным значениями напряжения u_d :

$$u_{d.\text{мин}} = 0,907 U_{d.\text{ср}}. \quad (3.14)$$

Неравенство (А.7) выполняется при условии:

$$u_{d.\text{мин}} > u_{\text{дв}}. \quad (3.15)$$

Учитывая, что в установившемся режиме работы $u_{\text{дв}} = U_{\text{вых}}$, можно записать:

$$0,907 U_{d.\text{ср}} > U_{d.\text{ср}} \gamma_{\text{макс}}, \quad (3.16)$$

$$\gamma_{\text{макс}} < 0,907. \quad (3.17)$$

Для дальнейших исследований величину $\gamma_{\text{макс}}$ принимаем равной 0,907.

3.2.5 Разработка алгоритма управления напряжением тягового генератора

В традиционных системах управления тяговой электропередачей автоматическая система регулирования напряжения (АСРН) ТГ является основным функциональным узлом, обеспечивающим управление передачей мощности от дизеля к тяговым электродвигателям тепловоза. К АСРН предъявляются достаточно высокие требования к быстрдействию и качеству управления, так как от этого зависят тяговые свойства, производительность и надежность локомотива [63].

При установившемся режиме работы АСРН регулирует выходное напряжение ТГ так, чтобы выполнялось следующее условие:

$$P_{\Gamma} = P_3 \eta_{\Gamma} = U_{\Gamma} I_{\Gamma}, \quad (3.18)$$

где P_3 – заданная мощность, Вт;

P_{Γ} – мощность на выходе тягового генератора, Вт;

η_{Γ} – КПД тягового генератора;

U_{Γ} – напряжение тягового генератора (выпрямленное значение), В;

I_{Γ} – ток тягового генератора (выпрямленное значение), А.

Зависимость $U_{\Gamma} = f(I_{\Gamma})$, соответствующая максимальной (15-й) позиции контроллера машиниста, называется внешней характеристикой тягового генератора (рисунок 3.9). Дополнительно на этом рисунке отмечены частичные характеристики ТГ на промежуточных позициях контроллера машиниста. Внешняя характеристика тягового генератора имеет три зоны: I – зона ограничения по максимальному току, II – зона ограничения по мощности дизеля (постоянства мощности), III – зона ограничения по максимальному напряжению. Стрелкой на рисунке 3.9 показано направление перемещения рабочей точки на внешней характеристике ТГ при работе тепловоза в режиме тяги.

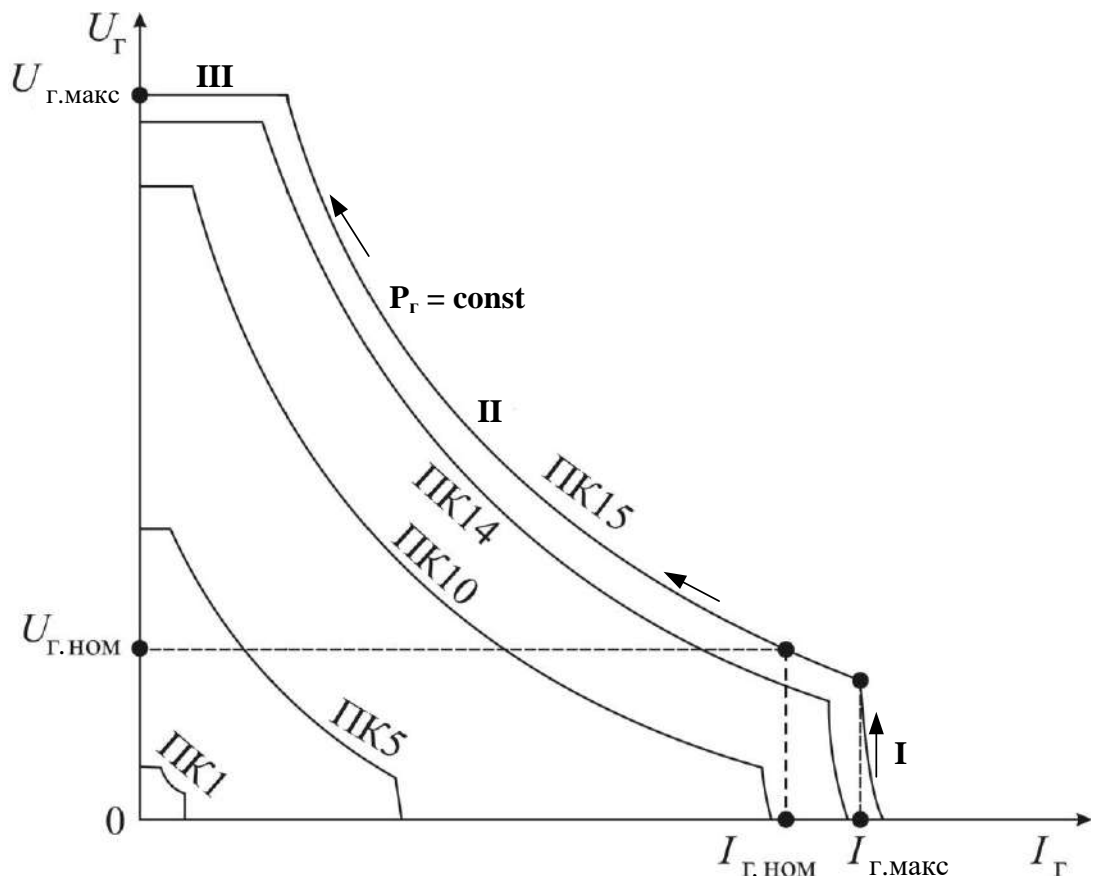


Рисунок 3.9 – Пример внешней характеристики тягового генератора

Наиболее сложный режим работы для ТГ возникает при трогания тепловоза с максимальной силой тяги (зона I), который характеризуется значительным

пусковым током и наибольшими электрическими потерями в ТГ. Работа ТГ на пусковых токах ограничена по времени для того, чтобы избежать перегрева и повреждения элементов конструкции ТГ.

В предлагаемом решении регулирование мощности ТЭД может осуществляться индивидуально для каждого канала полупроводникового преобразователя, который, по сути, является многоканальным преобразователем постоянного напряжения в постоянное. Поэтому можно уменьшить пусковой ток генератора за счет работы при более высоком выходном напряжении ТГ, которое будет снижено до требуемого каналами преобразователя. Тем самым, можно исключить работу ТГ в зоне I и снять связанные с этим ограничения.

При этом дальнейший алгоритм управления напряжением ТГ можно построить одним из двух способов. Первый предлагаемый способ базируется на условии выбора такого напряжения ТГ, чтобы его КПД оставался наибольшим насколько это возможно. На рисунке 3.10 приведен график зависимости КПД $\eta_r(I_r)$ для тягового генератора ГС-501А, на котором явно заметен максимум КПД на номинальном выходном токе (3660А).

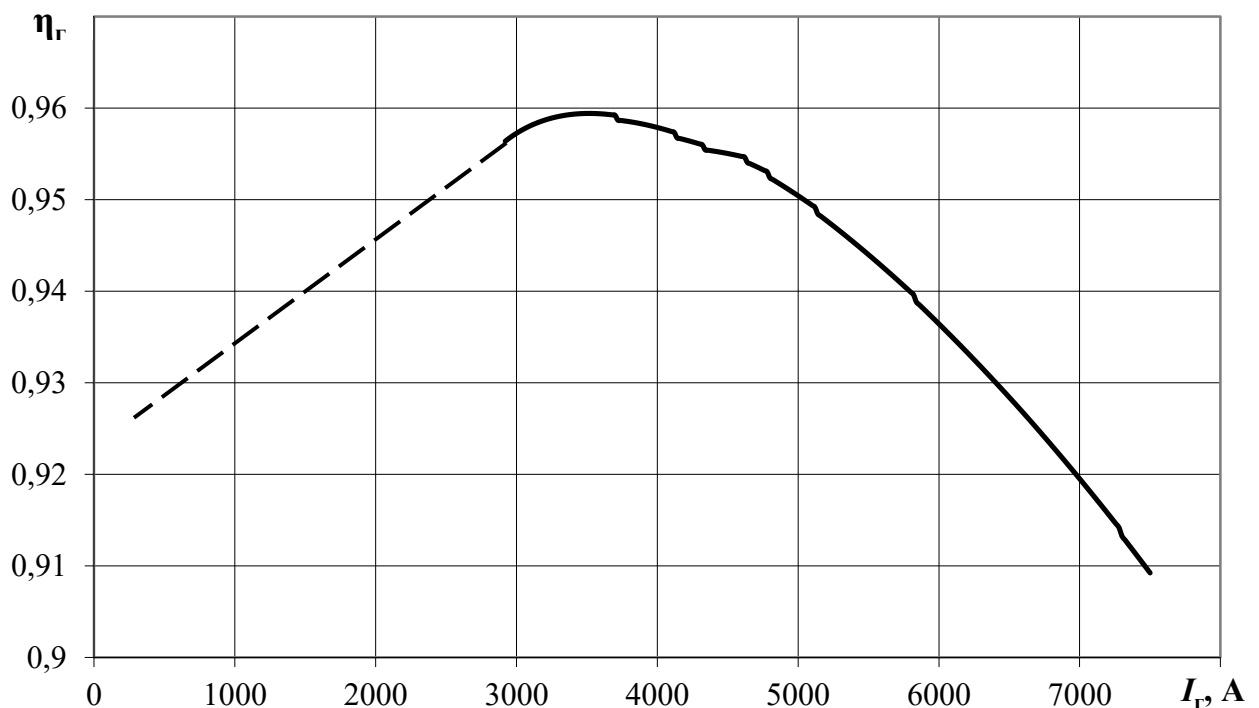


Рисунок 3.10 – Зависимость $\eta_r(I_r)$ для тягового генератора ГС-501А

В этом случае заданное напряжение на выходе ТГ можно рассчитать по формуле:

$$U_{Г.з} = \frac{P_з}{I_{Г.ном}}, \quad (3.19)$$

где $U_{Г.з}$ – заданное напряжение тягового генератора (выпрямленное значение), В;

$I_{Г.ном}$ – номинальный ток тягового генератора (выпрямленное значение), А.

Однако, в процессе движения тепловоза, выходное напряжение ТГ следует повышать до более высокого уровня независимо от выходного тока, чтобы обеспечить реализацию номинальной мощности дизеля во всем диапазоне скоростей движений тепловоза.

Второй предлагаемый способ базируется на использовании более простого алгоритма управления выходным напряжением при одновременном обеспечении наиболее благоприятных условий работы асинхронных двигателей мотор-вентиляторов, которые на тепловозах 2ТЭ116У(М), 2ТЭ25КМ подключены напрямую к тяговой обмотке ТГ. Этот способ позволит уменьшить их нагрев, повысить производительность и надежность. Напряжение на выходе ТГ предлагается поддерживать по следующему закону:

$$\frac{U_{Г.з}}{f_Г} = \mathit{const}, \quad (3.20)$$

где $f_Г$ – частота выходного напряжения тягового генератора, Гц.

Использование любого из предложенных способов позволит существенно упростить алгоритм управления напряжением ТГ, исключив его работу в зоне пусковых токов, связанный с этим нагрев изоляции, а также повысить его надежность [64, 65] и КПД. Одновременно с этим снижаются требования к функционалу, точности и быстродействию АСРН, так как основные функции управления электропередачей будут реализованы за счет полупроводникового преобразователя.

Разработка структурных схем АСРН для новой САУ ТП выходит за рамки настоящей работы, поэтому для дальнейших исследований будет использоваться второй из предложенных алгоритмов управления выходным напряжением ТГ как наиболее простой для реализации. Однако, при расчете экономической

эффективности применения полупроводникового преобразователя наиболее целесообразно воспользоваться первым предложенным алгоритмом как более энергоэффективным, хотя и более сложным к реализации.

3.3 Разработка системы автоматического управления тяговым приводом для режима электрического торможения

3.3.1 Разработка общей структуры

Электрическое торможение (ЭТ) обладает рядом преимуществ по сравнению с пневматическим:

- нет ограничений по условиям нагрева и механической прочности бандажей колесных пар, отсутствует возможность термического повреждения колес;

- возможность ограничения тормозной силы по условиям сцепления колес с рельсами;

Быстродействие ЭТ позволяет поддерживать скорость движения на спусках. Применение ЭТ сокращает время работы пневматического тормоза и снижает износ тормозных колодок и колес подвижного состава [55].

Укрупненная структурная схема тягового привода тепловозов с коллекторными тяговыми двигателями (2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ) для режима ЭТ приведена на рисунке 3.11.

В режиме ЭТ возбуждение ТЭД независимое, обмотки возбуждения ОВ1 – ОВ6 соединены последовательно и питаются от тягового генератора ТГ через один из каналов управляемого выпрямителя УВ. Якоря ТЭД Я1 – Я6 индивидуально подключены к тормозным резисторам $r_{т1} – r_{т6}$. Регулирование тормозной силы происходит за счет изменения тока в обмотках возбуждения тяговых электродвигателей.

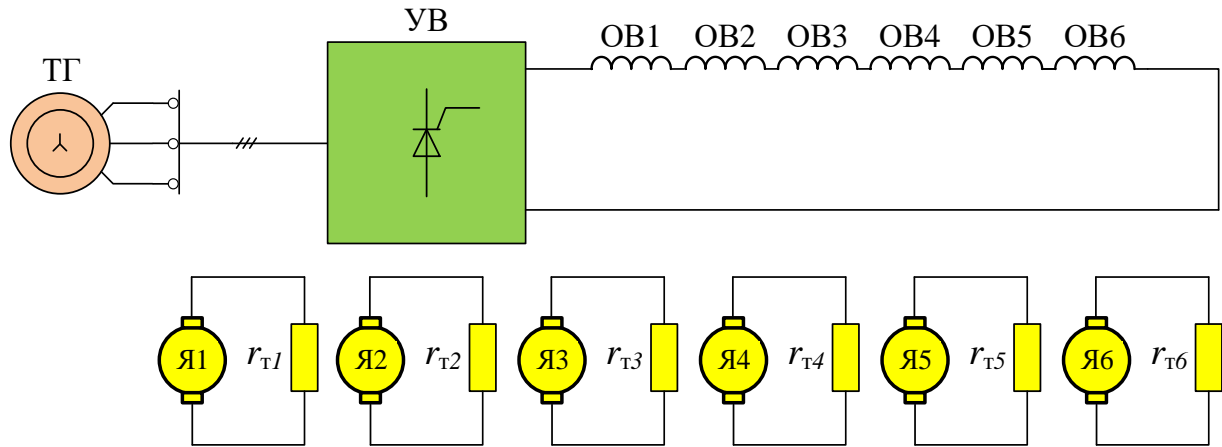


Рисунок 3.11 – Увеличенная структурная схема тягового привода тепловозов с коллекторными ТЭД для режима ЭТ

Предельная тормозная характеристика тепловоза, соответствующая данной схеме, приведена на рисунке 3.12 (на примере секции 2ТЭ25КМ).

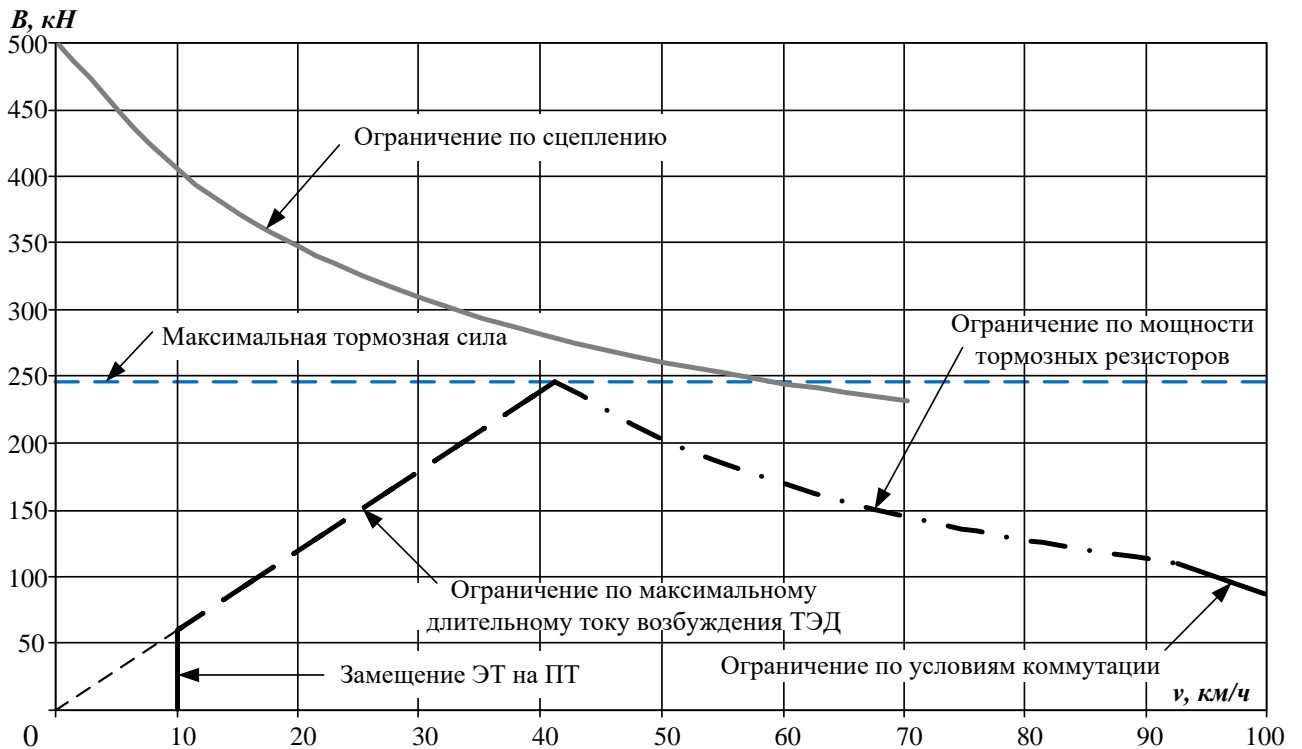


Рисунок 3.12 – Предельная тормозная характеристика секции тепловоза 2ТЭ25КМ

На неё наложены следующие ограничения:

- ограничение по условиям коммутации (по максимальной реактивной ЭДС), которое выражено в виде максимально допустимой величины произведения тока якоря на частоту вращения;

- ограничение по длительному току (мощности) тормозных резисторов;
- ограничение по длительному току возбуждения ТЭД.

Тормозная сила тепловоза достигает максимального значения на скорости 40 км/ч, а затем начинает снижаться и на скорости 10 км/ч (пробелы?) [46] происходит замещение на пневматическое торможение. Кривая ограничения по сцеплению проходит выше тормозной характеристики и не влияет на нее. Недостатки существующей схемы ЭТ подробно описаны в разделе 1.

Согласно [55], при остановочном торможении и при подтормаживании на спусках наиболее удобной является регулировочная тормозная характеристика с поддержанием постоянства тормозной силы $B = const$ (рисунок 3.13), где обозначено: B_T – тормозная сила, $P_{ЭТ}$ – мощность электрического тормоза, v – скорость движения.

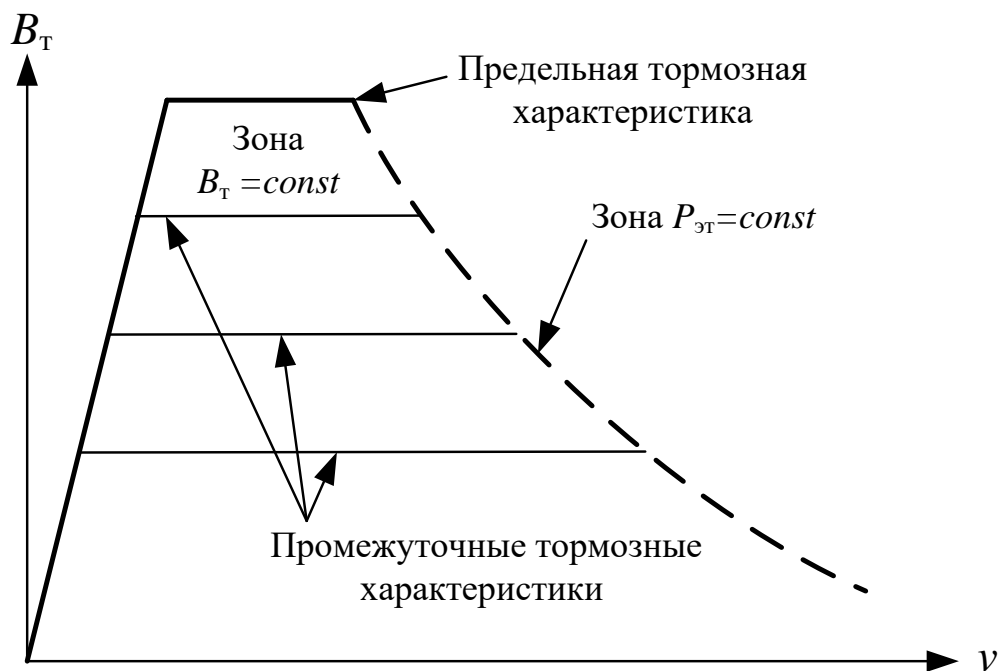


Рисунок 3.13 – Общий вид регулировочной тормозной характеристики $B = const$

Такая характеристика хорошо согласуется с характеристиками пневматического торможения, но, в отличие от него, обладает механической устойчивостью при торможениях на спусках. Машинист может задавать величину замедления независимо от скорости движения. Поэтому для дальнейшей работы будем использовать тормозную характеристику $B = const$.

В усовершенствованной схеме тягового привода тепловоза предполагается использовать последовательное возбуждение ТЭД в режиме ЭТ, при этом источник энергии для питания обмоток возбуждения не требуется.

С учетом вышеизложенного была разработана общая структура САУ ТП для режима ЭТ (рисунок 3.14), состоящая из следующих основных функциональных блоков:

- блок распределения нагрузок (БРН);
- регуляторы силы торможения (РСТ1 – РСТ6);
- блок управления тормозным импульсным регулятором (БУТИР).

На рисунке 3.14 не показаны дизель и тяговый генератор, так как они не участвуют в процессе электрического торможения. Управление выходным напряжением генератора осуществляется АСРН по условию обдува электрических машин и не является предметом рассмотрения настоящей работы.

Блок распределения нагрузок предназначен для распределения заданной тормозной силы B_3 между ТЭД и формирования следующих ограничений:

- ограничения B_3 по условиям сцепления;
- ограничения B_3 по условиям максимальной мощности тормозных резисторов;
- ограничения тока якоря по условиям коммутации;
- ограничение тока якоря по условиям нагрева электрической машины.

На вход БРН поступают следующие сигналы:

- сигнал заданного тормозной силы B_3 от функционального преобразователя ФП1, вырабатываемый в соответствии с текущей тормозной позицией N , поступающей от контроллера машиниста КМ;
- сигнал скорости движения локомотива v и значения диаметров бандажей колесных пар $D_{k1} - D_{k6}$;
- сигналы частот вращения якорей ТЭД ($\omega_1 - \omega_6$) от датчиков частоты вращения ДЧВ1- ДЧВ6.

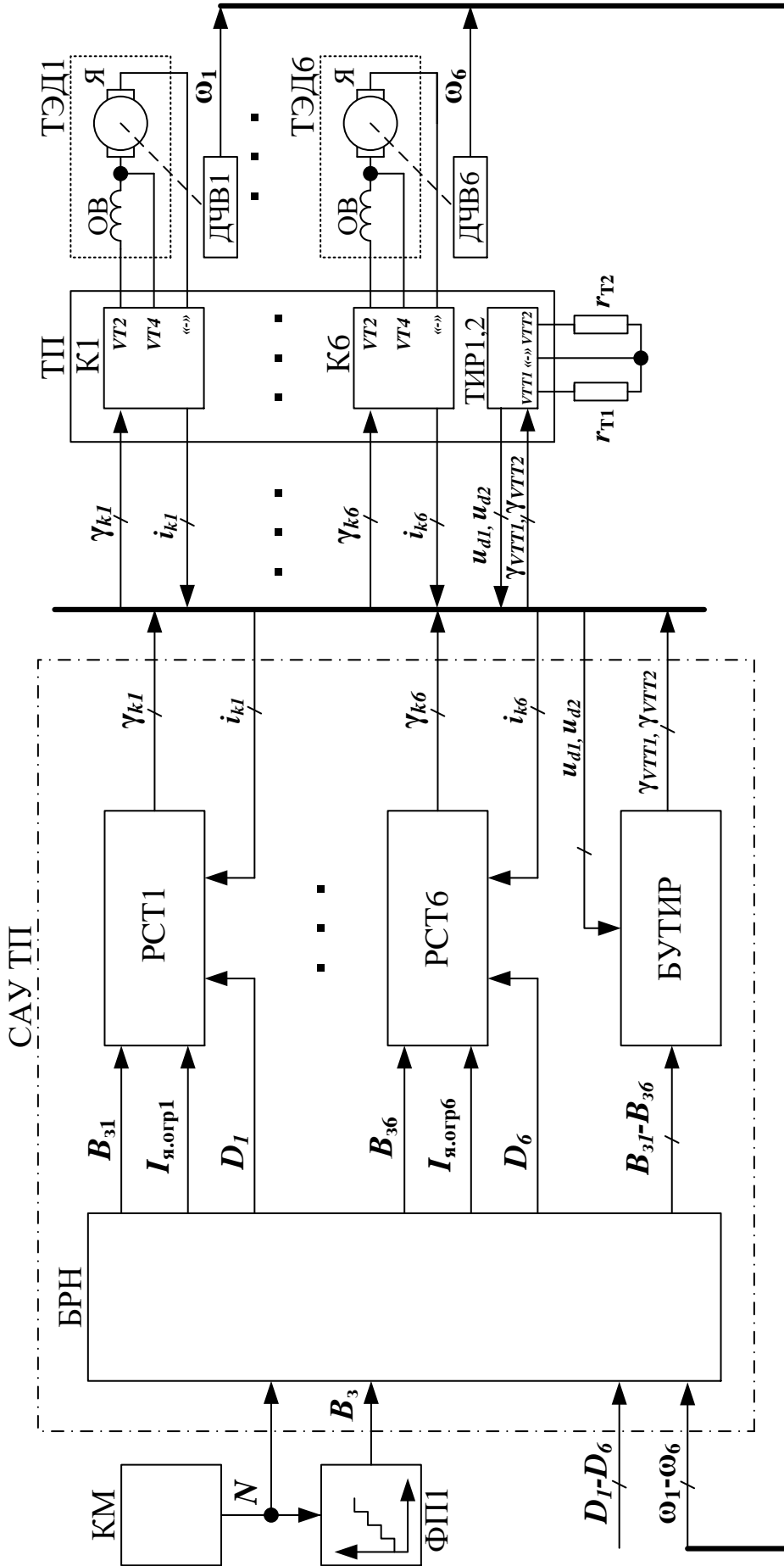


Рисунок 3.14 – Структурная схема САУ ТПИ для режима ЭТ

Выходными сигналами БРН являются заданные тормозные силы ($B_{з1} - B_{з6}$), уровни ограничений тока якоря ($I_{я.огр1} - I_{я.огр6}$), а также значения диаметров бандажей колесных пар $D_1 - D_6$, которые поступают на регуляторы силы торможения РСТ1 – РСТ6 каждого из каналов ТП.

Тяговый преобразователь представлен шестью каналами К1 – К6, к которым подключены тяговые двигатели ТЭД1 - ТЭД6, а также тормозными импульсными регуляторами (ТИР1, ТИР2), к которым подключены тормозные реостаты $r_{т1}, r_{т2}$.

Регуляторы силы торможения РСТ1 - РСТ6 предназначены для формирования сигналов управления ($Y_{k1} - Y_{k6}$) силовыми ключами VT2 и VT4 каналов К1 - К6 полупроводникового преобразователя на основе следующих входных параметров:

- заданная тормозная сила ($B_з$);
- уровня ограничения тока якоря ($I_{я.огр}$);
- значения диаметра бандажа колесной пары (D);
- входных токов канала ТП (i_k), включающих в себя ток обмотки возбуждения ($i_в$) и дополнительный ток ($i_{доп}$).

Блок управления тормозными импульсными регуляторами (БУТИР) предназначен для формирования сигнала управления ключами VTT ТИР1 и ТИР2 (рисунок 2.6) на основе заданных значений $B_{з1} - B_{з6}$ и напряжений в звеньях постоянного тока преобразователя u_{d1}, u_{d2} .

Предметом разработки в диссертации являются РСТ и БУТИР, а БРН может быть построен по принципам, приведенным в работе [57].

3.3.2 Разработка регулятора силы торможения

Структурная схема регулятора силы (рисунок 3.15) торможения (для одного канала преобразователя) показывает, что её входным сигналом является заданная тормозная сила $B_з$. На сумматоре 1 из $B_з$ вычитается измеренное значение $B_{изм}$,

рассчитываемое в блоке вычисления силы торможения БВСТ. Разность ΔB_3 поступает на вход регулятора Р, выходом которого является задание на ток якоря ТЭД, поступающее после ограничения на регулятор ОТЯ, как и в структурной схеме САУ ТП для режима тяги (рисунок 3.3). Однако, в данном случае выходом ОТЯ является сигнал управления γ_{VT2} ключом $VT2$ полупроводникового преобразователя.

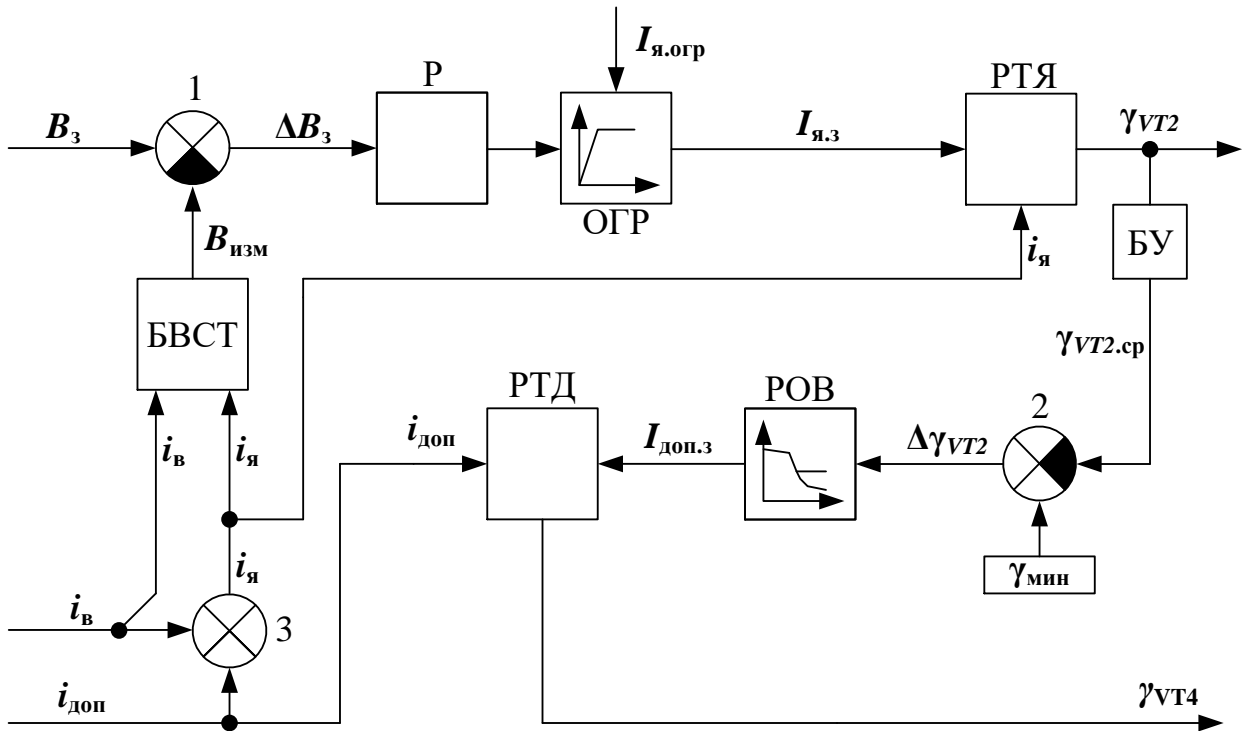


Рисунок 3.15 – Структурная схема регулятора силы торможения

Ослабление возбуждения осуществляется аналогично описанному для рисунка 3.3 с тем отличием, что сигнал $\gamma_{VT2.сп}$, вычитается из сигнала $\gamma_{мин}$, представляющий собой минимальный коэффициент заполнения сигнала γ_{VT2} , при котором начинается процесс ослабления возбуждения ТЭД. Выходом РТД в режиме ЭТ является сигнал управления γ_{VT4} силовым ключом $VT4$ полупроводникового преобразователя.

Вычисление тормозной силы $B_{изм}$ колесной пары осуществляется в блоке БВСТ по следующей формуле [43]:

$$B_{изм} = \frac{2M_{дв}\mu\eta_{ред}}{D_k 1000}, \quad (3.23)$$

где $M_{\text{дв}}$ – крутящий момент на валу двигателя, Hm ;

D_k – диаметр банджа колесной пары, m ;

$\eta_{\text{ред}}$ – коэффициент полезного действия редуктора;

μ – передаточное соотношение редуктора;

$B_{\text{изм}}$ – тормозная сила, kH .

При этом, согласно [43], механическими и магнитными потерями в двигателе можно пренебречь и считать, что крутящий момент на валу ТЭД $M_{\text{дв}}$ соответствует электромагнитному моменту M_E , который можно вычислить по формуле:

$$M_E = 9,55 C_E \Phi i_{\text{я}}, \quad (3.24)$$

где $i_{\text{я}}$ – ток якоря, A ;

C_E – конструктивная постоянная двигателя;

Φ – магнитный поток главных полюсов, $Bб$.

Магнитный поток главных полюсов рассчитывается на основе разработанной в разделе 4 математической модели ТЭД с учетом вихревых токов от главных и добавочных полюсов и реакции якоря по формуле (4.4).

3.3.3 Обеспечение устойчивости режима электрического торможения

Устойчивость режима электрического торможения определяется неравенством (2.3). Данное неравенство выдерживается в точке установившегося режима (формула (2.4)). Пренебрегая величиной сопротивления обмоток двигателя можно записать:

$$e = i_{\text{эт}} r_{\text{т}}, \quad (3.25)$$

где $i_{\text{эт}}$ – ток двигателя в режиме ЭТ, A .

Для устойчивой работы привода в режиме ЭТ следует обеспечить выполнение неравенства (2.3), что можно сделать за счет работы транзистора $VT2$ преобразователя в ключевом режиме (рисунок 2.2). В момент выключения ключа $VT2$ в индуктивности обмотки двигателя формируется ЭДС самоиндукции:

$$e_L = L_{\text{дв}} \frac{di_{\text{эт}}}{dt}, \quad (3.26)$$

где e_L – ЭДС самоиндукции, В;

$L_{\text{дв}}$ – индуктивность обмотки двигателя, Гн.

ЭДС самоиндукции складывается с ЭДС двигателя и заряжает конденсатор фильтра, что приводит к увеличению напряжения в звене постоянного тока преобразователя и на тормозном резисторе. Обратные диоды (рисунок 2.2) при этом препятствуют разряду емкости фильтра. Аналогичным образом работают повышающие DC/DC преобразователи [23, 66].

В этом случае формула (3.25) примет вид:

$$e + e_L = i_{\text{эт}} r_T. \quad (3.27)$$

При $e_L > 0$ обеспечивается условие $e < i_{\text{эт}} r_T$ и, соответственно, устойчивость режима электрического торможения. Для формирования данного условия следует обеспечить постоянную работу ключа VT2 преобразователя с минимальным коэффициентом заполнения. В предложенной САУ ТП это реализуется посредством регулятора ослабления возбуждения (РОВ) (рисунок 3.15), который начинает работать при достижении сигналом $Y_{VT2.cр}$ значения $Y_{\text{мин}}$.

3.3.4 Разработка блока управления тормозным импульсным регулятором

Значение напряжения в звене постоянного тока u_d предлагается поддерживать исходя из требуемой величины тормозной мощности, рассчитываемой по заданной тормозной силе и текущей скорости движения. Это позволит при работе привода в зоне ограничения тока якоря по условиям коммутации поддерживать максимальные значения u_d и, соответственно, ЭДС двигателя e , для увеличения тормозной мощности и тормозной силы тепловоза согласно формулам (3.23, 3.24).

Структурная схема БУТИР для приведена на рисунке 3.16.

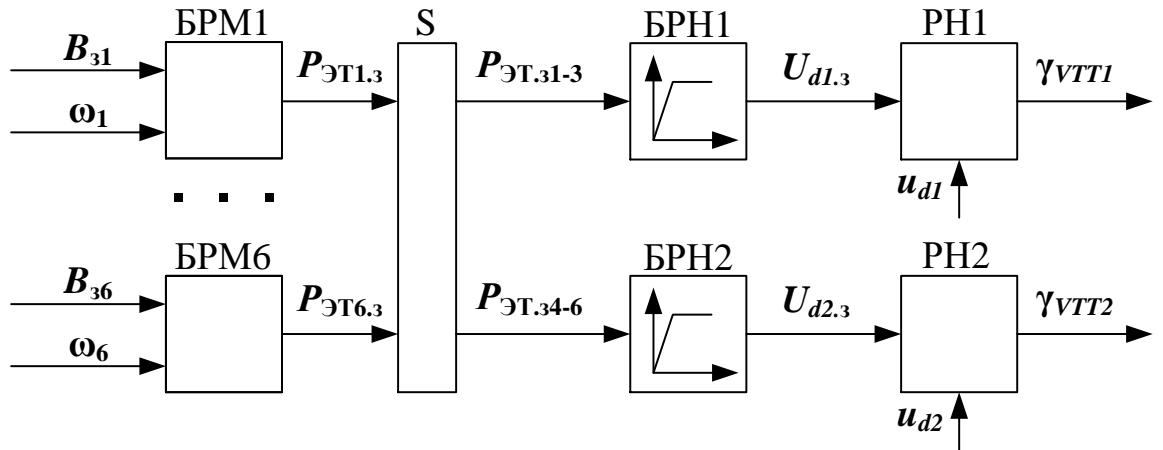


Рисунок 3.16 – Структурная схема БУТИР

По значениям заданных тормозных сил $B_{31} - B_{36}$ и частот вращения якорей ТЭД $\omega_1 - \omega_6$ в блоках расчета мощности (БРМ1 – БРМ6) выполняется расчет мощности электрического торможения $P_{ЭТ1.3} - P_{ЭТ6.3}$:

$$P_{ЭТ.з} = \frac{B_{зад} D_k 1000}{2\mu\omega\eta_{ред}}, \quad (3.28)$$

где D_k – диаметр бандажа колесной пары, м;

$\eta_{ред}$ – коэффициент полезного действия редуктора;

μ – передаточное соотношение редуктора;

ω – частота вращения якоря, рад/с.

В выходе сумматора S формируются сигналы заданной мощности электрического торможения для каналов 1-3 $P_{ЭТ.31-3}$ и 4-6 $P_{ЭТ.34-6}$ преобразователя, на основе которых в блоках расчета напряжения БРН1, БРН2 выполняется расчет заданных напряжений $U_{d1.3}$ и $U_{d2.3}$:

$$U_{d1.3} = \sqrt{P_{ЭТ.31-3} r_T}, \quad (3.29)$$

$$U_{d2.3} = \sqrt{P_{ЭТ.34-6} r_T}. \quad (3.30)$$

Затем заданные значения $U_{d1.3}$ и $U_{d2.3}$ как и их фактические значения u_{d1} и u_{d2} поступают на релейные регуляторы напряжения (РН1, РН2), построенные на тех же принципах, что и регуляторы тока предложенной САУ ТП. На выходе РН1 и РН2 формируются сигналы γ_{VTT1} , γ_{VTT2} управления тормозными ключами VTT ТИР1 и ТИР2 полупроводникового преобразователя.

3.4 Выводы по разделу 3

1 Структурные схемы САУ ТП для режимов тяги и электрического торможения включают в себя блоки регулятора мощности и регулятора силы торможения, имеющие схожую структуру. Расчет выходной мощности и силы торможения осуществляется без использования дополнительных датчиков.

2 Регулирование мощности и силы торможения наиболее рационально осуществить путем непосредственного управления током якоря. Ослабление возбуждения выполняется плавно по значению коэффициента заполнения сигнала управления ключом $VT1/VT2$ преобразователя для режимов тяги и электрического торможения.

3 Регуляторы тока новой САУ ТП целесообразно выполнить с использованием гистерезисных компараторов, позволяющих обеспечить высокое быстродействие системы.

4 Использование полупроводникового преобразователя позволяет применить более оптимальный алгоритм управления напряжением тягового генератора.

4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ТЕПЛОВОЗА

4.1 Выбор программного пакета и методики исследования

Для моделирования электромагнитных и электромеханических процессов, возникающих в тяговом приводе тепловоза, выбран пакет прикладных программ *MATLAB*.

MATLAB представляет собой язык программирования высокого уровня для технических вычислений, расширяемый большим числом пакетов прикладных программ. Самый известный из них - пакет библиотек *Simulink*, обеспечивающий блочное имитационное моделирование различных систем [67, 68].

Simulink состоит из следующих пакетов расширения (*Blocksets*), которые позволяют расширить его функционал для различных сфер применения [69]:

- *Simulink Blockset* содержит основную библиотеку графических блоков для имитационного моделирования;
- *Aerospace Blockset* содержит специальные инструменты для моделирования, интегрирования и имитации авиационных, космических, реактивных и турбореактивных систем;
- *Control System Blockset* предназначен для моделирования, анализа и проектирования систем автоматического управления;
- *Signal Processing Blockset* содержит специальные инструменты для решения фундаментальных и прикладных задач создания и обработки сигналов;
- *Neural Network Blockset* содержит средства для построения нейронных сетей;
- *SimMechanics* предназначен для моделирования различных геометрических конфигураций и реакций на механические воздействия;
- *SimPowerSystems* предназначен для моделирования энергетических систем, включая устройства электротехники и промышленной электроники.

Основным расширением, задействованным при моделировании процессов в тяговом приводе тепловоза, является *SimPowerSystems*. Расширение *SimPowerSystems* предоставляет инструменты для анализа и библиотеку компонентов для моделирования и симуляции электроэнергетических систем [70].

Основным преимуществом *SimPowerSystems* является то, что компоненты в модели соединяются физическими связями, которые представляют идеальные электропроводящие пути. Этот подход позволяет пользователю описывать физическую структуру системы вместо того, чтобы выводить и реализовывать уравнения для системы. Поэтому силовую схему преобразователя целесообразно выполнить из элементов *SimPowerSystems*, а систему управления – с помощью стандартных компонентов пакета *Simulink*. *SimPowerSystems* автоматически формирует и решает дифференциальные и алгебраические уравнения, которые определяют поведение системы [71]. По этой причине в работе дифференциальные уравнения будут приведены только для разработанной математической модели тягового двигателя.

4.2 Математическая и компьютерная модели коллекторного тягового электродвигателя с учётом отдельного влияния вихревых токов, создаваемых обмотками главных и дополнительных полюсов

Для полного анализа явлений, происходящих в силовых цепях полупроводникового преобразователя, а также для более точной настройки системы управления приводом требуется применение модели тягового электродвигателя (ТЭД) постоянного тока, которая бы адекватно отображала переходные процессы, возникающие при импульсном регулировании и, особенно, при нестационарных режимах работы, когда пульсации тока наиболее высоки. Нестационарные режимы работы для ТЭД требуют анализа и учета, так как большинство отказов элементов ТЭД тесно связано с воздействием электродинамических перегрузок [72].

Математическая модель коллекторного ТЭД, при питании от полупроводникового преобразователя должна учитывать следующие электромагнитные явления:

- вихревые токи, возникающие в магнитопроводе при изменении магнитных потоков главных и добавочных полюсов машины;
- нелинейность кривой намагничивания машины на основе использования понятия «динамическая индуктивность», так как результирующая индуктивность зависит не только от величины тока в обмотке, но и от динамики изменения потокосцепления и тока;
- действие поперечной реакции якоря, которая искажает поле машины и уменьшает его по величине (если отсутствует компенсационная обмотка).

Обычно [73 – 78] в моделях таких ТЭД не учитывают отдельное влияние на вихревые токи потоков обмоток главных и добавочных полюсов. Однако предлагаемым полупроводниковым преобразователем обеспечивается отдельное управление токами якоря и возбуждения, в результате чего потоки главных и добавочных полюсов будут различными и через вихревые токи в общем магнитопроводе будут влиять друг на друга.

Таким образом, отдельный учет вихревых токов от обмоток главных и добавочных полюсов является необходимым условием для создания уточненной математической модели коллекторного ТЭД.

За основу при разработке модели была принята расчетная схема коллекторного ТЭД независимого возбуждения (рисунок 4.1).

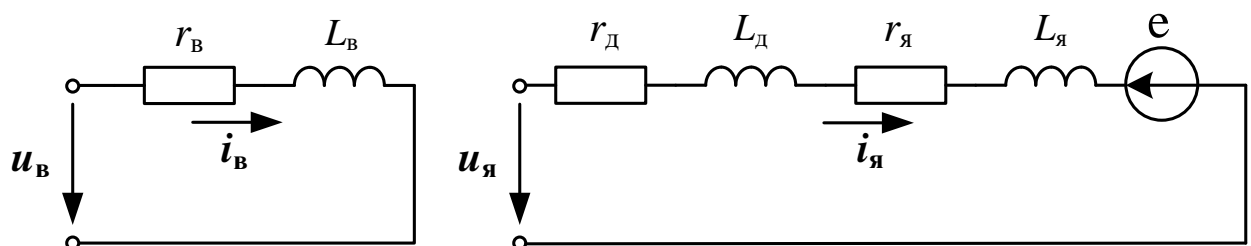


Рисунок 4.1 – Расчетная схема тягового электродвигателя

Модель независимой обмотки возбуждения содержит индуктивность L_B и активным сопротивлением r_B , по которым протекает ток возбуждения i_B . Якорная цепь представлена источником ЭДС e , индуктивностями $L_{я}$ и $L_{д}$, а также активными сопротивлениями $r_{я}$ и $r_{д}$ якоря и добавочных полюсов.

Для приведенной на рисунке 4.1 схемы можно составить уравнения равновесия, характеризующие работу двигателя:

$$\begin{cases} u_B = r_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}, \\ u_{я} = r_{д+я} i_{я} + \frac{d\psi_{д+я}}{dt} + e, \end{cases} \quad (4.1)$$

где $\psi_B, \psi_{д+я}$ – потокосцепления обмоток возбуждения, добавочных полюсов и якоря, Вб;

$u_B, u_{я}$ – мгновенные напряжения на обмотке возбуждения и якоре, В.

ЭДС двигателя e определяют следующим образом:

$$e = C_E n \Phi, \quad (4.2)$$

где C_E – конструктивная постоянная двигателя;

n – частота вращения;

Φ – магнитный поток главных полюсов.

Конструктивная постоянная, согласно [77], определяется формуле:

$$C_E = \frac{N p}{60 a}, \quad (4.3)$$

где N – число проводников якорной обмотки;

p – число пар полюсов;

a – число пар параллельных ветвей якорной обмотки.

Магнитный поток машины Φ нелинейно зависит от тока в обмотке возбуждения. Также необходимо дополнительно учитывать действие поперечной реакции якоря, что делает магнитный поток зависящим и от тока якоря:

$$\Phi = f(i_B, i_{я}). \quad (4.4)$$

Потокосцепления обмотки возбуждения, якоря и добавочных полюсов $\psi_B, \psi_{д+я}$ можно представить как:

$$\psi_B = L_B i_B, \quad (4.5)$$

$$\psi_{я+д} = L_{я+д} i_{я}. \quad (4.6)$$

Индуктивность обмотки возбуждения L_B в установившемся режиме можно найти по следующей формуле [78]:

$$L_B = \frac{2pw_B\sigma\Phi}{i_B}, \quad (4.7)$$

где w_B – число витков обмотки возбуждения;

σ – коэффициент рассеяния.

Так как магнитный поток главных полюсов Φ нелинейно зависит от протекающего по ним тока, индуктивность обмотки возбуждения также будет иметь нелинейную зависимость от тока. Поскольку точки магнитных характеристик соответствуют стационарному режиму работы машины, то данное понятие индуктивности получило название статической индуктивности:

$$L_B^{CT} = f(i_B). \quad (4.8)$$

В тяговых электрических машинах также существует понятие динамической индуктивности обмоток [4.5], которая отражает отношение потокосцепления и тока, но уже в динамике их изменения:

$$L_d = \frac{d\psi}{di}, \quad (4.9)$$

где L_d – динамическая индуктивность обмотки машины;

ψ – потокосцепление обмотки машины;

i – ток, протекающий в обмотке машины.

Соответственно, статическая индуктивность используется для описания стационарных режимов работы двигателя, а динамическая – неустановившихся. Так как при питании от импульсного преобразователя тяговый двигатель постоянно работает в условиях переходных процессов, в модели необходимо использовать динамическую индуктивность обмотки возбуждения, которую, согласно [79], можно определить по следующей формуле:

$$L_B^{ДИН} = L_B^{CT} + \frac{dL_B^{CT}}{di_B} i_B \quad (4.10)$$

Согласно [72], в собранном двигателе совокупная индуктивность якоря и обмотки добавочных полюсов образуется потокосцеплением их полей рассеяния, замыкающихся по воздуху. Отсюда следует, что величина индуктивности якорной

цепи незначительна и постоянна, так как образующие ее потоки не подвержены явлению магнитного насыщения. По этой причине можно пользоваться постоянными величинами индуктивности якоря и добавочных полюсов.

Наряду с нелинейностью характеристики намагничивания на переходные процессы в тяговом электродвигателе влияют и вихревые токи, увеличивающие постоянную времени магнитных процессов в двигателе. Для учета вихревых токов можно воспользоваться методикой М. З. Жица [80] и показывающей, согласно [81], наиболее достоверные результаты. Магнитодвижущую силу (МДС) обмотки возбуждения F_B связывают с полным магнитным потоком Φ и магнитным потоком первой гармоники Φ_1 двумя уравнениями:

$$\begin{cases} 1,23r_{\mu 1}\Phi_1 + i_{\mu B}w_B - r_{\mu 1}\Phi + L_{\mu}\frac{d\Phi_1}{dt} = i_B w_B = F_B, \\ 5,29r_{\mu 1}(\Phi - \Phi_1) + i_{\mu B}w_B - r_{\mu 1}\Phi + 0,475L_{\mu}\frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} = F_B, \end{cases} \quad (4.11)$$

где $(\Phi - \Phi_1)$ – магнитный поток высших гармоник;

w_B – число витков обмотки возбуждения;

$i_{\mu B} = i_B - i_{\text{вх.в}}$ – намагничивающий ток обмотки возбуждения;

$i_{\text{вх.в}}$ – вихревой ток от обмотки возбуждения;

$1,23r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление основному потоку;

$5,29r_{\mu 1}$ – магнитное сопротивление высшим гармоникам;

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

L_{μ} – магнитная индуктивность основного потока.

Для учета вихревых токов, возникающих при изменении потока добавочных полюсов, можно записать аналогичную систему уравнений [4.10]:

$$\begin{cases} 1,23r_{\mu 1д}\Phi_{1мд} + i_{\mu д}w_д - r_{\mu 1д}\Phi_{мд} + L_{\mu д}\frac{d\Phi_{1мд}}{dt} = i_я w_д = F_д, \\ 5,29r_{\mu 1д}(\Phi_{мд} - \Phi_{1мд}) + i_{\mu д}w_д - r_{\mu 1д}\Phi_{мд} + 0,475L_{\mu д}\frac{d(\Phi_{мд} - \Phi_{1мд})}{dt} = F_д, \end{cases} \quad (4.12)$$

где $\Phi_{мд}$ – полный магнитный поток добавочных полюсов;

$\Phi_{1мд}$ – магнитный поток первой гармоники добавочных полюсов;

$(\Phi_{мд} - \Phi_{1мд})$ – магнитный поток высших гармоник добавочных полюсов;

$F_д = i_я w_д$ – МДС добавочных полюсов;

$w_д$ – число витков обмоток добавочных полюсов;

$i_{\mu d} = i_{\text{я}} - i_{\text{вх.д}}$ – намагничивающий ток добавочных полюсов;

$i_{\text{вх.д}}$ – вихревой ток от обмоток добавочных полюсов;

$1,23r_{\mu 1d}$ – магнитное сопротивление потоку первой гармоники добавочных полюсов;

$5,29r_{\mu 1d}$ – магнитное сопротивление потоку высших гармоник добавочных полюсов;

$0,475L_{\mu d}$ – магнитная индуктивность потока высших гармоник добавочных полюсов;

$L_{\mu d}$ – магнитная индуктивность основного потока добавочных полюсов.

Магнитные индуктивности L_{μ} и $L_{\mu d}$ определяются геометрическими размерами двигателя, а также электропроводностью остова и сердечников главных и добавочных полюсов, соответственно [4.10].

Намагничивающие токи $i_{\mu \text{в}}$ и $i_{\mu d}$ рассчитываются на основе обратных характеристик намагничивания соответствующих обмоток:

$$i_{\mu \text{в}} = f(\Phi), \quad (4.13)$$

$$i_{\mu d} = f(\Phi_{m d}). \quad (4.14)$$

Магнитные сопротивления $r_{\mu 1}$ и $r_{\mu 1d}$ можно найти следующим образом:

$$r_{\mu 1} = \frac{F_{\text{в}}}{\Phi_1} = \frac{i_{\text{в}} w_{\text{в}}}{\Phi_1}, \quad (4.15)$$

$$r_{\mu 1d} = \frac{F_{\text{д}}}{\Phi_{1m d}} = \frac{i_{\text{я}} w_{\text{д}}}{\Phi_{1m d}}. \quad (4.16)$$

Под действием соответствующих магнитных потоков в магнитопроводе ТЭД образуются МДС вихревых токов от главных и добавочных полюсов [4.15]:

$$F_{\text{вх.в}} = F_{\text{в}} - F_{\mu \text{в}}, \quad (4.17)$$

$$F_{\text{вх.д}} = F_{\text{д}} - F_{\mu d}, \quad (4.18)$$

где $F_{\text{вх.в}}$, $F_{\text{вх.д}}$ – МДС вихревых токов от главных и добавочных полюсов;

$F_{\mu \text{в}}$, $F_{\mu d}$ – намагничивающие МДС главного и добавочного полюсов.

Так как магнитные потоки главных и добавочных полюсов протекают через общий магнитопровод, то можно сделать вывод о том, что МДС вихревых токов от добавочных полюсов будет оказывать влияние на основной магнитный поток,

уменьшая результирующую МДС главных полюсов и наоборот. Таким образом, можно записать следующие уравнения:

$$\mathbf{F}'_B = \mathbf{F}_B - \mathbf{F}_{\text{вх.д}}, \quad (4.19)$$

$$\mathbf{F}'_D = \mathbf{F}_D - \mathbf{F}_{\text{вх.в}}, \quad (4.20)$$

где $\mathbf{F}'_B, \mathbf{F}'_D$ – результирующие МДС главного и добавочного полюсов.

Используя полученные выше уравнения, можно составить результирующую систему нелинейных дифференциальных уравнений, позволяющую описать переходные процессы в тяговом двигателе постоянного тока с учетом влиянием вихревых токов, как от главных, так и от добавочных полюсов:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{\text{я}} = \int \frac{1}{L_{\text{д+я}}} (\mathbf{u}_{\text{я}} - i_{\text{я}} r_{\text{д+я}} - C_E n \Phi), \\ i_{\text{в}} = \int \frac{1}{L_{\text{в}}^{\text{двн}}} (\mathbf{u}_{\text{в}} - i_{\text{в}} r_{\text{в}}), \\ \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{1}{L_{\mu}} (\mathbf{F}'_B - 1,23 r_{\mu 1} \Phi_1 - i_{\text{в}} w_{\text{в}} + r_{\mu 1} \Phi), \\ \frac{d(\Phi - \Phi_1)}{dt} = \frac{1}{0,475 L_{\mu}} (\mathbf{F}'_B - 5,29 r_{\mu 1} (\Phi - \Phi_1) - i_{\text{в}} w_{\text{в}} + r_{\mu 1} \Phi), \\ \frac{d\Phi_{1\text{мд}}}{dt} = \frac{1}{L_{\mu\text{д}}} (\mathbf{F}'_D - 1,23 r_{\mu 1\text{д}} \Phi_{1\text{мд}} - i_{\text{мд}} w_{\text{д}} + r_{\mu 1\text{д}} \Phi_{\text{мд}}), \\ \frac{d(\Phi_{\text{мд}} - \Phi_{1\text{мд}})}{dt} = \frac{1}{0,475 L_{\mu\text{д}}} (\mathbf{F}'_D - 5,29 r_{\mu 1\text{д}} (\Phi_{\text{мд}} - \Phi_{1\text{мд}}) - i_{\text{мд}} w_{\text{д}} + r_{\mu 1\text{д}} \Phi_{\text{мд}}). \end{array} \right. \quad (4.21)$$

Важным параметром работы тягового электродвигателя является электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, который может быть найден по формуле [43]:

$$M_{\text{эм}} = 9,55 C_E \Phi i_{\text{я}} \quad (4.22)$$

Структура компьютерной модели тягового электродвигателя, построенная в среде *Matlab Simulink* на базе уравнений (4.21) и (4.22), показана на рисунке 4.2. В верхней части модели в соответствии с первыми двумя уравнениями системы уравнений (4.21) производится расчет токов якоря и обмотки возбуждения. Учет вихревых токов от главных полюсов в соответствии с третьим и четвертым уравнениями системы уравнений (4.21) выполнен в блоке *EC_vozb*. Учет вихревых токов от добавочных полюсов в соответствии с третьим и четвертым уравнениями системы уравнений (4.21) выполнен в блоке *EC_dob*.

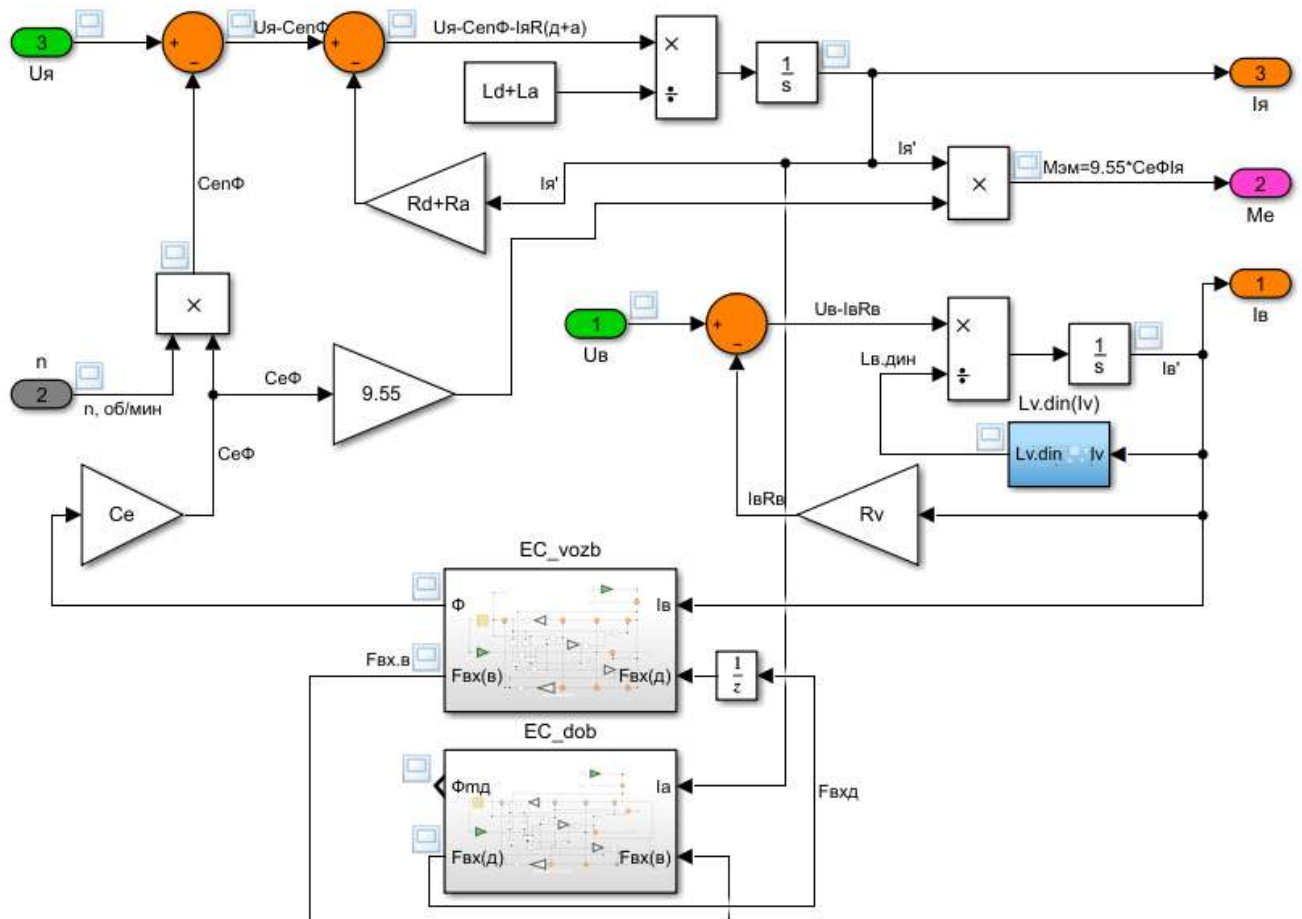


Рисунок 4.2 – Структура компьютерной модели тягового электродвигателя

На рисунке 4.3 показана привязка разработанной компьютерной модели тягового электродвигателя (блок МТЭД), выполненной на стандартных блоках *Simulink* к подсистеме *SimPowerSystems*. Сигналы о величинах напряжений на якоре и обмотке возбуждения («силовые» выходы модели «Я1», «Я2» и «В1», «В2») через датчики напряжения $U_{я}$ и $U_{в}$ (библиотечные блоки *Voltage Measurement*) поступают на соответствующие входы блока МТЭД. Расчетные сигналы токов якоря $i_{я}$ и обмотки возбуждения $i_{в}$ с выходов МТЭД поступают на входы одноименных библиотечных блоков типа *Controlled Current Source*.

Таким образом, с помощью управляемых источников тока моделируется работа якоря и обмотки возбуждения ТЭД в подсистеме *SimPowerSystems* по результатам расчета, выполненным в компьютерной модели двигателя, построенной на основе стандартных блоков пакета *Matlab Simulink*.

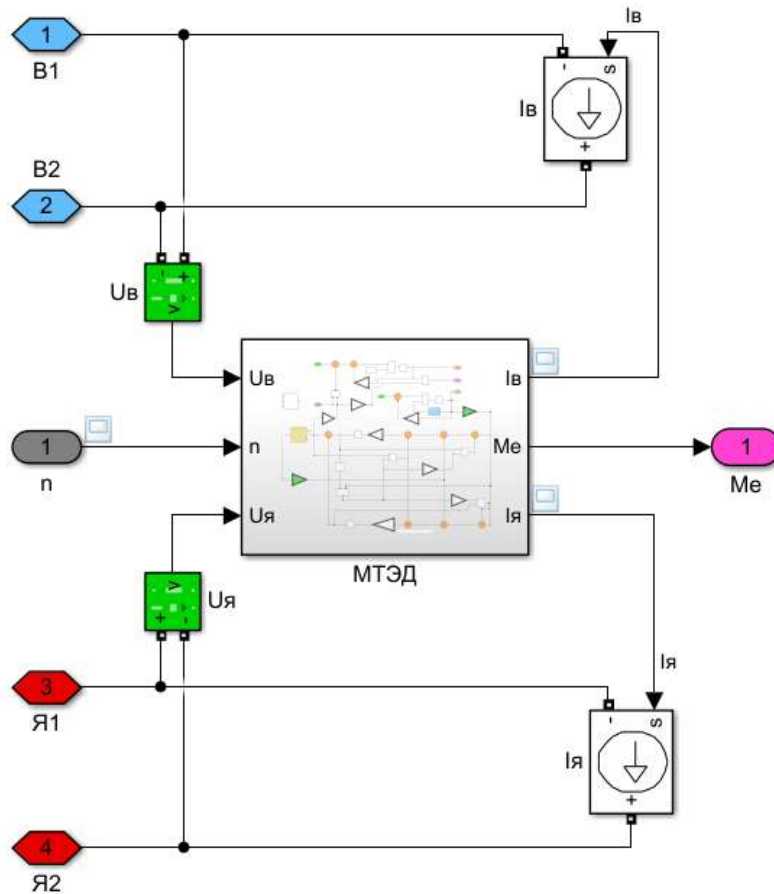


Рисунок 4.3 – Связывание компьютерной модели тягового электродвигателя с подсистемой *SimPowerSystems*

Результаты проверки предложенной выше методики раздельного учета вихревых токов от главных и добавочных полюсов приведены в [82]. При моделировании использованы параметры тягового двигателя ЭД-133 [83] (Приложение Б).

4.3 Математическая и компьютерная модели полупроводникового преобразователя

Основываясь на преимуществах подсистемы *SimPowerSystems* можно не записывать математические уравнения работы преобразователя, а описать его физическую структуру в среде *Matlab Simulink* с помощью стандартных блоков подсистемы *SimPowerSystems* (рисунок 4.4).

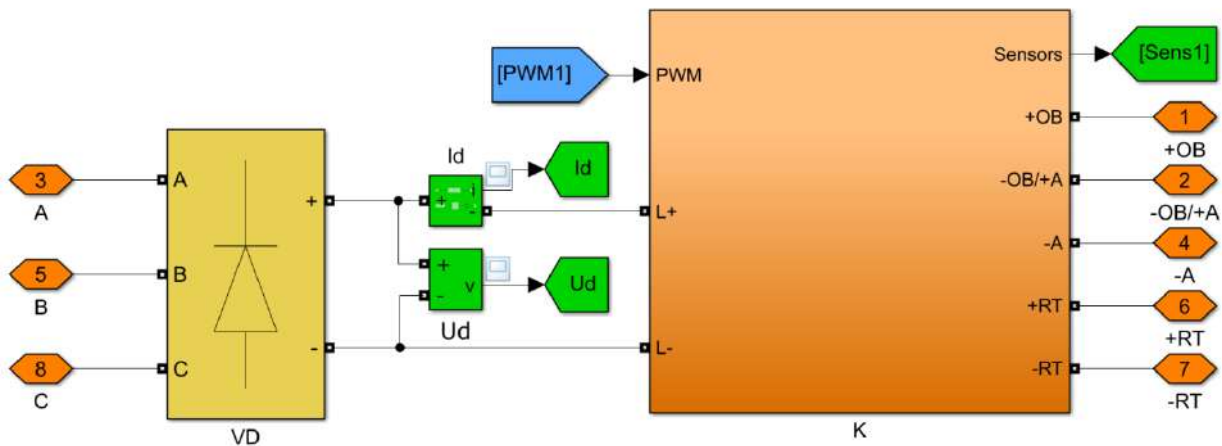


Рисунок 4.4 – Структура компьютерной модели полупроводникового преобразователя

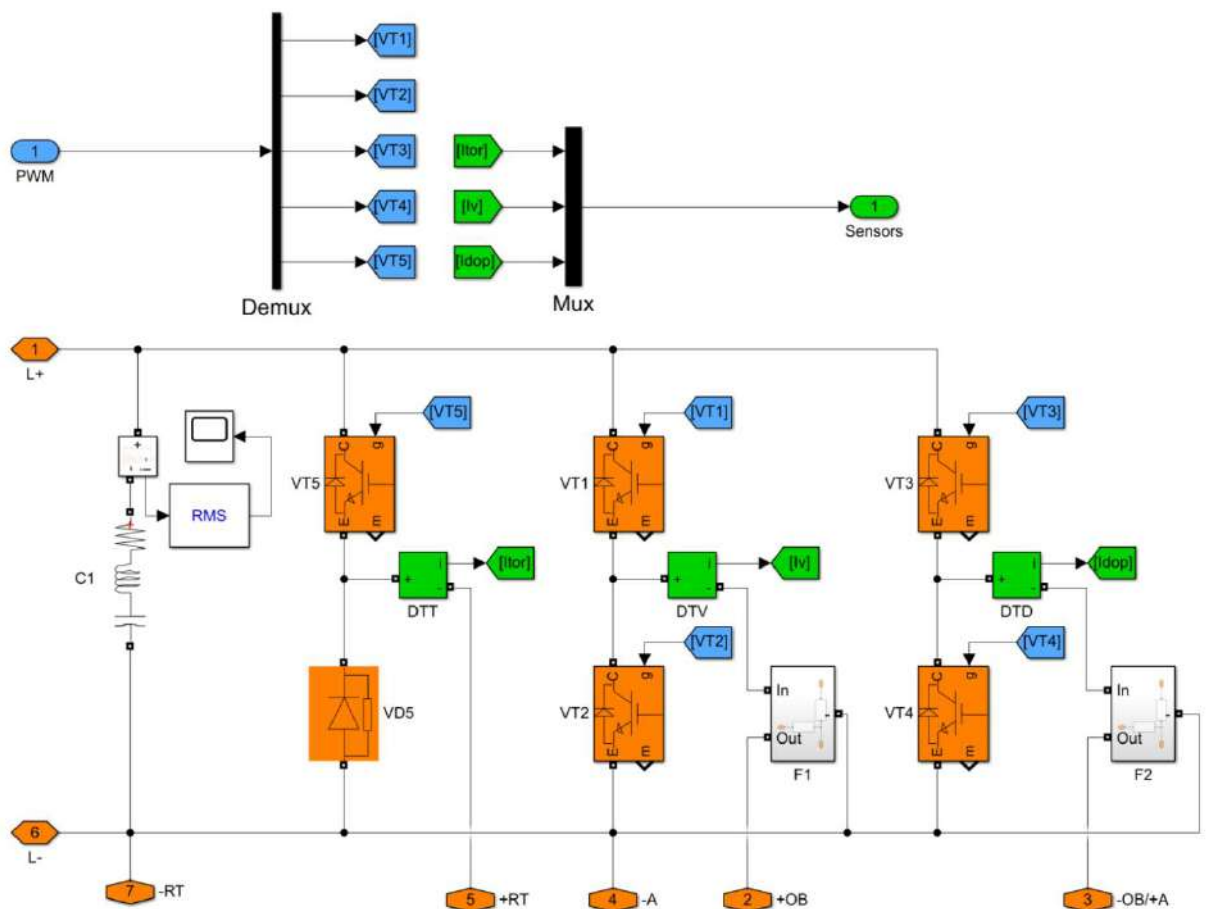


Рисунок 4.5 – Структура канала компьютерной модели полупроводникового преобразователя

Компьютерная модель преобразователя состоит из неуправляемого выпрямителя *VD* (библиотечный блок *Rectifier*), датчиков *Id*, *Ud* и канала *K* (рисунок 4.5), который содержит в себе элементы в соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 2.4:

- фильтровый конденсатор $C1$ (библиотечный блок *Series RLC branch*);
- силовые ключи $VT1-VT4$ (библиотечные блоки *IGBT/DIODE*);
- датчики тока возбуждения DTV и дополнительного тока DTD (библиотечные блоки *Current Measurment*);
- фильтры du/dt $F1$ и $F2$.

Дополнительно в канале располагаются элементы тормозного импульсного регулятора (рисунок 2.5): силовой ключ $VT5$ с обратным диодом $VD5$, а также датчик тормозного тока DTT .

4.4 Компьютерная имитационная модель усовершенствованного тягового привода тепловоза

Для выполнения расчетов разработана компьютерная имитационная модель тягового привода тепловоза, выполненная на основе разработанных математических моделей тягового двигателя, полупроводникового преобразователя и САУ ТП (рисунок 4.6).

Модель состоит из следующих основных блоков:

- KM – контроллер машиниста;
- $ORMCHV$ – объединенный регулятор мощности;
- DGU – дизель генераторная установка, включающая регулятор частоты вращения;
- $VREG$ – регулятор напряжения;
- BRN – блок распределения нагрузок;
- TP – тяговый преобразователь на 1 канал, включающий в себя как силовую часть (рисунок 4.4), так и блок системы управления.
- RT – тормозной резистор;
- TED – тяговый электродвигатель;
- BN – блок нагрузки.

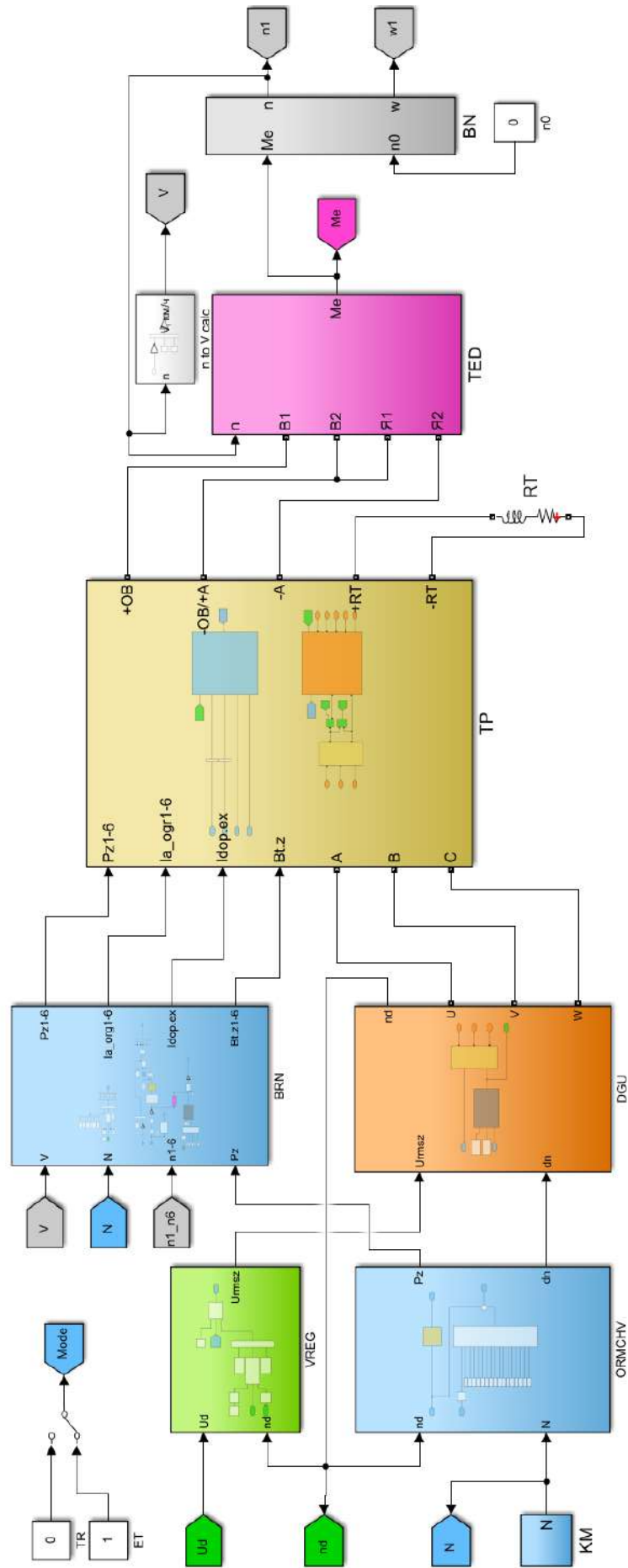


Рисунок 4.6 – Компьютерная имитационная модель тягового привода тепловоза

Объединенный регулятор мощности *ORMCHV* формирует на своем выходе сигнал заданной частоты вращения коленчатого вала ndz в зависимости от позиции контроллера машиниста N и сигнал заданной мощности дизеля P_z по сигналу текущей частоты вращения коленчатого вала nd .

Структура блока дизель-генераторной установки *DGU* показана на рисунке 4.7.

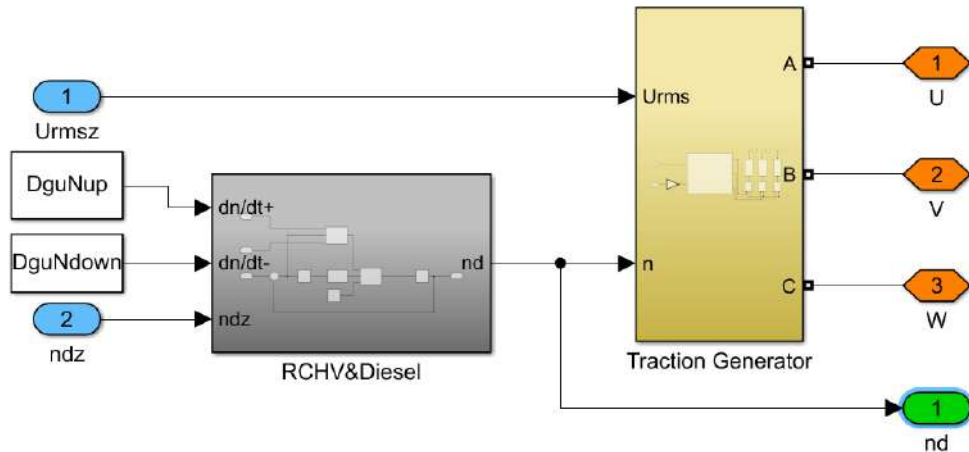


Рисунок 4.7 – Структура блока *DGU*

Математические модели регулятора частоты вращения и дизеля реализованы в блоке *RCHV&Diesel* (рисунок 4.8). Дизель совместно с РЧВ представляют собой упрощенную модель, выполненную на базе линейного задатчика интенсивности. Темпы изменения выходного сигнала при наборе и уменьшении оборотов коленчатого вала соответствует усредненным реальным значениям на локомотиве.

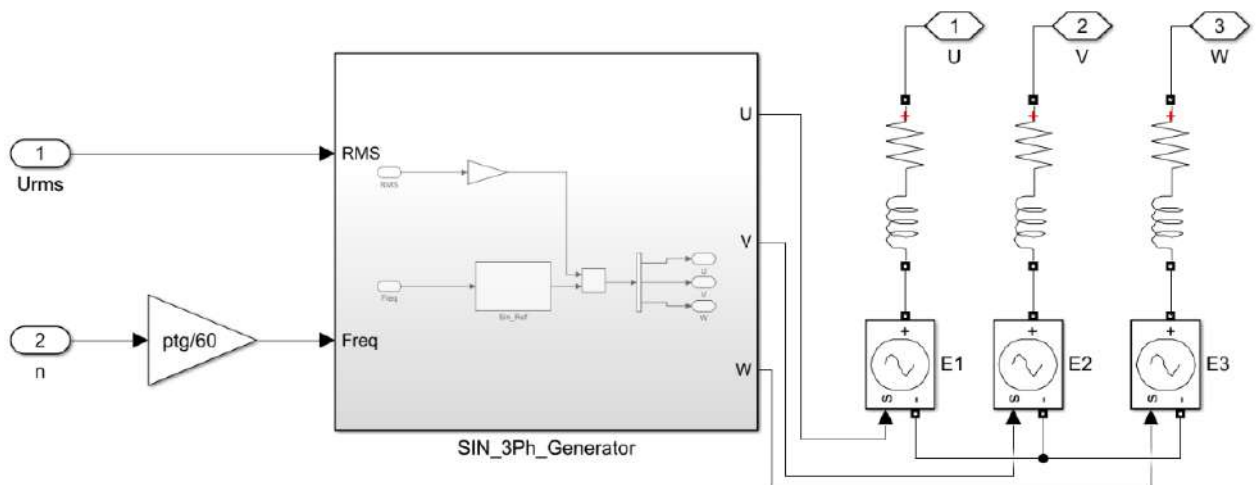


Рисунок 4.8 – Структура блока *Traction Generator*

На выходе блока *RCHV&Diesel* формируется сигнал текущей частоты вращения коленчатого вала nd , который затем поступает в упрощенную модель тягового генератора *Traction Generator*, состоящую из регулируемых блоков ЭДС $E1 - E3$. Последовательно с блоками $E1 - E3$ установлены элементы RL -нагрузки для имитации резистивного и индуктивного сопротивления обмоток тягового генератора.

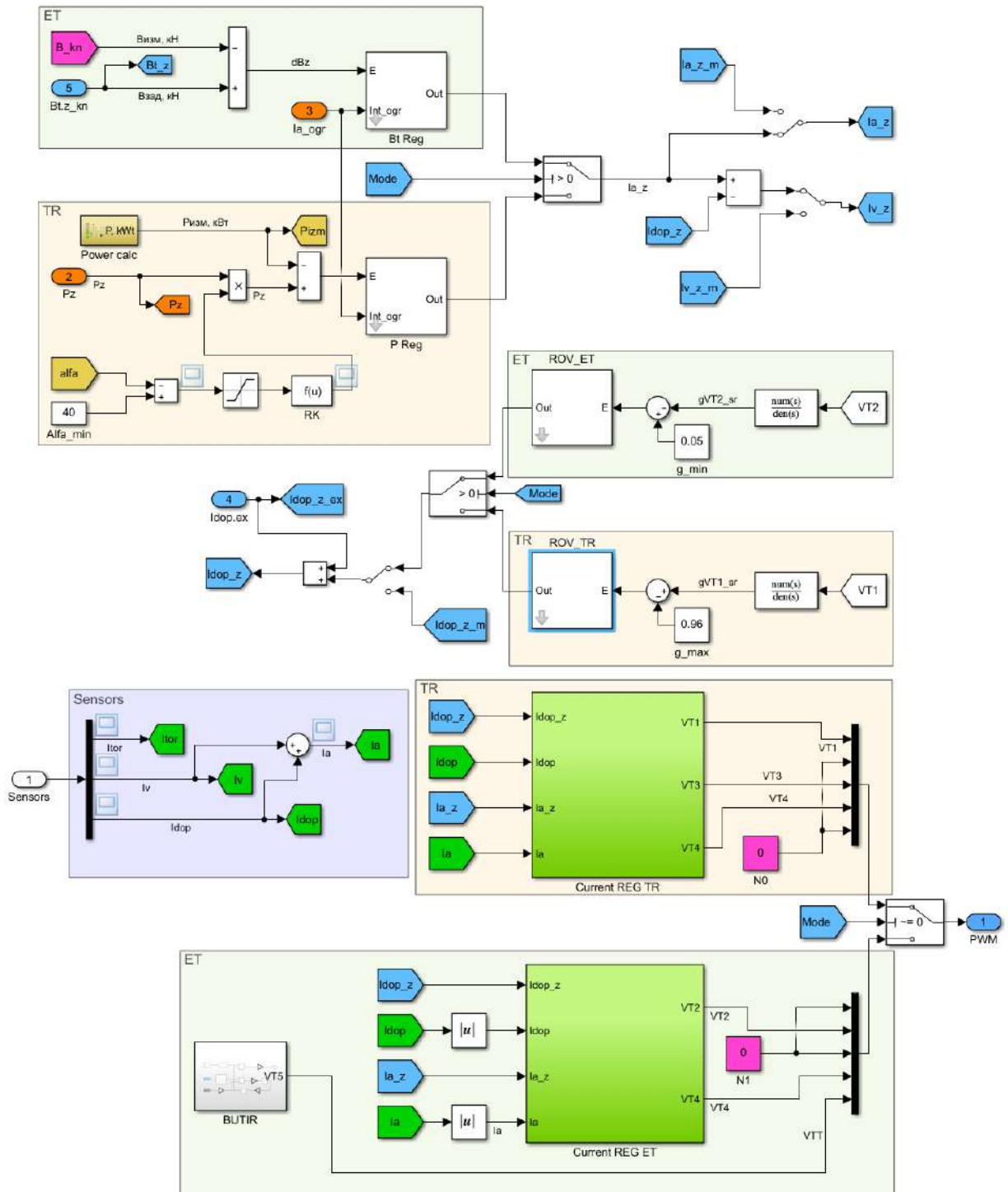


Рисунок 4.9 – Структура блока SAU

Блок системы управления *SAU* (рисунок 4.9), расположенный внутри модели тягового преобразователя *TP* содержит в себе регулятор мощности для режима тяги и регулятор силы торможения для режима ЭТ, выполненные на основе ранее разработанных структурных схем.

4.5 Выводы по разделу 4

1 Для исследования электромагнитных процессов в тяговом приводе при питании от полупроводникового преобразователя целесообразно использовать предложенную математическую модель тягового электродвигателя с учетом действия вихревых токов как от главных, так и от добавочных полюсов.

2 Силовую часть компьютерной модели полупроводникового преобразователя наиболее оптимально построить с использованием блоков *SimPowerSystems*, а модель системы автоматического управления тяговым приводом – с помощью обычных блоков пакета *Matlab Simulink*.

3 Компьютерная модель полупроводникового преобразователя для одной оси включает в себя неуправляемый выпрямитель и канал с элементами тормозного импульсного регулятора, выполненные с помощью библиотечных блоков расширения *SimPowerSystems*.

4 Имитационная компьютерная модель тягового привода для проведения исследований включает в себя модели контроллера машиниста, дизель-генераторной установки, регулятора напряжения, блока распределения нагрузок, преобразователя на 1 канал, тягового электродвигателя, блок нагрузки.

5 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА ТЕПЛОВОЗА

5.1 Результаты моделирования для режима тяги

5.1.1 Анализ работы регуляторов тока

Результаты компьютерного имитационного моделирования работы предложенных регуляторов тока ТЭД приведены на рисунках 5.1 – 5.7.

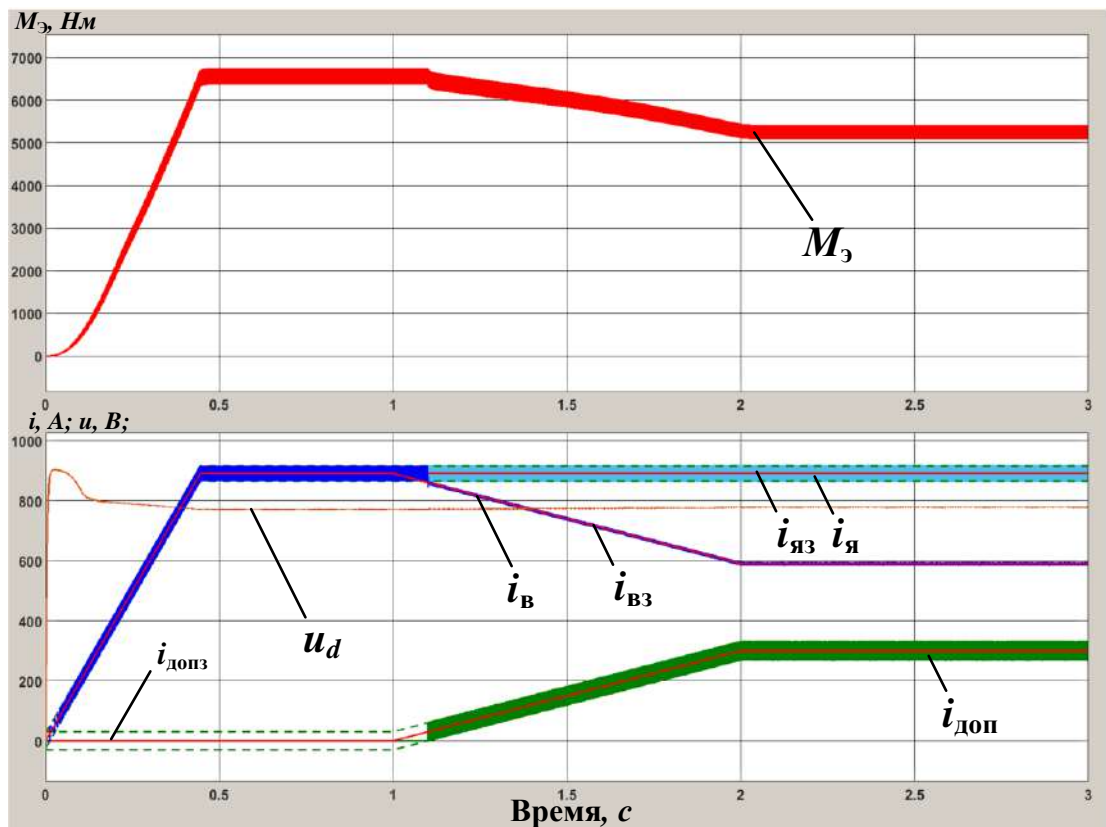


Рисунок 5.1 - Результаты моделирования работы контуров управления токами ТЭД в режиме ослабления возбуждения

На рисунке 5.1 представлены графики электромагнитного момента ТЭД ($M_э$), заданных и фактических токов якоря ($i_{яз}$ и $i_я$), возбуждения ($i_{вз}$ и $i_в$) и дополнительного тока ($i_{допз}$ и $i_{доп}$), а также напряжения в звене постоянного тока преобразователя u_d в режиме работы с ослаблением возбуждения. Как видно по

этому рисунку, разработанные регуляторы тока обеспечивают плавное увеличение тока двигателя от нуля до номинального значения в режиме полного возбуждения ($i_{\text{я}} = i_{\text{в}}$), а затем плавное ослабление возбуждения за счет одновременного увеличения дополнительного тока $i_{\text{доп}}$ и удержания тока якоря $i_{\text{я}}$ на заданном уровне, в результате чего ток возбуждения $i_{\text{в}}$ уменьшается. В верхней части рисунка 5.1 показан график изменения электромагнитного момента ТЭД $M_{\text{э}}$. При ослаблении возбуждения, величина $M_{\text{э}}$ закономерно уменьшается вслед за током возбуждения $i_{\text{в}}$.

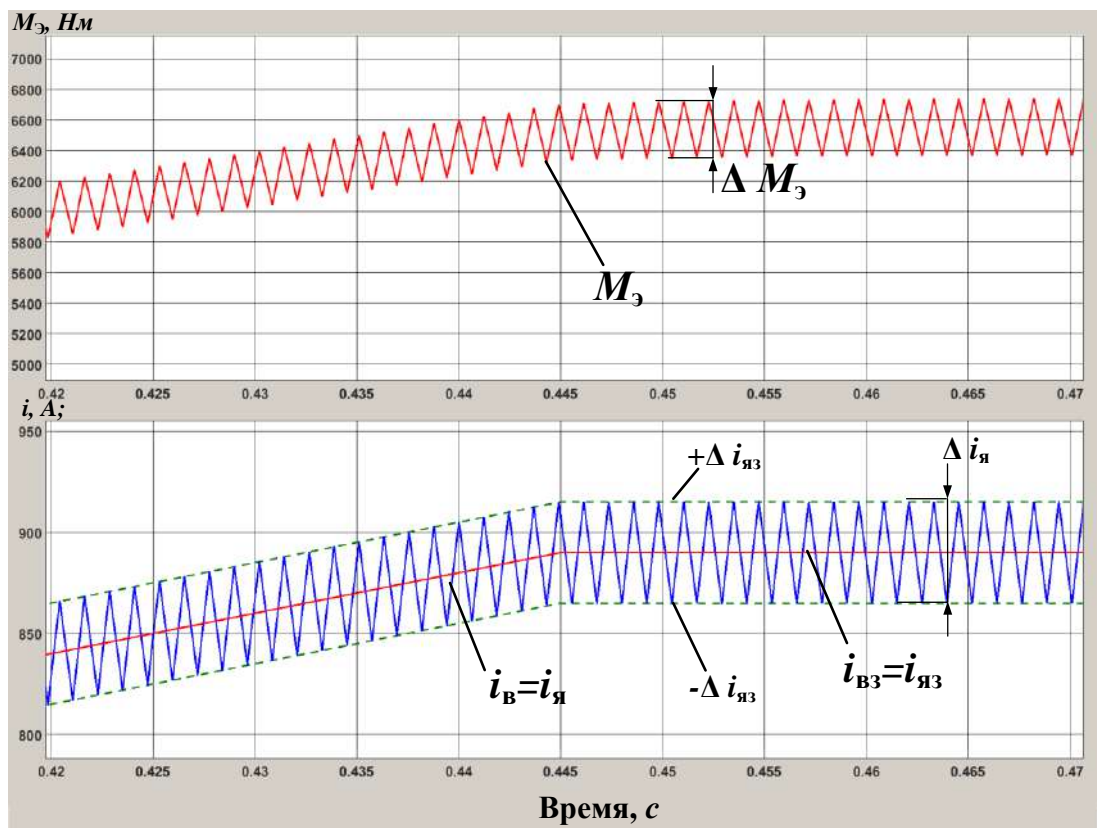


Рисунок 5.2 – Формы токов и электромагнитного момента в режиме полного возбуждения

На рисунках 5.2 и 5.3 графики изменения указанных выше параметров показаны более подробно, где дополнительно отмечены кривые ($+\Delta i_{\text{яз}}$, $-\Delta i_{\text{яз}}$ и $+\Delta i_{\text{допз}}$, $-\Delta i_{\text{допз}}$), отображающие верхнюю и нижнюю границы гистерезиса, в которой происходит регулирование тока. Разница между верхней и нижней границей называется трубкой гистерезиса. В данном опыте величина трубок гистерезиса $\Delta i_{\text{яз}} = 50 \text{ A}$, $\Delta i_{\text{допз}} = 60 \text{ A}$.

Как видно по рисунку 5.2 гистерезисный регулятор обеспечивает нахождение тока якоря внутри заданной трубки гистерезиса (от $-\Delta i_{\text{яз}}$ до $+\Delta i_{\text{яз}}$ (от 865 до 915 А)). Частота пульсаций тока якоря $i_{\text{я}}$ и электромагнитного момента $M_{\text{э}}$ составляет около 800 Гц, а размах пульсаций $\Delta i_{\text{я}}$ и $\Delta M_{\text{э}}$ около 5,5 % от среднего значения, как для тока якоря, так и для электромагнитного момента. При этом $\Delta M_{\text{э}} = 360 \text{ Нм}$ при среднем значении 6550 Нм, а $\Delta i_{\text{я}} = 50 \text{ А}$ при среднем значении 890 А. Учитывая, то, что в данном режиме ток возбуждения равен току якоря, можно сделать вывод, что размах пульсаций электромагнитного момента на такой частоте коммутации зависит только от величины пульсаций тока якоря, пульсации тока возбуждения нивелируются за счет действия вихревых токов.

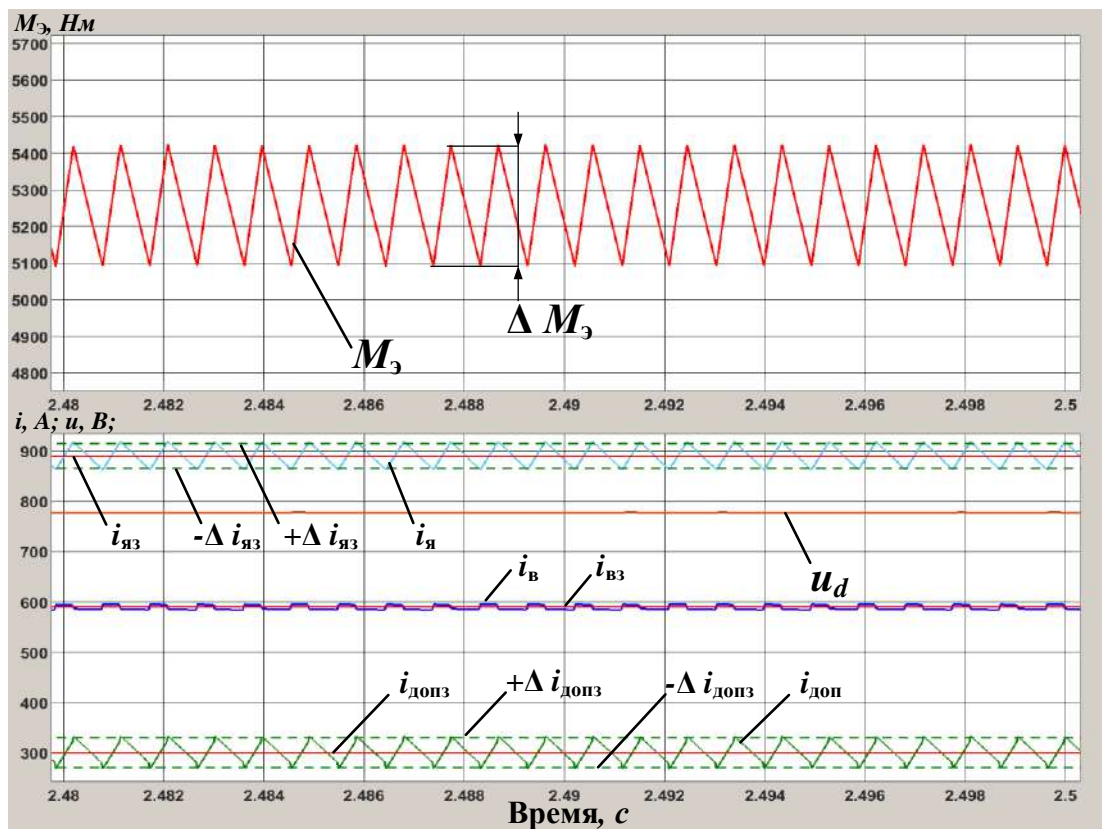


Рисунок 5.3 – Формы токов и электромагнитного момента в режиме ослабления возбуждения

Как видно по рисунку 5.3 в режиме ослабления возбуждения гистерезисные регуляторы также обеспечивают нахождение тока якоря и дополнительного тока внутри заданных трубок гистерезиса (для тока якоря от $-\Delta i_{\text{яз}}$ до $+\Delta i_{\text{яз}}$ (от 865 до 915 А) и для дополнительного тока от $-\Delta i_{\text{допз}}$ до $+\Delta i_{\text{допз}}$ (от 270 до 330 А)). Частота пульсаций тока якоря $i_{\text{я}}$, дополнительного тока $i_{\text{доп}}$ и электромагнитного

момента $M_э$ составляет около 1000 Гц. Размах пульсаций электромагнитного момента $\Delta M_э$ также составляет около 5,9 % от среднего значения ($\Delta M_э = 310 \text{ Нм}$ при среднем значении 525 0Нм). Размах пульсаций тока якоря $\Delta i_я$ (на рисунке 5.3 не показан) определяется величиной трубки гистерезиса и составляет около 5,5 %.

Ток возбуждения $i_в$ пульсирует слабо ($\Delta i_в \approx 10 \text{ А}$) и практически постоянный, а большая часть переменной составляющей тока якоря находится в дополнительном токе $i_{доп}$. Это уменьшает вихревые токи в магнитопроводе ТЭД и, соответственно, потери в стали.

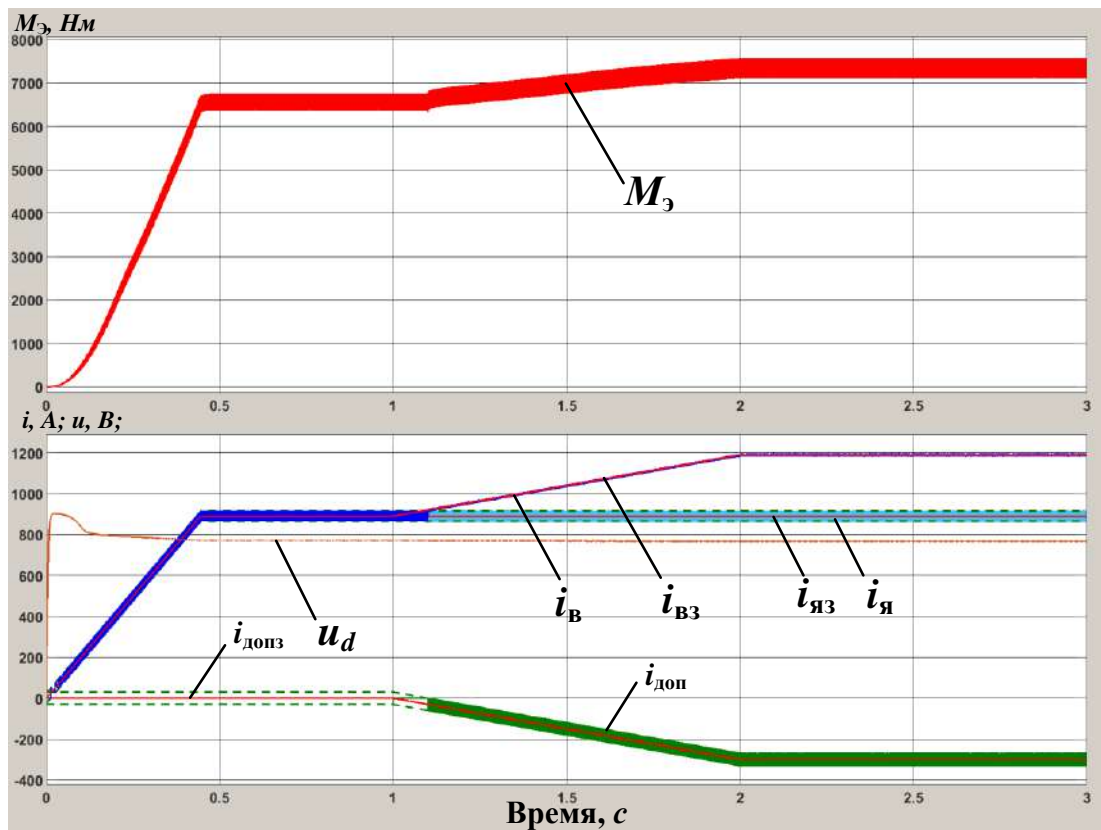


Рисунок 5.4 – Результаты моделирования работы контуров управления токами ТЭД в режиме повышения возбуждения

Согласно рисунку 5.4, разработанные регуляторы тока обеспечивают также и плавное повышение возбуждения ТЭД за счет одновременного увеличения дополнительного тока $i_{доп}$ (по модулю) и удержания тока якоря $i_я$ на заданном уровне. В верхней части рисунка 5.4 показан график электромагнитного момента ТЭД $M_э$, величина которого закономерно увеличивается вслед за током возбуждения $i_в$.

На рисунке 5.5 представлены результаты моделирования режима с пульсациями напряжения в звене постоянного тока преобразователя u_d . Как видно по данному рисунку, скачкообразное увеличение и уменьшение напряжения u_d не приводит к выходу тока якоря $i_{я}$ из заданной трубки гистерезиса.

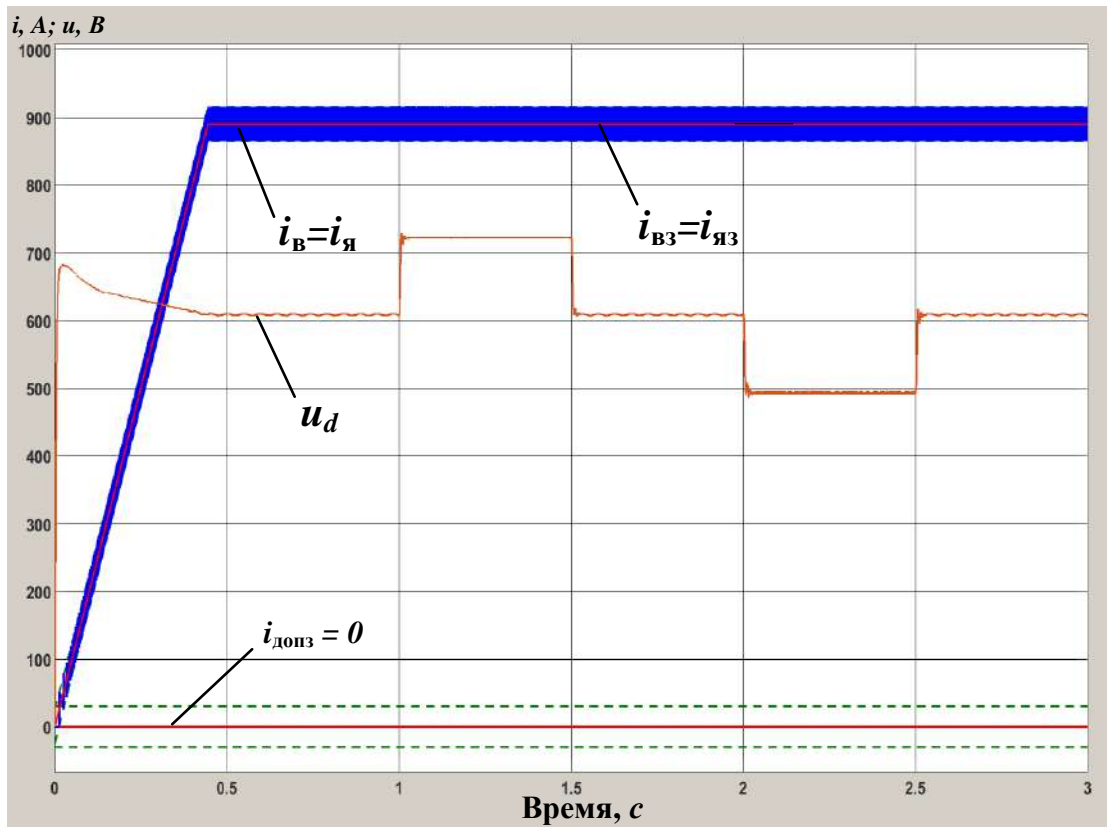
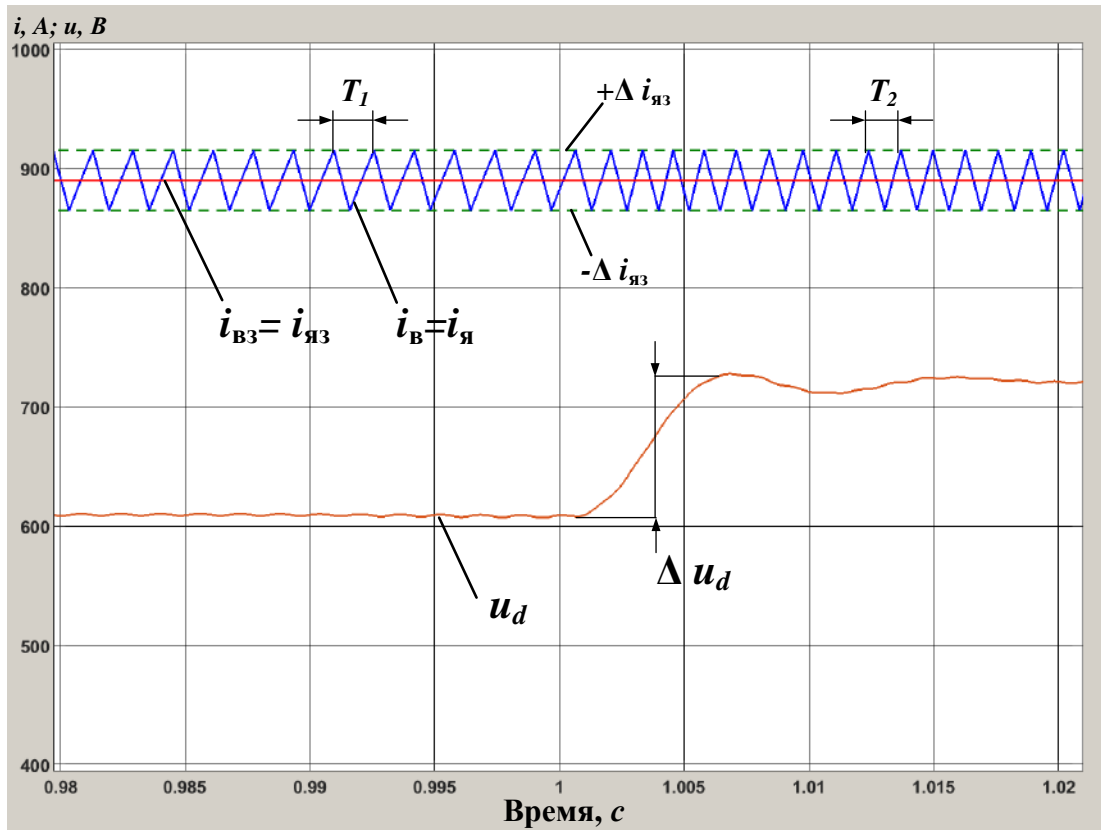


Рисунок 5.5 – Результаты моделирования режима с пульсациями напряжения в звене постоянного тока преобразователя (полное возбуждение)

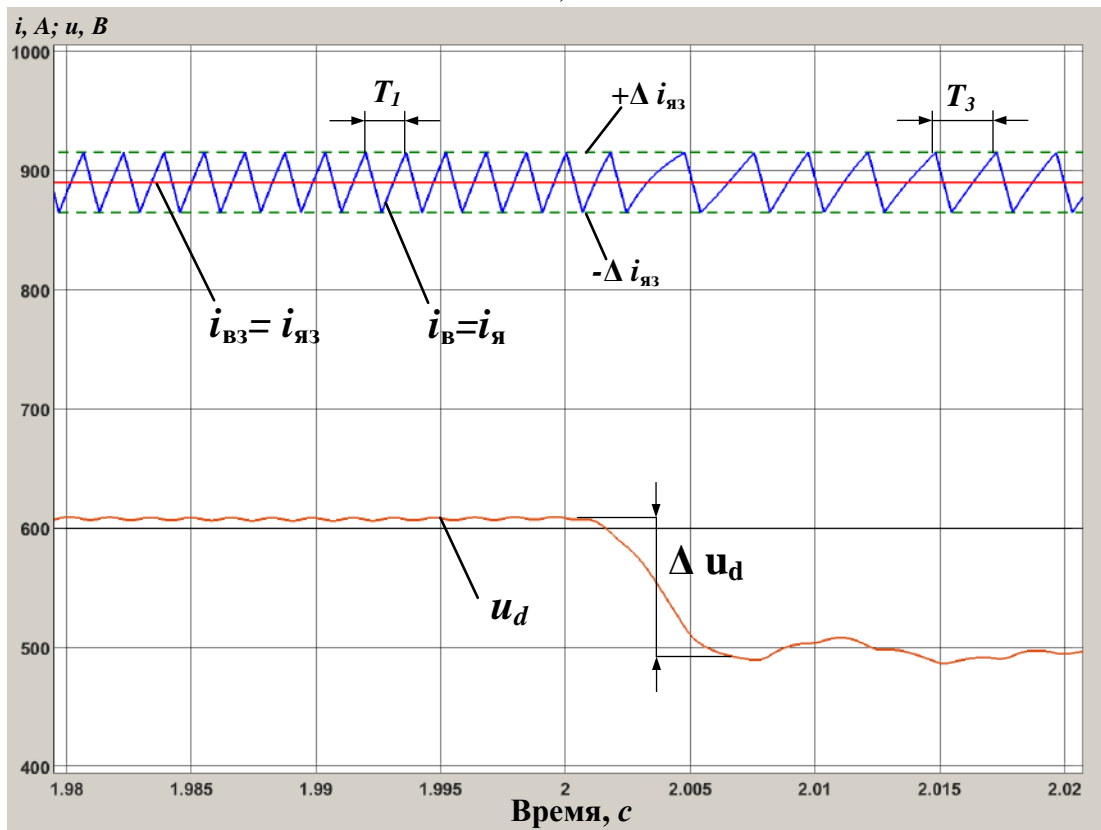
На рисунке 5.6 графики изменения тока якоря $i_{я}$ и напряжения u_d показаны более подробно. Как видно по рисунку 5.6 а) при скачкообразном увеличении напряжения в звене постоянного тока преобразователя на величину $\Delta u_d = 120 \text{ В}$ (+20 %) происходит увеличение частоты пульсаций тока якоря (период $T_2 < T_1$) со значения около 625 Гц до значения 850 Гц . При этом ток якоря находится внутри заданной трубки гистерезиса.

Согласно рисунку 5.16 б) при скачкообразном уменьшении напряжения на величину $\Delta u_d = 120 \text{ В}$ (-20%) происходит уменьшение частоты пульсаций тока якоря (период $T_3 > T_1$) со значения около 625 Гц до значения 400 Гц . При этом ток якоря также находится внутри заданной трубки гистерезиса.

а)



б)



а - увеличение напряжения; б - уменьшение напряжения

Рисунок 5.6 – Формы токов и напряжения в режиме с пульсациями напряжения в звене постоянного тока преобразователя (полное возбуждение)

На рисунке 5.7 представлены результаты моделирования режима, описанного выше, но с ослаблением возбуждения. Скачкообразное увеличение и уменьшение напряжения u_d также не приводит к выходу тока якоря $i_{я}$ и дополнительного тока $i_{доп}$ из заданных трубок гистерезиса.

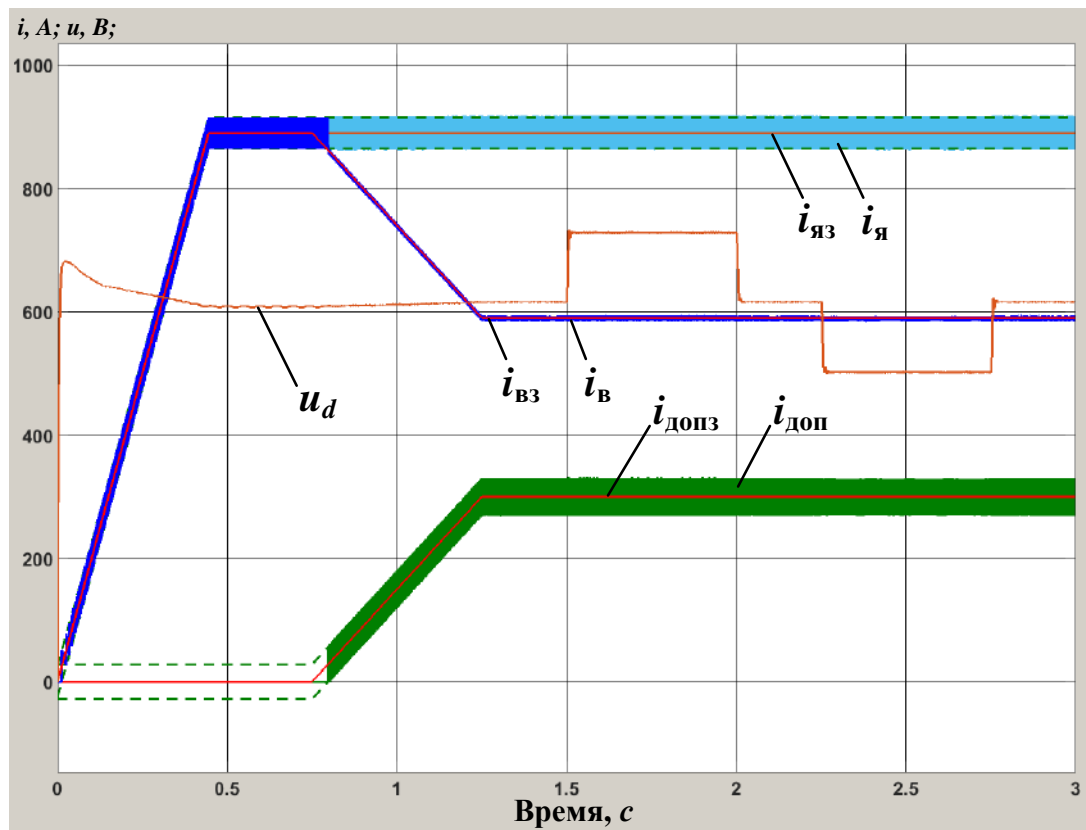


Рисунок 5.7 – Результаты моделирования режима с пульсациями напряжения в звене постоянного тока преобразователя (ослабление возбуждения)

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- разработанные регуляторы тока вместе с предложенной схемой тягового преобразователя обеспечивают режим полного возбуждения, а также режимы ослабления и повышения возбуждения ТЭД;
- разработанные регуляторы тока устойчивы (робастны) к изменению параметров работы привода и обеспечивают амплитуду пульсаций тока и его среднее значение на заданном уровне;
- величина пульсаций электромагнитного момента ТЭД зависит от величины пульсаций тока якоря, при этом влияние на электромагнитный момент пульсаций тока возбуждения нивелируется за счет действия вихревых токов;

- результаты моделирования соответствуют теоретическим выкладкам, приведенным в описании электромагнитных процессов в Приложении А:

- величина напряжения в звене постоянного тока преобразователя непосредственно влияет на скорость нарастания тока якоря и, соответственно, частоту коммутации;

- размах пульсаций тока якоря в проведенных опытах не превышает 5,5 %, что соответствует коэффициенту пульсаций 1,0275. Исходя из того, что на коммутацию на коллекторе преимущественно влияют переменные составляющие тока якоря и магнитного потока [77, 78], можно сделать вывод, что импульсное регулирование тока двигателя на частотах от 800 Гц не должно оказывать существенного влияния на процесс коммутации. При этом за счет использования IGBT-транзисторов возможно динамическое изменение частоты переключения силовых ключей для поддержания коэффициента пульсаций тока на требуемом уровне, чего нельзя добиться в системах с управляемыми выпрямителями.

5.1.2 Анализ работы регуляторов мощности

На рисунке 5.8 приведены результаты компьютерного имитационного моделирования работы регулятора мощности при разгоне тепловоза до максимальной скорости [84], где обозначено: $i_{я}$, $i_{в}$ – токи якоря и возбуждения ТЭД; $P_{вых}$ - мощность на выходе преобразователя; $M_{э}$ - электромагнитный момент ТЭД; v - скорость движения; β - коэффициент ослабления возбуждения.

Согласно рисунку 5.8 в первоначальный момент скорость движения v равна нулю (интервал времени $0с < t < 20 с$). ТЭД находится в режиме полного возбуждения, ток якоря нарастает плавно и ограничен на уровне максимального пускового тока 1130 А. Электромагнитный момент тягового двигателя $M_{э} = 9130 Нм$, что коррелируется с моментом на валу ТЭД ЭД-133, равным 9270 Нм при токе якоря 1130 А.

Далее (интервал времени $20\text{ с} < t < 45\text{ с}$) скорость движения v начинает линейно нарастать. Мощность на выходе преобразователя $P_{\text{ВЫХ}}$ увеличивается, а ток якоря уменьшается в соответствии с ограничением по сцеплению. В момент времени $t = 45\text{ с}$ выходная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$ достигает заданного значения 380 кВт , при этом скорость выхода на полную мощность $v = 22,8\text{ км/ч}$ удовлетворительно совпадает с параметрами тяговой передачи тепловоза 2ТЭ25КМ ($23,6\text{ км/ч}$). Ток двигателя в этой точке (900 А) также соответствует току длительного режима для двигателя ЭД-133 (890 А). С этого момента реализуется режим постоянства мощности $P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$ (интервал времени $45\text{ с} < t < 70\text{ с}$).

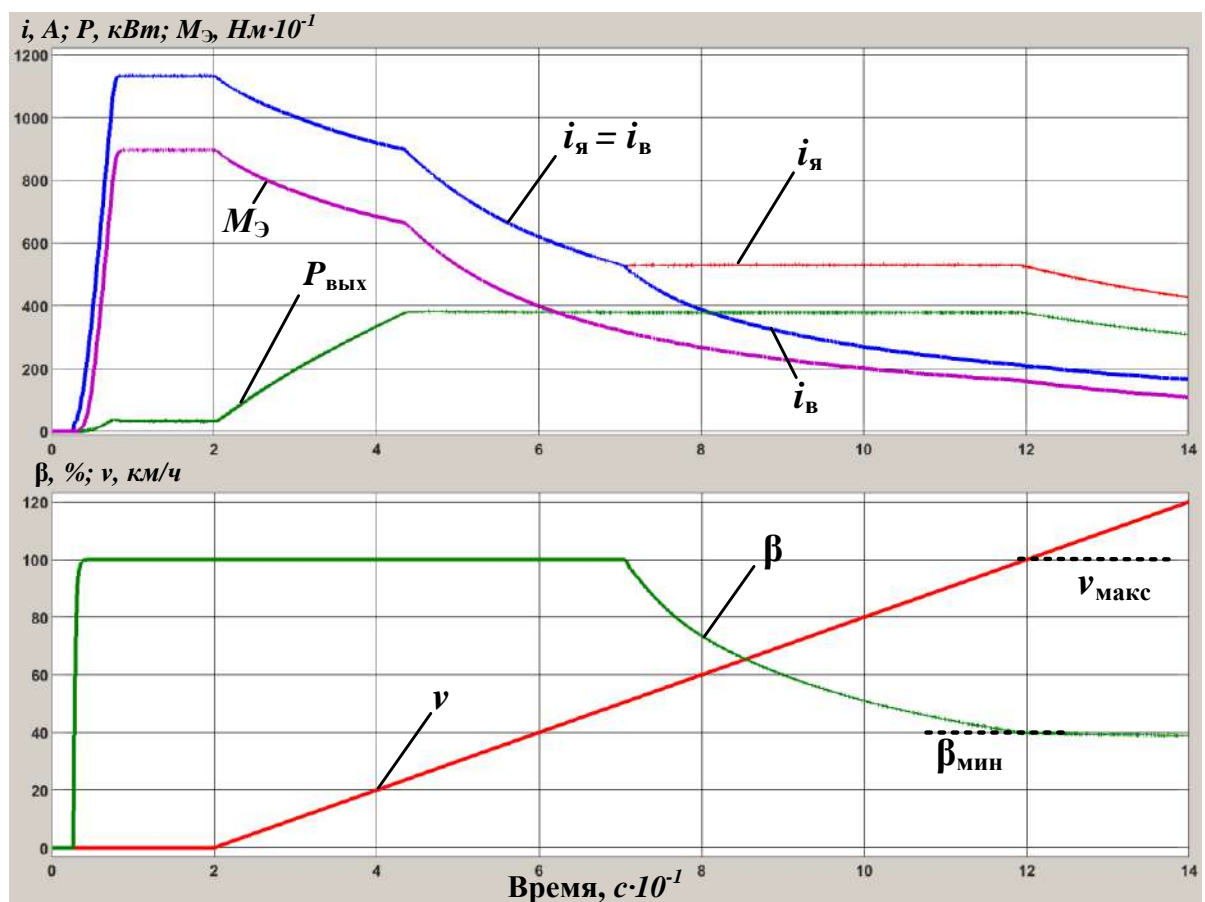


Рисунок 5.8 – Результаты моделирования работы регулятора мощности при разгоне тепловоза до максимальной скорости

В момент времени $t = 70\text{ с}$ начинается процесс ослабления возбуждения, который характеризуется постоянством тока якоря $i_{\text{я}}$ и уменьшения тока возбуждения $i_{\text{в}}$. Коэффициент ослабления возбуждения β уменьшается и достигает своего минимального значения ($\beta_{\text{мин}} = 40\%$) в момент времени $t =$

120 с, когда и скорость движения v также достигает максимального эксплуатационного значения ($v_{\text{макс}} = 100 \text{ км/ч}$), что говорит о правильности выбора параметров элементов тяговой передачи, а также об адекватности используемой математической модели.

При дальнейшем увеличении скорости движения (интервал времени $120 \text{ с} < t < 140 \text{ с}$) коэффициент ослабления возбуждения сохраняется на минимальном уровне за счет работы регулятора коэффициента ослабления возбуждения, в результате чего происходит снижение тока якоря i_a и выходной мощности преобразователя $P_{\text{вых}}$.

Работа регулятора мощности и блока вычисления мощности более подробно показана на рисунке 5.9, где приведены графики заданной мощности ($P_{\text{зад}}$), реализованной мощности ($P_{\text{вых}}$) и мощности в звене постоянного тока преобразователя (P_d).



Рисунок 5.9 – Работа регулятора и блока вычисления мощности

Как видно по этому рисунку регулятор мощности обеспечивает поддержание выходной мощности $P_{\text{вых}}$ на заданном уровне в диапазоне

скоростей движения от точки выхода на полную мощность $\approx 23,5$ км/ч до максимальной 100 км/ч (интервал времени $45 \text{ с} < t < 120 \text{ с}$). График выходной мощности преобразователя $P_{\text{ВЫХ}}$, рассчитанной в блоке вычисления мощности, совпадает с графиком мощности P_d , рассчитанной в модели по датчику тока «Id» (рисунок 4.4), что говорит о верности предложенной формулы (3.6).

На основе данных рисунка 5.8 была построена зависимость электромагнитной силы тяги от скорости $F_{\text{кэ}}(v)$ (рисунок 5.10) [84].

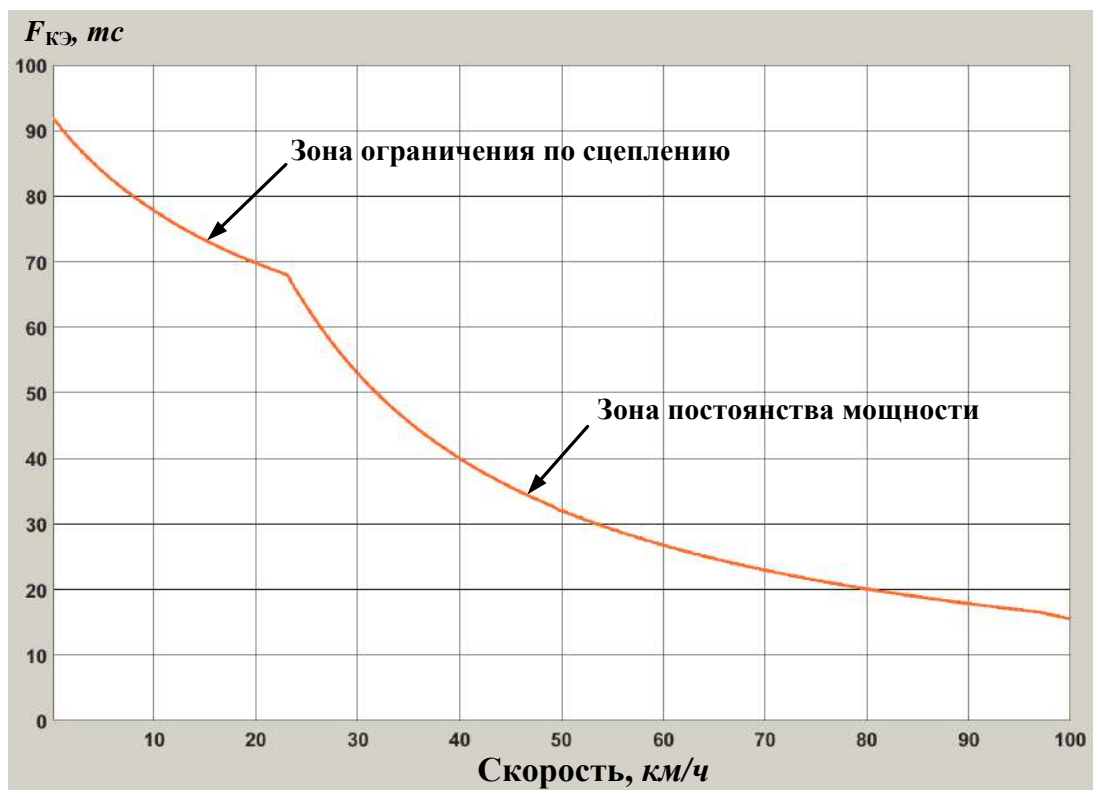


Рисунок 5.10 – Зависимость электромагнитной силы тяги от скорости

Полученная характеристика $F_{\text{кэ}}(v)$, в отличие от существующих тяговых характеристик тепловозов, не имеет разрывов в зоне постоянства мощности, что обусловлено плавным ослаблением возбуждения.

Режим повышения возбуждения (рисунок 5.11) [84], обеспечиваемый полупроводниковым преобразователем, может быть использован для повышения жесткости тяговой характеристики при движении с поездами большой массы на участках с тяжелым профилем, а также при боксовании и юзе.

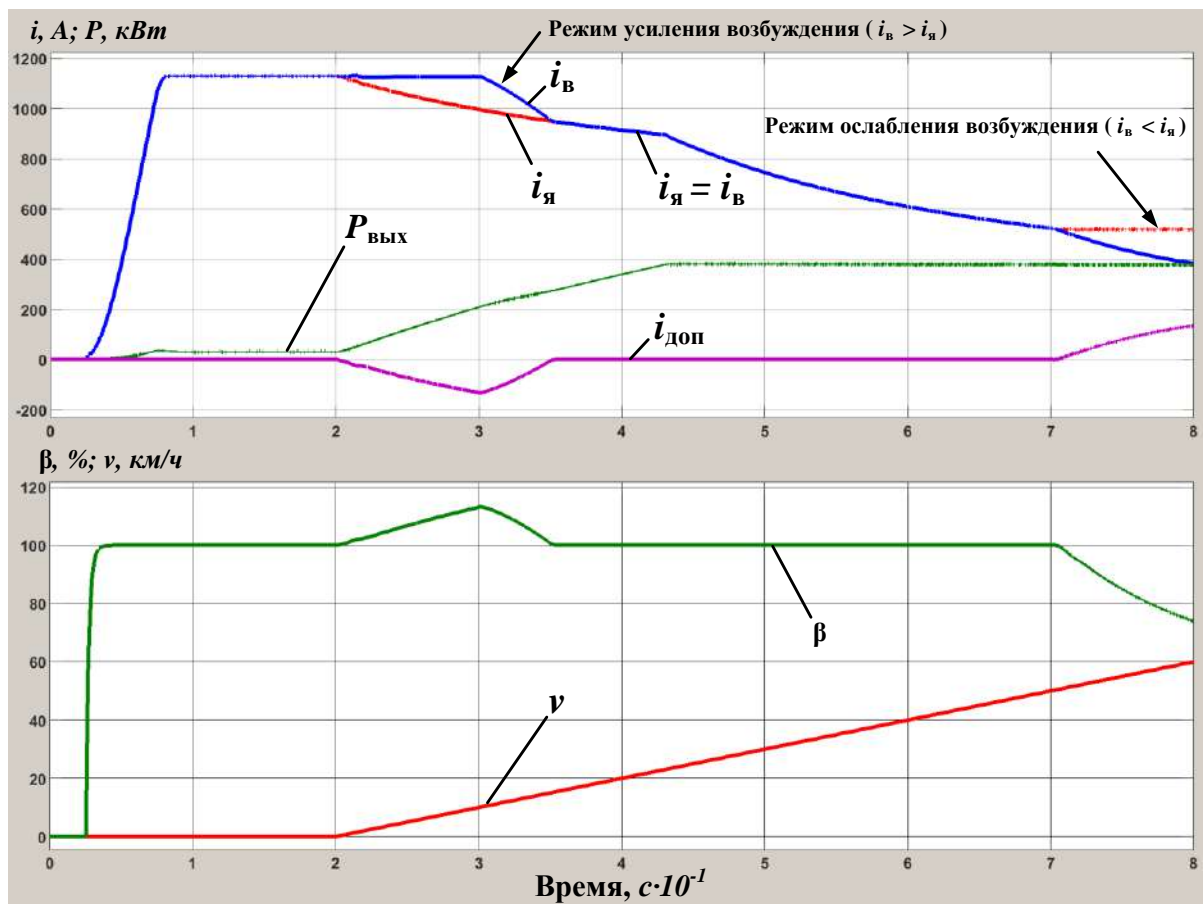


Рисунок 5.11 – Режимы повышения и ослабления возбуждения

В процессе трогания (интервал времени $20 \text{ с} < t < 30 \text{ с}$ на рис. 5.22) ток возбуждения $i_{\text{в}}$ поддерживается на постоянном уровне, независимо от тока якоря. Это обеспечивается внешним контуром управления путем задания величины $I_{\text{доп.вк}}$ (рисунок 3.3). Затем, на интервале времени $30 \text{ с} < t < 35 \text{ с}$ происходит плавный возврат на характеристику последовательного возбуждения. Дальнейшее движение аналогично рисунку 5.8.

На рисунке 5.12 приведены результаты моделирования работы регулятора мощности на различных позициях (ПК) контроллера машиниста (КМ) при скорости движения 25 км/ч на полном возбуждении [84]. На этом и последующих рисунках использованы следующие обозначения: n – частота вращения коленчатого вала дизеля, ПК – номер позиции КМ.

На интервале времени $0 \text{ с} < t < 30 \text{ с}$ происходит плавное увеличение и поддержание выходной мощности преобразователя $P_{\text{вых}}$ от нуля до значения, заданного для 8 позиции КМ. Затем выполняется постепенный набор позиций с 8

до 14 (интервал времени $30 \text{ с} < t < 80 \text{ с}$). При этом происходит плавное увеличение частоты вращения коленчатого вала дизеля n , напряжения в звене постоянного тока u_d , а также заданной и реализованной мощности $P_{\text{зад}}$ и $P_{\text{вых}}$. Далее происходит поддержание заданной мощности на 14 позиции КМ (интервал времени $80 \text{ с} < t < 110 \text{ с}$).

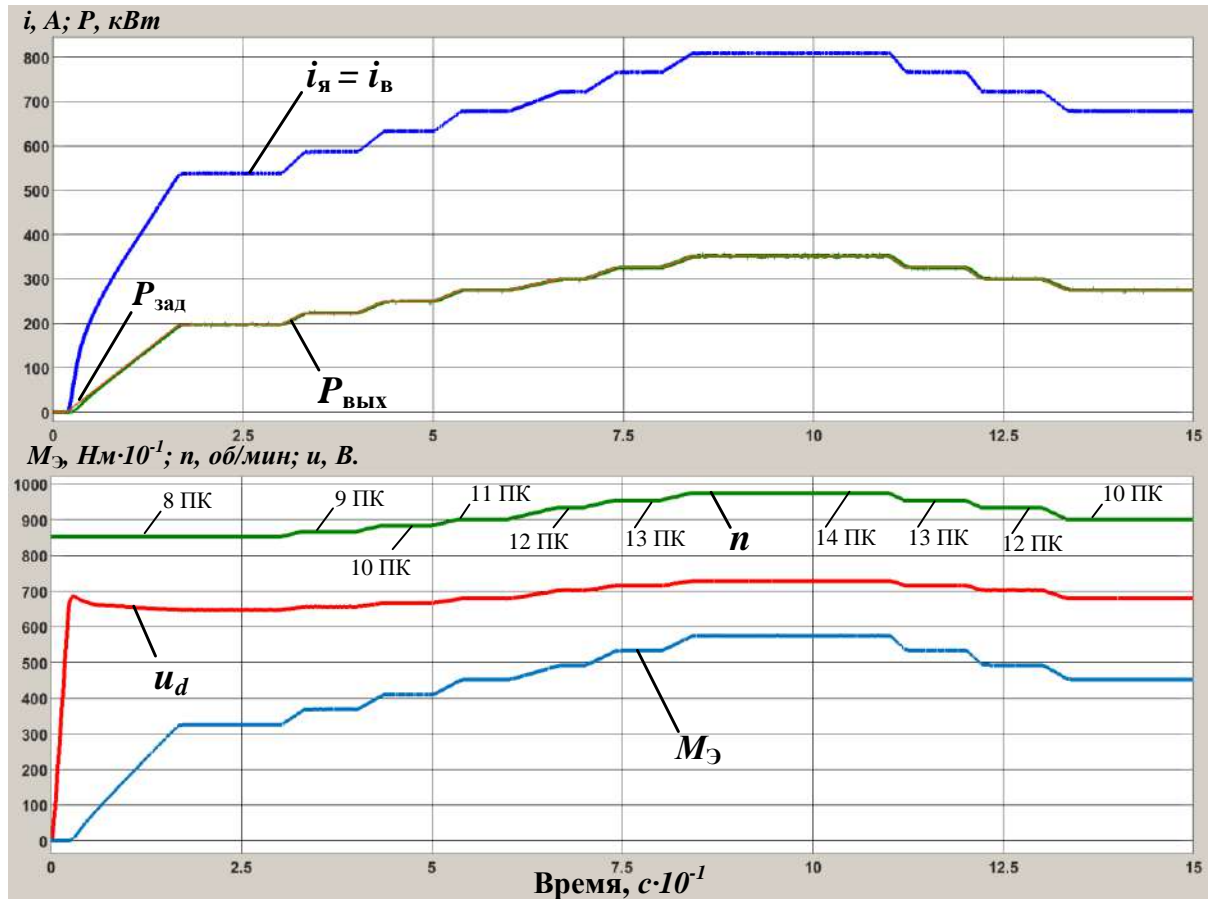


Рисунок 5.12 – Результаты моделирования работы регулятора мощности в нестационарных режимах при скорости 25 км/ч

На интервале времени $110 \text{ с} < t < 130 \text{ с}$ происходит сброс позиций КМ с 14 до 10. Регулятор мощности при этом также обеспечивает изменение выходной мощности в соответствии с заданием.

Результаты моделирования аналогичного режима при скорости движения 65 км/ч приведены на рисунке 5.13 [5.1]. В этом режиме тяговый привод автоматически переходит в режим ослабления возбуждения (момент времени $t = 12 \text{ с}$), а регулятор мощности также обеспечивает соответствие реализованной мощности заданной.

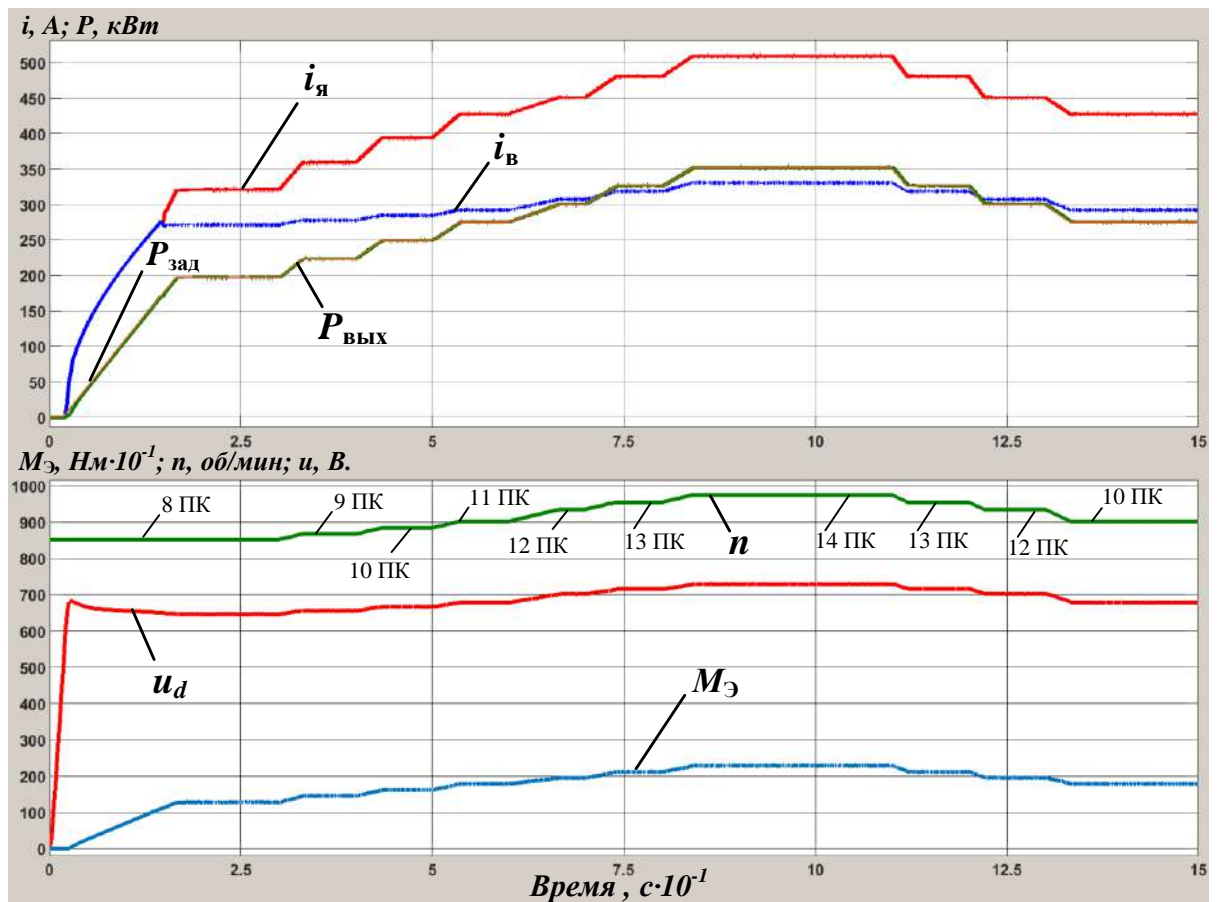


Рисунок 5.13 – Результаты моделирования работы регулятора мощности в нестационарных режимах при скорости 65 км/ч

По результатам моделирования работы регуляторов мощности новой САУ ТП можно сделать следующие выводы:

- разработанный регулятор мощности совместно с регулятором ослабления возбуждения обеспечивают реализацию заданной мощности преобразователя в стационарных и динамических режимах работы;
- регулятор ослабления возбуждения обеспечивает автоматическое плавное ослабление возбуждения ТЭД;
- разработанный блок вычисления мощности обеспечивает расчет выходной мощности преобразователя без использования датчика входного тока;
- количественные показатели, полученные по результатам моделирования, такие как электромагнитный момент ТЭД, точка (скорость) выхода на полную мощность, точка выхода на ограничение по коэффициенту ослабления возбуждения соответствуют режимам тепловоза 2ТЭ25КМ с разницей не более

3 %, что говорит об адекватности и достоверности используемой математической модели тягового привода.

5.2. Результаты моделирования для режима электрического торможения

Результаты компьютерного имитационного моделирования работы САУ ТП в режиме ЭТ при изменении скорости движения от 100 до 0 км/ч приведены на рисунке 5.24, где обозначено: $i_{я}$, $i_{в}$ – токи якоря и возбуждения ТЭД; $P_{Т}$ – мощность на тормозном реостате; $B_{Т}$ – тормозная сила; $B_{зад}$ – заданная тормозная сила; v – скорость движения; β – коэффициент ослабления возбуждения.

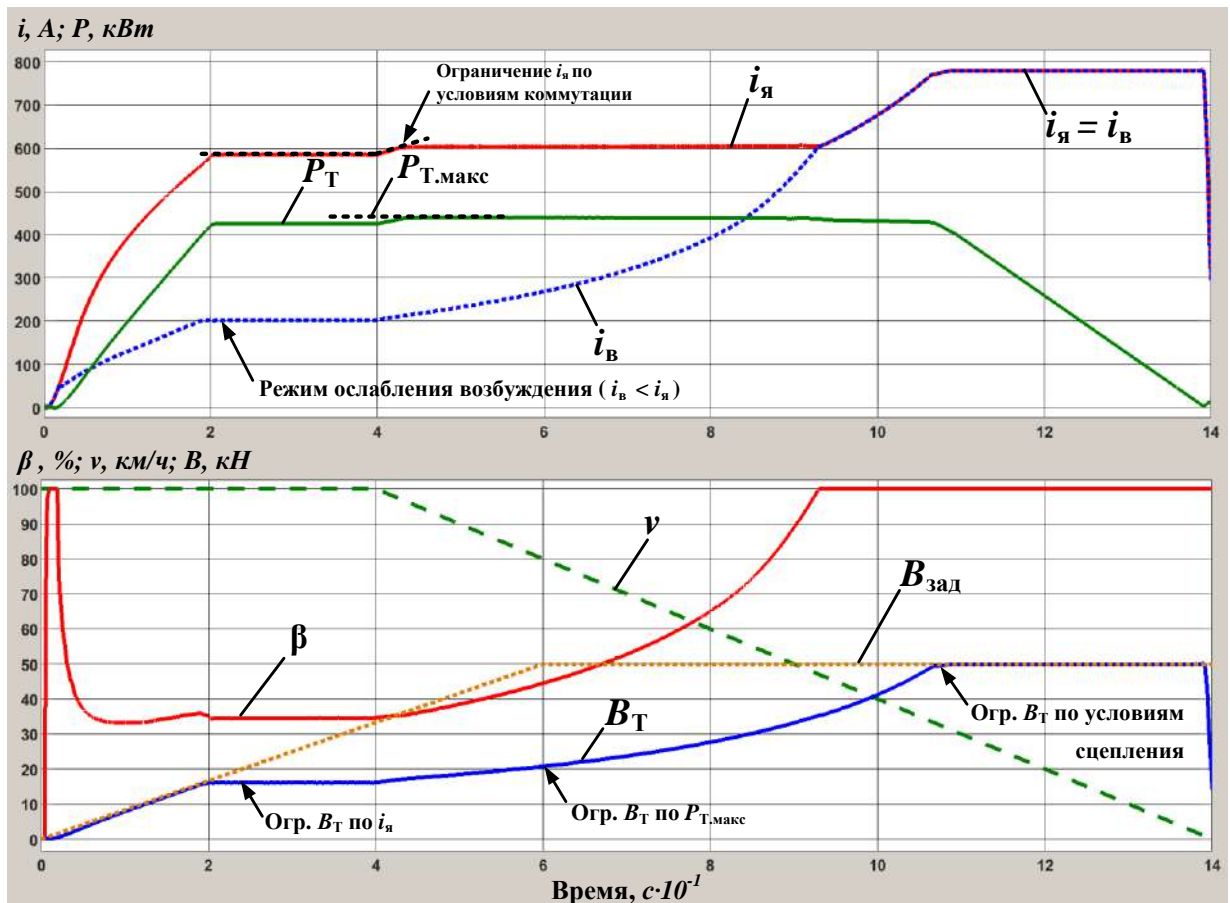


Рисунок 5.14 – Результаты моделирования работы регулятора силы торможения в диапазоне скоростей 0 – 100 км/ч

В первоначальный момент скорость движения $v = 100$ км/ч. Процесс самовозбуждения ТЭД происходит достаточно быстро (интервал времени $0 < t$

$< 2 \text{ с}$) и привод сразу же переходит в режим ослабления возбуждения ($\beta = 35 \%$). На интервале времени $0 \text{ с} < t < 20 \text{ с}$ тормозная сила \mathbf{B}_T начинает линейно нарастать до 18 кН и остается на этом уровне до момента времени $t = 40 \text{ с}$. Ограничение величины \mathbf{B}_T связано с ограничением тока якоря по условиям коммутации ($i_{\text{я}} = 585 \text{ А}$).

Далее (интервал времени $40 \text{ с} < t < 105 \text{ с}$) скорость движения \mathbf{v} начинает линейно снижаться. Реализованная тормозная сила увеличивается по гиперболической характеристике. Такая зависимость обуславливается ограничением по максимальной мощности тормозных резисторов $P_{T.\text{макс}}$, которое составляет 440 кВт . Ток возбуждения $i_{\text{в}}$ при этом увеличивается при постоянстве тока якоря ($i_{\text{я}} = 610 \text{ А}$). В момент времени $t = 92 \text{ с}$ привод переходит в режим полного возбуждения ($\beta = 100 \%$). Следующий небольшой излом кривой \mathbf{B}_T (интервал времени $105 \text{ с} < t < 110 \text{ с}$) обусловлен ограничением по сцеплению.

В момент времени $t = 110 \text{ с}$ при скорости $\mathbf{v} = 32 \text{ км/ч}$ тормозная сила достигает максимального значения 50 кН , установленного для 4 позиции, а мощность на тормозных резисторах P_T начинает снижаться.

Далее (интервал времени $110 \text{ с} < t < 140 \text{ с}$) \mathbf{B}_T удерживается на максимальном уровне 50 кН при токе якоря $i_{\text{я}} = 780 \text{ А}$ вплоть до скорости движения, близкой к нулю. При этом значение тока якоря $i_{\text{я}} = 780 \text{ А}$ близко к заданному ограничению длительного тока ТЭД (800 А), что делает возможным длительно удерживать максимальную силу торможения на 4 позиции КМ (300 кН на секцию).

Как видно из рисунка 5.14, разработанная САУ ТП обеспечивает поддержание тормозной силы на заданном уровне во всем диапазоне скоростей движения, а также реализует его ограничения, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза.

Работа регулятора ослабления возбуждения и блока управления тормозным импульсным регулятором в описанном выше опыте показана на рисунке 5.15, где обозначено: u_d – напряжение в звене постоянного тока преобразователя; e – ЭДС

двигателя; γ_{VT2} – коэффициент заполнения сигнала управления ключом $VT2$ полупроводникового преобразователя.

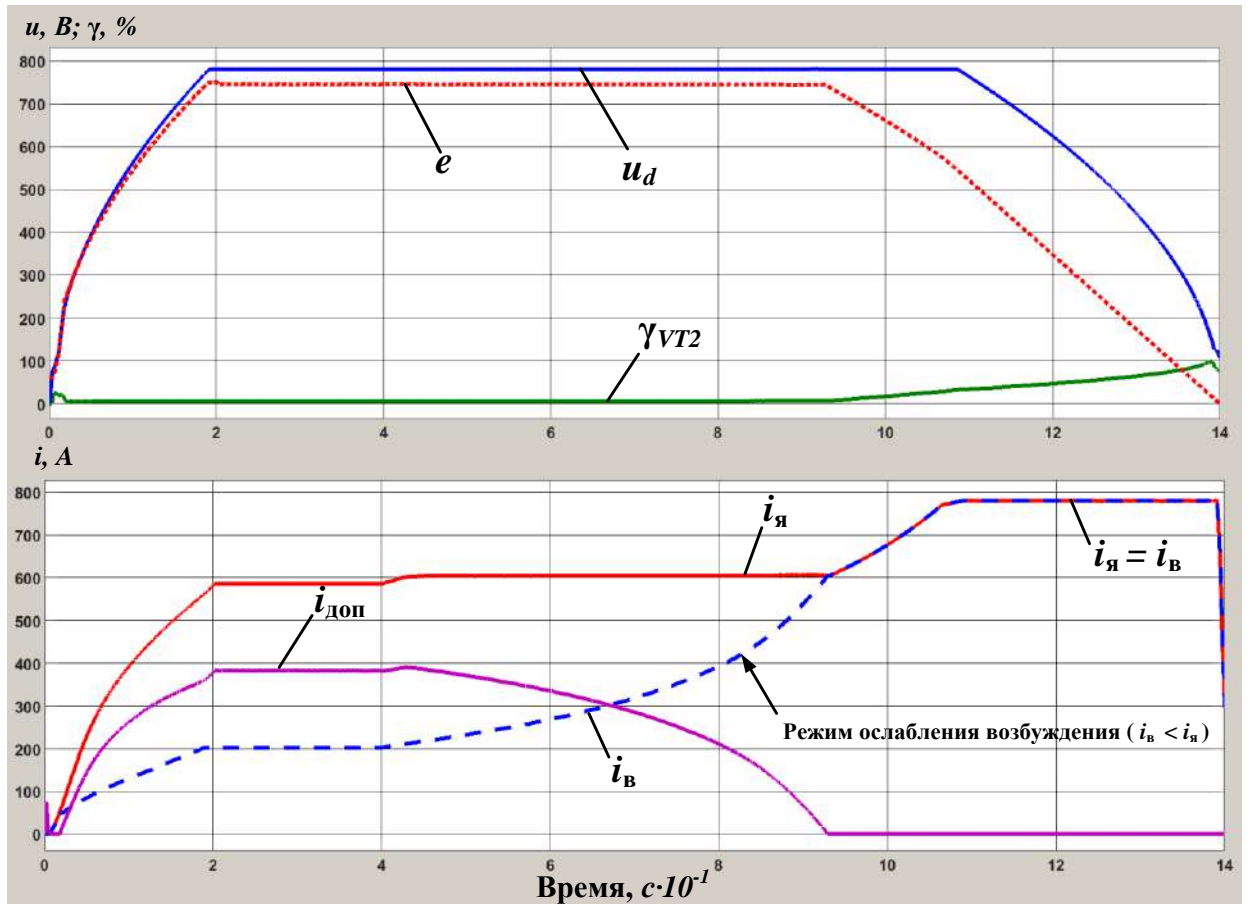


Рисунок 5.15 – Работа регулятора ослабления возбуждения в режиме ЭТ

На интервале времени $0 \text{ с} < t < 92 \text{ с}$ разница между u_d и e минимальна и обеспечивается за счет работы регулятора ослабления возбуждения и поддержания γ_{VT2} на минимальном уровне. В момент времени $t = 92 \text{ с}$ происходит переход на полное возбуждение ($i_{доп} = 0 \text{ А}$), коэффициент заполнения γ_{VT2} начинает увеличиваться, а с ним и разница между u_d и e .

Как видно по рисунку 5.15 ЭДС двигателя e на всем протяжении эксперимента меньше, чем напряжение u_d в звене постоянного тока преобразователя, что подтверждает работоспособность предложенного алгоритма поддержания устойчивости.

На основе данных рисунка 5.14 была построена зависимость предельной тормозной силы секции тепловоза от скорости $B_T(v)$ (рисунок 5.16). Полученная

характеристика в диапазонах скоростей $0 - 41 \text{ км/ч}$ и $92 - 100 \text{ км/ч}$ проходит выше тормозной характеристики секции тепловоза $2ТЭ25КМ$, показанной на том же рисунке пунктирной линией.

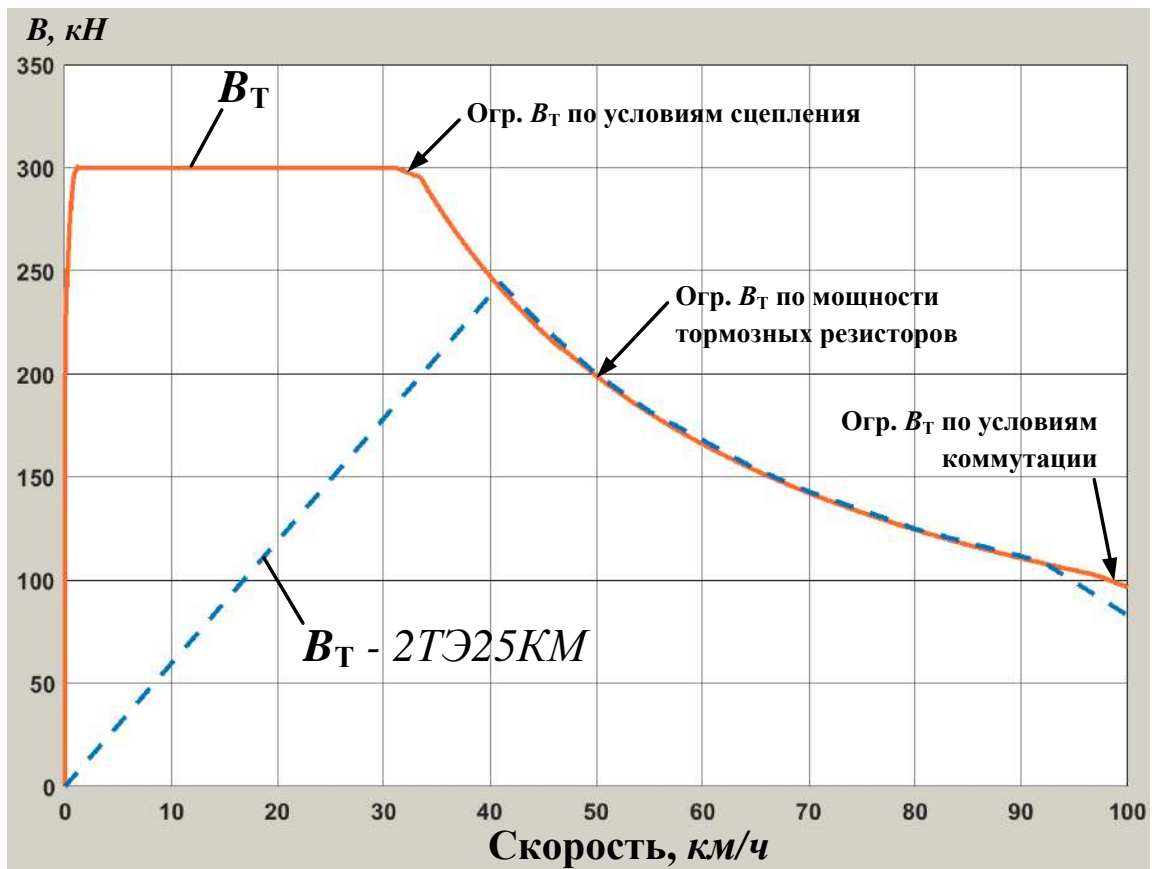


Рисунок 5.16 – Предельная тормозная характеристика тепловоза

В диапазоне скоростей движения $0 - 41 \text{ км/ч}$ повышение тормозной характеристики обеспечивается за счет работы силового ключа $VT2$ преобразователя и уменьшения эквивалентного сопротивления тормозного резистора. А в зоне скоростей движения $92 - 100 \text{ км/ч}$ - за счет работы силового ключа VTT тормозного импульсного регулятора преобразователя и увеличения эквивалентного сопротивления тормозного резистора, что также подтверждает работоспособность и эффективность предложенного алгоритма расчета напряжения в звене постоянного тока преобразователя.

В диапазоне скоростей движения $41 - 92 \text{ км/ч}$ тормозные характеристики практически совпадают, что, с учетом принятых допущений, говорит об адекватности используемой математической модели тягового привода.

Рассмотрим результаты моделирования работы САУ ТП в режиме ЭТ в динамических режимах при скорости движения 20 км/ч на полном возбуждении (рисунок 5.17). На этом и последующих рисунках на графике заданной тормозной силы $B_{\text{зад}}$ отмечен номер тормозной позиции контроллера машиниста (ПК).

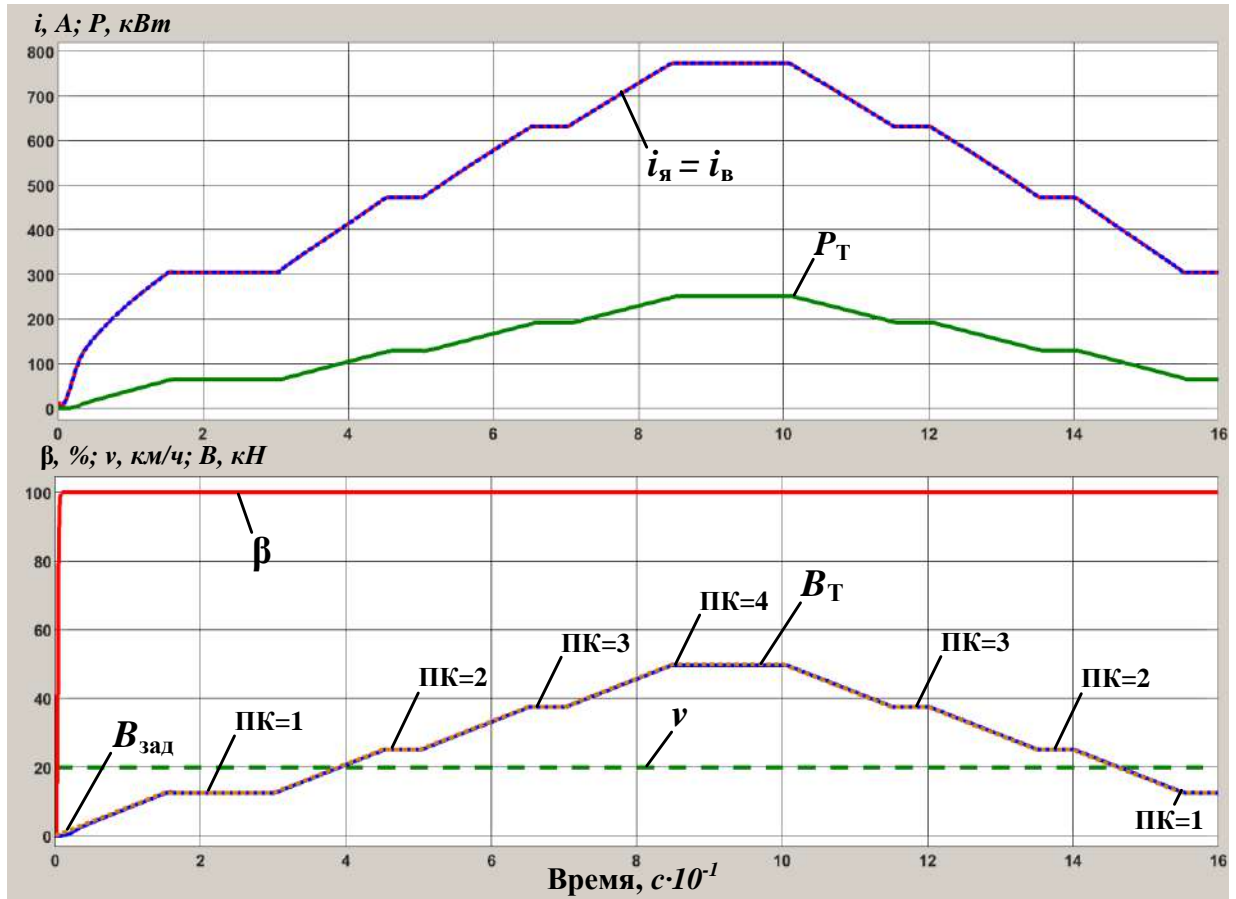


Рисунок 5.17 – Результаты моделирования работы регулятора силы торможения в динамических режимах при скорости 20 км/ч

На интервале времени $0 \text{ с} < t < 30 \text{ с}$ происходит плавное увеличение и поддержание тормозной силы B_{T} от нуля до заданного для 1 позиции КМ (12,5 кН). Затем выполняется постепенный набор позиций с 1 до 4 (интервал времени $30 \text{ с} < t < 100 \text{ с}$). Значение B_{T} увеличивается вслед за заданием $B_{\text{зад}}$, также происходит увеличение мощности на тормозном реостате P_{T} , токов якоря $i_{\text{я}}$ и возбуждения $i_{\text{в}}$ ТЭД. На 4 позиции КМ (интервал времени $85 \text{ с} < t < 100 \text{ с}$) тормозная сила B_{T} составляет 50 кН при токе якоря $i_{\text{я}} = 780 \text{ А}$.

На интервале времени $100 \text{ с} < t < 160 \text{ с}$ происходит сброс позиций КМ с 4 до 1. Регулятор силы торможения при этом также обеспечивает поддержание тормозной силы B_T в соответствии с заданием.

Результаты моделирования работы САУ ТП в аналогичном режиме при скорости движения 60 км/ч с ослаблением возбуждения приведены на рисунке 5.18.

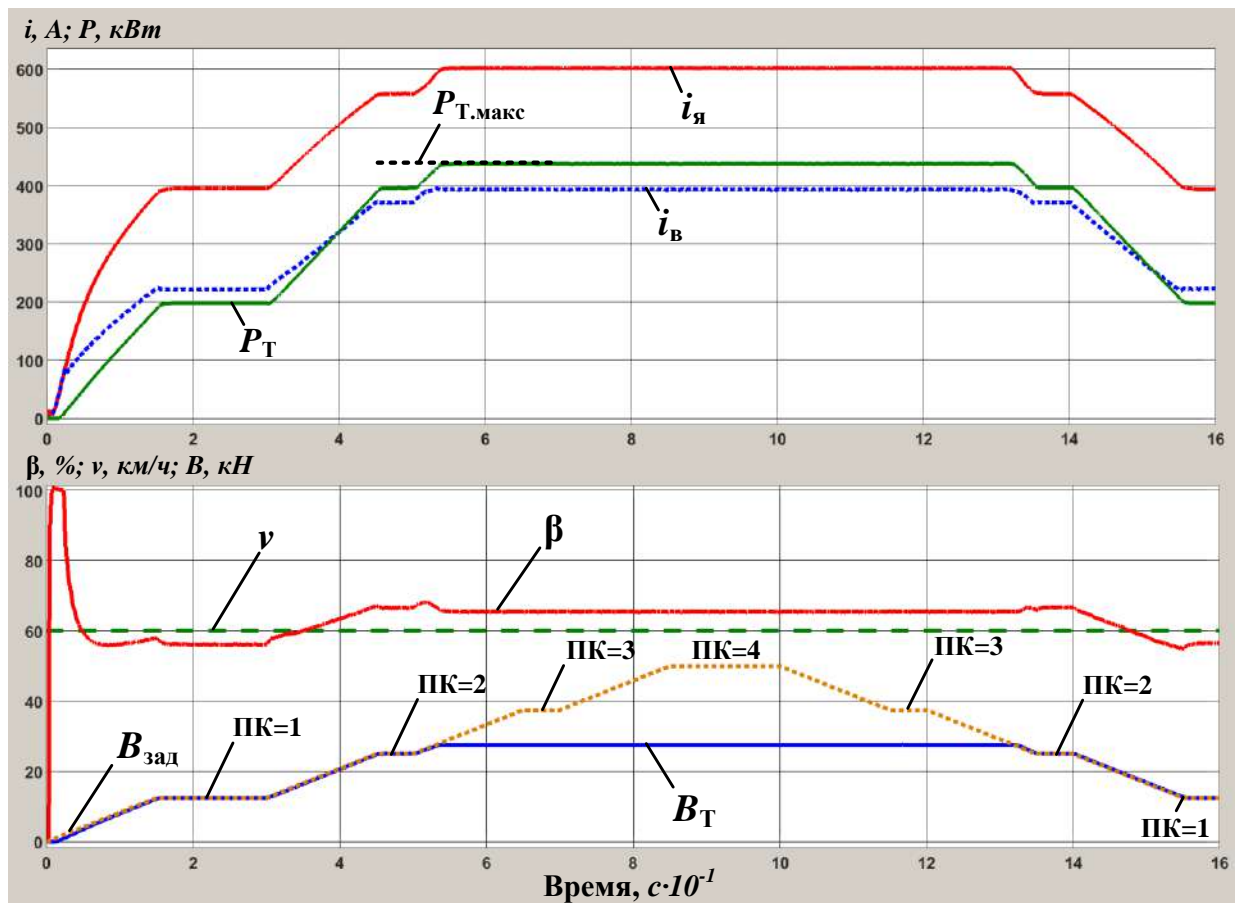


Рисунок 5.18 – Результаты моделирования работы регулятора силы торможения в динамических режимах при скорости 65 км/ч

На интервале времени $53 \text{ с} < t < 113 \text{ с}$ происходит ограничение тормозной силы B_T на уровне 28 кН , связанное с ограничением по максимальной мощности тормозного реостата ($P_T = 440 \text{ кВт}$). При этом ток якоря $i_{\text{я}}$ составляет 600 А , коэффициент ослабления возбуждения $\beta = 65 \%$. На остальных временных интервалах регулятор силы торможения обеспечивает поддержание тормозной силы B_T в соответствии с заданием.

По результатам моделирования работы САУ ТП в режиме ЭТ можно сделать следующие выводы:

- разработанный регулятор силы торможения совместно с регулятором ослабления возбуждения обеспечивают реализацию заданной тормозной силы в стационарных и динамических режимах, а также реализует ограничения тормозной силы, обусловленные электромеханическими параметрами узлов тепловоза;

- регулятор ослабления возбуждения и блок управления тормозным импульсным регулятором в соответствии с предложенным алгоритмом обеспечивают устойчивость электрического торможения во всем диапазоне скоростей движения;

- полученная по результатам расчетов предельная тормозная характеристика в диапазонах скоростей 0 – 41 км/ч и 92 – 100 км/ч проходит выше тормозной характеристики секции тепловоза 2ТЭ25КМ, что увеличивает общую эффективность ЭТ, особенно в зоне низких скоростей движения;

- совпадение расчетной и существующей тормозной характеристики секции тепловоза 2ТЭ25КМ в диапазоне скоростей движения 41 – 92 км/ч говорит о достоверности используемой математической модели тягового привода и полученных результатов.

5.3 Выводы по разделу 5

- 1 Разработанная компьютерная модель тягового привода позволяет исследовать работу полупроводникового преобразователя и его САУ в режимах тяги и электрического торможения.

- 2 Разработанные регуляторы тока вместе с предложенной схемой полупроводникового преобразователя обеспечивают режим полного возбуждения, а также режимы ослабления и повышения возбуждения ТЭД. При этом обеспечивается поддержание коэффициента пульсаций тока якоря на достаточно

низком уровне (менее 1,025), что не будет существенно влиять на процесс коммутации на коллекторе тягового двигателя. При этом тяговый двигатель защищен от бросков тока за счет высокого быстродействия предложенных регуляторов в переходных режимах.

3 Разработанные регуляторы мощности и силы торможения совместно с регулятором ослабления возбуждения обеспечивают реализацию заданных параметров, как в статических режимах работы привода, так и в динамических.

4 Предлагаемое решение имеет все необходимые инструменты для реализации существующих алгоритмов поосного регулирования силы тяги, а также внедрения более совершенных, что не является предметом исследования настоящей диссертации.

5 Количественные показатели, полученные по результатам моделирования, говорят об адекватности используемой математической модели тягового привода и достоверности результатов исследования.

6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

6.1 Описание экспериментального стенда

Структурная схема стенда для проведения экспериментальных исследований (рисунок 6.1) состоит из следующих устройств:

- опытного образца тягового двухканального преобразователя ТП типа 27.Т.768.00.00.000;
- тяговых электродвигателей М1 и М2 типа ЭД107Б, жестко соединенных между собой и снабженных датчиками частоты вращения $BR1$, $BR2$ типа ДСНТ-01.
- синхронного генератора СГ типа ГСТ-1050-1000;
- коммутационной аппаратуры: реверсоров $QS1$, $QS2$ и защитного автоматического выключателя $QF1$;
- тормозных резисторов R_{T1} и R_{T2} типа ЛСО-9110.

Управление каналами преобразователя и запись параметров работы производится с помощью персональных компьютеров ПК1, ПК2. Стенд обеспечивает одновременную проверку преобразователя в режимах тяги и электрического торможения (ЭТ).

Первый канал преобразователя является тяговым и получает питание от СГ через автомат $QF1$. Тяговый двигатель М1 подключен к выходу первого канала преобразователя и работает в двигательном режиме.

Второй канал преобразователя является тормозным, питание к нему не подключено. Тяговый двигатель М2, жестко связанный с М1, работает в генераторном режиме и отдает энергию в канал 2 преобразователя, которая рассеивается на тормозном реостате R_{T2} .

Для проведения испытаний на большой мощности предусмотрен режим работы по взаимной нагрузке: в этом случае соединяют отрицательные выводы каналов преобразователя, а также вывод « R_{T2} » и «+» как показано пунктирной

линией на рисунке 6.1, а реостат R_{T2} отключают. Каналы оказываются гальванически связанными. Тогда энергия тягового двигателя $M2$ поступает в канал 1 преобразователя, а не рассеивается в воздухе, что существенно снижает потребление энергии от СГ.

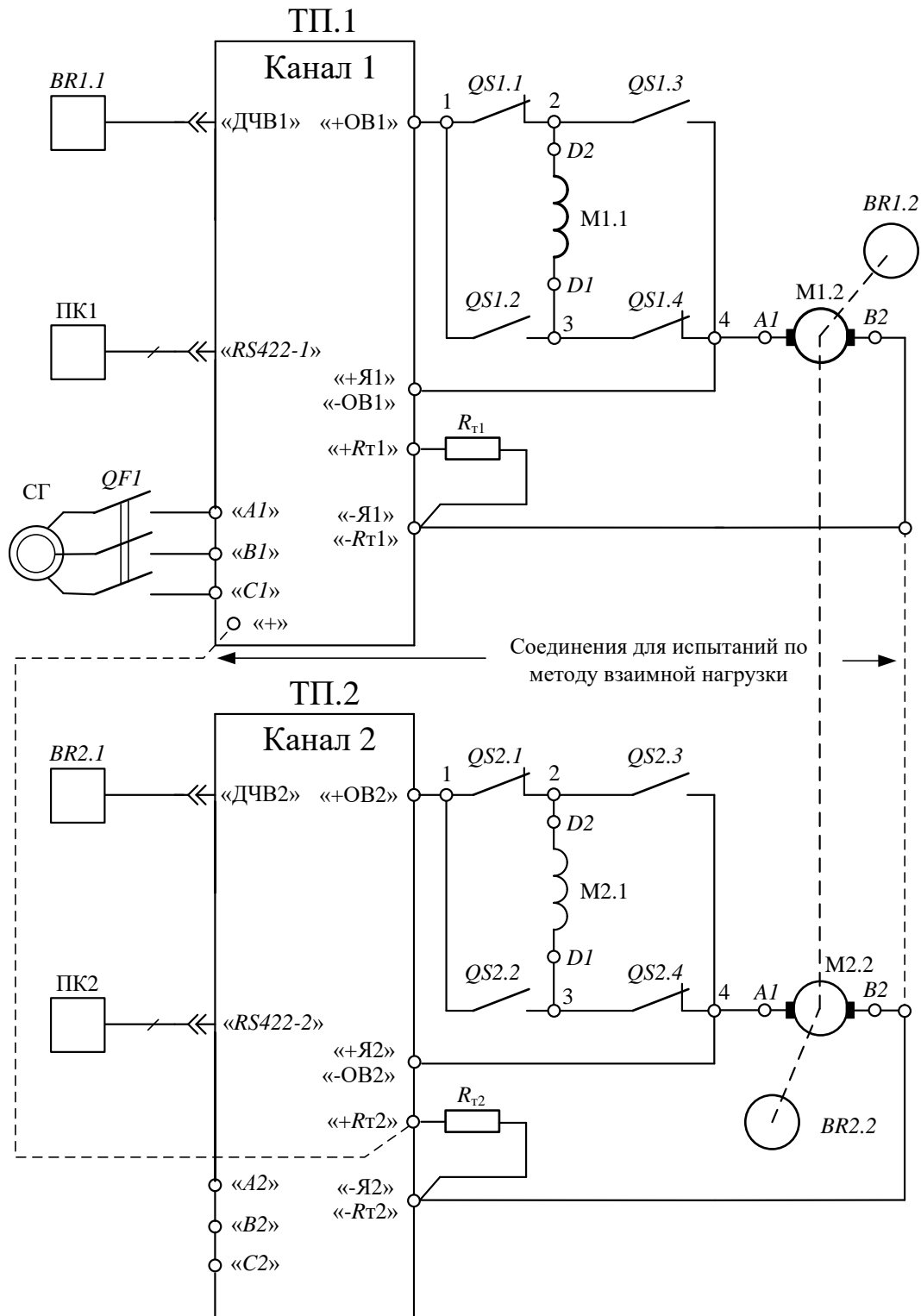


Рисунок 6.1 – Структурная схема стенда для проведения испытаний

6.2. Описание полупроводникового преобразователя

Для проведения испытаний использовался опытный образец преобразователя тягового двухканального 27.Т.768.00.00.000, разработанного АО «ВНИКТИ» для маневровых тепловозов с электрической передачей переменного-постоянного тока. Преобразователь спроектирован с учетом положений, приведенных в настоящей диссертации, и предназначен для питания группы из трех последовательно соединенных тяговых двигателей постоянного тока последовательного возбуждения.

Структурная схема и основные параметры преобразователя приведены на рисунке 6.2 и в таблице 6.1, соответственно.

Таблица 6.1 – Параметры полупроводникового преобразователя

Наименование параметра	Значение
Номинальное входное линейное напряжение каналов 1 и 2, В	660
Номинальная выходная мощность каналов 1 и 2 в режимах тяги и электрического торможения, кВт	415
Номинальный ток на выходах «+ОВ1» и «+ОВ2», А	890
Максимальный ток на выходах «+ОВ1» и «+ОВ2», в течение не более 2 мин., А	1100
Номинальный ток на выходах «+Rт1» и «+Rт2», А	485
Коэффициент полезного действия в номинальном режиме, %, не менее	98
Напряжение питания системы автоматического управления, В: - номинальное значение - допустимый диапазон изменения	110 77 - 150
Режим работы	Продолжительный
Масса, кг, не более	500
Степень защиты оболочки по ГОСТ 14254	IP21

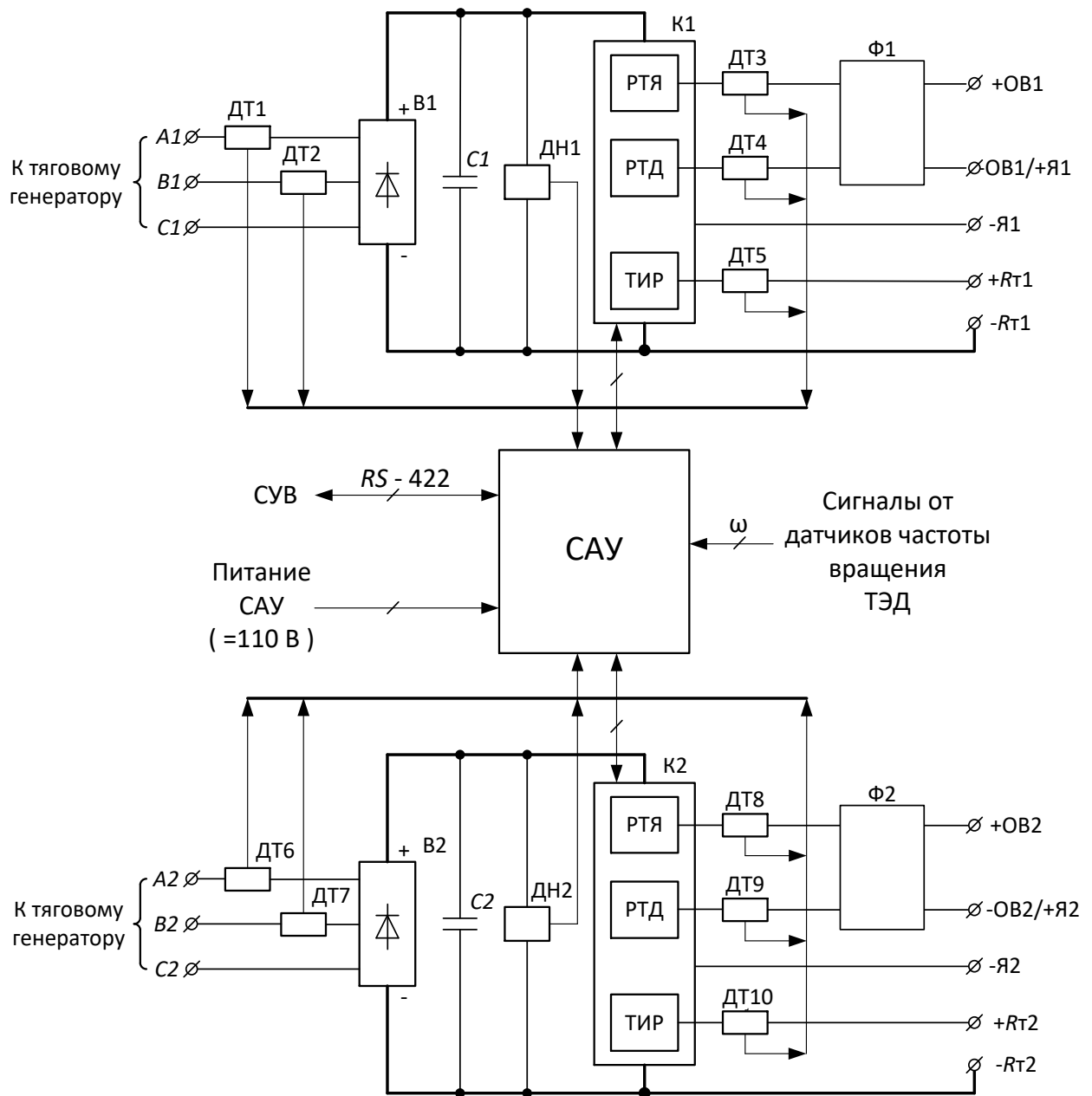


Рисунок 6.2 – Структурная схема полупроводникового преобразователя

Преобразователь содержит следующие основные узлы (рисунок 6.2):

- трехфазные мостовые выпрямители (B1, B2);
- батареи фильтровых конденсаторов (C1, C2);
- фильтры du/dt Ф1, Ф2;
- два идентичных канала регулирования (K1, K2), включающие:
 - тормозной импульсный регулятор (ТИР);
 - регулятор тока якоря (РТЯ);
 - регулятор дополнительного тока (РТД);

- набор датчиков напряжения (ДН1, ДН2) и тока (ДТ1 – ДТ10);
- систему автоматического управления (САУ).

Климатические условия эксплуатации преобразователя:

- значение рабочей температуры окружающей среды от -50 до $+60$ °С;
- значение рабочей температуры охлаждающего воздуха от -50 до $+45$ °С.

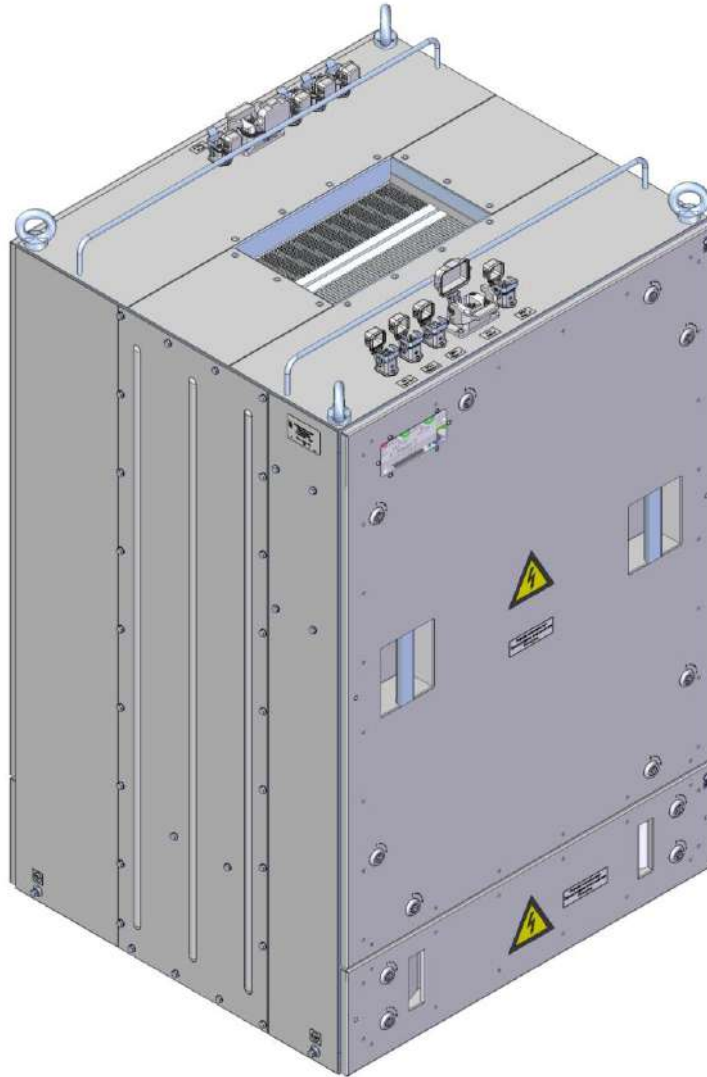


Рисунок 6.3 – Внешний полупроводникового преобразователя

Преобразователь (рисунок 6.3) выполнен в виде шкафа двухстороннего обслуживания. С каждой стороны размещаются элементы каналов: силовая часть, плата управления, датчики тока и напряжения. Охлаждение принудительное от внешней системы вентиляции.

Алгоритмы управления, предложенные в настоящей работе, реализованы в электронной плате управления преобразователем, выполненной на базе

микроконтроллера серии *STM32G4XX*. Данная серия микроконтроллеров построена на базе процессорного ядра *Cortex-M4* (с *FPU* и *DSP* инструкциями) с максимальной рабочей частотой *170 МГц* и имеет следующие особенности [85]:

- *ART Accelerator™* исполняемого кода, *CCM-SRAM* ускоритель прерываний, математические ускорители *CORDIC* и *FMAC*;
- расширенная аналоговая периферия: 12/16 бит АЦП, ЦАП, компараторы;
- последовательные каналы связи *UART, FDCAN, SPI, I2C, USB, SAI*;
- таймеры 16/32 бит общего назначения и с расширенными возможностями для управления силовой электроникой, в том числе электроприводов;
- память до 512 кбайт *FLash* и до 128 кбайт *SRAM*.

Электронная плата (рисунок 6.4) предназначена для управления силовыми ключами преобразователя по командам от системы управления верхнего уровня (СУВ) с учетом сигналов, поступающих с внутренних и внешних датчиков тока, напряжения, температуры и частоты вращения. Обмен данными с СУВ осуществляется по каналу связи *RS-422*.



Рисунок 6.4 – Внешний вид платы управления

Программное обеспечение разработано в среде *STM32CubeIDE*. Укрупненная блок схема работы программы приведена на рисунке 6.5.

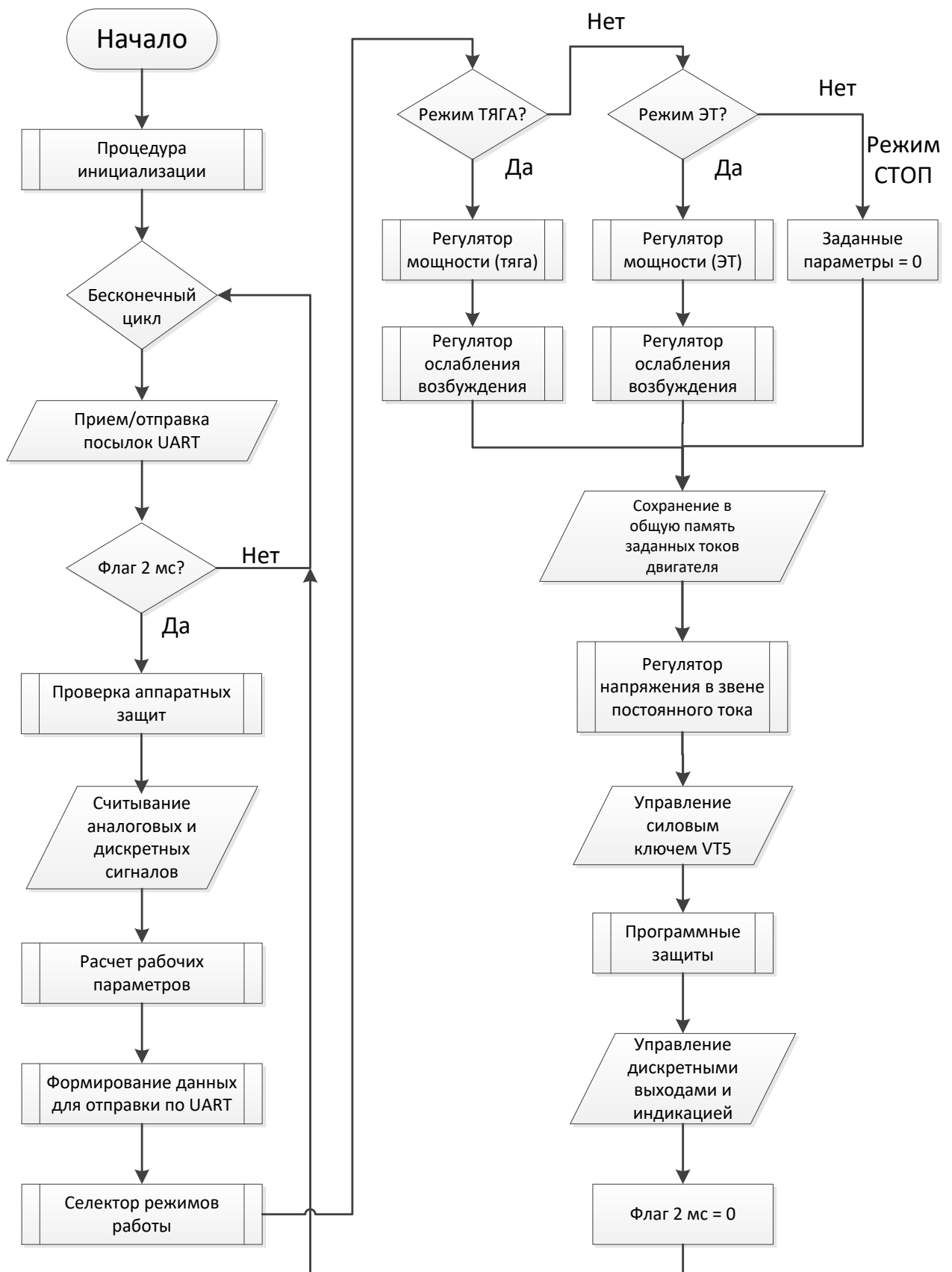


Рисунок 6.5 – Блок схема работы программы

После запуска программы выполняется процедура инициализации, а затем в бесконечном цикле выполняются процедура обмена пакетами по *UART*-порту

(фоновая задача). Каждые 2мс выполняется основной цикл, включающий в себя процедуры контроля аппаратных защит, считывания аналоговых и дискретных сигналов, расчета параметров работы, программных защит, управления режимом работы и вызова регуляторов. В основном цикле также формируются логические сигналы управления силовым ключом $VT5$ тормозного регулятора, а также дискретными выходами и индикацией. Вызов регуляторов тока якоря (РТЯ) и дополнительного тока (РТД) и формирование логических сигналов управления силовыми ключами $VT1-VT4$ осуществляется в процедуре обработки прерывания по периоду таймера микроконтроллера, вызываемого с высокой частотой (рисунок 6.6).

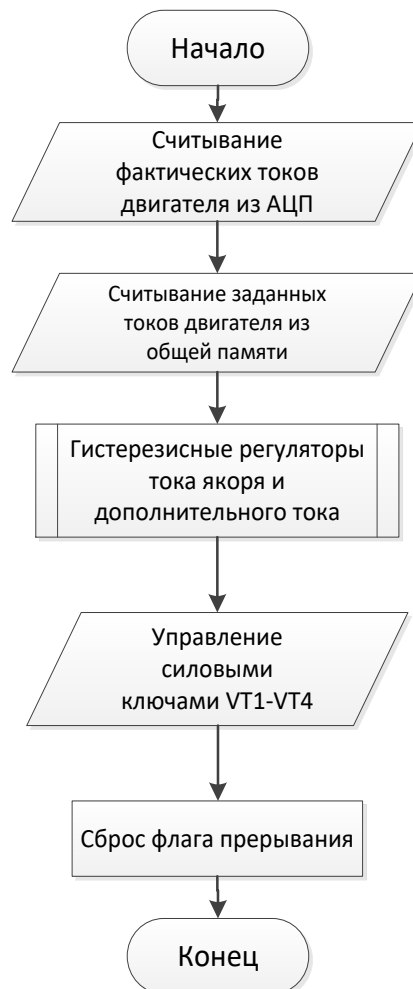


Рисунок 6.6 – Блок схема процедуры обработки прерывания по периоду таймера

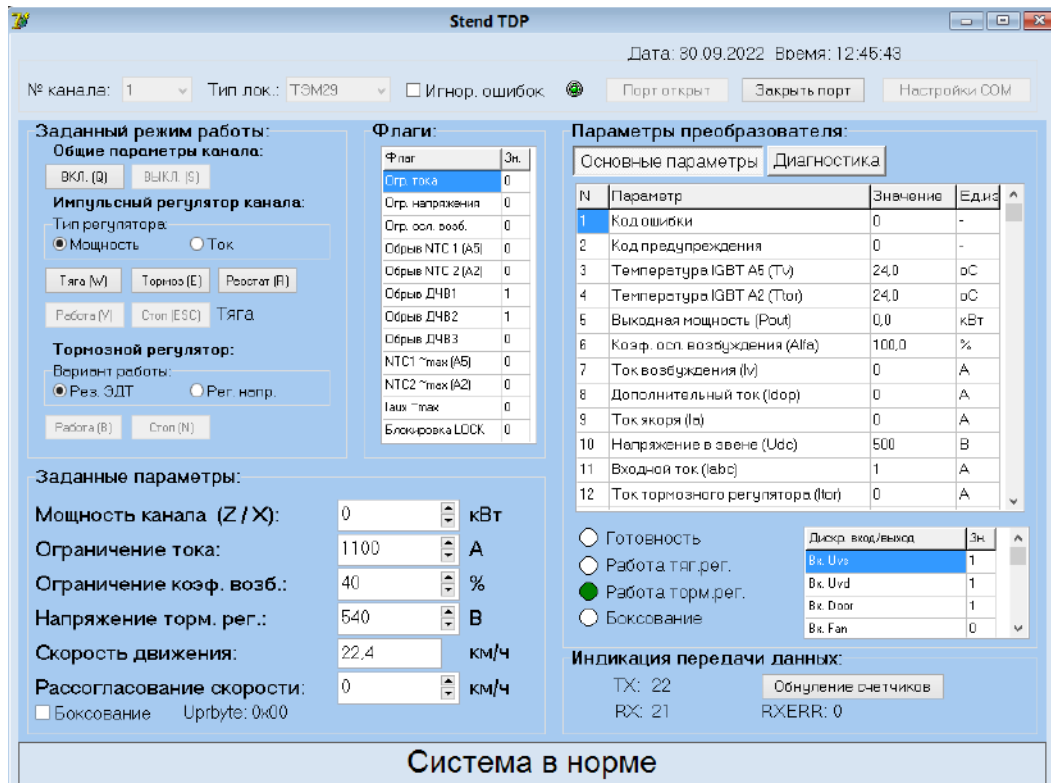


Рисунок 6.7 – Главное окно программы-терминала

Для формирования задающих воздействий в среде *Delphi 7* была разработана программа-терминал (рисунок 6.7), имитирующая работу СУВ тепловоза и имеющая функцию записи рабочих параметров в файл.

Таким образом, была выполнена подготовка стендового и программного обеспечения для проведения экспериментальных исследований.

6.3 Результаты испытаний полупроводникового преобразователя

6.3.1 Методика испытаний и используемое оборудование

Экспериментальная проверка предложенных алгоритмов управления и всего решения в целом проводилась в рамках предварительных испытаний преобразователя, выполняемых согласно программе и методике «Преобразователь тяговый двухканальный. Программа и методика предварительных испытаний»

27.Т.768.00.00.000 ПМ1. Для измерения и регистрации результатов экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование:

- цифровой четырехканальный осциллограф *TBS2104*;
 - пробники напряжения с гальванической развязкой типа *THDP0100*;
 - токовые пробники переменного тока типа *A621*;
 - вольтамперметры типа М2017 с шунтами типа 75.ШИСВ-1500;
 - вольтметры типа Щ02 с добавочными сопротивлениями типа Р4201;
 - мультиметр *Fluke 289*.
 - ноутбуки с установленной программой-терминалом и функцией записи.
- Фото испытательного стенда приведено на рисунке 6.8.



Рисунок 6.8 – Испытательный стенд на территории АО «ВНИКТИ»

В ходе испытаний проводилась фиксация осциллограмм работы силовой части преобразователя и запись его основных параметров в файл для последующего анализа и сравнения с теоретическими выкладками и результатами компьютерного моделирования. Все измерительные приборы, использованные при испытаниях, были поверены в установленном порядке.

6.3.2 Экспериментальное исследование работы регуляторов тока

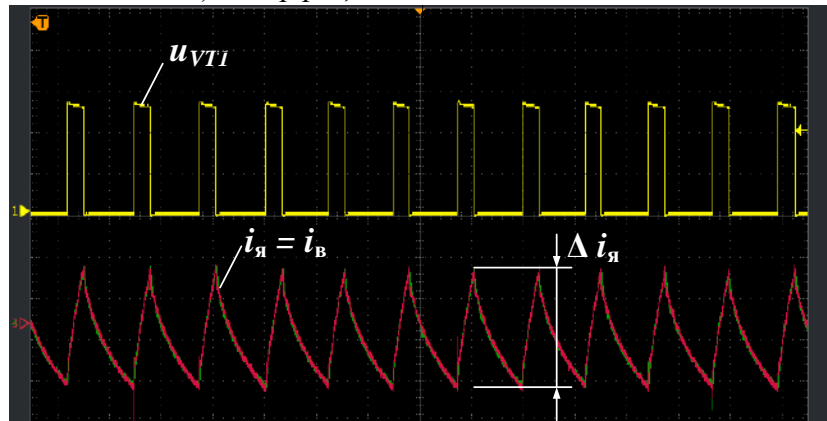
Рассмотрим работу регулятора тока якоря (рисунок 6.9) при испытаниях преобразователя на полном возбуждении при различных коэффициентах заполнения сигнала управления ключом $VТ1$. На рисунке 6.9 показаны осциллограммы токов якоря и возбуждения i_a , i_b (переменная составляющая, масштаб $20 A/дел$) и напряжения на выходе силового ключа $VТ1$ преобразователя u_{VT1} (вывод «+ОВ1», масштаб $200 B/дел$), горизонтальный масштаб $1 мс/дел$. Дополнительно обозначен размах пульсаций токов якоря Δi_a .

Испытания проводились при напряжении в звене постоянного тока преобразователя от 480 до $520 B$, выходной мощности от 50 до $130 кВт$ и токах якоря от 340 до $380 A$. Заданные значения размаха пульсаций тока якоря составляли $56 A$, $62 A$, $48 A$, $34 A$ при средних значениях тока $380 A$, $385 A$, $330 A$, $340 A$ для вариантов рисунка 6.9 а) - г), соответственно.

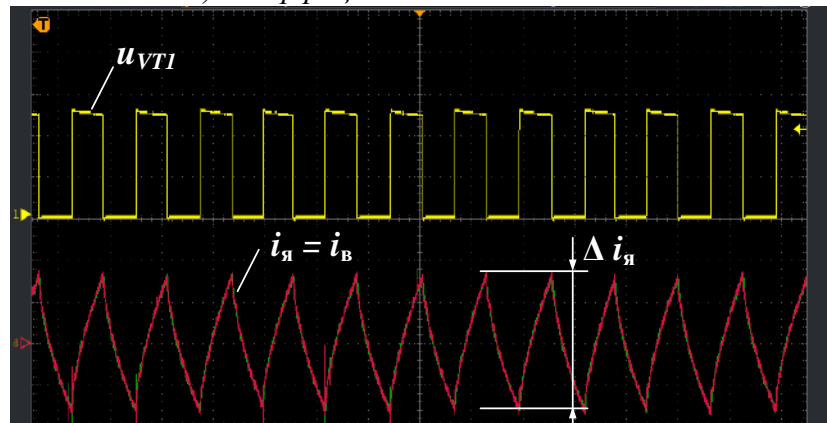
Как видно по представленным осциллограммам регулятор тока якоря обеспечивает поддержание тока в заданном диапазоне, при этом фактический размах пульсаций соответствует заданному с отклонением $3 - 4 A$ и составляет 15% , 16% , 15% , 10% от среднего значения тока при средней частоте коммутации $800 Гц$, для вариантов рисунка 6.9 а), б), в), г), соответственно. При этом скорость нарастания тока якоря максимальная при минимальном коэффициенте заполнения и наоборот, что соответствует теоретическим выкладкам (Приложение А). Если учесть, что преобразователь предназначен для питания трех последовательно соединенных тяговых двигателей тепловоза, то фактический коэффициент пульсаций тока якоря в эксплуатации будет достигать максимального значения $1,026$, что не будет оказывать существенного влияния на коммутацию на коллекторе ТЭД. При этом в ходе испытаний заметного увеличения искрения на коллекторе ТЭД отмечено не было.

На рисунке 6.10 дополнительно показана работа регулятора тока якоря в условиях пульсаций входного напряжения от 180 до $220 B$ (масштабы по току $10 A/дел$, по напряжению $100 B/дел$).

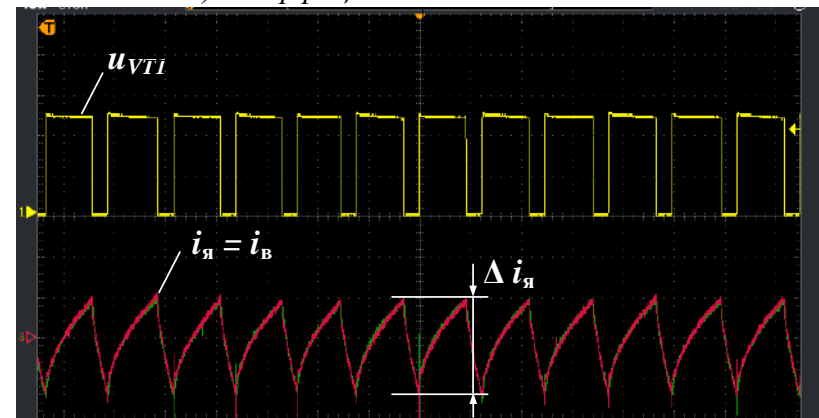
а) Коэффициент заполнения 25 %



б) Коэффициент заполнения 50 %



в) Коэффициент заполнения 75 %



г) Коэффициент заполнения 88 %

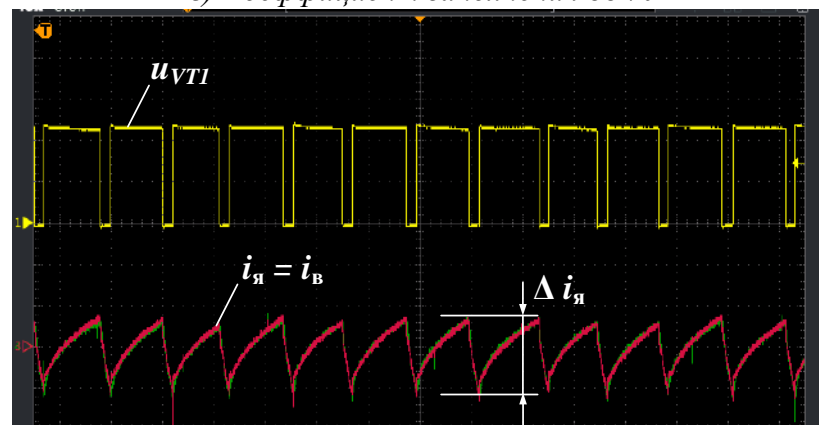
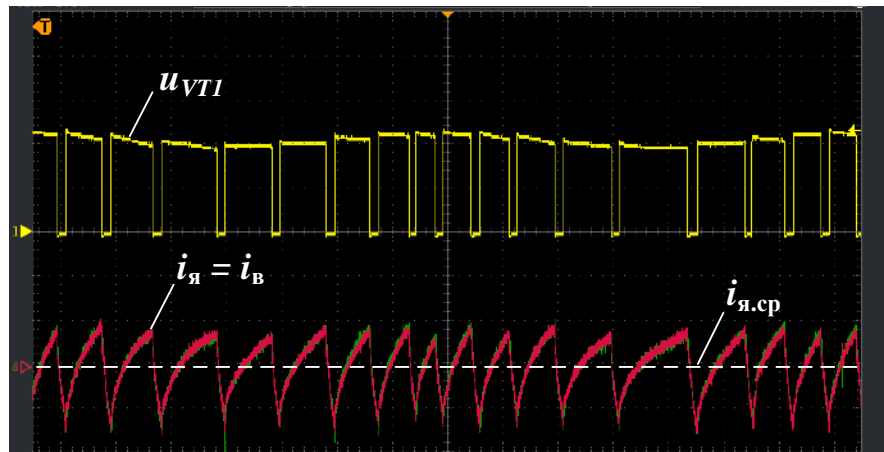


Рисунок 6.9 – Результаты испытаний регулятора тока в режиме полного возбуждения

а) Горизонтальный масштаб 2мс/дел



б) Горизонтальный масштаб 1мс/дел

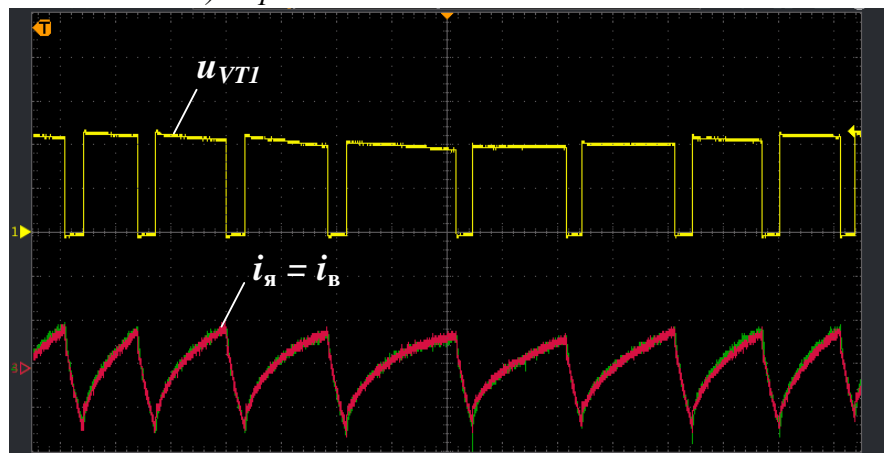


Рисунок 6.10 – Режим с пульсациями входного напряжения

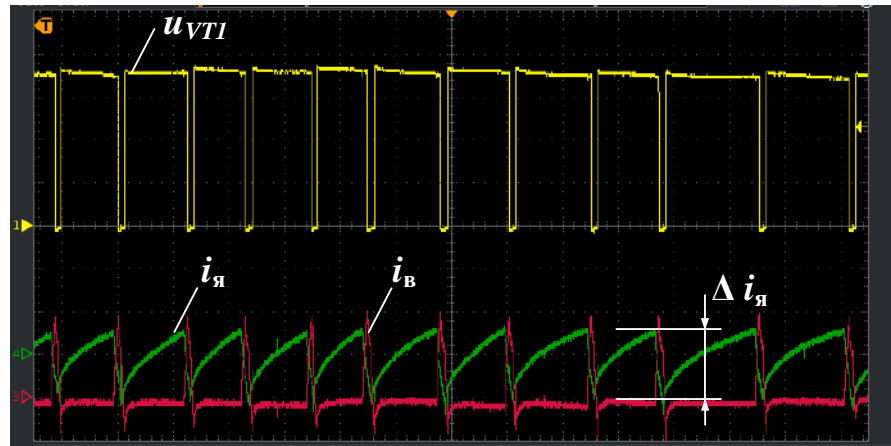
Предложенный регулятор обеспечивает поддержание среднего тока якоря $i_{я.ср}$ на постоянном уровне независимо от пульсаций, при этом заметно изменение частоты коммутации в зависимости от уровня напряжения в звене постоянного тока (огибающая сигнала u_{VT1}), что соответствует результатам математического моделирования (рисунок 5.6) и теоретическим выкладкам (Приложение А).

Осциллограммы токов якоря и возбуждения при испытаниях преобразователя на ослабленном возбуждении при коэффициентах ослабления 88 % и 60 % показаны на рисунке 6.11 (масштабы по току 20 А/дел, по напряжению 100 В/дел, горизонтальный масштаб 1 мс/дел).

Испытания проводились при токе якоря 375 А и выходной мощности 120 кВт. Как видно по этому рисунку регулятор тока обеспечивает режим ослабленного возбуждения, при этом в обоих случаях размах пульсаций составляет 16 А (4,3 % от среднего значения) на частоте 800 Гц независимо от

коэффициента ослабления возбуждения, что подтверждает возможность отдельного управления токами. При этом ток возбуждения пульсирует с той же частотой, однако его форма близка к постоянному току, что совпадает с результатами моделирования.

а) Коэффициент ослабления возбуждения 88 %



б) Коэффициент ослабления возбуждения 60 %

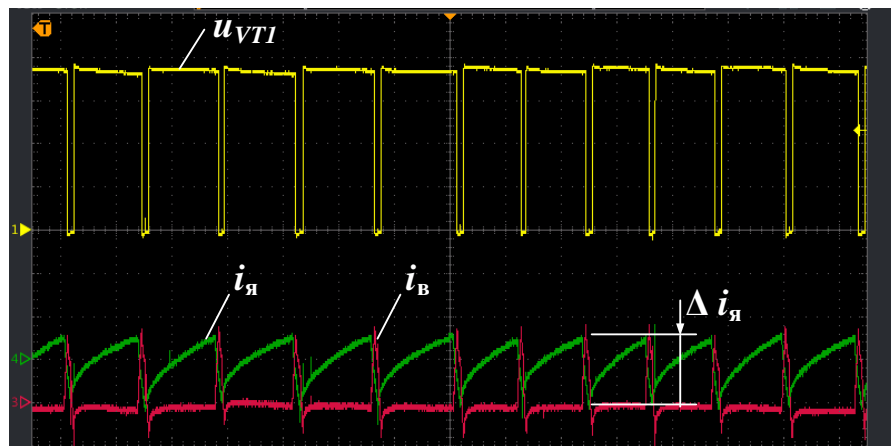


Рисунок 6.11 – Результаты испытаний регулятора тока в режиме ослабленного возбуждения

Дополнительно следует отметить, что в обоих случаях за счет работы внешнего контура ослабления возбуждения коэффициент заполнения сигнала управления ключом VTI не превышает 91 %, обеспечивая при этом поддержания тока якоря на заданном уровне, что подтверждает правильность структуры САУ и выбора критерия перехода на ослабленное возбуждение согласно п.3.2.4.

Осциллограммы работы регулятора тока в режиме электрического торможения не показаны ввиду того, что форма тока и происходящие электрические процессы аналогичны приведенным для режима тяги.

6.3.2 Экспериментальное исследование работы преобразователя в целом

Рассмотрим работу преобразователя в режиме тяги на полном (рисунки 6.12, 6.13) и ослабленном возбуждении (рисунки 6.14, 6.15), где и на последующих рисунках обозначено:

- $i_{я}$, $i_{в}$ – токи якоря и возбуждения ТЭД (масштаб -1000 – 1000 А);
- $P_{зад}$, $P_{вых}$ – заданная и выходная мощности преобразователя (масштаб 0 – 500 кВт);
- u_d – напряжение в звене постоянного тока (масштаб 0 – 1000 В);
- n – частота вращения якоря (масштаб 0 – 2000 об/мин);
- β – коэффициент ослабления возбуждения (масштаб 0 – 100 %).

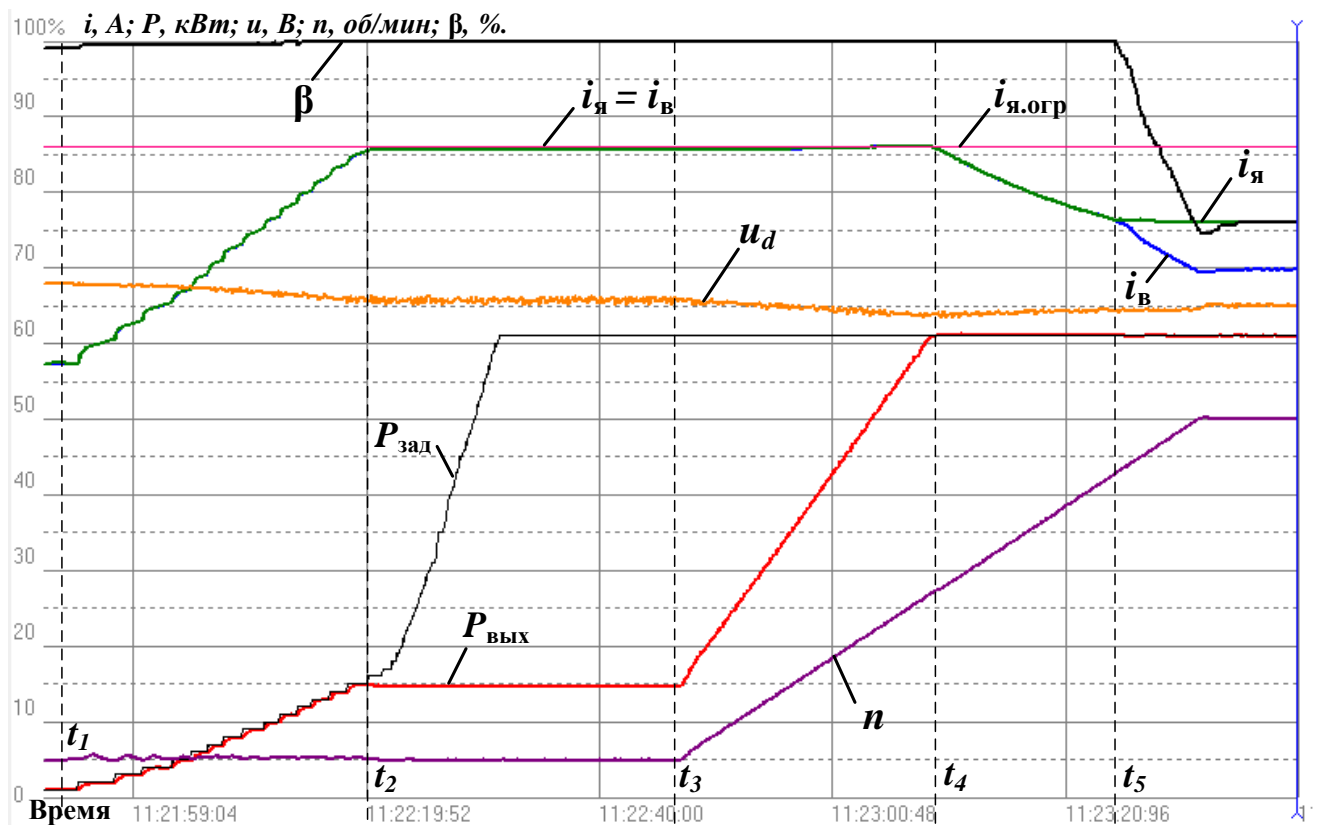


Рисунок 6.12 – Результаты испытаний преобразователя в режиме ограничения выходного тока (полное возбуждение, тяга)

Опыт (рисунок 6.12) проведен с помощью метода взаимной нагрузки. При частоте вращения 100 об/мин происходит увеличение заданной мощности преобразователя с 10 до 305 кВт (интервал времени $t_1 - t_3$). Ток якоря

увеличивается плавно и ограничивается на заданном уровне $i_{я.огр} = 720 \text{ A}$ в момент времени t_2 (номинальный режим для тягового двигателя ЭД-107Б [86]). Далее (интервал времени $t_2 - t_5$) частота вращения плавно увеличивается до 1000 об/мин. Выходная мощность $P_{\text{вых}}$ увеличивается при постоянстве тока якоря и в момент времени t_2 достигает заданного значения 305 кВт. Далее обеспечивается режим постоянной мощности $P_{\text{вых}} = const$, а ток якоря начинает снижаться. В момент времени t_5 начинается процесс ослабления возбуждения.

Данный опыт подтверждает возможность плавного регулирования выходного тока при низких скоростях движения и высоком входном напряжении, а формы графиков, приведенные на рисунке 6.12, соответствуют результатам компьютерного моделирования (рисунок 5.8). Наличие гальванической связи между каналами в этом опыте и отсутствие сбоев при их совместной работе с общим звеном постоянного тока подтверждают возможность построения многоканального преобразователя для поосного управления силой тяги магистрального теплового вагона.

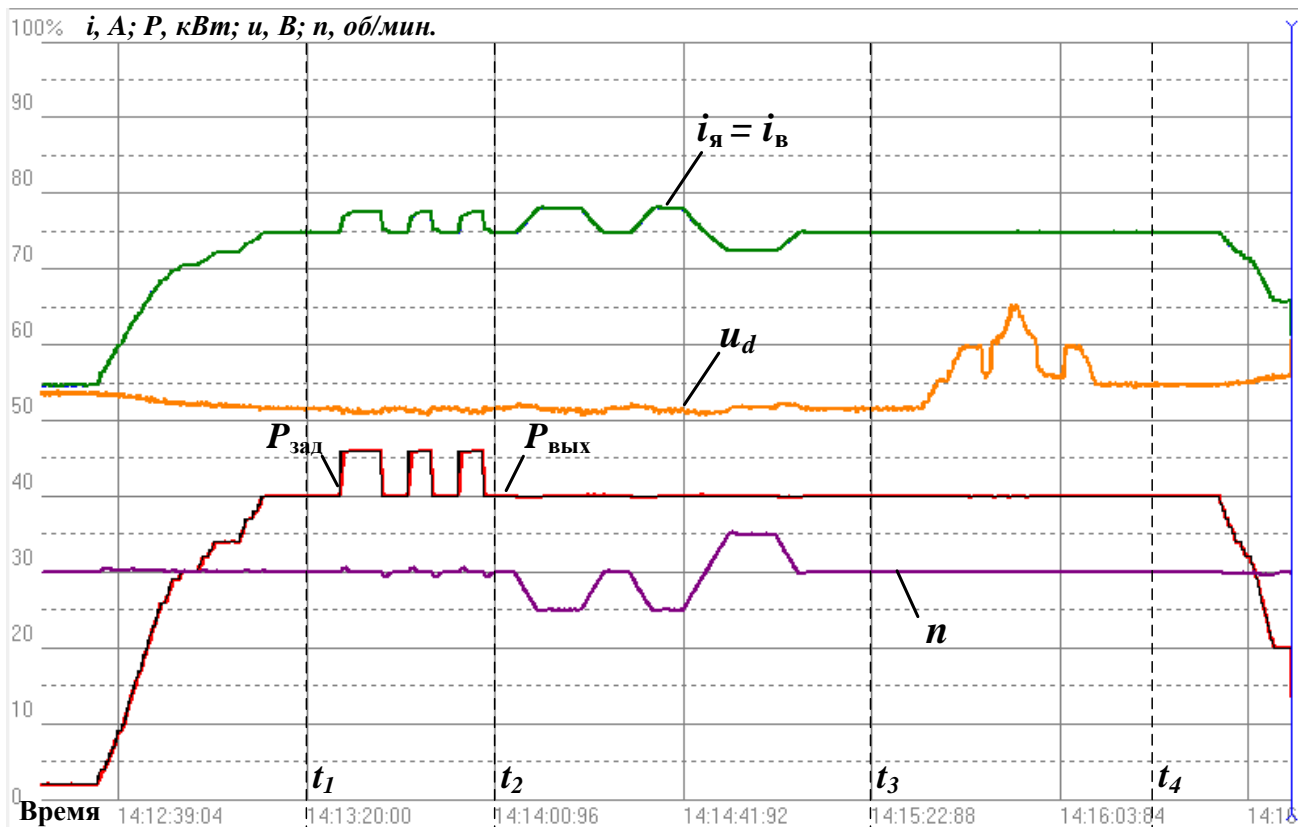


Рисунок 6.13 – Результаты испытаний преобразователя в динамических режимах работы (полное возбуждение, тяга)

Результаты испытаний преобразователя в динамических режимах работы показаны на рисунке 6.13, где при установившемся режиме работы ($P_{\text{ВЫХ}} = 200 \text{ кВт}$, $n = 600 \text{ об/мин}$) происходит изменение следующих параметров работы привода:

- заданной мощности $P_{\text{зад}}$ в пределах $\pm 30 \text{ кВт}$ (интервал времени $t_1 - t_2$);
- частоты вращения якоря n в пределах $\pm 100 \text{ об/мин}$ (интервал времени $t_2 - t_3$);
- напряжения в звене постоянного тока u_d в пределах $\pm 100 \text{ В}$ (интервал времени $t_3 - t_4$).

Как видно по этому рисунку разработанная САУ обеспечивает соответствие выходной мощности заданной при всех воздействиях.

Работа регулятора ослабления возбуждения, а также регулятора ограничения коэффициента возбуждения показана на рисунке 6.14. На этом рисунке при установившемся режиме работы ($P_{\text{ВЫХ}} = 200 \text{ кВт}$, $n = 500 \text{ об/мин}$) в момент времени t_1 начинается плавное увеличение частоты вращения якоря до значения 1500 об/мин . На интервале времени $(t_1 - t_2)$ сначала происходит снижение токов двигателя, а затем ослабляется возбуждение до уровня 42 %.

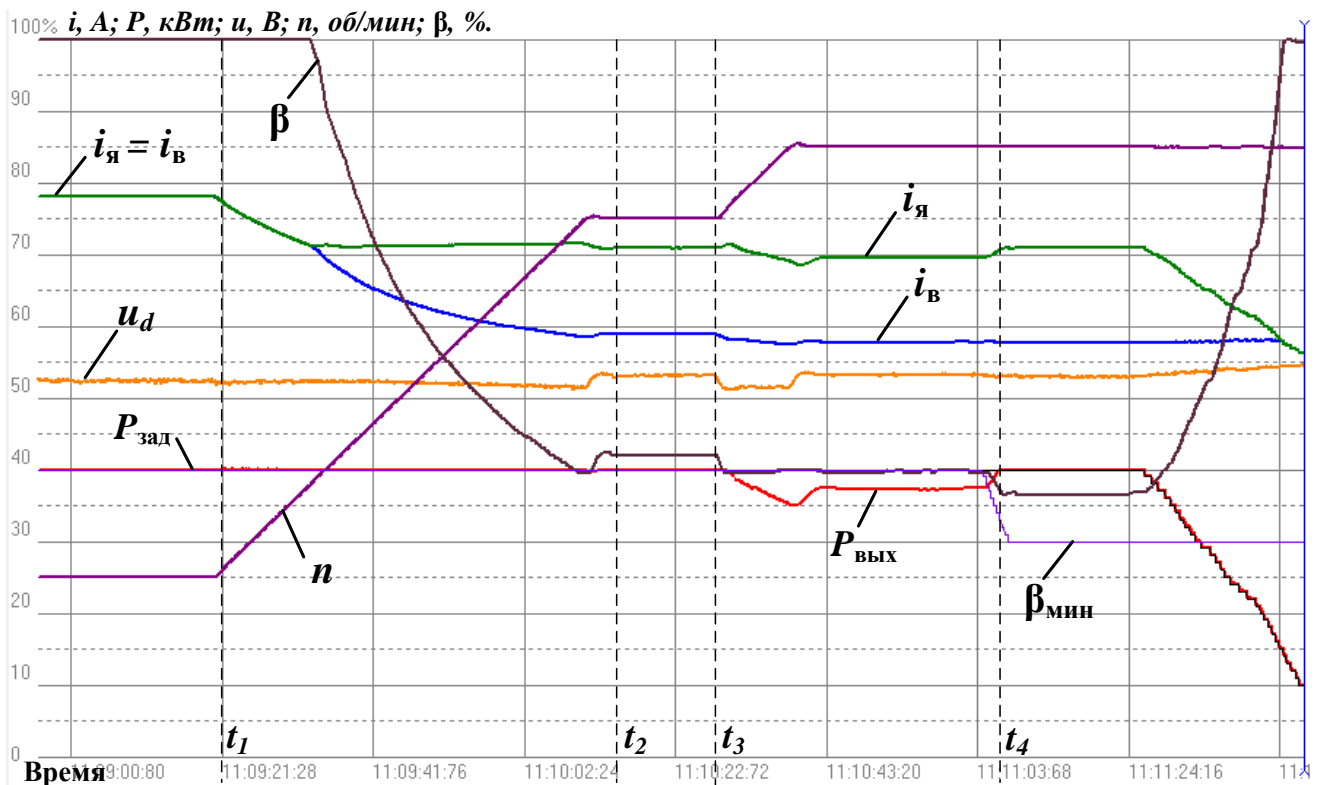


Рисунок 6.14 – Процесс ослабления возбуждения и ограничения коэффициента возбуждения (тяга)

Далее, в момент времени t_3 , частота вращения увеличивается еще на 200 об/мин. При этом выходная мощность $P_{\text{вых}}$ начинает снижаться, так как коэффициент возбуждения β достигает уровня ограничения $\beta_{\text{мин}} = 40\%$. Затем ограничение снижают до 30% (момент времени t_4) и выходная мощность возвращается к заданному значению при $\beta = 36\%$. Формы графиков, приведенные на рисунке 6.14, соответствуют результатам компьютерного моделирования (рисунок 5.8).

На рисунке 6.15 по аналогии с рисунком 6.13 показана работа преобразователя в динамических режимах, но в режиме ослабления возбуждения.

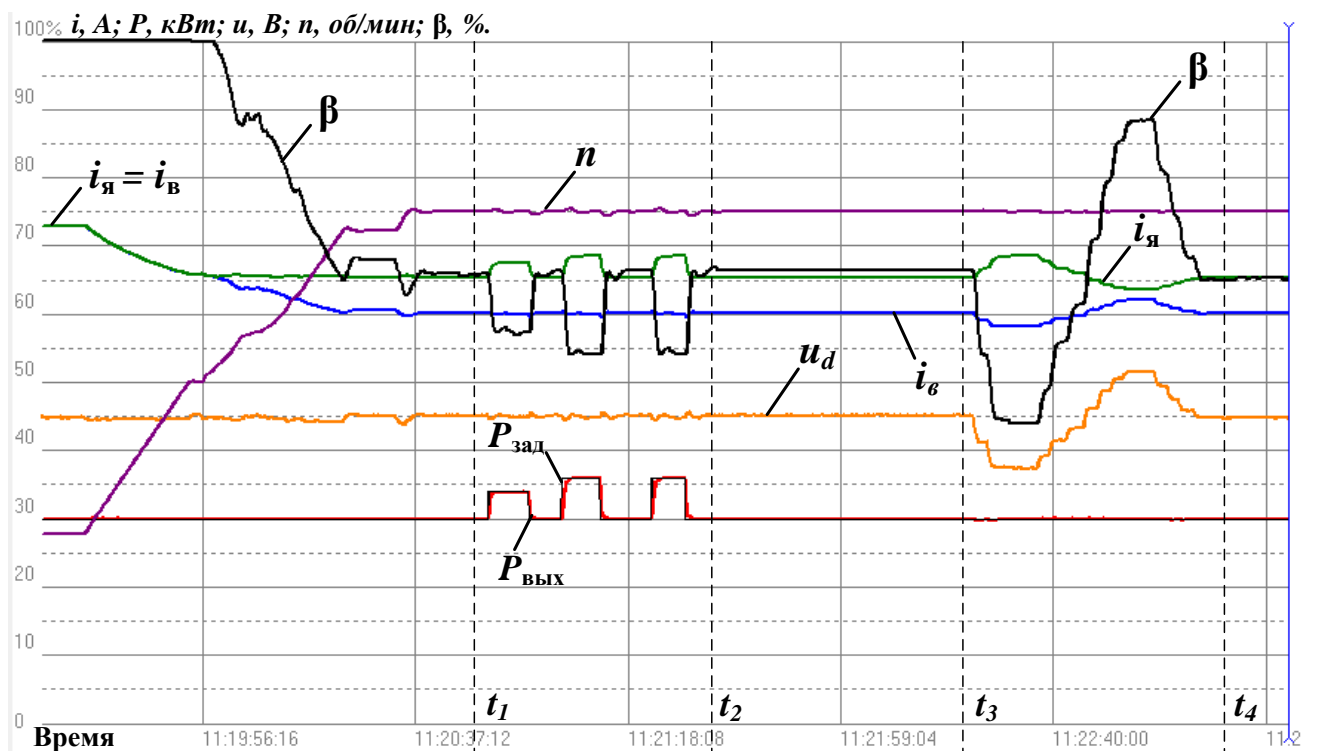


Рисунок 6.15 – Результаты испытаний преобразователя в динамических режимах работы (ослабленное возбуждение, тяга)

На данном рисунке при установившемся режиме работы ($P_{\text{вых}} = 150 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ об/мин}$, $\beta = 66 \%$) происходит изменение следующих параметров работы привода:

- заданной мощности $P_{\text{зад}}$ в пределах $\pm 30 \text{ кВт}$ (интервал времени $t_1 - t_2$);
- напряжения в звене постоянного тока u_d в пределах $\pm 100 \text{ В}$ (интервал времени $t_3 - t_4$).

Как видно по рисунку 6.15, разработанная САУ обеспечивает соответствие выходной мощности заданной при всех воздействиях и в режиме ослабления возбуждения.

Рассмотрим работу преобразователя в режиме ЭТ на полном (рисунки 6.16, 6.17) и ослабленном возбуждении (рисунок 6.18), где обозначено:

- $i_{я}, i_{в}$ – токи якоря и возбуждения ТЭД (масштаб $1000 - 0 A$);
- $P_{зад}, P_{вых}$ – заданная и реализованная мощность преобразователя (масштаб $0 - 500 кВт$);
- u_d – напряжение в звене постоянного тока (масштаб $0 - 1000 В$);
- n – частота вращения якоря (масштаб $0 - 2000 об/мин$);
- β – коэффициент ослабления возбуждения (масштаб $0 - 100 \%$);
- $i_{тор}$ – ток через тормозной резистор (масштаб $0 - 500 A$).

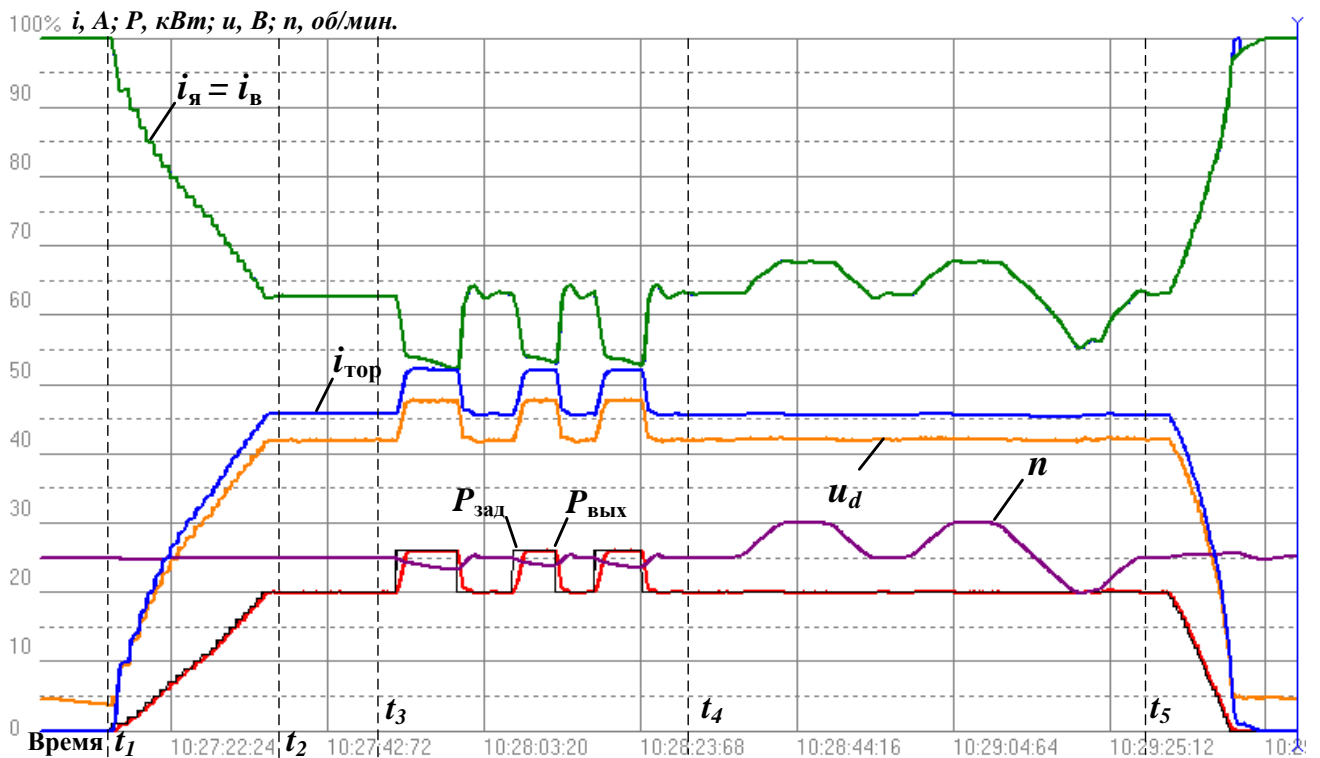


Рисунок 6.16– Результаты испытаний преобразователя в динамических режимах работы (полное возбуждение, ЭТ)

Результаты испытаний преобразователя в динамических режимах работы показаны на рисунке 6.16, где на интервале времени $t_1 - t_2$ выполняется плавное включение преобразователя и выход на установившийся режим ($P_{вых} = 100 кВт$,

$n = 500$ об/мин), затем происходит изменение следующих параметров работы привода:

- заданной мощности $P_{\text{зад}}$ в пределах ± 30 кВт (интервал времени $t_3 - t_4$);
- частоты вращения якоря n в пределах ± 100 об/мин (интервал времени $t_4 - t_5$).

Как видно по этому рисунку, разработанная САУ обеспечивает соответствие выходной мощности заданной при всех воздействиях.

На рисунке 6.17 по аналогии с рисунком 6.16 показана работа преобразователя в динамических режимах, но в режиме ослабления возбуждения.

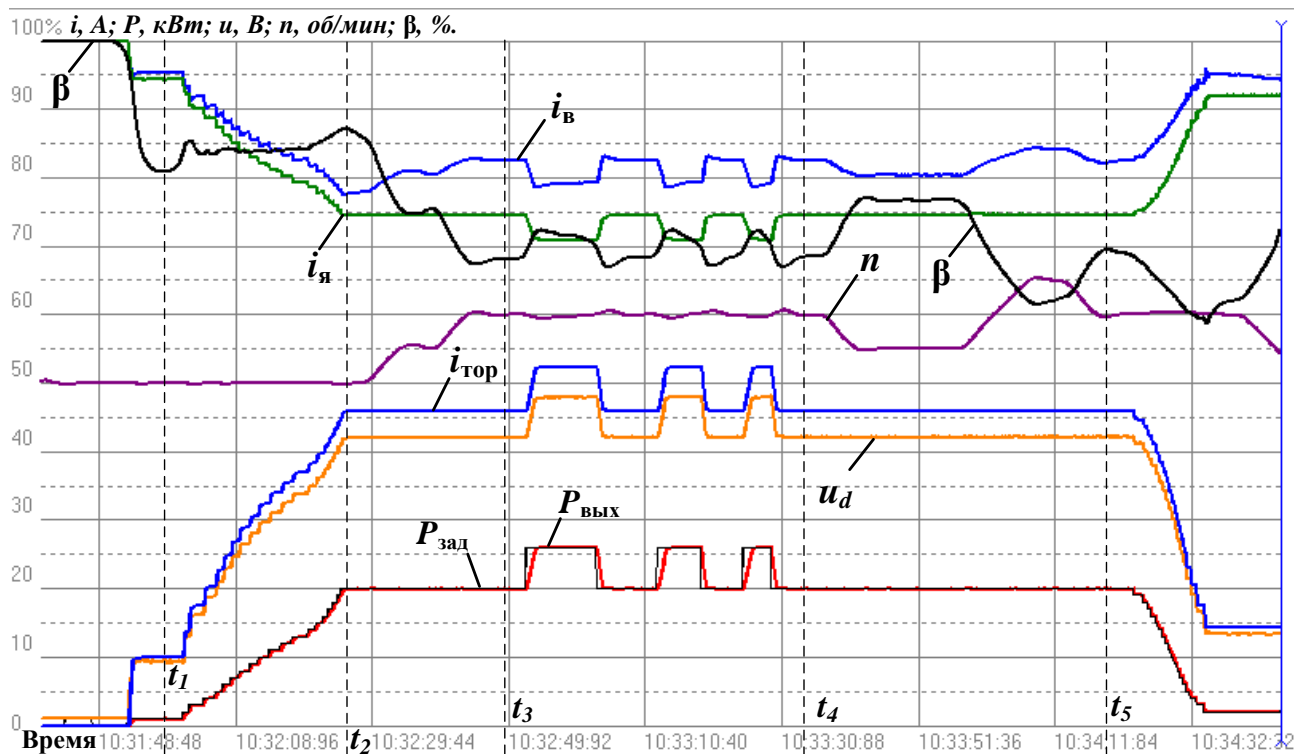


Рисунок 6.17 – Результаты испытаний преобразователя в динамических режимах работы (ослабленное возбуждение, ЭТ)

На данном рисунке при установившемся к моменту времени t_3 режиме работы ($P_{\text{вых}} = 100$ кВт, $n = 1200$ об/мин, $\beta = 68$ %) происходит изменение следующих параметров работы привода:

- заданной мощности $P_{\text{зад}}$ в пределах ± 30 кВт (интервал времени $t_3 - t_4$);
- частоты вращения якоря n в пределах ± 100 об/мин (интервал времени $t_4 - t_5$).

Как видно по рисунку 6.17 разработанная САУ обеспечивает соответствие выходной мощности заданной при всех воздействиях и в режиме ослабления возбуждения.

На рисунке 6.18 показаны результаты испытаний САУ и преобразователя в широком диапазоне скоростей движения при электрическом торможении. На интервале времени $t_1 - t_2$ выполняется плавное включение преобразователя и выход на установившийся режим ($P_{\text{вых}} = 100 \text{ кВт}$, $n = 1400 \text{ об/мин}$), при этом привод сразу же автоматически переходит в режим ослабления возбуждения ($\beta = 58\%$).

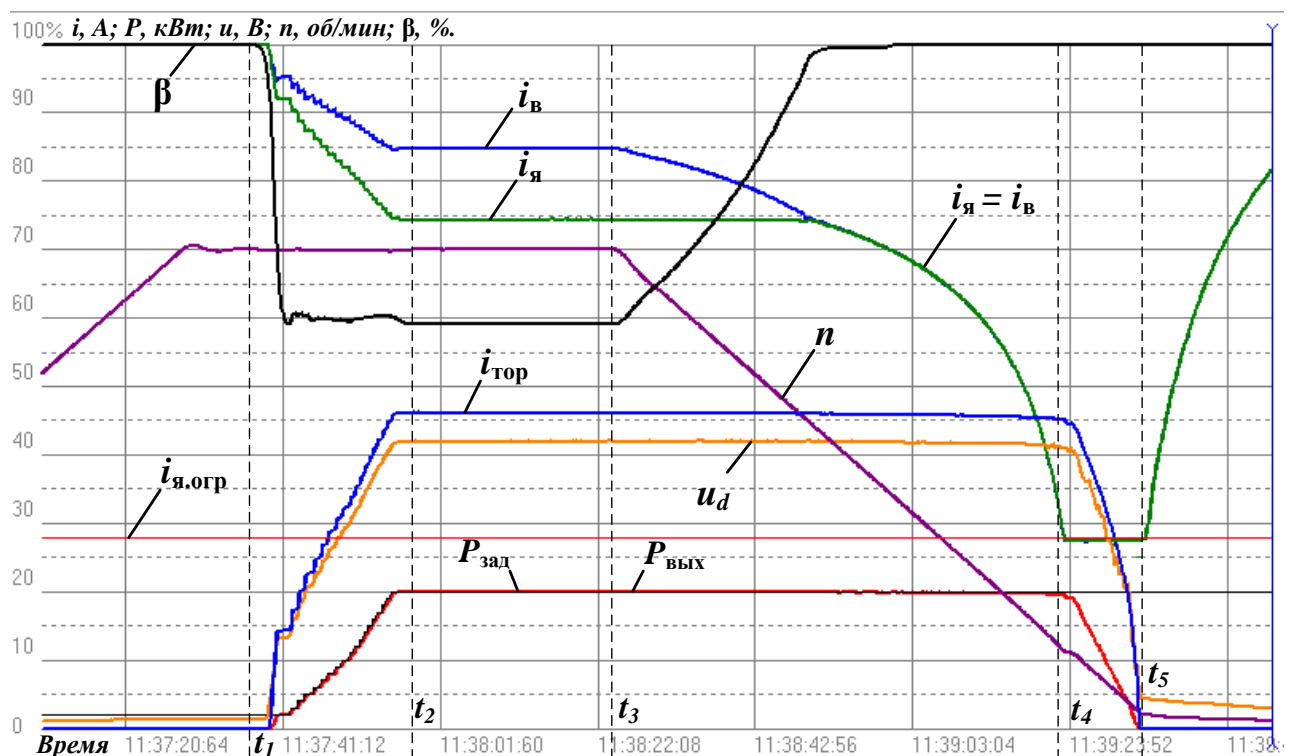


Рисунок 6.18 – Результаты испытаний преобразователя в широком диапазоне скоростей движения (ЭТ)

Начиная с момента времени t_3 происходит плавное снижение частоты вращения якоря. При этом ток возбуждения плавно увеличивается и при частоте вращения $n \approx 900 \text{ об/мин}$ выполняется переход в режим полного возбуждения. Затем, для поддержания заданной мощности, происходит увеличение тока якоря, который в момент времени t_4 ($n = 240 \text{ об/мин}$) ограничивается на заданном уровне

$i_{я.огр} = 720 \text{ А}$. Далее работа осуществляется при ограничении тока якоря, при этом мощность $P_{вых}$ и ток через тормозной резистор $i_{тор}$ снижаются.

В момент времени t_5 ($n = 50 \text{ об/мин}$) указанные выше параметры становятся равными нулю, а ток якоря начинает снижаться. Это свидетельствует о том, что произошло постоянное включение силового ключа преобразователя, цепь двигателя замкнулась, а величина тока якоря теперь зависит от параметров обмотки ТЭД и скорости движения. Формы графиков, приведенные на рисунке 6.18, соответствуют результатам компьютерного моделирования (рисунок 5.14).

Результаты проведенных предварительных испытаний опытного образца преобразователя подтверждают его соответствие заявленным техническим характеристикам и функциональным возможностям. Результаты испытаний оформлены соответствующим протоколом (Приложение В). При этом сбоев и неисправностей в работе преобразователя и тяговых двигателей не отмечено.

6.4 Выводы по разделу 6

1 Разработанный экспериментальный стенд с реальными тяговыми двигателями позволяет исследовать различные режимы работы привода при питании от полупроводникового преобразователя.

2 Разработанные регуляторы тока вместе с предложенной схемой полупроводникового преобразователя обеспечивают режимы полного и ослабленного возбуждения ТЭД. При этом результаты эксперимента имеют качественное сходство с результатами моделирования (форма тока якоря и возбуждения, реакция системы на изменение входного напряжения). Ошибка регулирования тока якоря составляет $\pm 5\%$, что обусловлено более низкой частотой работы системы управления реального объекта по сравнению с идеализированной САУ в имитационной модели.

3 Расчетный коэффициент пульсаций тока якоря в эксплуатации не превысит 1,026, что не должно оказывать существенного влияния на коммутацию

на коллекторе ТЭД, также учитывая то, что за счет использования *IGBT*-транзисторов возможно динамическое изменение частоты переключения силовых ключей для поддержания коэффициента пульсаций тока на требуемом уровне.

4 Разработанный регулятор мощности совместно с регулятором ослабления возбуждения обеспечивают реализацию заданной мощности, как в статических режимах работы привода, так и в динамических, что обеспечивает совместимость преобразователя с существующими системами ОРМЧВ. Дополнительно обеспечивается ограничение выходного тока и коэффициента возбуждения на заданном уровне.

5 Показана возможность плавного регулирования выходного тока при низких скоростях движения и высоком входном напряжении, что подтверждает возможность использования усовершенствованного алгоритма управления выходным напряжением тягового генератора и снижения его выходного тока.

6 Обеспечивается режим электрического торможения с самовозбуждением и сохранением устойчивости на высоких скоростях движения. Подтверждена возможность поддержания постоянного выходного тока и, соответственно, тормозной силы при низких скоростях движения: начиная с 240 *об/мин* (~10 *км/ч*) и до 50 *об/мин* (~2 *км/ч*), что соответствует результатам моделирования.

7 Внешний вид кривых тока, мощности и коэффициент ослабления возбуждения соответствует результатам компьютерного моделирования, что говорит об адекватности используемой математической модели тягового привода, достоверности результатов исследования и правильности выбора структуры системы автоматического управления. Расхождения же количественных показателей между экспериментом и моделью обусловлены различными типами тяговых двигателей и соответствующими ограничениями параметров экспериментального стенда.

8 Отсутствие сбоев в работе экспериментального стенда подтверждает возможность питания каналов преобразователя от одного источника и свидетельствует об отсутствии при этом взаимного гальванического влияния, что делает возможным построение многоканального преобразователя.

7 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

7.1 Оценка технической эффективности

Внедрение предлагаемого полупроводникового преобразователя на эксплуатируемых и вновь строящихся тепловозах позволит:

- повысить надежность работы силовой электрической схемы локомотива, в том числе тяговых электродвигателей и генератора и, тем самым, сократить число отказов и время на техническое обслуживание и ремонты.

- повысить КПД тягового генератора и обеспечить экономию энергетических ресурсов;

- сократить износ бандажей колесных пар и тормозных колодок;

- повысить силу тяги локомотива при неблагоприятных условиях сцепления.

Рассмотрим более подробно, за счет чего обеспечивается улучшение указанных показателей [87].

Сокращение числа отказов и, соответственно, повышение живучести и долговечности локомотива связано с упрощением электрической схемы и исключением из неё большого числа электромеханического оборудования, перечень которого (таблица 7.1) был составлен на основе анализа существующей (рисунок 1.1) и усовершенствованной (рисунок 2.6) структурных схем тепловоза 2ТЭ2КМ. Данное оборудование подвержено износу, подгоранию контактов и разрегулировке в процессе эксплуатации.

Сокращение времени на техническое обслуживание и ремонты также тесно связано со снимаемым оборудованием, обслуживание которого предусмотрено документацией на тепловоз: очистка, регулировка, проверка зазоров и добавление смазки [88] .

Таблица 7.1 - Перечень снимаемого оборудования с секции тепловоза

№ п/п	Наименование	Количество
1	Торм. переключ. (ТП) ППК-8122	1 шт.
2	Контактор тормозной (ТК) ПК-1146	1 шт.
3	Контактор шунтировки (КШ1, КШ2) ПК-1616	2 шт.
4	Сопротивление шунтировки (СШ1-СШ3) ЛР-9230П	3 шт.
5	Сопротивление шунтировки (СШ4-СШ6) ЛР-9231П	3 шт.
6	Шунт 75ШСМ (RS3..8, RS11) М3-1500-0,5	7 шт.
7	Преобразователь ПН-1(U1..6, 11..16, 25)	13 шт.
8	Блок диодов реле заземления (UZ1)	1 шт.
8	Силовая кабельная продукция	1 шт.
9	Сигнальная кабельная продукция	39 м
10	Выпрямитель типа М-ТПП-3600	1 шт.
11	Блоки системы управления локомотивом	1 шт.

Сокращение износа бандажей колесных пар и тормозных колодок локомотива, а также вагонов поезда обеспечивается за счет существенного повышения эффективности электрического торможения в диапазоне скоростей движения 0 – 40 км/ч (рисунок 5.27). Исходя из соотношения площадей, описываемых кривыми существующей и перспективной тормозной характеристик, в диапазоне скоростей движения 0 – 100 км/ч средняя тормозная сила тепловоза, оборудованного полупроводниковым преобразователем, выше на 30 % относительно существующего решения.

Повышение силы тяги локомотива при неблагоприятных условиях сцепления и уменьшение расхода песка обеспечивается за счет:

- автоматического распределения токов по тяговым двигателям в зависимости от загрузки колесных пар, позволяющего максимально реализовать тяговую характеристику в зоне ограничения по сцеплению;

- обеспечения лучшей формы тока в тяговых двигателях за счет применения высокочастотной ШИМ-модуляции - 800 Гц (рисунки 6.9 – 6.11);

- обеспечения работы ТЭД при боксовании и юзе в режиме, близком к независимому возбуждению за счет повышения возбуждения (рисунок 5.11), что увеличивает жесткость механической характеристики и способствует повышению силы тяги тепловоза при работе в зоне ограничения по сцеплению до 15 – 17 % [36].

Повышение надежности тяговых электродвигателей (ТЭД) тепловоза связано с использованием плавного ослабления возбуждения (рисунок 6.14). В этом случае исключаются нежелательные переходные процессы в электрической цепи тяговый генератор - тяговый электродвигатель, а также возможные рывки тепловоза.

Повышение надежности и КПД тягового генератора обеспечивается за счет исключения пусковых токов и реализации усовершенствованного алгоритма управления его выходным напряжением (п. 4.2.5).

7.2 Оценка экономической эффективности

7.2.1 Расчет экономии топливно-энергетических ресурсов

Применение нового полупроводникового преобразователя на тепловозе обеспечивает экономию топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) за счет:

- возможности реализации усовершенствованного алгоритма управления выходным напряжением тягового генератора и, соответственно, повышения его КПД;
- отсутствия резисторов ослабления поля и источника питания обмоток возбуждения ТЭД в режиме ЭТ.

Наибольший вклад в экономию вносит первый из перечисленных эффектов, с учетом которого и проведен расчет экономической эффективности для секции тепловоза 2ТЭ25КМ.

Процесс разгона локомотива с поездом при условии постоянной мощности на каждой позиции КМ обуславливается плавным переходом от ограничения тока тягового двигателя к ограничению напряжения тягового генератора. При этом, в соответствии с рисунком 3.10, изменяется и КПД тягового генератора.

В таблице 7.2 приведены значения мощностей, ограничения напряжения и тока на каждой позиции (ПК) контроллера машиниста (КМ) тепловоза 2ТЭ25КМ [46]: $U_{ТГ_макс}$ – максимальное напряжение ТГ (выпрямленное значение), B ; $I_{ТГ_макс}$

– максимальный ток ТГ (выпрямленное значение), A ; $I_{ТГ_мин}$ – минимальный ток ТГ (при $U_{ТГ_макс}$), A ; P – мощность ТГ на позиции, $кВт$; $\eta_{ТГ}$ – КПД тягового генератора.

Таблица 7.2 – Ограничения тока и напряжения по позициям тепловоза 2ТЭ25КМ

№ ПК	P , $кВт$	$U_{ТГ_макс}$, B	$I_{ТГ_макс}$, A	$I_{ТГ_мин}$, A	$\eta_{ТГ}$, <i>о.е.</i> (при $I_{ТГ_макс}$)	$\eta_{ТГ}$, <i>о.е.</i> (при $I_{ТГ_мин}$)	$\eta_{ТГ}$, <i>о.е.</i> , среднее
1	120	263	3000	457	0,956	0,925	0,9405
2	220	353	3600	624	0,959	0,93	0,9445
3	325	443	4200	734	0,955	0,932	0,9435
4	570	510	4800	1118	0,952	0,935	0,9435
5	1000	551	5400	1814	0,945	0,943	0,944
6	1180	578	6000	2043	0,936	0,945	0,9405
7	1290	593	6600	2177	0,927	0,947	0,937
8	1380	608	6900	2272	0,92	0,948	0,934
9	1470	615	6900	2390	0,92	0,95	0,935
10	1580	634	6900	2493	0,92	0,952	0,936
11	1760	656	6900	2682	0,92	0,955	0,9375
12	1940	679	6900	2858	0,92	0,956	0,938
13	2110	705	6900	2993	0,92	0,957	0,9385
14	2250	728	6900	3093	0,92	0,958	0,939
15	2400	750	6900	3200	0,92	0,959	0,9395

При использовании полупроводникового преобразователя возможно задание такого режима работы тягового генератора, при котором на каждой позиции КМ его ток будет максимально приближен к значению 3200 A , что соответствует максимальному КПД (рисунок 3.10). В таблице 7.3 приведены характеристики работы тягового генератора, которые могут быть достигнуты при использовании нового преобразователя, в том числе и прирост КПД $\Delta\eta_{ТГ}$.

Для подсчета экономии энергии требуется знать работу тепловоза на каждой позиции КМ. Для этого необходимо привязаться к конкретному участку движения поезда. За основу для расчета был взят участок Таксимо – Тынды. Данные по времени работы на позициях КМ и общее время движения взяты из «Технико – экономического обоснования эффективности грузового тепловоза 3ТЭ25А» [89].

Таблица 7.3 – Характеристики работы тягового генератора при использовании нового преобразователя в составе тепловоза 2ТЭ25КМ

№ ПК	P , кВт	$U_{ТГ_макс}$, В	$I_{ТГ_макс}$, А	$I_{ТГ_мин}$, А	$\eta_{ТГ}$, о.е. (при $I_{ТГ_макс}$)	$\eta_{ТГ}$, о.е. (при $I_{ТГ_мин}$)	$\eta_{ТГ}$, о.е., среднее	$\Delta\eta_{ТГ}$, %
1	120	263	3000	457	0,956	0,925	0,9405	0
2	220	353	3200	624	0,959	0,93	0,9445	0
3	325	443	3200	734	0,959	0,932	0,9455	+0,2
4	570	510	3200	1118	0,959	0,935	0,947	+0,35
5	1000	551	3200	1814	0,959	0,943	0,951	+0,7
6	1180	578	3200	2043	0,959	0,945	0,952	+1,15
7	1290	593	3200	2177	0,959	0,947	0,953	+1,6
8	1380	608	3200	2272	0,959	0,948	0,9535	+1,95
9	1470	615	3200	2390	0,959	0,95	0,9545	+1,95
10	1580	634	3200	2493	0,959	0,952	0,9555	+1,95
11	1760	656	3200	2682	0,959	0,955	0,957	+1,95
12	1940	679	3200	2858	0,959	0,956	0,9575	+1,95
13	2110	705	3200	2993	0,959	0,957	0,958	+1,95
14	2250	728	3200	3093	0,959	0,958	0,9585	+1,95
15	2400	750	3200	3200	0,959	0,959	0,959	+1,95

В таблице 7.4 приведены данные по времени работы тепловоза на различных позициях КМ на вышеуказанном участке $t_{ПК}$.

Таблица 7.4 – Распределение времени работы на позициях КМ на участке Таксимо – Тында

№ ПК	Время работы по позициям на участке, ч							Всего, ч ($t_{ПК}$)
	Таксимо-Балбукта	Балбукта - Сюльбан	Сюльбан -Новая Чара	Новая Чара-Икабьека н	Икабье-кан - Олонгдо	Олонгдо - Хани	Хани - Тында	
1	0,091	0,002	0,041	0,026	0,028	0,006	0,34	0,534
2	0,115	0,002	0,049	0,019	0,014	0,005	0,273	0,477
3	0,061	0,004	0,033	0,025	0,01	0,005	0,335	0,473
4	0,047	0,004	0,036	0,042	0,007	0,005	0,423	0,564
5	0,041	0,002	0,038	0,027	0,004	0,005	0,355	0,472
6	0,038	0,002	0,041	0,02	0,004	0,003	0,303	0,411
7	0,032	0,002	0,085	0,016	0,003	0,003	0,314	0,455
8	0,045	0,003	0,038	0,017	0,004	0,003	0,342	0,452
9	0,038	0,003	0,031	0,012	0,007	0,003	0,321	0,415
10	0,032	0,003	0,025	0,01	0,004	0,002	0,368	0,444
11	0,022	0,003	0,028	0,01	0,014	0,002	0,534	0,613
12	0,016	0,002	0,035	0,009	0,038	0,001	2,947	3,048
13	0,013	0,001	0,032	0,012	0,004	0,002	0	0,064
14	0,075	0,001	0,7	0,02	0,023	0,002	0	0,821
15	1,542	0,335	0	0,912	0,641	0,004	0	3,434

На основе данных таблиц 7.3 и 7.4 можно по следующим формулам рассчитать экономию энергии и топлива, которую обеспечивает новый полупроводниковый преобразователь:

$$A = Pt_{\text{ПК}}, \quad (7.1)$$

$$\Delta A = A\Delta\eta_{\text{ТГ}}, \quad (7.2)$$

где A – работа дизеля, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

ΔA – экономия работы дизеля, $\text{кВт}\cdot\text{ч}$;

$\Delta\eta_{\text{ТГ}}$ – прирост КПД, о.е.

Добавив данные о зависимости удельного расхода топлива g_e от мощности дизеля (рисунок 7.1) можно рассчитать экономию топлива за одну поездку:

$$\Delta G = \frac{\Delta A g_e}{1000}, \quad (7.3)$$

где g_e – удельный расхода топлива, $\text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$;

ΔG – экономия топлива, кг .

Результаты расчетов приведены в таблице 7.5.

Таблица 7.5 - Расчет экономии ТЭР за счет более высокого КПД генератора

№ ПК	P , кВт	$t_{\text{ПК}}$, ч	A , кВт·ч	$\Delta\eta_{\text{ТГ}}$, %	ΔA , кВт·ч	g_e , г/(кВт·ч)	ΔG , кг
1	120	0,534	64	0	0	210	0
2	220	0,477	105	0	0	221	0
3	325	0,473	154	0,2	0,3	226	0,1
4	570	0,564	321	0,35	1,1	223	0,3
5	1000	0,472	472	0,7	3,3	214	0,7
6	1180	0,411	485	1,15	5,6	212	1,2
7	1290	0,455	587	1,6	9,4	208	2
8	1380	0,452	624	1,95	12,2	207	2,5
9	1470	0,415	610	1,95	11,9	206	2,5
10	1580	0,444	702	1,95	13,7	204	2,8
11	1760	0,613	1079	1,95	21	203	4,3
12	1940	3,048	5913	1,95	115,3	202	23,3
13	2110	0,064	135	1,95	2,6	202	0,5
14	2250	0,821	1847	1,95	36	202,5	7,3
15	2400	3,434	8242	1,95	160,7	203	32,6
Всего		12,677	21340		393,1		80,1

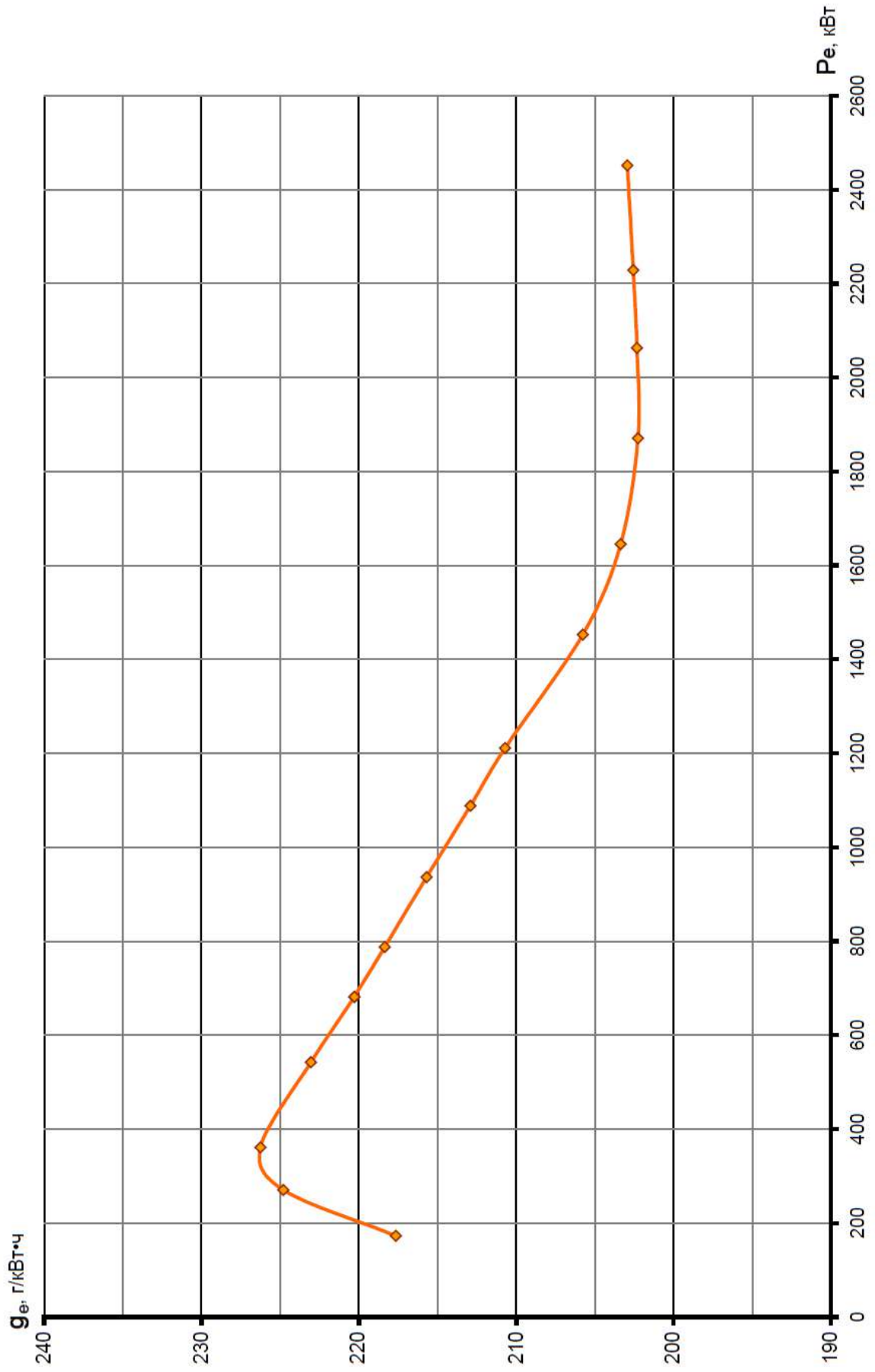


Рисунок 7.1 – Зависимость удельного расхода топлива от мощности дизеля 12ЧН26/26

Таким образом, экономия энергетических ресурсов - дизельного топлива на данном участке составляет 80,1 кг на одну секцию. Расчет среднегодовой экономии затрат на дизельное топливо выполнен по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{СГ}} = \frac{\Delta G}{\rho_{\text{T}}} \frac{S_{\text{Г}}}{S_{\text{уч}}} \text{Ц}_{\text{T}}, \quad (7.4)$$

где $\mathcal{E}_{\text{СГ}}$ – среднегодовая экономия, *тыс. рублей*;

$S_{\text{Г}}$ – годовой пробег тепловоза, *км*;

$S_{\text{уч}}$ – протяженность участка, *км*;

ρ_{T} – плотность топлива, *кг/м³*;

Ц_{T} – цена топлива, *тыс. руб./м³*.

Для расчета приняты следующие условия:

- протяженность участка Таксимо-Тында 877,25 км;
- годовой пробег тепловоза 250 000 км;
- плотность дизельного топлива 850 кг/м³;
- стоимость 1 м³ дизельного топлива 47,236 тыс. руб. без НДС [90].

Согласно расчету экономия годовых затрат на одну секцию тепловоза 2ТЭ25КМ составит 1268,54 тыс. рублей без НДС или 2537,08 тыс. рублей без НДС на двухсекционный тепловоз.

7.2.2 Оценка инвестиционных затрат

Расчет стоимости изготовления полупроводникового преобразователя выходит за рамки настоящей работы. По этой причине оценка его стоимости проводилась экспертным путем на основе данных о стоимости аналогичных изделий. Стоимость полупроводникового преобразователя принимается равной 4 600 тыс. рублей без НДС. Срок службы – 22,5 года.

Список снимаемого оборудования с секции тепловоза при использовании нового преобразователя и его стоимость приведены в таблице 7.6.

Таблица 7.6 - Перечень и стоимость снимаемого оборудования с секции тепловоза

№ п/п	Наименование	Цена тыс. руб., без НДС	Кол-во на секцию	Сумма тыс. руб., без НДС
1	Торм. переключ. (ТП) ППК-8122	104	1 шт.	104
2	Контактор тормозной (ТК) ПК-1146	24	1 шт.	24
3	Контактор шунтировки (КШ1, КШ2) ПК-1616	52,3	2 шт.	104,6
4	Сопротивление шунтировки (СШ1-СШ3) ЛР-9230П	6,7	3 шт.	20,1
5	Сопротивление шунтировки (СШ4-СШ6) ЛР-9231П	6,7	3 шт.	20,1
6	Шунт 75ШСМ (RS3..8, RS11) М3-1500-0,5	2,6	7 шт.	18,2
7	Преобразователь ПН-1(U1..6, 11..16, 25)	14,4	13 шт.	187,2
8	Блок диодов реле заземления (UZ1)	10	1 шт.	10
8	Силовая кабельная продукция	50	1 шт.	50
9	Сигнальная кабельная продукция	0,373	39 м	14,5
10	Выпрямитель типа М-ТПП-3600	1750	1 шт.	1750
11	Блоки системы управления локомотивом	168	1 шт.	168
	Итого	-	-	2470,7

Оценка инвестиционных затрат на двухсекционный локомотив 2ТЭ25КМ при серийном использовании решения приведена в таблице 7.7.

Таблица 7.7 - Оценка инвестиционных затрат на двухсекционный локомотив 2ТЭ25КМ

Вид оборудования	Стоимость оборудования, тыс. руб. без НДС	
	на секцию	на тепловоз
Тяговый преобразователь	4 600	9 200
Снимаемое оборудование	2 470,8	4 941,6

7.2.3 Расчет чистого дисконтированного дохода и срока окупаемости

Оценка экономической эффективности применения нового полупроводникового преобразователя в составе тепловоза 2ТЭ25КМ выполнена при его серийном использовании на двухсекционном локомотиве за срок службы 22,5 года.

В соответствии со стандартом СТО РЖД 08.005-2011 [91] в качестве основного показателя оценки эффективности проекта используется чистый дисконтированный доход. Применительно к новому тяговому преобразователю в составе тепловоза 2ТЭ25КМ рассчитана величина интегрального экономического эффекта:

$$\mathcal{E}_T = \sum_{t=0}^T (\Delta I_t - \Delta N_t \pm \Delta K_t) \alpha_t, \quad (7.5)$$

где \mathcal{E}_T – интегральный экономический эффект, *тыс. руб.*;

ΔI_t – экономия годовых эксплуатационных расходов от использования нового преобразователя в год t расчетного периода, *тыс. руб.*;

ΔN_t – изменение налоговых отчислений от прибыли в году t , *тыс. руб.*;

ΔK_t – дополнительные сопутствующие инвестиции, связанные с использованием преобразователя, *тыс. руб.*;

α_t – коэффициент приведения разновременных затрат и результатов к расчетному году, *о.е.*

Коэффициент приведения α_t рассчитывается по формуле:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t}, \quad (7.6)$$

где t – номер шага расчета ($t = 0, 1, 2, \dots, T$);

T – горизонт расчета, *лет*;

E – норма дисконта, *о.е.*

Интегральный экономический эффект рассчитан как накопленный дисконтированный поток реальных денег. Поток реальных денег на каждом шаге расчета определён как разность между притоком (поступлением) и оттоком денежных средств.

Срок окупаемости инновационного мероприятия T_{OK} определяется из выражения:

$$\sum_{t=0}^{T_{OK}} [(P_{t1} - Z_{t1}) - (P_{t2} - Z_{t2})] \alpha_t = \sum_{t=0}^{T_{OK}} (K_{t1} - K_{t2}) \alpha_t, \quad (7.7)$$

где P_{t1}, P_{t2} – экономические результаты реализации проекта по базовому и новому варианту, достигаемые на t -ом шаге расчёта, *тыс. руб.*;

K_{t1}, K_{t2} – капитальные вложения (инвестиционные затраты) на t -ом шаге

по базовому и новому техническим решениям, *тыс. руб.*;

Z_{t1}, Z_{t2} – годовые затраты по рассматриваемым техническим решениям, *тыс. руб.*

В расчёте учтено налоговое окружение по налогу на прибыль на уровне 20 % налогооблагаемой базы (годового эффекта). Налогооблагаемая база по налогу на прибыль рассчитана с учетом разницы амортизационных отчислений по сравниваемым вариантам.

В Приложении Г приведены расчеты интегрального экономического эффекта и срока окупаемости потребных инвестиций, которые составили:

- $\Delta_T = 13\,614,58$ *тыс. руб.*;

- $T_{ок} = 2,2$ *года.*

7.3 Выводы по разделу 7

1 Внедрение предлагаемого полупроводникового преобразователя позволит повысить тяговые свойства и экономичность магистральных тепловозов, а также общую надежность силовой электрической схемы локомотива.

2 Оценка экономической эффективности предлагаемого решения выполнена для двухсекционного тепловоза 2ТЭ25КМ при эксплуатации на участке Таксимо-Тында. Экономия энергетических ресурсов - дизельного топлива на данном участке составляет 80,1кг на одну секцию.

3 Среднегодовая экономия затрат на энергетические ресурсы тепловозом 2ТЭ25КМ с новым тяговым преобразователем составит 2 537,08 *тыс. руб.* без НДС.

4 Чистый дисконтированный доход при использовании новых тяговых полупроводниковых преобразователей в составе тепловоза 2ТЭ25КМ составит 13 614,58 *тыс. руб.* при сроке окупаемости затрат 2,2 *года.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основе проведенного аналитического обзора определено, что тяговый электропривод эксплуатируемых в настоящее время и перспективных тепловозов с коллекторными ТЭД возможно усовершенствовать путем внедрения полупроводниковых преобразователей на *IGBT*-транзисторах, что обеспечит возможность индивидуального управления напряжением на зажимах тяговых двигателей и токами их возбуждения

2 Показано, что новый тяговый преобразователь целесообразно построить на двух неуправляемых выпрямителях и шести идентичных каналах регулирования, выполненных на полумостовых *IGBT*-транзисторных модулях, что позволит обеспечить заданные функциональные возможности с частичным резервированием при отказе оборудования.

3 Разработана математическая модель тягового электродвигателя постоянного тока с учетом динамической индуктивности, а также отдельного влияния вихревых токов от главных и добавочных полюсов, предназначенная для исследования электромагнитных и электромеханических процессов в тяговом приводе при работе предложенных транзисторных преобразователей.

4 Обосновано, что автоматизацию тягового привода с предложенным преобразователем следует выполнить на базе двухконтурной системы подчиненного регулирования, в первом контуре которой задаётся мощность для режима тяги или тормозная сила для режима электрического торможения. При этом внутренними контурами являются контуры регулирования токов двигателя, которые целесообразно выполнить с использованием гистерезисных компараторов.

5 Выполнено компьютерное имитационное моделирование работы усовершенствованного тягового привода, которое показало, что предложенная схема полупроводникового преобразователя совместно с разработанной САУ обеспечивают работу привода в режимах тяги и ЭТ при полном, ослабленном и повышенном возбуждении. Адекватность полученных результатов компьютерного имитационного моделирования обеспечивается:

– удовлетворительной сходимостью с погрешностью не более 3 – 5 % с заданными характеристиками тягового привода тепловоза 2ТЭ25КМ;

– удовлетворительной сходимостью с погрешностью не более 5 % с результатами экспериментальных исследований.

При этом предлагаемое решение имеет все необходимые инструменты для реализации существующих алгоритмов системы поосного регулирования силы тяги, а также внедрения более совершенных.

6 Исследована работа предлагаемого решения на специально разработанном экспериментальном стенде с реальными тяговыми двигателями. Результаты исследований подтверждают работоспособность преобразователя и его САУ в режимах тяги и ЭТ. Обеспечивается реализация заданных параметров, как в статических режимах работы привода, так и в динамических. Подтверждена возможность параллельной работы нескольких каналов преобразователя от общего звена постоянного тока.

7 Показано, что использование полупроводникового преобразователя позволяет повысить надежность и экономичность магистральных грузовых тепловозов. При этом на расчетном участке движения среднегодовая экономия затрат на энергетические ресурсы тепловозом 2ТЭ25КМ с новым тяговым преобразователем составит 2 537,08 *тыс. руб.* без НДС, а чистый дисконтированный доход при использовании новых тяговых полупроводниковых преобразователей в составе тепловоза 2ТЭ25КМ составит 13 614,5 8 *тыс. руб.* без НДС при сроке окупаемости затрат 2,2 *года*.

8 Рекомендуются внедрение предлагаемого решения на модернизируемых или вновь строящихся магистральных тепловозах с коллекторным тяговым приводом серий 2ТЭ116(К, У, УД), 3ТЭ116У, 2ТЭ25К, 2ТЭ25КМ, 3ТЭ25К2М, 3ТЭ28, что может стать более выгодной альтернативой постройке новых тепловозов с асинхронными тяговыми двигателями.

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является совершенствование алгоритмов поосного регулирования с реализацией оптимального алгоритма полезного проскальзывания и распределением силы тяги тепловоза по осям в зависимости от их загрузки с использованием индивидуальной подрегулировки возбуждения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АСРН – автоматическая система регулирования напряжения;
- АТД – асинхронный тяговый электродвигатель;
- БВМ – блок вычисления мощности;
- БВСТ – блок вычисления силы торможения;
- БРН – блок распределения нагрузок;
- БТР – блок тормозных резисторов;
- БУТИР – блок управления тормозным импульсным регулятором;4
- ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь;
- ВУВ – выпрямительная установка возбуждения;
- ГК – гистерезисный компаратор;
- ДЧВ – датчик частоты вращения;
- МДС – магнитодвижущая сила;
- НДС – налог на добавленную стоимость;
- ОАО «РЖД» – Открытое акционерное общество «Российские железные дороги»;
- ОВ – обмотка возбуждения;
- ПИ – пропорционально-интегральный (регулятор);
- ПК – позиция контроллера;
- РМ – регулятор мощности;
- РОВ – регулятор ослабления возбуждения;
- РСВ – регулятор свободной мощности;
- РСТ – регулятор силы торможения;
- РТД – регулятор дополнительного тока;
- РТЯ – регулятор тока якоря;
- РЧВ – регулятор частоты вращения;
- КМ – контроллер машиниста;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- КШ – контактор шунтировки;
- ОРМЧВ – объединенный регулятор мощности и частоты вращения;

САУ – система автоматического управления;
СД – сглаживающий дроссель;
СУВ – система управления верхнего уровня;
ТИР – тормозной импульсный регулятор;
ТГ – тяговый генератор;
ТК – тормозной контактор;
ТП – тяговый преобразователь;
ТЭД – тяговый электродвигатель;
ТЭО – технико-экономическое обоснование;
ТЭР – топливно-энергетические ресурсы;
УВВ – управляемый выпрямитель возбуждения;
ФП – функциональный преобразователь;
ШИМ – широтно-импульсной модуляции;
ЭДС – электродвижущая сила;
ЭТ – электрическое торможение;
DC – direct current;
IGCT – Integrated Gate-Commutated Thyristor;
GTO – gate turn-off;
IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга): [утверждена распоряжением от 17.04.2018г. № 769/р]. – Москва : ОАО «РЖД», 2018. – 128 с. – Текст : непосредственный.

2 Михальчук, Н.Л. Перспективные направления повышения эффективности дирекции тяги и требования к новым локомотивам / Н.Л. Михальчук. – Текст : непосредственный // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век т. 1: материалы VI Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2018 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2018. – с. 270-281.

3 ОАО «РЖД» закупило 497 новых локомотивов в 2022 году // ОАО «РЖД» : [сайт]. – 2023. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9397/page/104069?id=280524> (дата обращения: 08.02.2023). – Текст : электронный.

4 РЖД в 2023 г. увеличат закупки локомотивов почти на 21%, до более 600 единиц // ОАО «РЖД» : [сайт]. – 2023. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=208102> (дата обращения: 20.02.2023). – Текст : электронный.

5 Киржнер, Д.Л. Тепловоз с высоким коэффициентом тяги / Д.Л. Киржнер, Ю.И. Клименко, А.С. Кулабухов, С.В. Путинцев. – Текст : непосредственный // Труды ВНИКТИ. – 1999. – № 79. – с. 189-198.

6 Клименко, Ю.И. Исследование электропривода с изменяемой жесткостью тяговой характеристики: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Клименко Юрий Иванович; ВНИКТИ. – Коломна, 2004. – 188 с. – Текст : непосредственный.

7 Пляскин, А. К. Энергоэффективность тепловозов БАМ: проблемы и решения / А.К. Пляскин, Я.А. Новачук. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 4 (58). – с. 63-66.

8 Шаркин, И.А. Магистральный грузовой тепловоз 2ТЭ25КМ: структура системы управления и электрооборудования / И.А. Шаркин, П.Л. Чудаков, В.А. Линьков, О.М. Котов, М.В. Федотов, Д.А. Сурков. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2016. – № 1 (709). – с. 42-43.

9 Сергеев, С.В. Знакомьтесь: тепловоз ЗТЭ116У / С.В. Сергеев, М.В. Федотов, А.Л. Ткаченко, С.В. Ким, Е.В. Долганова, И.В. Рубаник, Р.В. Нестеренко, Ю.Г. Алешевский. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2014. – № 3 (687). – с. 38-42.

10 Патент №2471652 Российская Федерация, МПК В60L 15/00. Способ ослабления возбуждения тяговых электродвигателей локомотива : № 2011130203/11 : заявл. 20.07.2011 : опубл. 10.01.2013 / В.Ф. Руденко, М.А. Егоров, Д.С. Спиридонов; патентообладатель ОАО «РЖД». – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

11 Грищенко, А.В. Новым тепловозам - новые технологии реостатных испытаний / А.В. Грищенко, В.В. Грачёв, Ф.Ю. Базилевский, Е.В. Долганова, А.Е. Леонов. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2016. – № 1. – с. 11-13.

12 Крамсков, С.А. Результаты испытаний микропроцессорной системы управления на электровозе ВЛ85-061 / С.А. Крамсков, В.И. Плис, Н.Ю. Федорова. – Текст : непосредственный // Сб. науч. тр. Всес. н.-и. проектн.-конструкт. и технол. ин.-та электровозостроения. – 1991. – № 32. – с. 108-115.

13 Щербаков, В.Г. Разработка новых электровозов и электропоездов / В.Г. Щербаков. – Текст : непосредственный // Сб. науч. тр. Всес. н.-и. проектн.-конструкт. и технол. ин.-та электровозостроения. – 1995. – № 35. – с. 3-8.

14 Мацнев, В.Д. Применение независимого возбуждения двигателей на электровозах ВЛ60к / В.Д. Мацнев. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1985. – № 9. – с. 16-18.

15 Мацнев, В.Д. Эксплуатационные испытания электровоза ВЛ80т с независимым возбуждением двигателей в тяговом режиме / В.Д. Мацнев, А.Г. Суворов, В.К. Волков. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. – 1985. – № 9. – с. 18-23.

16 "Ермаки" с поосным регулированием силы тяги // Блог Трансмашхолдинга : [сайт]. – 2016. – URL: <https://tmholding.livejournal.com/2671.html> (дата обращения: 21.02.2023). – Текст : электронный.

17 Силовые цепи электровозов 2ЭС6 «СИНАРА» // СЦБИСТ - железнодорожный форум : [сайт]. – 2019. – URL: <http://scbist.com/xx2/51599-04->

2019-silovye-cepi-elektrovozov-2es6-sinara.html (дата обращения: 21.02.2023). – Текст : электронный.

18 Об энергетической стратегии ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года: [утверждена распоряжением от 11.02.2008г. № 269/р] // ОАО «РЖД» : [сайт]. – 2008. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=35> (дата обращения: 17.02.2023). – Текст : электронный.

19 Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации: [утверждена указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016г. № 642] // Администрация Президента России : [сайт]. – 2016. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449> (дата обращения: 17.02.2023). – Текст : электронный.

20 Долгосрочная программа развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года: [утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г., № 466-р] // Правительство Российской Федерации. – 2019. – 134 с. – URL: <http://static.government.ru/media/files/zcAMxApAgyO7PnJ42aXtXAga2RXSVoKu.pdf> (дата обращения: 17.02.2023). – Текст : электронный.

21 Лихошерст, В.И. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии с импульсным регулированием: учебное пособие / В.И. Лихошерст ; Науч. ред. Ф.Н. Сарапулов ; Уральский государственный технический университет. – Екатеринбург : УГТУ, 2000. – 116 с. : ил. – ISBN 5-230-06533-8. – Текст : непосредственный.

22 Онищенко, Г.Б., Силовая электроника. Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения: учебное пособие / Г.Б. Онищенко, О.М. Соснин. – Москва : Инфра-М, 2021. – 120 с. : ил. – ISBN 978-5-16-015776-4. – Текст : непосредственный.

23 Бурков, А.Т. Электронная техника и преобразователи: учебник для вузов ж-д трансп. / А.Т. Бурков. – Москва : Транспорт, 1999. – 464 с. : ил. – ISBN 5-277-02110-8. – Текст : непосредственный.

24 Грачев, В.В. Усовершенствованный тяговый привод электровозов переменного тока с коллекторными двигателями / В.В. Грачев., К.С. Перфильев, Ю.И. Клименко, В.Ю. Евсеев. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2020. – № 8 (764). – с. 26-28.

25 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, Хабаровск, 25-27 сентября 2013 г. – Хабаровск : ДВГУПС, 2013. – с. 191-192.

26 Волчек, Т.В. Повышение эффективности эксплуатации электровозов переменного тока при плавном регулировании тока возбуждения тяговых электродвигателей / Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. : [сайт]. – 2020. – № 4 (10). – URL: <http://mnnv.irkgups.ru/toma/410-2020> (дата обращения: 12.12.2022). – Текст : электронный/

27 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. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2020. – с. 140-146.

28 Рязанов, Ю.В. Концепция импульсного регулирования в качестве альтернативы реостатному пуску электропоездов постоянного тока / Ю.В. Рязанов, К.Л. Хохлов, М.Ю. Изварин, А.В. Волов. – Текст : непосредственный // Материалы VIII международного симпозиума «Элтранс-2015», Санкт-Петербург, 7–9 октября 2015 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2017. – с. 380-385.

29 Мазнев, А.С. Структура и принципы управления многорежимным полупроводниковым преобразователем электропоезда постоянного тока / А.С. Мазнев, Ю.П. Бороненко, А.А. Воробьев, А.А. Киселев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 2. – с. 25-30.

30 Клименко, Ю.И. Усовершенствовали силовую схему тягового электропривода тепловозов / Ю.И. Клименко, К.С. Перфильев, Я.В. Чупин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2017. – № 11 (731). – с. 36-37.

31 Клименко, Ю.И. Совершенствование тягового привода тепловозов с коллекторными двигателями / Ю.И. Клименко, К.С. Перфильев, В.Ю. Евсеев, Я.В.

Чупин. – Текст : непосредственный // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век т. 2: материалы VI Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2018г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2018. – с. 24-33.

32 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. – Москва : ООО «ЛокоТех», 2018. – с. 114-120.

33 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. – 2019. – № 5. – с. 34-37.

34 Клименко, Ю.И. Усовершенствованный тяговый привод тепловозов с коллекторными двигателями / Ю.И. Клименко, К.С. Перфильев, В.Ю. Евсеев, Я.В. Чупин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2019. – № 3 (747). – с. 18-20.

35 Хтет, К.К. Импульсное регулирование электродвигателей постоянного тока электропоездов в режимах тяги и электрического торможения: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ко Ко Хтет; МГУПС (МИИТ). – Москва, 2014. – 145 с. – Текст : непосредственный.

36 Баранов, В.А. Усовершенствованный тяговый электропривод магистральных электровозов постоянного тока для эксплуатации на участках с трудным профилем: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Баранов Валерий Александрович; ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2011. – 137 с. – Текст : непосредственный.

37 Норман, Э.А. Тепловоз профессора Ю.В. Ломоносова – первенец советского и мирового тепловозостроения / Э.А. Норман. – Текст :

непосредственный // Вопросы истории естествознания и техники. – 1985. – № 4. – с. 116-125.

38 ТМХ направил грузовые магистральные тепловозы в Казахстан // АО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ» : [сайт]. – 2022. – URL: <https://tmholding.ru/media/events/18671.html> (дата обращения: 18.10.2022). – Текст : электронный.

39 Бабков, Ю.В. Электропривод тепловозов с поосным регулированием силы тяги и торможения на *IGBT*-модулях / Ю.В. Бабков, К.С. Перфильев, Н.И. Бенькович, А.А. Плешаков. – Текст : непосредственный // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы – XXI век: материалы V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России, Санкт-Петербург, 14-16 ноября 2017г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2017. – с. 159-163.

40 Патент №2677971 Российская Федерация, МПК В60L 11/06, В60L 15/20, В60L 7/04, В60L 7/08. Тяговый электропривод локомотива: № 2018103870 : заявл. 01.02.2018 : опубл. 22.01.2019 / Ю.И. Клименко, Н.А. Кузнецов, К.С. Перфильев, Я.В. Чупин, В.Ю. Евсеев; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

41 Патент №2722734 Российская Федерация, МПК В60L 15/20, В60L 50/52, В60L 9/02, H02P 7/24. Тяговый электропривод локомотива: № 2019127930 : заявл. 05.09.2019 : опубл. 03.06.2020 / Ю.И. Клименко, Н.А. Кузнецов, К.С. Перфильев, Я.В. Чупин, В.Ю. Евсеев; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

42 Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1995. – 294 с. : ил. – ISBN 5-277-01462-4. – Текст : непосредственный.

43 Осипов, С.И. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. транспорта / С.И. Осипов, С.С. Осипов, В.П. Феоктистов; под. ред. С.И. Осипова. – Москва : Маршрут, 2006. – 434 с. : ил. – ISBN 5-89035-333-0. – Текст : непосредственный.

44 Кузнецов, Н.А. Регулятор электродинамического тормоза горочного тепловоза / Н.А. Кузнецов, В.Ю. Евсеев. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2019. – № 6 (750). – с. 39-40.

45 Патент №2588321 Российская Федерация, МПК В60Т 8/17, В60Т 7/26. Регулятор электродинамического тормоза транспортного средства: №2015112877/11 : заявл. 09.04.2015 : опубл. 27.06.2016 / Ю.В. Бабков, Н.А. Кузнецов, К.С. Перфильев, В.Ю. Евсеев; заявитель и патентообладатель АО «ВНИКТИ». – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.

46 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 1. Техническое описание. 2ТЭ25КМ РЭ Часть 1 / ЗАО «УК «БМЗ». – Брянск, 2015. – 153 с. – Текст : непосредственный.

47 Флоренцев, С.Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий / С.Н. Флоренцев. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 1999. – № 4. – с. 2-10.

48 Отсуки, М. Силовые модули в корпусах *PrimePACK* с повышенной надежностью / Масахито Отсуки, Питер Дитрих, Томас Хайнцель. – Текст : непосредственный // Силовая Электроника. – 2013. – № 5. – с. 41-45.

49 *Volke, A. IGBT Modules. Technologies, Driver and Application. /A. Volke, M. Hornkamp. – Munich: Infineon Technologies AG, 2011. – 534 p. – Текст : непосредственный.*

50 ГОСТ Р МЭК/ТС 60034-17-2009. Машины электрические вращающиеся. Часть 17. Руководство по применению асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором при питании от преобразователей : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 декабря 2009 г. № 640-ст : введен впервые : дата введения 2011-01-01 / разработан ГОУ ВПО «Московский энергетический институт (технический университет)». – Москва : Стандартинформ, 2011. – 15 с. – Текст : непосредственный.

51 Тепловоз 3ТЭ25КМ. Схема электрическая принципиальная. 3ТЭ25КМ.070.01.000 Э3 / ЗАО «УК «БМЗ». – Брянск, 2015. – 20 с. – Изображение : непосредственное.

52 Сергеев, С.В. Принципы работы и диагностика системы регулирования мощности дизель-генератора тепловоза 2ТЭ116У / С.В. Сергеев, С.В. Ким, А.В. Грищенко, В.В. Грачёв, Ф.Ю. Базилевский, Ф.Ю. Чуб. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2012. – № 1 (671). – с. 23-27.

53 Тепловоз 2ТЭ116У. Руководство по эксплуатации. 2ТЭ116.00.00.008-01 РЭ. Часть 1. Описание и работа / ПАО «Лугансктепловоз». – Луганск, 2007. – 147 с. – Текст : непосредственный.

54 Патент №2466039 Российская Федерация, МПК В60L 1/00. Способ регулирования мощности тягового генератора тепловоза: №2011125608/11 : заявл. 23.06.2011 : опубл. 10.11.2012 / Ю.В. Бабков, Н.В. Грачев, Ю.И. Клименко, Е.Г. Суркова, А.П. Троицкий; заявитель и патентообладатель ОАО «ВНИКТИ». – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.

55 Колесник, И.К. Электропередачи тепловозов на переменном-постоянном токе / И.К. Колесник, Т.Ф. Кузнецов, В.И. Липовка, В.С. Марченко, Ю.М. Милованов, Г.А. Михневич. – Москва : Академкнига, 2005. – 156 с. : ил. – ISBN 5-94628-209-3. – Текст : непосредственный.

56 Андриющенко, А.А. Асинхронный тяговый привод локомотивов: учеб. пособие / А.А. Андриющенко, Ю.В. Бабков, А.А. Зарифьян и др.; под ред. А.А. Зарифьяна. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2013. – 413 с. : ил. – ISBN 978-5-89035-631-4. – Текст : непосредственный.

57 Чучин, А.А. Индивидуальное потележечное и поосное управление силой тяги электровоза однофазно-постоянного тока с адаптацией по сцеплению: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чучин Антон Александрович; МИИТ. – Москва, 2005. – 241 с. – Текст : непосредственный.

58 Савоськин, А.Н. Автоматизация электроподвижного состава: учебник для вузов ж.-д. трансп. / А.Н. Савоськин, Л.А. Баранов, А.В. Плакс, В.П. Феоктистов; под ред. А.Н. Савоськина. – Москва : Транспорт, 1990. – 311 с. : ил. – ISBN 5-277-00947-7. – Текст : непосредственный.

59 Бенькович, Н.И. Совершенствование алгоритмов управления тяговым приводом тепловозов с асинхронными электродвигателями: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бенькович Никита Игоревич; ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2019. – 123 с. – Текст : непосредственный.

60 Buso, S. A Dead-Beat Adaptive Hysteresis Current Control / Simone Buso, Sandro Fasolo, Luigi Malesani, Paolo Mattavelli // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS. – 2000. – VOL. 36. – NO. 4. – p. 1174-1180. – URL: https://www.dei.unipd.it/~pel/Pagine_Personali/Simone/Articoli%20pdf/2000/TransIAJ_ul2000.pdf (дата обращения: 12.12.2022). – Текст : электронный.

61 Rodríguez, J. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter / José Rodríguez, Jorge Pontt, César A. Silva, Pablo Correa, Pablo Lezana, Patricio Cortés, Ulrich Ammann // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS. – 2007. – VOL. 54. – NO. 1. – p. 495-503. – URL: https://www.researchgate.net/publication/3218812_Predictive_Current_Control_of_a_Voltage_Source_Inverter/link/00b4951f18276e33df000000/download (дата обращения: 12.12.2022). – Текст : электронный.

62 Альтшуллер, М.И. Релейное регулирование тока в высоковольтном электроприводе. / М.И. Альтшуллер, С.А. Лазарев, И.И. Иванчин // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: ТулГУ, 2010. – ч. 2. – с. 3-11. – URL: https://tidings.tsu.tula.ru/tidings/pdf/web/file/tsu_izv_technical_sciences_2010_03_part_2.pdf (дата обращения: 10.01.2023). – Текст : электронный.

63 Луков, Н.М. Автоматические системы управления локомотивов: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Н.М. Луков, А.С. Космодамианский. – Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2007. – 429 с. : ил. – ISBN 978-5-89035-475-4. – Текст : непосредственный.

64 Прохоров, А.В. Надежность системы электроизоляции тяговых электродвигателей / А.В. Прохоров. – Текст : непосредственный // Диагностика и надежность электрооборудования. – 2010. – № 2 (32). – с. 25-28.

65 Федоров, М.М. Оценка сроков службы изоляции электрических машин / М.М. Федоров, А.И. Лужнев, А.Е. Боев // Научные труды Донецкого национального технического университета. – 2011. – № 10 (180). – с. 200-203. – URL: <http://ea.donntu.ru:8080/jspui/bitstream/123456789/4999/1/200.pdf> (дата обращения: 18.11.2022). – Текст : электронный.

66 Хасиев, В. Расчет и схемотехника повышающих DC/DC-преобразователей высокой мощности / Виктор Хасиев, Алексей Кулаков. – Текст : непосредственный // Силовая Электроника. – 2008. – № 4. – с. 36-40.

67 Мироновский, Л.А. Введение в *MATLAB*: учебное пособие / Л.А. Мироновский, К.Ю. Петрова. – Санкт-Петербург : СПбГУАП, 2005. – 164 с. : ил. – Текст : непосредственный.

68 Дьяконов, В.П. *MATLAB*: Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 767 с. : ил. – ISBN 978-5-94074-652-2. – Текст : непосредственный.

69 Дьяконов, В.П. *Simulink*. Самоучитель : блочное имитационное моделирование, инструменты и практика моделирования, моделирование в механике, энергетике и радиотехнике / В.П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2013. – 781 с. : ил. – ISBN 978-5-94074-868-7. – Текст : непосредственный.

70 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в *MATLAB*. *SimPowerSystems* и *Simulink*. / И.В. Черных. – Москва : Питер, 2008. – 288 с. : ил. – ISBN 978-5-388-00020-0. – Текст : непосредственный.

71 *SimPowerSystems*. Симуляция и моделирование электроэнергетических систем // Экспонента : [сайт]. – 2019. – URL: https://matlab.ru/datasheets/simpowersystems_rus.pdf (дата обращения: 12.04.2020). – Текст : электронный.

72 Дурандин, М.Г. Работа тяговых электродвигателей в неустановившихся режимах: конспект лекций / М.Г. Дурандин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2016. – 62 с. : ил. – Текст : непосредственный.

73 Литовченко, В.В. Имитационная модель электровоза постоянного тока с коллекторными тяговыми двигателями / В.В. Литовченко, Д.В. Назаров, В.А. Шаров. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2019. № 9. – с. 60-66.

74 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.

75 Чучин, А.А. Построение модели силовой цепи / А.А. Чучин, Пью Окка. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2010. – № 2 (30). – с. 54-59.

76 Копылов, И.П. Электрические машины: учеб. для студентов электромехан. и электроэнергет. специальностей вузов / И.П. Копылов. – 3. изд., испр. – Москва : Высшая школа, 2002. – 607 с. : ил. – ISBN 5-06-003841-6. – Текст : непосредственный.

77 Находкин, М.Д. Проектирование тяговых электрических машин: учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта / М.Д. Находкин, Г.В. Василенко, В.И. Бочаров, М.А. Козорезов; под ред. М.Д. Находкина. – Москва : Транспорт, 1976. – 624 с. : ил. – Текст : непосредственный.

78 Курбасов, А.С. Проектирование тяговых электродвигателей: учебное пособие для вузов ж.-д. трансп. / А.С. Курбасов, В.И. Седов, Л.Н. Сорин; под ред. А.С. Курбасова. – Москва : Транспорт, 1987. – 536 с. : ил. – Текст : непосредственный.

79 Алексеев, А.С. Исследование влияния нелинейности кривой намагничивания тягового электродвигателя на переходные процессы в силовой цепи электровоза / А.С. Алексеев. – Текст : непосредственный // Труды МИИТ, вып. 912. – Москва : МИИТ, 1997. – 104 с.

80 Жиц, М.З. Переходные процессы в машинах постоянного тока / М.З. Жиц. – Москва : Транспорт, 1974. – 378 с. : ил. – Текст : непосредственный.

81 Гольдберг, О.Д. Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования / О.Д. Гольдберг, О.Б. Буль, И.В. Свириденко. – Москва : Высшая школа, 2001. – 512 с. : ил. – ISBN 5-06-003844-0.

– Текст : непосредственный.

82 Евсеев, В.Ю. Математическая модель коллекторного тягового двигателя с отдельным учетом вихревых токов главных и добавочных полюсов / В.Ю. Евсеев, А.Н. Савоськин. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2020. – № 9. – с. 32-38.

83 Шамардина, В.Н. Модели тяговых электрических машин в условиях использования на маневровых тепловозах с поосным регулированием тяги / В.Н. Шамардина, С.М. Лемешко // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт: [сб. науч. тр.]. – Харьков, 2017. – Вып. 27 (1249): Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность: темат. вып. – с. 428-431. – Текст : непосредственный/

84 Евсеев, В.Ю. Электромагнитные процессы в коллекторном тяговом приводе тепловоза при питании от силового полупроводникового преобразователя / В.Ю. Евсеев, А.Н. Савоськин, К.С. Перфильев. – Текст : непосредственный // Практическая силовая электроника. – 2021. – № 4 (84). – с. 32-38.

85 Гавриков, В. *STM32G4* – новый флагман микроконтроллеров общего назначения / В. Гавриков // Компэл : [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.compel.ru/lib/138282> (дата обращения: 29.09.2022). – Текст : электронный.

86 Справочник по электрическим машинам: в 2 т.; под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Том 1. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 456 с. : ил. – Текст : непосредственный.

87 Коссов, В.С. Повышение эффективности и живучести магистральных тепловозов с коллекторным тяговым приводом / В.С. Коссов, В.Ю. Евсеев, К.С. Перфильев, А.А. Плешаков; Департамент технической политики ОАО «РЖД» (ЦТЕХ ОАО «РЖД»); АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»). – Текст : непосредственный // Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта: сборник трудов

международной научной конференции, Коломна, 22 июня 2021 г. – Коломна, 2021. – с. 10-18.

88 Магистральный грузовой двухсекционный тепловоз 2ТЭ25КМ. Руководство по эксплуатации. Часть 3. Инструкция по техническому обслуживанию и текущему ремонту. 2ТЭ25КМ РЭ Часть 3 / ЗАО «УК «БМЗ». – Брянск, 2015. – 193 с. – Текст : непосредственный.

89 Техико – экономическое обоснование эффективности грузового тепловоза 3ТЭ25А / ОАО «РЖД»; ОАО «ВНИКТИ». – Коломна, 2014. – 121 с. : ил. – Текст : непосредственный.

90 Стоимость дизельного топлива «Лукойл» // Lukoilazs.ru : [сайт]. – 2022. – URL: <https://lukoilazs.ru/dizelnoe-toplivo-dt/> (дата обращения: 16.09.2022). – Текст : электронный.

91 СТО РЖД 08.005-2011. Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок оценки эффективности инновационных проектов: стандарт ОАО «РЖД» : утвержден и введен в действие Распоряжением ОАО «РЖД» от «26» июня 2012 г. № 1267р : введен взамен СТО РЖД 1.08.005-2008 : дата введения 2012-07-01 / разработан МОО «Инносоюз». – Москва : ОАО «РЖД», 2011. – 13 с. – Текст : непосредственный.

92 Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов : в 3 томах / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин; ч. 1. – 4-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 463 с. : ил. – ISBN 5-94723-620-6. – Текст : непосредственный.

Описание электромагнитных процессов в тяговом электродвигателе при питании от полупроводникового преобразователя

Обмотка возбуждения (рисунок А.1) ТЭД описывается индуктивностью L_B и активным сопротивлением r_B . Она соединена последовательно с якорем, который представлен индуктивностью $L_я$ и активным сопротивлением $r_я$, а также источником ЭДС e . Обмотка дополнительных полюсов описывается индуктивностью $L_д$ и своим активным сопротивлением $r_д$ [77]. При описании электромагнитных процессов влияние вихревых токов не учитывается, так как это осложняет понимание электрических процессов, происходящих в цепи преобразователь-двигатель. Влияние вихревых токов учтено в математической модели ТЭД, приведенной в разделе 4 диссертации.

Тяговый преобразователь представлен коммутационными элементами – транзисторами $VT1 – VT4$ с обратными диодами $VD1 – VD4$. Напряжение в звене постоянного тока преобразователя описано величиной u_d .

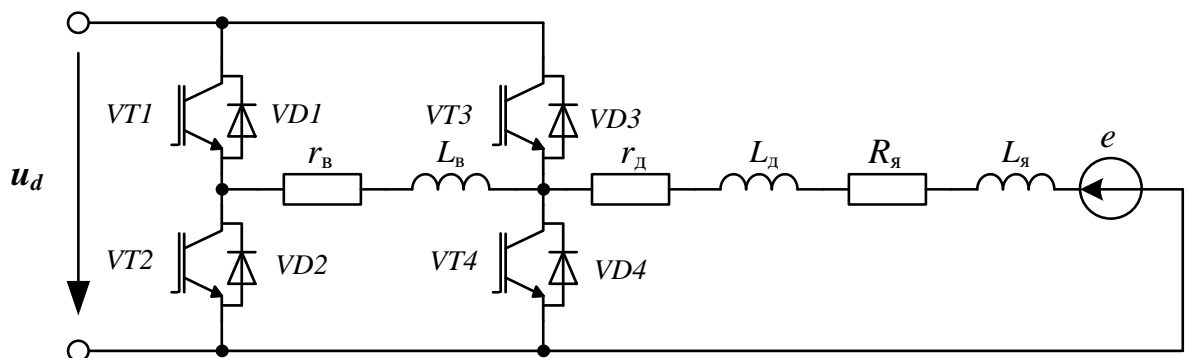


Рисунок А.1 – Схема включения ТЭД постоянного тока с новым полупроводниковым преобразователем

Для приведенной на рисунке А.1 схемы можно составить уравнения равновесия в режиме тяги, характеризующие работу двигателя. Опишем работу в режиме полного возбуждения, где транзистор $VT1$ работает в ключевом режиме, а остальные транзисторы закрыты.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

На рисунке А.2 штрих-пунктирной линией показано направление обхода контура напряжения для записи уравнения по II закону Кирхгофа для включенного состояния транзистора $VT1$, а также узел «А», для которого будет записано соотношение токов по I закону Кирхгофа [92]. Здесь и далее проводящий транзистор или диод обозначаются пунктирными линиями.

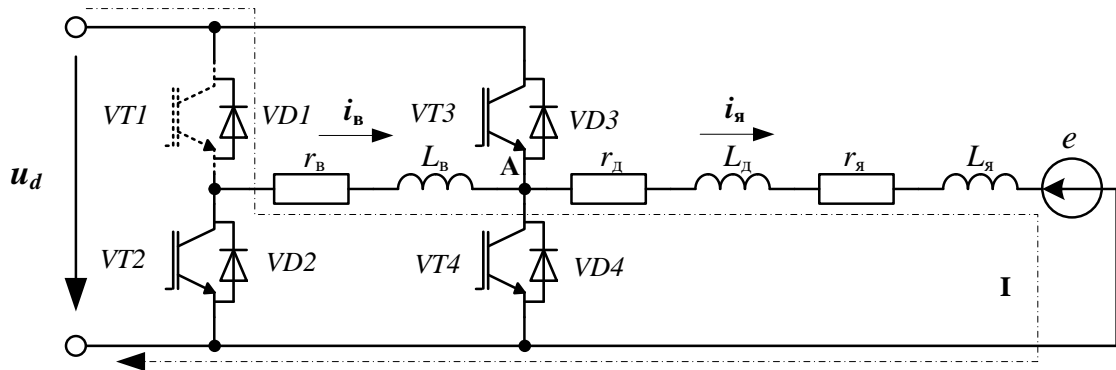


Рисунок А.2 – Расчетная схема для включенного состояния транзистора $VT1$ в режиме полного возбуждения

Согласно рисунку А.2 уравнение равновесия для включенного состояния $VT1$ примет следующий вид:

$$\begin{cases} u_d = r_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} + r_{д+я} i_я + \frac{d\psi_{д+я}}{dt} + e, \\ i_B = i_я, \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

где u_d – напряжение звена постоянного тока преобразователя, B ;

$r_B, r_{д+я}$ – активные сопротивления обмоток возбуждения, добавочных полюсов и якоря, Ом ;

$\psi_B, \psi_{д+я}$ – потокосцепления обмоток возбуждения, добавочных полюсов и якоря, $Bб$;

$i_B, i_я$ – токи обмотки возбуждения и якоря, A ;

e – электродвижущая сила двигателя, B .

При описании электромагнитных процессов падения напряжений на открытом транзисторе и диоде не учитывались, так как эти величины много меньше u_d . Потокосцепления обмоток возбуждения, добавочных полюсов и якоря можно представить в следующем виде:

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

$$\Psi_B = L_B i_B, \quad (\text{A.2})$$

$$\Psi_{\text{д+я}} = L_{\text{д+я}} i_{\text{я}}. \quad (\text{A.3})$$

Тогда уравнение (A.1) можно будет записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = \frac{u_d - e - r_B i_B - r_{\text{д+я}} i_{\text{я}}}{L_B + L_{\text{д+я}}}, \\ i_B = i_{\text{я}}. \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Исходя из уравнения (A.4), можно сделать вывод, что при включении транзистора *VT1* ток обмотки возбуждения (и якоря) будет возрастать при следующем условии:

$$u_d > e + r_B i_B + r_{\text{д+я}} i_{\text{я}}. \quad (\text{A.5})$$

При этом скорость нарастания тока прямо пропорциональна напряжению в звене постоянного тока преобразователя u_d и обратно пропорциональна ЭДС двигателя e и индуктивностям L_B и $L_{\text{д+я}}$, при этом произведения $(r_d + r_{\text{я}})i_{\text{я}}$ и $R_B i_B$ можно не учитывать так как они много меньше u_d .

Рассмотрим ситуацию, в которой транзистор *VT1* выключен (рисунок A.3). В этом случае ток возбуждения i_B замкнется через диод *VD2*. К началу обмотки возбуждения за счет включенного диода *VD2* приложится нулевое напряжение.

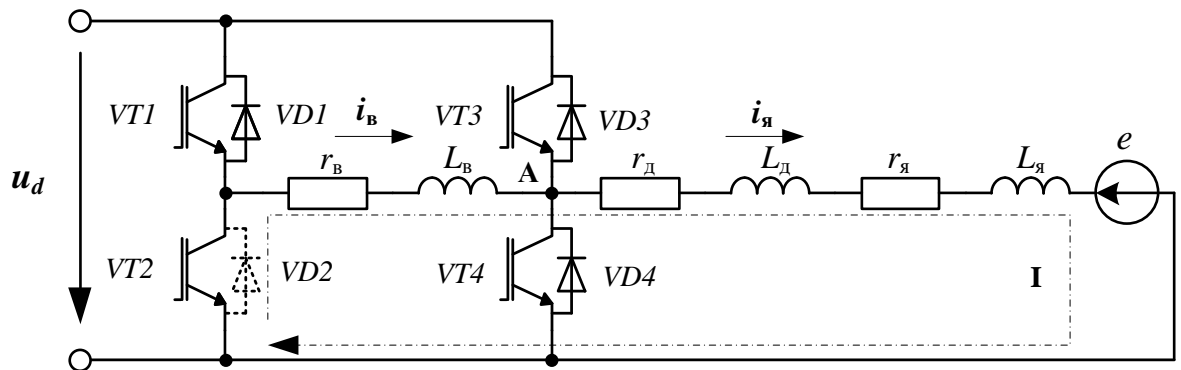


Рисунок A.3 – Расчетная схема для отключенного состояния транзистора *VT1* в режиме полного возбуждения

Уравнение (A.1), с учетом уравнений (A.2) и (A.3), для этого случая примет вид:

$$\begin{cases} 0 = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + r_{\text{д+я}} i_{\text{я}} + L_{\text{д+я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + e, \\ i_B = i_{\text{я}}. \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Скорость изменения тока при этом:

$$\frac{di_B}{dt} = - \frac{e + r_B i_B + r_{д+я} i_{я}}{L_B + L_{д+я}}. \quad (A.7)$$

Ток двигателя начнет спадать под действием ЭДС e . Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что при питании ТЭД от нового полупроводникового преобразователя ток двигателя будет изменяться следующим образом:

- быстро нарастать и медленно спадать при условии $u_d \gg e$;
- медленно нарастать и быстро спадать при условии $u_d \approx e$.

Ослабление возбуждения тягового электродвигателя происходит при помощи транзистора $VT3$, также работающего в ключевом режиме. Необходимо проанализировать электромагнитные процессы для следующих возможных состояний транзисторов $VT1$ и $VT3$:

- $VT1$ включен и $VT3$ включен;
- $VT1$ включен и $VT3$ выключен;
- $VT1$ выключен и $VT3$ включен;
- $VT1$ выключен и $VT3$ выключен.

Для записи уравнений ТЭД примем условие, что ток в обмотке возбуждения меньше тока якоря ($i_B < i_{я}$), а напряжение $u_d > e$.

Рассмотрим ситуацию, в которой $VT1$ и $VT3$ включены. В этом случае ток возбуждения i_B будет протекать через транзистор $VT1$, а дополнительный ток $i_{доп}$ - через открытый транзистор $VT3$ (рисунок А.4). Следует отметить, что к началу и концу обмотки возбуждения за счет включенных транзисторов $VT1$ и $VT3$ приложено напряжение u_d , то есть разность потенциалов равна нулю.

Используя показанные на рисунке .4 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} 0 = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ u_d = r_{д+я} i_{я} + L_{д+я} \frac{di_{я}}{dt} + e, \\ i_{я} = i_B + i_{доп}. \end{cases} \quad (A.8)$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

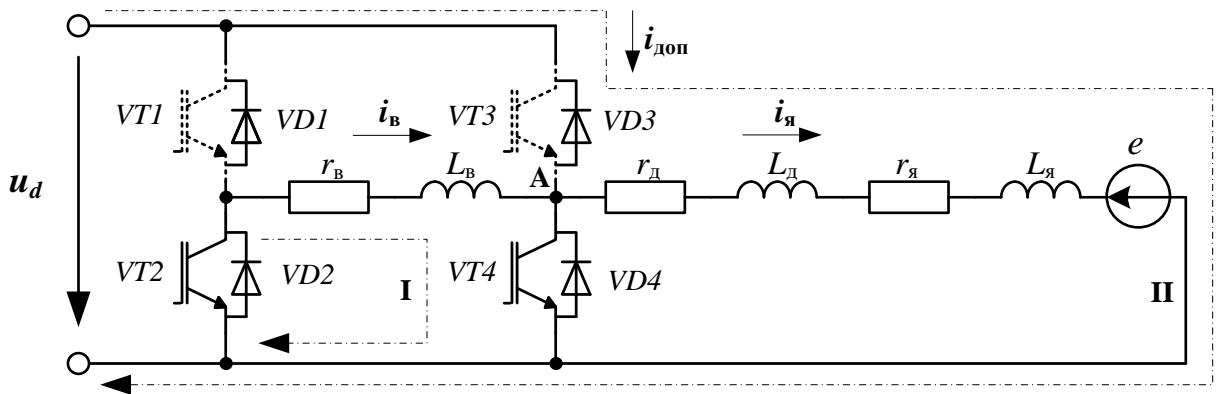


Рисунок А.4 – Расчетная схема для включенных транзисторов $VT1$ и $VT3$ в режиме ослабления возбуждения

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{r_B i_B}{L_B}, \\ \frac{di_{доп}}{dt} = \frac{u_d - e - r_{Д+я} i_я}{L_{Д+я}} - \frac{di_B}{dt}, \\ \frac{di_я}{dt} = \frac{u_d - e - r_{Д+я} i_я}{L_{Д+я}}. \end{cases} \quad (A.9)$$

Исходя из уравнения (А.9), можно сделать вывод, как будут вести себя токи в данном случае:

- ток возбуждения i_B будет медленно спадать по аperiodическому закону, при этом скорость спада будет определяться параметрами обмотки;
- ток якоря $i_я$ будет расти, при этом скорость нарастания будет прямо пропорциональна разности $u_d - e$ и обратно пропорциональна индуктивности $L_{Д+я}$;
- дополнительный ток $i_{доп}$ будет расти с большей скоростью, чем ток якоря, за счет положительной добавки $\frac{di_B}{dt}$.

Рассмотрим ситуацию, в которой транзистор $VT1$ включен, а $VT3$ выключен. В этом случае ток возбуждения i_B будет протекать через транзистор $VT1$, дополнительный ток $i_{доп}$ замкнется через диод $VD4$ (рисунок А.5). За счет открытого диода $VD4$ напряжение на якоре станет равным нулю.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

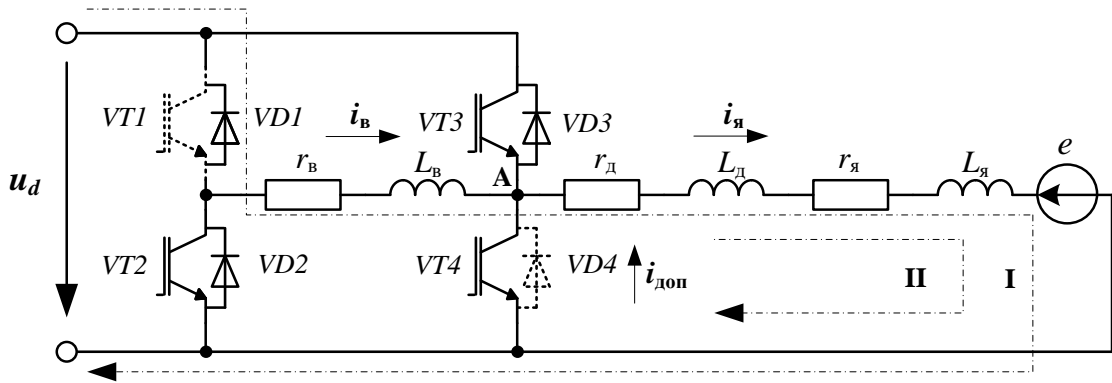


Рисунок А.5 – Расчетная схема для включенного транзистора $VT1$ и выключенного транзистора $VT3$ в режиме ослабления возбуждения

Используя показанные на рисунке А.5 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} u_d = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + r_{д+я} i_я + L_{д+я} \frac{di_я}{dt} + e, \\ 0 = r_{д+я} i_я + L_{д+я} \frac{di_я}{dt} + e, \\ i_я = i_B + i_{доп}. \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

Подставив второе уравнение системы (А.10) в первое, а третье во второе получаем:

$$\begin{cases} u_d = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ 0 = r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} + L_{д+я} \frac{di_B}{dt} + L_{д+я} \frac{di_{доп}}{dt} + e, \\ i_я = i_B + i_{доп}. \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = \frac{u_d - r_B i_B}{L_B}, \\ \frac{di_{доп}}{dt} = -\frac{r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} + e}{L_{д+я}} - \frac{di_B}{dt}, \\ \frac{di_я}{dt} = \frac{di_B}{dt} + \frac{di_{доп}}{dt} = -\frac{r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} + e}{L_{д+я}}. \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

Исходя из уравнения (А.12) можно сделать вывод:

- ток возбуждения i_B будет расти, при этом скорость нарастания будет прямо пропорциональна напряжению u_d . Так как в числителе первой формулы системы уравнений (А.12) отсутствует ЭДС двигателя e с отрицательным знаком,

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

то скорость нарастания будет выше, чем в режиме без ослабления возбуждения (система уравнений (А.4));

- ток якоря $i_{я}$ будет спадать, при этом скорость спада будет прямо пропорциональна ЭДС двигателя e и обратно пропорциональна индуктивности $L_{д+я}$.

- дополнительный ток $i_{доп}$ будет спадать с большей скоростью, чем ток якоря, за счет отрицательной добавки $\frac{di_{в}}{dt}$.

Рассмотрим ситуацию, в которой транзистор $VT1$ выключен, а $VT3$ включен. В этом случае ток возбуждения $i_{в}$ замкнется через диод $VD2$, а дополнительный ток $i_{доп}$ будет протекать через транзистор $VT3$ (рисунок А.6). За счет открытого транзистора $VT3$ к якору приложится напряжение u_d , а к обмотке возбуждения – напряжение $-u_d$.

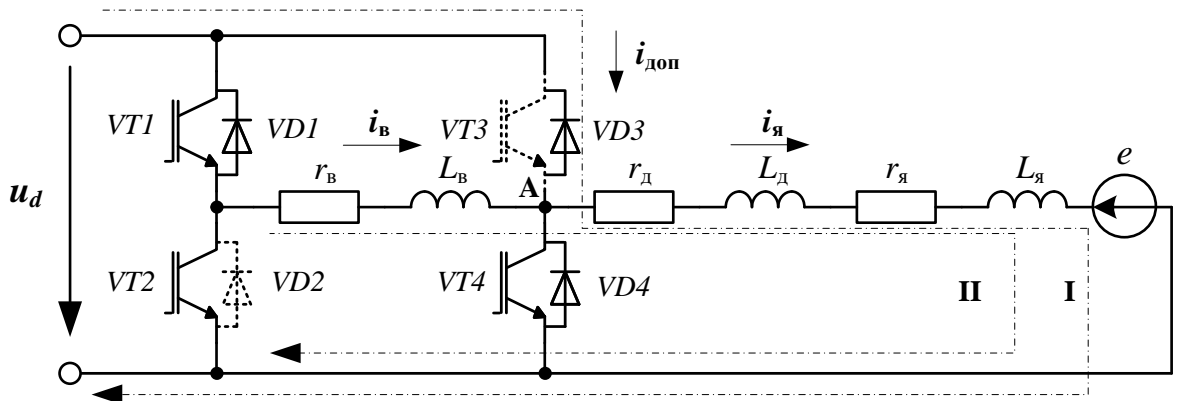


Рисунок А.6 – Расчетная схема для выключенного транзистора $VT1$ и включенного транзистора $VT3$ в режиме ослабления возбуждения

Используя показанные на рисунке А.6 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} 0 = r_{в} i_{в} + L_{в} \frac{di_{в}}{dt} + r_{д+я} i_{я} + L_{д+я} \frac{di_{я}}{dt} + e, \\ u_d = r_{д+я} i_{я} + L_{д+я} \frac{di_{я}}{dt} + e, \\ i_{я} = i_{в} + i_{доп}. \end{cases} \quad (A.13)$$

Подставив второе уравнение системы (А.13) в первое, а третье во второе получаем:

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

$$\begin{cases} \mathbf{0} = r_{\text{в}} \mathbf{i}_{\text{в}} + L_{\text{в}} \frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt} + \mathbf{u}_d, \\ \mathbf{u}_d = r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{в}} + r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{доп}} + L_{\text{д+я}} \frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt} + L_{\text{д+я}} \frac{d\mathbf{i}_{\text{доп}}}{dt} + \mathbf{e}, \\ \mathbf{i}_{\text{я}} = \mathbf{i}_{\text{в}} + \mathbf{i}_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt} = -\frac{\mathbf{u}_d + r_{\text{в}} \mathbf{i}_{\text{в}}}{L_{\text{в}}}, \\ \frac{d\mathbf{i}_{\text{доп}}}{dt} = \frac{\mathbf{u}_d - r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{в}} - r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{доп}} - \mathbf{e}}{L_{\text{д+я}}} - \frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt}, \\ \frac{d\mathbf{i}_{\text{я}}}{dt} = \frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt} + \frac{d\mathbf{i}_{\text{доп}}}{dt} = \frac{\mathbf{u}_d - r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{в}} - r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{доп}} - \mathbf{e}}{L_{\text{д+я}}}. \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

Исходя из уравнения (A.15), можно сделать вывод:

- ток возбуждения $\mathbf{i}_{\text{в}}$ будет спадать, при этом скорость спада будет прямо пропорциональна напряжению \mathbf{u}_d ;

- ток якоря $\mathbf{i}_{\text{я}}$ будет расти, при этом скорость нарастания будет прямо пропорциональна напряжению \mathbf{u}_d и обратно пропорциональна ЭДС двигателя \mathbf{e} и индуктивности $L_{\text{д+я}}$;

- дополнительный ток $\mathbf{i}_{\text{доп}}$ будет расти с большей скоростью, чем ток якоря, за счет положительной добавки $\frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt}$.

Рассмотрим ситуацию, в которой транзисторы $VT1$ и $VT3$ выключены. В этом случае ток возбуждения $\mathbf{i}_{\text{в}}$ замкнется через диод $VD2$, а дополнительный ток $\mathbf{i}_{\text{доп}}$ замкнется через диод $VD4$ (рисунок А.7). За счет открытых диодов $VD2$ и $VD4$ напряжения, приложенные к обмотке возбуждения и якорю, станут равными нулю.

Используя показанные на рисунке А.7 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} \mathbf{0} = r_{\text{в}} \mathbf{i}_{\text{в}} + L_{\text{в}} \frac{d\mathbf{i}_{\text{в}}}{dt} + r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{я}} + L_{\text{д+я}} \frac{d\mathbf{i}_{\text{я}}}{dt} + \mathbf{e}, \\ \mathbf{0} = r_{\text{д+я}} \mathbf{i}_{\text{я}} + L_{\text{д+я}} \frac{d\mathbf{i}_{\text{я}}}{dt} + \mathbf{e}, \\ \mathbf{i}_{\text{я}} = \mathbf{i}_{\text{в}} + \mathbf{i}_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

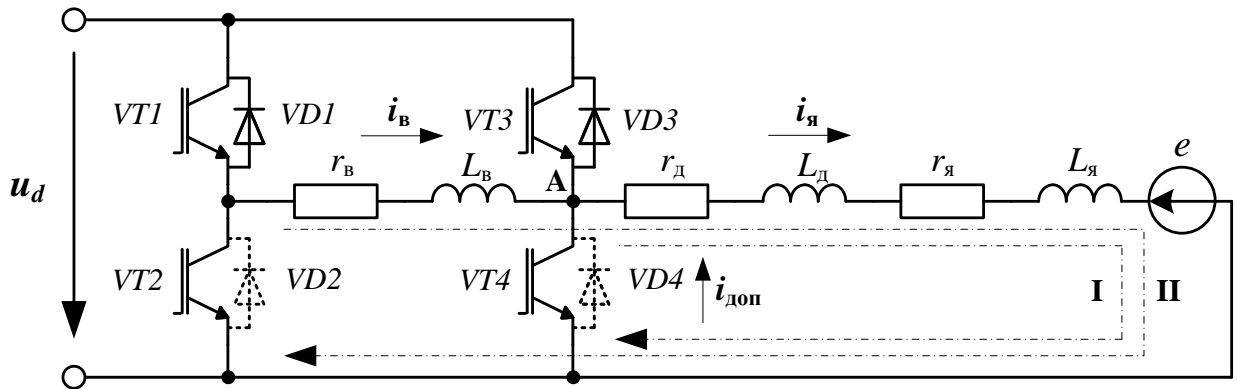


Рисунок А.7 – Расчетная схема для выключенных транзисторов $VT1$ и $VT3$ в режиме ослабления возбуждения

Подставив второе уравнение системы (А.15) в первое, а третье во второе получаем:

$$\begin{cases} 0 = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ 0 = r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} + L_{д+я} \frac{di_B}{dt} + L_{д+я} \frac{di_{доп}}{dt} + e, \\ i_я = i_B + i_{доп}. \end{cases} \quad (\text{А.16})$$

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{r_B i_B}{L_B}, \\ \frac{di_{доп}}{dt} = -\frac{r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} + e}{L_{д+я}} - \frac{di_B}{dt}, \\ \frac{di_я}{dt} = \frac{di_B}{dt} + \frac{di_{доп}}{dt} = -\frac{r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} + e}{L_{д+я}}. \end{cases} \quad (\text{А.17})$$

Исходя из уравнения (А.17) можно сделать вывод:

- ток возбуждения i_B будет медленно спадать по аperiodическому закону, при этом скорость спада будет определяться параметрами обмотки;

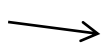








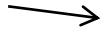


- ток якоря $i_я$ будет спадать, при этом скорость спада будет прямо пропорциональна ЭДС двигателя e и обратно пропорциональна индуктивности $L_{д+я}$.

- дополнительный ток $i_{доп}$ будет спадать немного медленнее, чем ток якоря, за счет положительной добавки $\frac{di_B}{dt}$.





ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Результаты проведенного анализа электромагнитных процессов в цепи преобразователь - тяговый электродвигатель в режиме ослабления возбуждения удобно представить в табличной форме (таблица А.1).

Таблица А.1 – Электромагнитные процессы в ТЭД в режиме ослабления возбуждения в зависимости от состояния ключей тягового преобразователя

Состояние транзисторов		Ток возбуждения i_B		Ток якоря i_A		Дополнительный ток $i_{доп}$	
$VT1$	$VT3$	Характер изменения	Основной влияющий фактор	Характер изменения	Основной влияющий фактор	Характер изменения	Основной влияющий фактор
1	1		r_B, L_B		$u_d - e$		$u_d - e$
1	0		u_d		e		$u_d + e$
0	1		u_d		$u_d - e$		$2u_d - e$
0	0		r_B, L_B		e		e

Пояснение к таблице А.1:

- «1» - транзистор включен;
- «0» - транзистор выключен;
- «» - медленное спадание;
- «» - спадание;
- «» - нарастание;
- «» - быстрое нарастание.

Как видно из таблицы А.1 транзистор $VT1$ целесообразно использовать для управления именно током якоря i_A , а не возбуждения, так как изменение i_A при работе транзистора $VT1$ согласовано с изменением дополнительно тока $i_{доп}$ при тех же состояниях транзистора $VT3$, учитывая, что ток якоря прямо пропорционален дополнительному току.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Повышение возбуждения тягового электродвигателя происходит при помощи транзистора $VT4$. Необходимо проанализировать электромагнитные процессы для следующих возможных состояний транзисторов $VT1$ и $VT4$:

- $VT1$ включен и $VT4$ включен;
- $VT1$ включен и $VT4$ выключен;
- $VT1$ выключен и $VT4$ включен;
- $VT1$ выключен и $VT4$ выключен.

Для записи уравнений ТЭД примем условие, что ток в обмотке возбуждения больше тока якоря ($i_B > i_A$), а напряжение $u_d > e$.

Рассмотрим ситуацию, в которой $VT1$ и $VT4$ включены. В этом случае ток возбуждения i_B будет протекать через транзистор $VT1$, а дополнительный ток $i_{доп}$ будет протекать через открытый транзистор $VT4$ (рисунок А.8). При этом к обмотке возбуждения за счет включенных транзисторов $VT1$ и $VT4$ будет приложено напряжение u_d , а якорю – нулевое напряжение.

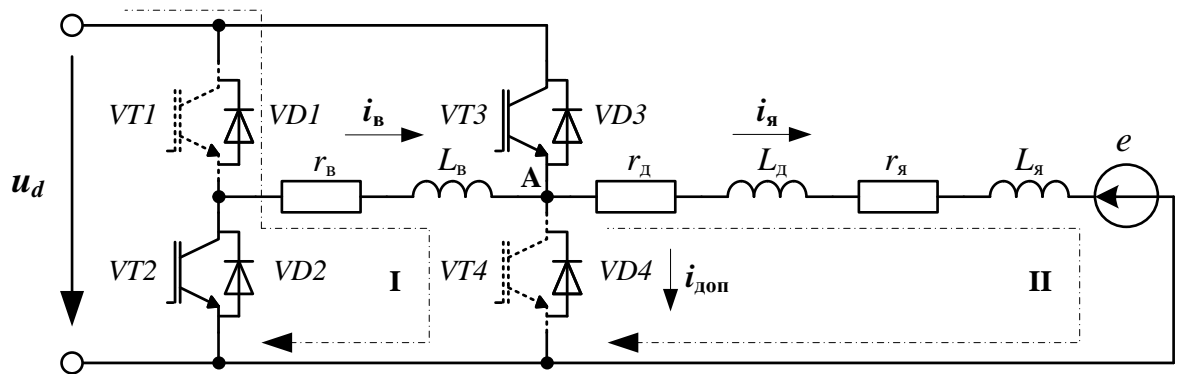


Рисунок А.8 – Расчетная схема для включенных транзисторов $VT1$ и $VT4$ в режиме повышения возбуждения

Используя показанные на рисунке А.8 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе для включенных транзисторов $VT1$ и $VT4$:

$$\begin{cases} u_d = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ 0 = r_{Д+я} i_A + L_{Д+я} \frac{di_A}{dt} + e, \\ i_A = i_B - i_{доп}. \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Подставив третье уравнение системы (А.18) во второе, получаем:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_d = r_B \mathbf{i}_B + L_B \frac{d\mathbf{i}_B}{dt}, \\ \mathbf{0} = r_{д+я} \mathbf{i}_B - r_{д+я} \mathbf{i}_{доп} + L_{д+я} \frac{d\mathbf{i}_B}{dt} - L_{д+я} \frac{d\mathbf{i}_{доп}}{dt} + \mathbf{e}, \\ \mathbf{i}_я = \mathbf{i}_B - \mathbf{i}_{доп}. \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{i}_B}{dt} = \frac{\mathbf{u}_d - r_B \mathbf{i}_B}{L_B}, \\ \frac{d\mathbf{i}_{доп}}{dt} = \frac{r_{д+я} \mathbf{i}_B - r_{д+я} \mathbf{i}_{доп} + \mathbf{e}}{L_{д+я}} + \frac{d\mathbf{i}_B}{dt}, \\ \frac{d\mathbf{i}_я}{dt} = \frac{d\mathbf{i}_B}{dt} - \frac{d\mathbf{i}_{доп}}{dt} = - \frac{r_{д+я} \mathbf{i}_B - r_{д+я} \mathbf{i}_{доп} + \mathbf{e}}{L_{д+я}}. \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

Исходя из системы уравнений (А.20) можно сделать вывод:

- ток возбуждения \mathbf{i}_B будет расти, при этом скорость нарастания будет прямо пропорциональна напряжению \mathbf{u}_d и обратно пропорциональна индуктивности L_B ;

- ток якоря $\mathbf{i}_я$ будет спадать, при этом скорость спада будет прямо пропорциональна ЭДС двигателя \mathbf{e} и обратно пропорциональна индуктивности $L_{д+я}$.

- дополнительный ток $\mathbf{i}_{доп}$ будет расти (по абсолютному значению) пропорционально сумме $\mathbf{u}_d + \mathbf{e}$ и с большей скоростью, чем ток возбуждения, за счет положительной добавки $\frac{d\mathbf{i}_B}{dt}$.

Рассмотрим ситуацию, в которой транзистор $VT1$ включен, а $VT4$ выключен. В этом случае ток возбуждения \mathbf{i}_B будет протекать через транзистор $VT1$, дополнительный ток $\mathbf{i}_{доп}$ замкнется через диод $VD3$ (рисунок А.9). За счет открытых транзистора $VT1$ и диода $VD3$ к обмотке возбуждения приложится нулевое напряжение, к якорю – напряжение \mathbf{u}_d .

Используя показанные на рисунке А.9 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_d = r_B \mathbf{i}_B + L_B \frac{d\mathbf{i}_B}{dt} + r_{д+я} \mathbf{i}_я + L_{д+я} \frac{d\mathbf{i}_я}{dt} + \mathbf{e}, \\ \mathbf{u}_d = r_{д+я} \mathbf{i}_я + L_{д+я} \frac{d\mathbf{i}_я}{dt} + \mathbf{e}, \\ \mathbf{i}_я = \mathbf{i}_B - \mathbf{i}_{доп}. \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

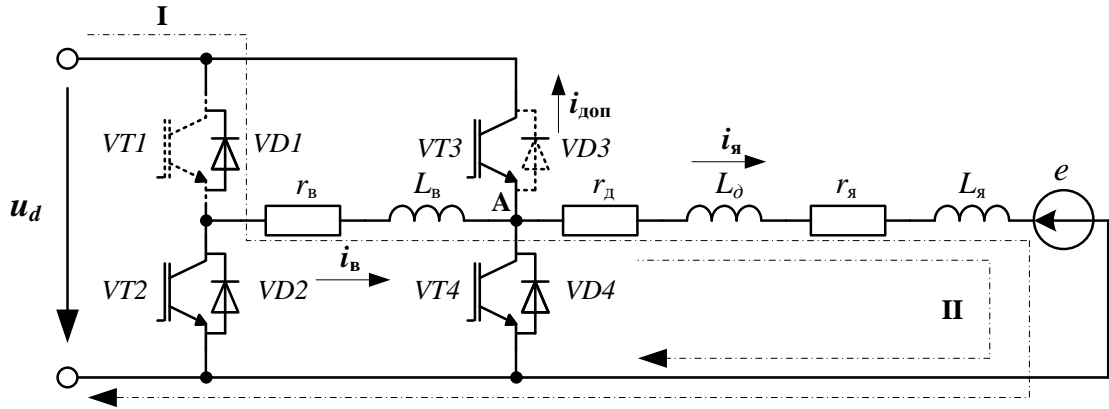


Рисунок А.9 – Расчетная схема для включенного транзистора $VT1$ и выключенного транзистора $VT4$ в режиме повышения возбуждения

Подставив второе уравнение системы (А.21) в первое, а третье во второе получаем:

$$\begin{cases} 0 = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ u_d = r_{д+я} i_B - R_{д+я} i_{доп} + L_{д+я} \frac{di_B}{dt} - L_{д+я} \frac{di_{доп}}{dt} + e, \\ i_я = i_B - i_{доп}. \end{cases} \quad (A.22)$$

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{r_B i_B}{L_B}, \\ \frac{di_{доп}}{dt} = -\frac{u_d - r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} - e}{L_{д+я}} + \frac{di_B}{dt}, \\ \frac{di_я}{dt} = \frac{di_B}{dt} - \frac{di_{доп}}{dt} = \frac{u_d - r_{д+я} i_B + r_{д+я} i_{доп} - e}{L_{д+я}}. \end{cases} \quad (A.23)$$

Исходя из уравнения (А.23) можно сделать вывод:

- ток возбуждения i_B будет медленно спадать по аperiodическому закону, при этом скорость спада будет определяться параметрами обмотки;
- ток якоря $i_я$ будет расти, при этом скорость нарастания будет прямо пропорциональна напряжению u_d и обратно пропорциональна ЭДС двигателя e .
- дополнительный ток $i_{доп}$ будет спадать со скоростью, немного выше чем скорость нарастания ток якоря, за счет отрицательной добавки $\frac{di_B}{dt}$.

Рассмотрим ситуацию, в которой транзистор $VT1$ выключен, а $VT4$ включен. В этом случае ток возбуждения i_B замкнется через диод $VD2$, а дополнительный

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

ток $i_{\text{доп}}$ будет протекать через транзистор $VT4$ (рисунок А.10). За счет открытых диода $VD2$ и транзистора $VT4$ к обмотке возбуждения и якорю приложится нулевое напряжение.

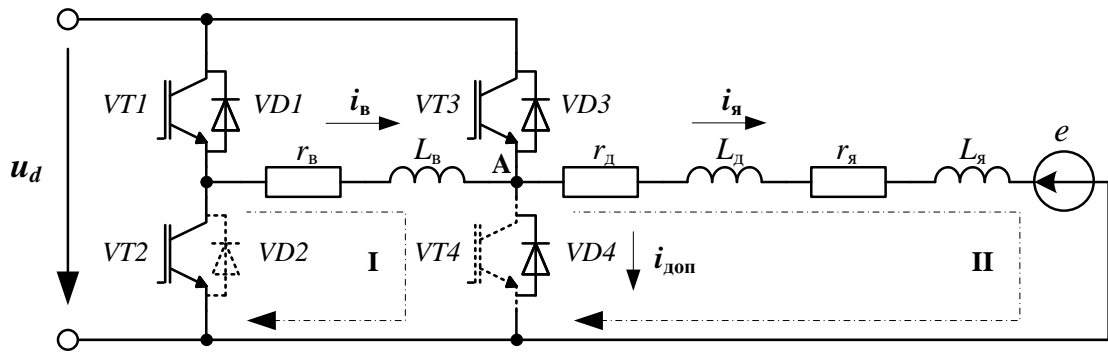


Рисунок А.10 – Расчетная схема для выключенного транзистора $VT1$ и включенного транзистора $VT4$ в режиме повышения возбуждения

Используя показанные на рисунке А.10 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} 0 = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ 0 = r_{\text{д+я}} i_{\text{я}} + L_{\text{д+я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + e, \\ i_{\text{я}} = i_B - i_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (\text{A.24})$$

Подставив третье уравнение системы (А.24) во второе получаем:

$$\begin{cases} 0 = r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt}, \\ 0 = r_{\text{д+я}} i_B - r_{\text{д+я}} i_{\text{доп}} + L_{\text{д+я}} \frac{di_B}{dt} - L_{\text{д+я}} \frac{di_{\text{доп}}}{dt} + e, \\ i_{\text{я}} = i_B - i_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\begin{cases} \frac{di_B}{dt} = -\frac{R_B i_B}{L_B}, \\ \frac{di_{\text{доп}}}{dt} = \frac{r_{\text{д+я}} i_B - r_{\text{д+я}} i_{\text{доп}} + e}{L_{\text{д+я}}} + \frac{di_B}{dt}, \\ \frac{di_{\text{я}}}{dt} = \frac{di_B}{dt} - \frac{di_{\text{доп}}}{dt} = -\frac{r_{\text{д+я}} i_B - r_{\text{д+я}} i_{\text{доп}} + e}{L_{\text{д+я}}}. \end{cases} \quad (\text{A.26})$$

Исходя из уравнения (А.26), можно сделать вывод:

- ток возбуждения i_B будет медленно спадать по аperiодическому закону, при этом скорость спада будет определяться параметрами обмотки;

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

- ток якоря $i_{я}$ будет падать, при этом скорость спада будет прямо пропорциональна ЭДС двигателя e и обратно пропорциональна индуктивности $L_{д+я}$;

- дополнительный ток $i_{доп}$ будет расти со скоростью, немного меньшей чем скорость спада ток якоря, за счет отрицательной добавки $\frac{di_{я}}{dt}$.

Рассмотрим ситуацию, в которой транзисторы $VT1$ и $VT4$ выключены. В этом случае ток возбуждения $i_{в}$ замкнется через диод $VD2$, а дополнительный ток $i_{доп}$ замкнется через диод $VD3$ (рисунок А.11). За счет открытых диодов $VD2$ и $VD3$ к якорю приложится напряжение u_d , а к обмотке возбуждения – напряжение $-u_d$.

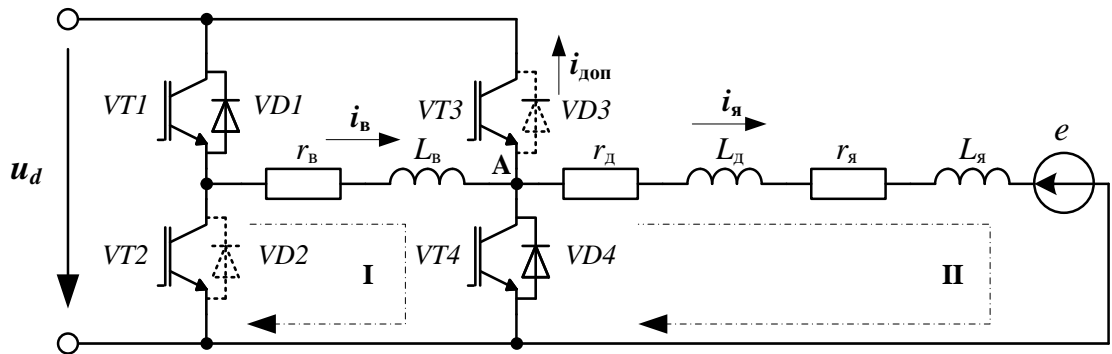


Рисунок А.11 – Расчетная схема для выключенных транзисторов $VT1$ и $VT4$ в режиме повышения возбуждения

Используя показанные на рисунке А.11 контуры напряжения «I» и «II» и узел «А», запишем систему уравнений, описывающую процессы в двигателе:

$$\begin{cases} -u_d = r_{в} i_{в} + L_{в} \frac{di_{в}}{dt}, \\ u_d = r_{д+я} i_{я} + L_{д+я} \frac{di_{я}}{dt} + e, \\ i_{я} = i_{в} - i_{доп}. \end{cases} \quad (A.17)$$

Подставив третье уравнение системы (А.17) во второе получаем:

$$\begin{cases} -u_d = r_{в} i_{в} + L_{в} \frac{di_{в}}{dt}, \\ u_d = r_{д+я} i_{в} - r_{д+я} i_{доп} + L_{д+я} \frac{di_{в}}{dt} - L_{д+я} \frac{di_{доп}}{dt} + e, \\ i_{я} = i_{в} - i_{доп}. \end{cases} \quad (A.18)$$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Скорость изменения тока в данном случае:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_B}{dt} = -\frac{U_d + r_B i_B}{L_B}, \\ \frac{di_{\text{доп}}}{dt} = -\frac{u_d - r_{\text{д+я}} i_B + r_{\text{д+я}} i_{\text{доп}} - e}{L_{\text{д+я}}} + \frac{di_B}{dt}, \\ \frac{di_{\text{я}}}{dt} = \frac{di_B}{dt} - \frac{di_{\text{доп}}}{dt} = \frac{u_d - r_{\text{д+я}} i_B + r_{\text{д+я}} i_{\text{доп}} - e}{L_{\text{д+я}}}. \end{array} \right. \quad (\text{A.19})$$

Исходя из уравнения (A.19), можно сделать вывод, как будут вести себя токи в данном случае:

- ток возбуждения i_B будет спадать, при этом скорость спада будет прямо пропорциональна напряжению u_d и обратно пропорциональна индуктивности L_B .
- ток якоря $i_{\text{я}}$ будет расти, при этом скорость нарастания будет прямо пропорциональна разности $u_d - e$ и обратно пропорциональна индуктивности $L_{\text{д+я}}$.
- дополнительный ток $i_{\text{доп}}$ будет спадать пропорционально разности $2u_d - e$ и с большей скоростью, чем ток якоря, за счет отрицательной добавки $\frac{di_B}{dt}$.





Результаты проведенного анализа электромагнитных процессов в режиме повышения возбуждения удобно представить в виде таблицы (таблица А.2).

Таблица А.2 – Электромагнитные процессы в ТЭД в режиме повышения возбуждения в зависимости от состояния ключей тягового преобразователя

Состояние транзисторов		Ток возбуждения i_B		Ток якоря $i_{\text{я}}$		Дополнительный ток $ i_{\text{доп}} $	
$VT1$	$VT4$	Характер изменения	Основной влияющий фактор	Характер изменения	Основной влияющий фактор	Характер изменения	Основной влияющий фактор
1	1	\nearrow	u_d	\searrow	e	\nearrow	$u_d + e$
1	0	\rightarrow	r_B, L_B	\nearrow	$u_d - e$	\searrow	$u_d - e$
0	1	\rightarrow	r_B, L_B	\searrow	e	\nearrow	e
0	0	\searrow	u_d	\nearrow	$u_d - e$	\downarrow	$2u_d - e$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Пояснение к таблице А.2:

- «1» - транзистор включен;
- «0» - транзистор выключен;
- «  » - медленное спадание;
- «  » - спадание;
- «  » - быстрое спадание;
- «  » - нарастание;

Изменение $i_{я}$ при работе транзистора $VT1$ прямо противоположно изменению дополнительно тока $i_{доп}$ (по абсолютной величине) при тех же состояниях транзистора $VT3$, но ток якоря в этом режиме обратно пропорционален дополнительному току, поэтому транзистор $VT1$ целесообразно использовать для управления именно током якоря, а не возбуждения, как было отмечено и для режима ослабления возбуждения.

Параметры тягового двигателя постоянного тока ЭД-133

Таблица Б.1 – Параметры тягового двигателя постоянного тока ЭД-133

№ п/п	Наименование	Значение	Размерность
1	2	4	5
1	Внешний диаметр якоря	493	мм
2	Внутренний диаметр якоря	180	мм
3	Полная длина железа якоря	400	мм
4	Число пазов якоря	58	-
5	Число эффективных проводников в пазу якоря	8	-
6	Число элементарных проводников в эффективном	1	-
7	Диаметр коллектора	400	мм
8	Активная длина коллектора	140	мм
9	Число коллекторных пластин	232	-
10	Число щеточных бракетов	4	-
11	Число главных полюсов	4	-
12	Число витков на полюс	15	-
13	Ширина сердечника главного полюса	196	мм
14	Высота сердечника главного полюса	73,5	мм
15	Длина сердечника главного полюса	400	мм
16	Толщина листов главного полюса	1,4	мм
17	Марка стали главного полюса	08КП ГОСТ 16523-97	
18	Полюсное деление	38,72	см
19	Коэффициент полюсного перекрытия	0,718	-
20	Количество добавочных полюсов	4	-
21	Число витков на добавочный полюс	18	-
22	Индуктивность обмотки якоря	2,08	мГн
23	Индуктивность обмотки добавочных полюсов	0,99	мГн
24	Индуктивность обмотки главных полюсов	1,58	мГн

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Продолжение таблицы Б.1

1	2	4	5
25	Сопротивление обмотки якоря при 20 °С	0,0118	Ом
26	Сопротивление обмотки добавочных полюсов при 20 °С	0,00698	Ом
27	Сопротивление обмотки главных полюсов при 20 °С	0,00671	Ом
28	Номинальная мощность на валу	414	кВт
29	Момент на валу	6592	Нм
30	Коэффициент полезного действия	91,8	%
31	Напряжение	506/780	В
32	Ток длительного режима	890/577	А
33	Частота вращения	600/2320	об/мин
34	Максимальный пусковой ток	1130	А
35	Масса без деталей подвески	2850	кг

**Протокол предварительных испытаний преобразователя
(титульный лист)**

**АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический
институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)**
140402, г. Коломна, Московской обл., ул. Октябрьской революции, 410
тел. (496) 618-82-18, факс: (496) 618-82-27

УТВЕРЖДАЮ:

Первый заместитель
генерального директора –
главный инженер

Ю.В. Бабков
« 06 » 03 2023г.

**ПРОТОКОЛ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЯГОВОГО ДВУХКАНАЛЬНОГО
27.Т.768.00.00.000**

№ ИП15–02–23

**Измерение электрического сопротивления изоляции
Проверка электрической прочности изоляции
Проверка функционирования
Проверка требований к программному обеспечению
Проверка защит
Проверка максимальных параметров в режиме ослабления возбуждения и скорости
изменения напряжения
Испытание на нагрев**

Испытательное подразделение ИП15 АО «ВНИКТИ» в период с 12 декабря по 28 февраля 2023г. провело испытания преобразователя тягового двухканального 27.Т.768.00.00.000 (далее ПТД) на соответствие требованиям технического задания 27.Т.768.00.00.000 ТЗ.

Количество испытываемых объектов – 1, зав. № 0230155-1.

Дата изготовления ПТД – 30 сентября 2022 г.

Дата получения ПТД на испытания – 12 декабря 2022 г.

Место проведения испытаний – корпус испытаний локомотивов АО «ВНИКТИ».

Расчет интегрального эффекта и срока окупаемости затрат

Таблица Г.1 – Расчет интегрального эффекта и срока окупаемости затрат

	Период эксплуатации, годы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Инвестиции в локомотив, тыс. руб., в том числе:	4258,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 тяговый преобразователь;	9200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 снимаемое оборудование локомотива.	-4941,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Экономия годовых эксплуатационных затрат, тыс. руб.	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08
Разность денежных потоков, тыс. руб.	-1721,32	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08
Изменение налога на прибыль, тыс. руб.	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56
Чистый денежный поток, тыс. руб.	-2190,88	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52
Коэффициент дисконтирования	1	0,892857	0,797194	0,71178	0,635518	0,567427	0,506631	0,452349	0,403883	0,36061	0,321973	
Дисконтированный денежный поток, тыс. руб.	-2190,88	1846	1648,21	1471,62	1313,95	1173,17	1047,47	935,24	835,04	745,57	665,69	
Интегральный эффект, тыс. руб.	-2190,88	-344,88	1303,33	2774,95	4088,9	5262,07	6309,54	7244,78	8079,82	8825,39	9491,08	

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г

Продолжение таблицы Г.1

	Период эксплуатации, годы									
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Инвестиции в локомотив, тыс. руб.:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 тяговый преобразователь;	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 снимаемое оборудование локомотива.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Экономия годовых эксплуатационных затрат, тыс. руб.	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08
Разность денежных потоков, тыс. руб.	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08	2537,08
Изменение налога на прибыль, тыс. руб.	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56	469,56
Чистый денежный поток, тыс. руб.	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52	2067,52
Коэффициент дисконтирования	0,287476	0,256675	0,229174	0,20462	0,182696	0,163121	0,145644	0,130039	0,116106	0,103666
Дисконтированный денежный поток, тыс. руб.	594,36	530,68	473,82	423,06	377,73	337,26	301,12	268,86	240,05	214,33
Интегральный эффект, тыс. руб.	10085,44	10616,12	11089,94	11513	11890,73	12227,99	12529,11	12797,97	13038,02	13252,35

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Г

Продолжение таблицы Г.1

	Период эксплуатации, годы	
	22	23
Инвестиции в локомотив, тыс. руб., в том числе:	0	0
<i>1 тяговый преобразователь;</i>	0	0
<i>2 снимаемое оборудование локомотива.</i>	0	0
Экономия годовых эксплуатационных затрат, тыс. руб.	2537,08	2537,08
Разность денежных потоков, тыс. руб.	2537,08	2537,08
Изменение налога на прибыль, тыс. руб.	469,56	469,56
Чистый денежный поток, тыс. руб.	2067,52	2067,52
Коэффициент дисконтирования	0,092559	0,082642
Дисконтированный денежный поток, тыс. руб.	191,37	170,86
Интегральный эффект, тыс. руб.	13443,72	13614,58