

Министерство транспорта Российской Федерации  
Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Омский государственный университет путей сообщения

На правах рукописи



ПЛОТНИКОВ Юрий Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ В  
СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук

Шантаренко Сергей Георгиевич

Омск 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	14
1.1 Показатели использования электроэнергии в системе электроснабжения железнодорожных транспортных средств.....	14
1.2 Электротехнический комплекс системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока .....	18
1.3 Внешние воздействия и их влияние на эффективность работы электротехнического комплекса системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока .....	22
1.3.1 Изменение напряжения сети внешнего электроснабжения, или величины районной нагрузки .....	22
1.3.2 Изменение оперативной поездной обстановки .....	23
1.3.3 Изменение нормальных режимов работы со стороны энергодиспетчера .....	24
1.3.4 Возникновение вынужденных и аварийных режимов работы под влиянием внешних факторов .....	24
1.3.5 Краткосрочное и долгосрочное влияние погодных условий .....	25

1.4 Постановка цели и задач исследования.....	26
2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	29
2.1 Влияние технологических режимов тяговых подстанций на эффективность работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока .....	29
2.2 Автоматическое резервирование мощности тяговых подстанций как способ повышения эффективности работы системы электроснабжения транспортных средств .....	34
2.3 Разработка технических решений электротехнического комплекса автоматического резервирования мощности тяговых подстанций .....	39
2.4 Практическая реализация предложенных технических решений электротехнических комплексов систем резервирования мощности тяговых подстанций .....	54
2.5 Выводы .....	58
3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ .....	59
3.1 Автоматическое управление резервированием мощности тяговых подстанций как средство повышения эффективности системы электроснабжения транспортных средств .....	59

3.2 Разработка алгоритма управления электротехническим комплексом резервирования мощности тяговых подстанций.....	67
3.3 Апробация алгоритма управления системой резервирования мощности тяговых подстанций путем моделирования его работы в условиях реальной тяговой нагрузки .....	78
3.4 Выводы .....	84
4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА МЕСТ УСТАНОВКИ СИСТЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ И АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ .....	86
4.1 Выбор критериев для определения мест установки автоматических систем резервирования мощности .....	86
4.2 Научное обоснование выбора тяговых подстанций на участке железной дороги для установки систем резервирования мощности .....	89
4.3 Апробация и внедрение разработанных технических и технологических решений резервирования мощности тяговых подстанций в условиях реального производства .....	99
4.4 Выводы .....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	115
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	136

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

АСКУЭ	Автоматизированная система комплексного учета электроэнергии
АСМУЭ	Автоматизированная система мониторинга и учета электроэнергии
БАРН	Блок автоматического регулирования напряжения
ВП	Выпрямительный преобразователь
ДТ	Датчик тока
ИП	Источник питания
ИПТС	Источник питания от тяговой сети
МАВ	Модуль аналогового ввода
МИ	Микропроцессорный измеритель
МСД	Модуль сбора данных
МЦВВ	Модуль цифрового ввода - вывода
ПА	Преобразовательный агрегат
ПР	Переключатель
ПСВА	Подсистема синхронного включения агрегата
ПТ	Преобразовательный трансформатор
ПУ	Подсистема управления
РК	Радиоканал
СРМ	Система резервирования мощности
ТП	Тяговая подстанция
УСВ	Устройство синхронного включения
УСВТ	Устройство синхронного включения трансформатора
ЭПС	Электроподвижной состав

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Утвержденная стратегия развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года и стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации в целях повышения провозной способности участков дорог предусматривают увеличение весовых норм тяжеловесных поездов вплоть до 7,1 - 14,2 тыс. тонн. При этом на электрифицированных участках тяговые подстанции (ТП) могут работать на пределе своих возможностей, что может приводить к уменьшению напряжения на токоприемниках локомотивов ниже минимально допустимого уровня, снижению их скорости и, как следствие, к уменьшению провозной способности участка.

Одним из путей, обеспечивающих передачу необходимой мощности в контактную сеть, является выявление неоптимальных режимов работы тяговых подстанций с последующей автоматической коррекцией этих режимов в реальном времени в соответствии с поездной обстановкой. При этом техническая реализация может быть осуществлена как внедрением дополнительного силового оборудования с системами его управления, так и внедрением дополнительных систем управления, подключаемых к имеющемуся оборудованию и управляющих режимами его работы. Во многих случаях использования второго подхода представляет большой экономический интерес.

Несмотря на постоянный ввод в эксплуатацию новых тяговых подстанций, изначально имеющих современные системы автоматического управления режимами работы, по всей сети дорог ОАО «РЖД» эксплуатируется большое количество ТП, построенных во второй половине прошлого века, которые либо не имеют систем автоматического управления режимами, либо эти системы не отвечают современным требованиям. Поэтому разработка методов и средств для совершенствования работы тяговых подстанций в автоматических режимах с целью обеспечения

требуемой провозной способности участков железной дороги является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения (тема НИР № г.р. АААА-А18-118052390030-4, договор № 277-19-00020/ЗТЭ-2019/1-1и от 14 мая 2019 года).

**Степень разработанности темы диссертации.** Исследования по повышению эффективности работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств проводились научными коллективами ВНИИЖТа, РУТ(МИИТа), ПГУПС, ДВГУПС, РГУПС, УрГУПС, ИрГУПС, СамГУПС, ОмГУПС и др.

Значительный вклад в решение рассматриваемых проблем внесли известные отечественные ученые Б. А. Аржанников, М.П. Бадёр, Л. А. Баранов, А. Т. Бурков, М. А. Гаранин, Л. А. Герман, В. А. Гречишников, Б. Е. Дынькин, А. М. Евстафьев, Д. В. Ермоленко, Ю. И. Жарков, В. П. Закарюкин, А. Б. Косарев, А. В. Котельников, А. Н. Марикин, Р. Р. Мамошин, К. Г. Марквардт, Р. И. Мирошниченко, А. Н. Митрофанов, В. С. Молярчук, Л. А. Мугинштейн, Т. П. Третьяк, Н. О. Фролов, В. Т. Черемисин, М. В. Шевлюгин и др., а также зарубежные специалисты D. Genethliou, E. Almeshaiei, J. Wang, P. Bunnoon, A. Badri и др.

Применительно к работе тяговых подстанций, тематика большинства исследований включает вопросы разработки и использования систем, осуществляющих контроль параметров подстанций в процессе работы и формирующих на их основе рекомендации, либо сигналы для управления или изменения конфигурации оборудования, а так же режимов его работы. При этом, несмотря на большой объем проведенных исследований, тема повышения эффективности управления и качества функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока в различных режимах, при

разнообразных внешних воздействиях является актуальной и требует научно обоснованных решений.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов резервирования мощности в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока за счет совершенствования технологических режимов тяговых подстанций.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ влияния внешних воздействий на работоспособность электротехнических комплексов тяговых подстанций в системе электроснабжения транспортных средств постоянного тока и предложить способ повышения эффективности их функционирования;
- разработать аппаратную часть системы резервирования мощности для тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами;
- разработать управляющий алгоритм, позволяющий реализовать технологические режимы эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств;
- разработать методику выбора мест установки автоматических систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока для повышения эффективности функционирования системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств;
- выполнить практическую апробацию разработанных технических и технологических решений по эффективному функционированию систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в условиях эксплуатации.

**Объекты исследования** – электротехнические комплексы электроснабжения транспортных средств железных дорог постоянного тока.



**Области исследования** – оптимизация электротехнических комплексов тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока, разработка алгоритмов их эффективного управления; исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в комплексном подходе при разработке новых научно обоснованных технических и технологических решений с целью повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов резервирования мощности в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока и состоит в следующем:

- исследовано влияние внешних воздействий на работоспособность электротехнических комплексов тяговых подстанций в системе электроснабжения транспортных средств постоянного тока и предложен усовершенствованный способ повышения ее эффективности посредством управления технологическими режимами автоматического резервирования мощности тяговых подстанций;

- разработан управляющий алгоритм с использованием оригинальных математических выражений и корректировкой управляющего параметра путем самообучения в процессе работы, позволяющий реализовать технологические режимы эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств за счет снижения временных задержек на включение и отключение резервного преобразовательного агрегата при неизменном количестве суточных переключений;

- разработана методика выбора мест установки автоматических систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на основе предварительной оценки ожидаемой эффективности системы

электрообеспечения железнодорожных транспортных средств при установке системы на конкретную тяговую подстанцию.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Предложена методология обеспечения эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности в системах электрообеспечения железнодорожных транспортных средств постоянного тока за счет управления технологическими режимами тяговых подстанций.

Разработанная аппаратная часть системы автоматического резервирования мощности для тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами позволяет обеспечивать управление высоковольтными выключателями преобразовательных трансформаторов на основе сигналов выходного, либо входного тока преобразовательных агрегатов.

Разработанный управляющий алгоритм позволяет реализовать технологические режимы эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в системах электрообеспечения железнодорожных транспортных средств с использованием оригинальных математических выражений и корректировкой управляющего параметра путем самообучения в процессе работы.

Разработанная методика позволяет на основе использования показаний штатных приборов учета и результатов натурных измерений осуществлять выбор мест установки автоматических систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на участке железной дороги для повышения эффективности работы системы электрообеспечения железнодорожных транспортных средств.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе методов математической статистики, математического моделирования, в том

числе с использованием встроенного языка программирования Visual Basic for Applications программы работы с электронными таблицами Microsoft Excel. Эксперименты и практическая апробация результатов проводились на тяговых подстанциях постоянного тока участка железной дороги в условиях эксплуатации железнодорожных транспортных средств.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

усовершенствованный способ повышения эффективности системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока посредством управления технологическими режимами автоматического резервирования мощности тяговых подстанций;

управляющий алгоритм, позволяющий реализовать технологические режимы эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств, с использованием оригинальных математических выражений и корректировкой управляющего параметра путем самообучения в процессе работы;

методика выбора мест установки автоматических систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на основе предварительной оценки ожидаемой эффективности системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств при установке системы на конкретную тяговую подстанцию.

**Реализация результатов работы.**

Разработанная интеллектуальная система эффективного управления технологическими режимами автоматического резервирования мощности тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами внедрена в эксплуатацию на шести тяговых подстанциях системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока на одном из участков Омской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги.

**Степень достоверности научных положений и результатов** подтверждена экспериментальными исследованиями, практической реализацией и основана на использованных положениях математической статистики и математического моделирования. Адекватность предложенных решений подтверждена достаточно высокой степенью согласования теоретических расчетов с экспериментальными данными и практическими результатами (расхождение составляет не более 10 %).

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI научно-практической конференции «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2012), второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2016), научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2016), научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2020), XIX международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век» (Орел, 2021), V международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (Чебоксары, 2021), XIV международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (Самара, 2021), международной научно-практической конференции «Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика» (Омск, 2021), на расширенном заседании кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» ОмГУПС (Омск, 2021), на постоянно действующем научно-техническом семинаре Омского государственного университета путей сообщения по экспертизе и обсуждению диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

ученой степени доктора наук по научным специальностям технических отраслей науки (Омск, 2022).

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликованы 13 научных работ, в том числе четыре научных статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, один патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованной литературы из 132 наименований и содержит 139 страниц текста, включая 34 рисунка и 8 таблиц.

# **1. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

## **1.1 Показатели использования электроэнергии в системе электроснабжения железнодорожных транспортных средств**

Открытое акционерное общество «Российские железные дороги» является крупнейшим системообразующим элементом российской экономики, важнейшим звеном ее транспортной системы, выполняющим более 45% грузооборота и одним из крупнейших потребителей топливно-энергетических ресурсов в России [1 – 5]. В 2019 году потребление ОАО «РЖД» электрической энергии составило 50,1 млрд кВт·ч, дизельного топлива 2,6 млн т, мазута 256 тыс. т, угля 630,4 тыс. т, природного газа 430,0 млн м<sup>3</sup>.

Объемы перевозочной работы, выполненные на электрической тяге, постоянно возрастают. Большая часть перевозочной работы выполняется грузовым движением, в то время как доля пассажирского и пригородного движения составляет порядка 6 – 7 %, при этом имея тенденцию к постоянному снижению [6], при этом более 85 % перевозочной работы выполняется на электротяге. График расхода электрической энергии на тягу поездов за период 2004 – 2020 гг. представлен на рисунке 1.1. Наблюдаются незначительные кратковременные снижения, обусловленные как явлениями в мировой экономике, так и изменением экономической ситуации в стране, в частности экономическим кризисом 2009 года и пандемией короновиральной инфекции в 2019, 2020 гг., не оказывающие существенного влияния на общую тенденцию.

Тенденция ежегодного увеличения потребления электрической энергии на тягу поездов привела к необходимости увеличения объемов научных и

практических работ ОАО «РЖД», направленных на повышение эффективности работы электроподвижного состава [7 – 10] и системы электроснабжения транспортных средств [11 – 16].

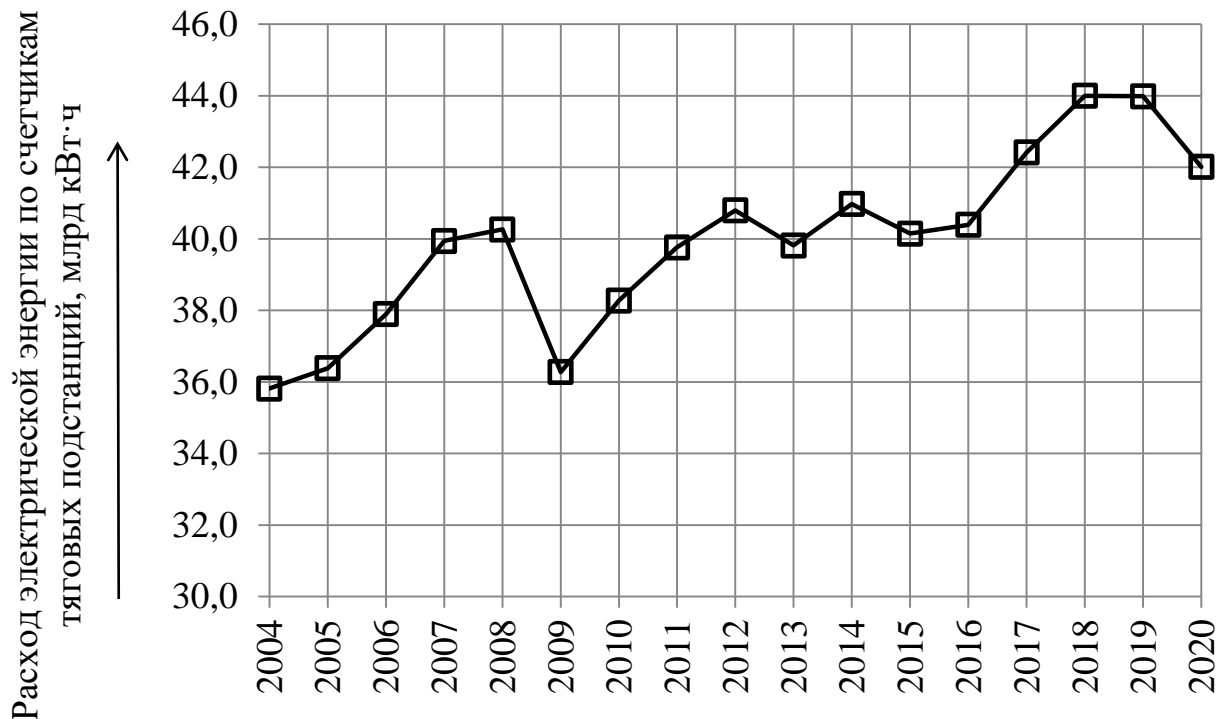


Рисунок 1.1 – Динамика изменения расхода электрической энергии на тягу поездов за период 2004 – 2020 гг.

В качестве показателя эффективности использования электроэнергии на тягу поездов принят удельный расход электроэнергии [17 – 19], как отношение объема потребленной электроэнергии (кВт·ч) на единицу перевозочной работы (10000 т·км брутто). На рисунке 1.2 представлен график изменения удельного расхода электрической энергии на тягу поездов ОАО «РЖД» за период 2004 – 2020 гг. В обозначенный период наблюдается устойчивое снижение этого показателя, что можно объяснить непрерывной работой по контролю эффективности использования электроэнергии на тягу поездов, внедрением энергосберегающих технических средств и технологий, а так же расширением полигонов

применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации.

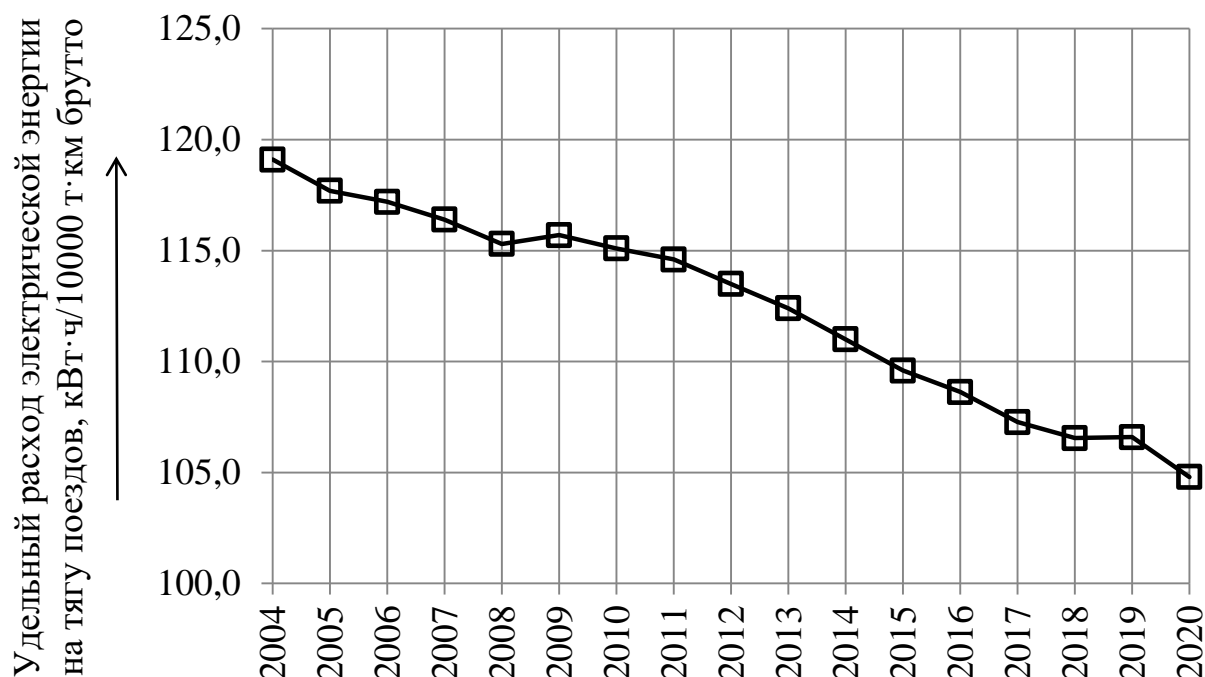


Рисунок 1.2 – Динамика изменения удельного расхода электрической энергии на тягу поездов ОАО «РЖД» за период 2004 – 2020 гг.

Одним из критериев, при помощи которого можно косвенно оценить эффективность работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств является уровень фактических потерь электроэнергии в тяговой сети [20 – 22], определяемый как разность отпущенной с шин тяговых подстанций и потребленной по счетчикам электроподвижного состава электроэнергии с учетом возврата энергии рекуперации по фидерам контактной сети тяговых подстанций, а также питания нетяговых потребителей электроэнергии, измеряемый в процентах от общего количества электроэнергии, отпущенной с шин тяговых подстанций. График изменения уровня фактических потерь электроэнергии в тяговой сети на сети дорог ОАО «РЖД» за период 2005 – 2020 гг. представлен на рисунке. 1.3.

В период 2005 – 2015 гг. наблюдалось ежегодное снижение этого показателя, но в последние годы наблюдается его небольшой, но устойчивый



рост. Это можно объяснить выявленными и устраненными в 2016, 2017 гг. недостатками систем учета электроэнергии на вводимых в эксплуатацию новых серии электроподвижного состава на восточном полигоне сети железных дорог, а так же изменениями в организации грузового движения, в частности применением современных электровозов повышенной мощности, поездов повышенного веса и длины [23], а так же организацией пакетного движения [24, 25], что приводит к увеличению технологической составляющей потерь электроэнергии в тяговой сети.

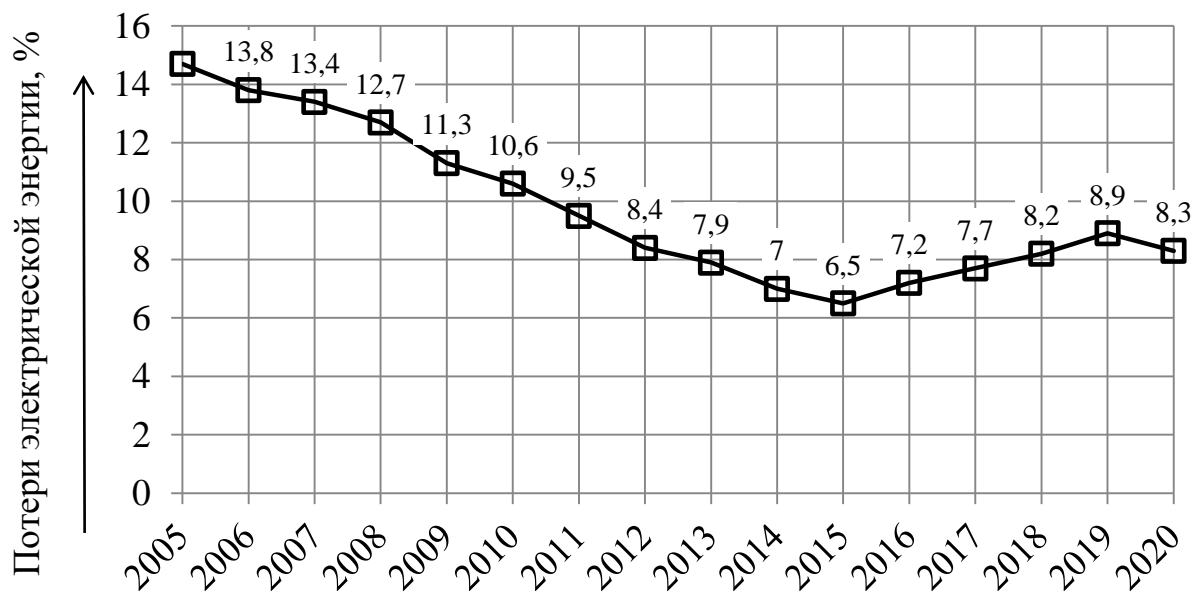


Рисунок 1.3 – Динамика фактических потерь электрической энергии на тягу поездов ОАО «РЖД» за период 2005 – 2020 гг.

На практике уровень фактических потерь на полигоне переменного тока, как правило, составляет 4 – 8 %, на полигоне постоянного тока обычно находится в диапазоне – от 12 до 20 % [26].

Потери электроэнергии на тягу поездов на полигоне постоянного тока в 2020 году составили 64,9% от общего объема потерь на сети железных дорог. При этом за период 2015 – 2020 гг. наблюдается увеличение потерь электроэнергии на тягу поездов на полигоне переменного тока, что наглядно представлено на рисунке 1.4.

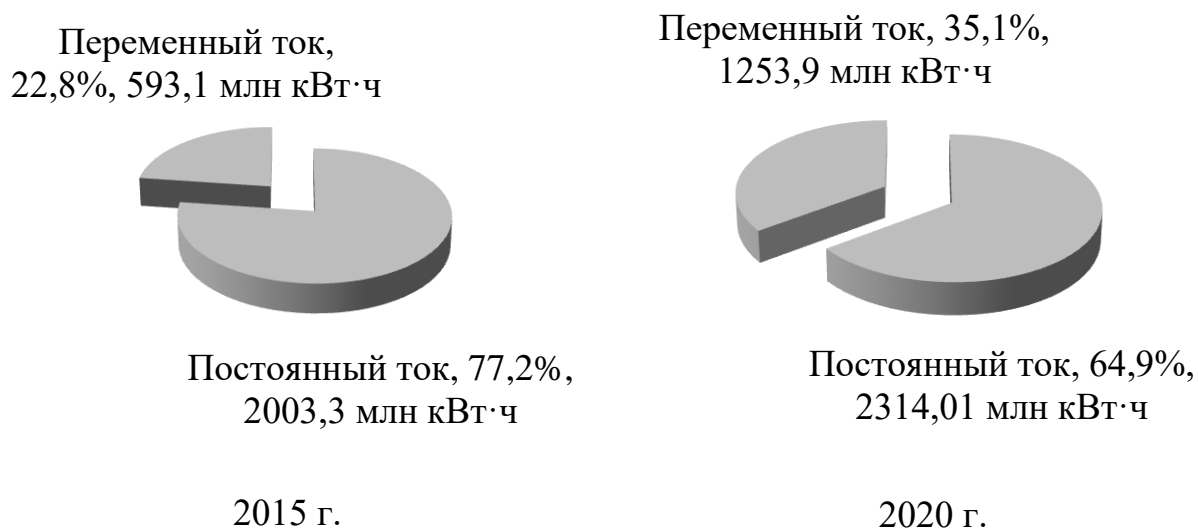


Рисунок 1.4 – Процентный состав потерь электрической энергии на тягу поездов ОАО «РЖД» по данным за 2015 и 2020 годы

Таким образом, ввиду наличия положительной динамики по изменению значения потерь электрической энергии на тягу поездов начиная с 2016 года, а так же ввиду большей доли фактических потерь на полигоне постоянного тока в сравнении с полигоном переменного тока, дальнейшие исследования по повышению эффективности работы электротехнических комплексов системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств, выполняемые в рамках настоящей работы, будут проводиться применительно к системе электроснабжения и локомотивам постоянного тока.

## 1.2 Электротехнический комплекс системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока

Для удобства анализа представим электротехнический комплекс системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока в виде фрагмента, имеющего упрощенную структурную схему, состоящую из идеальных электрических элементов, представленную на рисунке 1.5.

Ввиду того, что на практике в системе электроснабжения транспортных средств постоянного тока принимаются специальные меры, направленные на подавление высокочастотных составляющих напряжения контактной сети [27, 28], будем считать их влияние незначительным, что позволяет исключить из схемы элементы с реактивным сопротивлением, построив ее только на основе источников постоянного напряжения и активных сопротивлений, моделирующих расход электроэнергии на тепловые потери и полезную нагрузку.

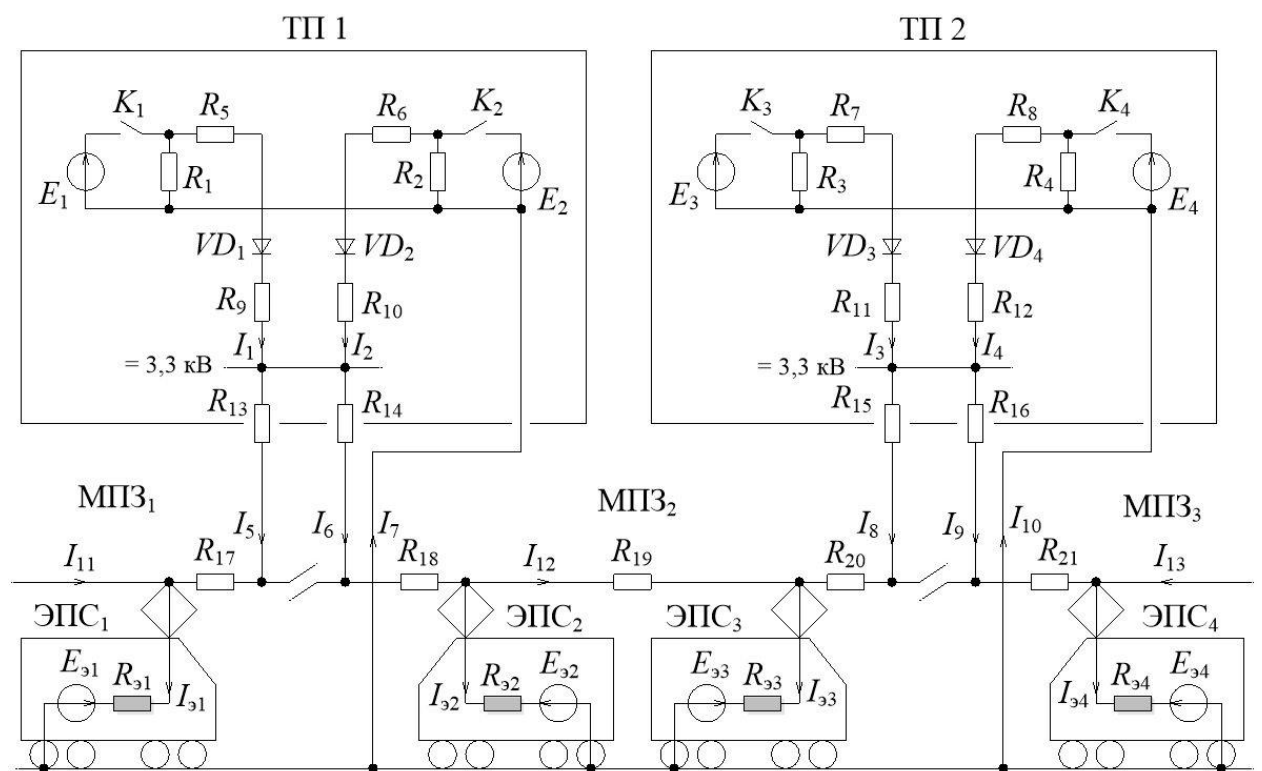


Рисунок 1.5 – Упрощенная структурная схема фрагмента электротехнического комплекса системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока, состоящая из идеальных элементов

В конструкции реальной контактной сети используются изоляторы, имеющие сравнительно низкие токи утечки [29], и, как следствие, низкие потери мощности на нагрев, несоизмеримые с мощностями, потребляемыми

электроподвижным составом [30], что позволяет не учитывать влияние потерь на изоляторах в общей картине потерь электроэнергии.

Фрагмент системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока, представленный на рисунке 1.5 состоит из двух тяговых подстанций (ТП) ТП1 и ТП2, питаемых ими трех межподстанционных зон МПЗ<sub>1</sub> – МПЗ<sub>3</sub>, и четырех единиц электроподвижного состава ЭПС<sub>1</sub> – ЭПС<sub>4</sub>, выполняющих перевозочную работу на этих зонах. Обе тяговые подстанции построены по одинаковой электрической схеме, и содержат по два преобразовательных агрегата, представленных источниками постоянного напряжения  $E_1 – E_4$  с номинальным значением 3,3 кВ, и диодами  $VD_1 – VD_4$ . Диоды в этой схеме необходимы для моделирования работы выпрямительных агрегатов и исключения протекания токов через источники напряжения  $E_1 – E_4$  в обратном направлении. Резисторы  $R_1 – R_4$ , включенные параллельно источникам, моделируют потери электроэнергии, возникающие в преобразовательных трансформаторах в режиме холостого хода. Резисторы  $R_5 – R_{12}$  включены последовательно с источниками напряжения и моделируют соответственно тепловые потери преобразовательных трансформаторов в режиме нагрузки и тепловые потери выпрямительных агрегатов. Активные сопротивления  $R_{13} – R_{16}$  отражают тепловые потери, возникающие в шинах 3,3 кВ тяговых подстанций и в соответствующих фидерах контактной сети. Потери на активном сопротивлении контактного провода и прочие потери в контактной сети, возникающие в процессе ее работы, представлены сопротивлениями  $R_{17} – R_{21}$ . Каждая из четырех единиц подвижного состава представлена источниками постоянного напряжения  $E_{\text{э}1} – E_{\text{э}4}$  и активными сопротивлениями  $R_{\text{э}1} – R_{\text{э}4}$ , соединенными последовательно и подключенными одним концом к контактному проводу, другим к рельсам. Такая схема полностью отражает работу локомотива в трех основных состояниях [31]:

- в режиме тяги, когда напряжение источников  $E_{\text{э}1} - E_{\text{э}4}$  равно нулю, а сопротивления  $R_{\text{э}1} - R_{\text{э}4}$ , имеют средние значения, обеспечивающие протекание тягового тока по направлению из контактной сети в электровоз;
- в режиме горячего простоя, когда напряжение источников  $E_{\text{э}1} - E_{\text{э}4}$  так же равно нулю, а сопротивления  $R_{\text{э}1} - R_{\text{э}4}$ , имеют высокие значения, обеспечивающие протекание сравнительно низкого тока горячего простоя так же из контактной сети в электровоз;
- в режиме рекуперативного торможения, когда напряжение источников  $E_{\text{э}1} - E_{\text{э}4}$  находится чуть выше обычного напряжения контактной сети, а сопротивления  $R_{\text{э}1} - R_{\text{э}4}$ , имеют низкие значения, обеспечивающие протекание тока рекуперативного торможения по направлению от электровоза в контактную сеть.

Если рассмотреть представленную схему с точки зрения электрической эффективности, то очевидно, что полезная работа совершается только энергией, выделяемой на сопротивлениях  $R_{\text{э}1} - R_{\text{э}4}$  в режимах тяги и горячего простоя, в то время как на всех остальных резисторах выделяется только энергия потерь. Поэтому, для повышения эффективности работы электротехнического комплекса системы электроснабжения транспортных средств, следует стремиться максимально увеличивать сопротивления  $R_1 - R_4$ , и максимально уменьшать сопротивления  $R_5 - R_{21}$ .

Эффективным режимом работы рассматриваемого электротехнического комплекса следует считать режим, при котором:

- сопротивления  $R_1 - R_4$  имеют максимально возможные значения;
- сопротивления  $R_5 - R_{21}$  всегда, а  $R_{\text{э}1} - R_{\text{э}4}$  в режиме рекуперативного торможения имеют минимально возможные значения;
- напряжения источников  $E_1 - E_4$  подобраны так, что все тяговые токи протекают по минимально возможным коротким путям.

Только в этом случае будет наблюдаться максимальное соотношение полезной мощности к мощности потерь, что обеспечит максимальную энергоэффективность технологических режимов работы рассматриваемого

электротехнического комплекса системы электроснабжения транспортных средств, включающего две тяговые подстанции.

Под внешними воздействиями на электротехнический комплекс системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока будем понимать любые воздействия электрической или неэлектрической природы, поступающие извне и изменяющие режимы его работы [32, 33].

### **1.3 Внешние воздействия и их влияние на эффективность работы электротехнического комплекса системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока**

#### **1.3.1 Изменение напряжения сети внешнего электроснабжения, или величины районной нагрузки**

В классическом случае под сетью внешнего электроснабжения принято понимать сеть, которая поставляет энергию на тяговую подстанцию [34]. Как правило, это трехфазная сеть напряжением 110 либо 220 кВ, напряжение которой поступает на силовые понижающие трансформаторы, находящиеся в составе оборудования тяговой подстанции, и формирующие выходное трехфазное напряжение значением 10 или 6 кВ. Это напряжение поступает на вход преобразовательных трансформаторов, формирующих напряжение значением 3,3 кВ для тяговых выпрямительных агрегатов и на трансформаторы районной нагрузки, формирующие напряжение значением 0,4 кВ, от которого питаются различные районные потребители. Как следует из работ [35, 36], любые изменения напряжения сети внешнего электроснабжения, либо колебания мощности, потребляемой районной нагрузкой, приводят к изменениям входного напряжения преобразовательных трансформаторов, и, как следствие, к изменению выходного напряжения выпрямительно-преобразовательных агрегатов,

подающих напряжение в контактную сеть. Анализ зарубежного научного опыта [37, 38] позволяет сделать аналогичные выводы.

Таким образом, влияние изменения напряжения сети внешнего электроснабжения, либо влияние изменения величины районной нагрузки приводит к изменению выходного напряжения источников  $E_1 - E_4$  как в большую, так и в меньшую сторону.

### **1.3.2 Изменение оперативной поездной обстановки**

Оперативная поездная обстановка включает в себя множество факторов [39] и может изменяться в различных направлениях [40], изменяя нагрузку на электротехнический комплекс системы электроснабжения транспортных средств. В частности, изменения тяговой нагрузки может быть обусловлено различными массами поездов, проходящих через межподстанционную зону за одни сутки [17, 41], изменениями в графике движения поездов, который вместо равномерной загрузки может состоять из отдельных пакетов, и продолжительных окон между ними [23, 42]. Так же на оперативную поездную обстановку влияет стиль вождения машинистов, производящих работу на зоне [43]. Они могут по разному осуществлять разгон, использовать либо не использовать рекуперативное торможение [44 – 48] взамен пневматического, могут по разному поддерживать необходимую скорость движения, либо изменением выбранной позиции контроллера машиниста [49], либо используя ослабление поля тяговых двигателей при неизменной позиции контроллера [50]. Так же в процессе движения могут случаться различные нештатные ситуации, приводящие к отклонениям от нормативного графика движения поездов [51]. Зарубежный опыт по оценке влияния поездной обстановки на энергоэффективность перевозочного процесса [52, 53] так же свидетельствует о его значительном влиянии на показатели энергетической эффективности. Применительно к схеме рисунка 1.5, любое изменение оперативной поездной обстановки приводит к

изменениям значений сопротивлений  $R_{31} - R_{34}$ ,  $R_{17} - R_{21}$ , и изменениям выходного напряжения источников  $E_{31} - E_{34}$ .

### **1.3.3 Изменение нормальных режимов работы со стороны энергодиспетчера**

В процессе работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств по сигналам энергодиспетчера может осуществляться как изменение электрических режимов работы оборудования [54], так и изменение схемы соединения отдельных элементов электротехнического комплекса [55]. Зарубежные электрические железные дороги так же используют режимы, при которых управление энергохозяйством осуществляется диспетчером [56, 57]. В частности, по сигналам диспетчера могут быть изменены режимы работы коммутационных аппаратов линейных устройств постов секционирования, пунктов параллельного соединения и секционных разъединителей контактной сети (условно не показанных на схеме рисунка 1.5), что не нарушит питание межподстанционной зоны, но может значительно изменить ее работу в электрическом плане. Применительно к схеме рисунка 1.5 это вызовет изменение сопротивления резисторов  $R_{17} - R_{21}$ . Кроме того, энергодиспетчер может подключать или отключать отдельные преобразовательные агрегаты тяговых подстанций, коммутируя высоковольтные выключатели  $K_1 - K_4$ , изменяя структуру схемы и вызывая тем самым как изменение выходного напряжения тяговых подстанций, так и их выходного сопротивления.

### **1.3.4 Возникновение вынужденных и аварийных режимов работы под влиянием внешних факторов**

При возникновении различных нештатных ситуаций, например таких, как короткие замыкания, обрывы контактного провода на



межподстанционной зоне и пр., под действием систем защиты и автоматики нормальные режимы работы оборудования изменяются на вынужденные или аварийные [58, 59]. При этом возможно изменение состояния и характеристик всех элементов схемы, включая источники  $E_{\text{э}1} - E_{\text{э}4}$  и сопротивления нагрузки  $R_{\text{н}1} - R_{\text{н}4}$  от электроподвижного состава. Зарубежный опыт изучения подобных ситуаций [60, 61] позволяет сделать аналогичные выводы.

### 1.3.5 Краткосрочное и долгосрочное влияние погодных условий

Атмосферные осадки, температура окружающей среды и прочие природные факторы так же оказывают влияние на состояние элементов системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств [62]. Резкие изменения погодных условий, такие как снег, дождь, понижение температуры способны вызвать обледенение контактного провода [63]. Повышенная влажность совместно с колебаниями температуры окружающего воздуха, периодически пересекающими нулевую отметку, в долгосрочной перспективе способны вызвать возникновение коррозионных явлений, приводящих к постепенному увеличению сопротивлений шин тяговых подстанций [64] и элементов контактной сети. Все это на рассматриваемой схеме приводит к увеличению значений «последовательных» сопротивлений  $R_5 - R_{16}, R_{17} - R_{21}$ .

В результате можно заключить, что любые внешние воздействия, не зависимо от природы их возникновения, приводят к изменениям характеристик всех элементов схемы рисунка 1.5 за исключением сопротивлений резисторов  $R_1 - R_4$ , включенных параллельно источникам  $E_1 - E_4$  и моделирующим потери электроэнергии холостого хода преобразовательных трансформаторов. Значения этих потерь почти

полностью определяется конструкцией трансформаторов и практически не зависит от влияния внешних воздействий [65].

Таким образом, можно утверждать, что возникновение любого из рассмотренных внешних воздействий или их сочетаний вызывает изменение электрических параметров электротехнического комплекса системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока, что нарушает оптимальный режим его работы [66].

Исследования, проведенные ОмГУПС по оценке потенциала повышения эффективности использования электроэнергии в системе электроснабжения транспортных средств постоянного тока [67, 68], показали, что во многих случаях режимы работы трансформаторного оборудования тяговых подстанций постоянного тока не соответствуют текущей тяговой электрической нагрузке, что вызывает необоснованное увеличение потерь электроэнергии на тягу поездов.

#### **1.4 Постановка цели и задач исследования**

Проблема снижения удельной энергоемкости перевозочного процесса в условиях непрерывного роста тарифов на электроэнергию и неопределенности с ожидаемыми объемами перевозочной работы, а, следовательно, с невозможностью прогнозировать себестоимость и доходность перевозок, получает в ОАО «Российские железные дороги» дополнительную актуальность.

В течение последних лет основными направлениями работ по снижению энергоемкости и стоимости перевозок являлись приобретение новых более мощных электровозов, позволяющих увеличить массу составов с 4000 – 5600 т до 6300 – 7100 т, внедрение систем автоматического управления движением поездов, организация пакетного движения, в том числе с применением тяжеловесных и длинносоставных поездов. Реализация перечисленных мероприятий привела к существенному увеличению нагрузки

на электротехнические комплексы систем электроснабжения транспортных средств железных дорог. При этом финансирование данной отрасли обеспечивало лишь поддержание ее текущего технического состояния без возможности существенного усиления, что привело к исчерпанию резервов увеличения пропускной способности железных дорог.

Таким образом, одним из ключевых направлений обеспечения эффективной перевозочной деятельности железнодорожного транспорта является поддержание эффективной работоспособности электротехнических комплексов тяговых подстанций, как ключевого элемента системы электроснабжения транспортных средств железных дорог, за счет снижения потерь и повышения ресурса трансформаторного и преобразовательного оборудования.

На основании изложенного целью настоящей диссертационной работы определено повышение эффективности функционирования электротехнических комплексов резервирования мощности в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока за счет совершенствования технологических режимов работы тяговых подстанций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выполнить анализ влияния внешних воздействий на работоспособность электротехнических комплексов тяговых подстанций в системе электроснабжения транспортных средств постоянного тока и предложить способ повышения эффективности их функционирования;
- разработать аппаратную часть системы резервирования мощности для тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами;
- разработать управляющий алгоритм, позволяющий реализовать технологические режимы эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в системах электроснабжения железнодорожных транспортных средств;

– разработать методику выбора мест установки автоматических систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока для повышения эффективности функционирования системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств;

– выполнить практическую апробацию разработанных технических и технологических решений по эффективному функционированию систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в условиях эксплуатации.

## **2. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **2.1 Влияние технологических режимов тяговых подстанций на эффективность работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока**

Обеспечение эффективной работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств, применительно к режимам работы входящих в нее тяговых подстанций может осуществляться в различных направлениях [69].

Известен подход [70], использующий систему автоматизированного мониторинга и учета электроэнергии (АСМУЭ), которая обеспечивает синхронные электрические измерения в различных точках тяговых подстанций и электроподвижного состава [71], позволяя определять показатели энергетической эффективности, сравнивать их с расчетными, и в случае их расхождения локализовывать участки с повышенным удельным расходом и выдавать рекомендации по устранению обнаруженных расхождений [72]. При этом сама АСМУЭ не повышает энергоэффективность напрямую, а участвует в этом косвенно, предоставляя уникальную информацию, на основе которой можно выполнять необходимые мероприятия по совершенствованию системы тягового электроснабжения [73 – 75].

Применительно к рисунку 1.5 такой «алгоритм повышения эффективности» выглядит следующим образом:

- постоянный контроль напряжений всех источников и значений сопротивлений всех резисторов в схеме;
- расчет оптимальных значений этих напряжений и сопротивлений исходя из текущей ситуации;
- сравнение полученных значений с их рассчитанными оптимальными значениями;
- формирование, в случае необходимости, рекомендаций по изменению режимов работы или состава оборудования системы тягового электроснабжения в зависимости от значения отклонения измеренных величин от их расчетных аналогов;
- практическая реализация сформированных рекомендаций.

Поскольку многие из «последовательных» сопротивлений схемы распределены на значительных расстояниях, и их непосредственное измерение является сложной технической задачей, целесообразно определять их значения аналитическим методом на основе значений токов и напряжений, измерение которых осуществляется значительно проще. Измерения необходимо производить на выходах всех выпрямительных агрегатов и всех фидерах контактной сети каждой тяговой подстанции, а также на всех единицах электроподвижного состава, осуществляющего перевозочную работу на питаемых зонах [76]. При этом измерения обязательно должны быть синхронизированы во времени, а для каждой пары значений тока и напряжения ЭПС, кроме всего прочего, необходимо фиксировать текущие географические координаты. При выполнении всех этих условий появляется возможность получения набора данных, на основе которых можно рассчитать как текущие значения необходимых сопротивлений, так и их оптимальные значения.

Внедрение полноценной АСМУЭ является сложной и дорогостоящей задачей. Поэтому в разное время предпринимались попытки реализовать хотя бы некоторые функции АСМУЭ посредством уже имеющихся приборов учета электроэнергии [77 – 79]. Все приборы учета, использующиеся в

настоящее время можно условно разделить по месту их установки – приборы тяговых подстанций и приборы учета электроподвижного состава. Приборы учета тяговых подстанций устанавливаются на входах понижающих трансформаторов по переменному напряжению 110 кВ, часть из них, устанавливается на входах преобразовательных трансформаторов по переменному напряжению 10 либо 6 кВ, и последняя часть из них устанавливается на электроподвижном составе и производят измерения на постоянном напряжении контактной сети значением 3,3 кВ. При этом первые две группы приборов учета подключены к автоматизированной системе комплексного учета электроэнергии АСКУЭ, позволяющей осуществлять централизованный сбор и обработку измеренных данных. Последняя группа приборов в своем большинстве представляет собой устаревшие счетчики электроэнергии постоянного тока сравнительно низкого класса точности 2.0, не имеющих системы синхронизации точного времени и фиксации географических координат [80]. Учет электроэнергии постоянного тока на выходах выпрямительных агрегатов и в ячейках фидеров контактной сети тяговых подстанций в настоящее время не ведется.

Таким образом, система учета электроэнергии, применяемая в настоящее время в составе системы тягового электроснабжения не производит измерения токов и напряжений на выходах выпрямительных агрегатов и фидерах контактной сети тяговых подстанций, не имеет технических возможностей синхронизации моментов измерения всех измерительных приборов и не способна фиксировать текущие географические координаты электроподвижного состава в моменты измерения, что делает ее непригодной в качестве средства для реализации «алгоритма повышения эффективности», представленного ранее.

Внедрение АСМУЭ на тяговых подстанциях и электроподвижном составе позволяет получить очень мощный инструмент для улучшения работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств,

но при этом представляет собой достаточно сложную и дорогостоящую техническую задачу.

Известен способ повышения эффективности системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств путем внедрения электротехнического комплекса автоматического регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций (БАРН – блок автоматического регулирования напряжения) [81]. В процессе работы системы тягового электроснабжения возможна ситуация, при которой происходят перетоки электроэнергии между межподстанционными зонами [82]. В случае, когда локомотив ЭПС<sub>4</sub> на рисунке 1.5 потребляет повышенный ток, напряжение на шинах тяговой подстанции ТП2 снижается настолько, что ЭПС<sub>4</sub> начинает получать питание от тяговой подстанции ТП1. При этом, помимо резисторов  $R_{16}$ ,  $R_{21}$  тяговый ток дополнительно будет протекать по сопротивлениям  $R_{14}$ ,  $R_{18} - R_{20}$ ,  $R_{15}$ , создавая повышенные тепловые потери. Подобного режима можно было бы избежать повысив выходное напряжение ТП2, причем это следует делать в автоматическом режиме в зависимости от поездной ситуации.

Для реализации возможности автоматической регулировки выходного напряжения тяговая подстанция должна быть оборудована специальной системой, одним из вариантов которой может быть БАРН. При этом подключение трансформаторного агрегата на существующих тяговых подстанциях (с распределительным устройством 10 кВ или с питающим напряжением 35 кВ) выполняется путем замены существующих преобразовательных трансформаторов на преобразовательные трансформаторные агрегаты (преобразовательный трансформатор ТРДП-16000/10 (35) и управляемый реактор РТДП-6300/10 (35)) для двенадцатипульсовых выпрямительных блоков [83–85].

Известен подход к повышению эффективности системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока, заключающийся в использовании накопителей электрической энергии [86]. В общем случае этот метод позволяет накапливать электроэнергию в моменты, когда ее



расход на тягу минимален, либо во время рекуперативного торможения на межподстанционной зоне, и отдавать ее потребителю при возникновении большой тяговой нагрузки. Это позволяет передать в тяговую нагрузку высокую пиковую мощность, что может обеспечить пропуск тяжеловесных поездов там, где без накопителей это было бы невозможно [87, 88]. Системы накопления электроэнергии могут устанавливаться на тяговых подстанциях, на электроподвижном составе, и применяться в виде отдельно стоящего оборудования [89]. Определение энергоемкости и мощности в системах тягового электроснабжения и на электроподвижном составе выполняется на основе тяговых расчетов, формирующих график электрической нагрузки тяговых подстанций. Для их определения исходят из графика нагрузки электроподвижного состава при следовании по участку или тяговых расчетов на основе заданных условий пропуска поездов по участку железной дороги. По аналогии с тяговыми подстанциями расчетным способом определяется график электрической нагрузки системы накопления электроэнергии.

Условия работы и параметры систем накопления электроэнергии различны для электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения. Варианты размещения систем накопления электроэнергии на электроподвижном составе, в системе тягового электроснабжения или при комбинации указанных вариантов являются конкурирующими. Необходимость выбора того или иного варианта требует выработки критериев и целевой функции для поиска оптимального решения.

Существующие исследования отечественных [90] и зарубежных авторов [91, 92], показывают, что предпочтительным вариантом является размещение систем накопления электроэнергии на борту электроподвижного состава, однако, количество систем накопления электроэнергии и суммарная энергоемкость оказывается достаточно большими по сравнению со стационарным размещением накопителей в системе тягового электроснабжения [93].

Исследования в области выбора видов накопителей привели к появлению гибридных устройств, использующих аккумуляторные батареи и суперконденсаторы, в транспортных системах [94]. В настоящее время существует ряд различных подходов к определению параметров систем накопления электроэнергии, выбору места их размещения, разрабатываемых как зарубежными [95 – 97], так и отечественными исследователями [98], основанных на различных моделях источников энергии [99]. Исследования в области применения систем накопления для тяговой энергетики железнодорожного транспорта показывают имеющийся технический результат, заключающийся в повышении энергетической эффективности и пропускной способности на межподстанционных зонах.

## **2.2 Автоматическое резервирование мощности тяговых подстанций как способ повышения эффективности работы системы электроснабжения транспортных средств**

Одним из способов управления эффективностью системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств является внедрение электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций [100]. Суть этого способа заключается в том, что при повышении нагрузки дополнительно подключаются один или несколько резервных преобразовательных агрегатов, осуществляющих работу в параллель с основным [101, 102]. При этом снижается выходное сопротивление тяговой подстанции, что позволяет отдавать в нагрузку большую мощность. При последующем уменьшении тяговой нагрузки ниже определенного уровня, работа нескольких агрегатов в параллель перестает быть необходимой и становится неэффективной ввиду высоких потерь холостого хода преобразовательных трансформаторов (потери оцениваются в пределах 3 % от объема переработки электроэнергии) [103]. В этом случае

резервные преобразовательные агрегаты отключаются, оставляя в работе только основной агрегат. Таким образом, работа системы управления заключается в постоянном анализе тока каждого преобразовательного агрегата и формировании на их основе сигналов управления их штатными высоковольтными выключателями ( $K_1 - K_4$  на рисунке 1.5) [104]. При этом вся система может представлять собой недорогой блок управления небольших размеров с набором датчиков, подключаемый к вторичным цепям тяговой подстанции, что значительно упрощает и удешевляет процесс реализации рассматриваемого способа.

Для ТП1 (рисунок 1.5) система автоматического резервирования мощности должна анализировать значения суммы токов  $I_1$  и  $I_2$ , на основании чего коммутировать ключи  $K_1, K_2$ , вводя в работу один или два источника напряжения  $E_1, E_2$ . Таким образом, в режиме малых нагрузок снижается мощность потерь, выделяемых на сопротивлениях  $R_1, R_2$ , поскольку работает один преобразовательный агрегат вместо двух, в то время как в режиме больших нагрузок снижается мощность потерь, выделяемых на сопротивлениях  $R_5 - R_{12}$ , так как при одновременной работе двух агрегатов эти сопротивления будут включены параллельно и их суммарное значение будет ниже. При этом, при практической реализации подобных систем, необходимо учитывать что в момент коммутации высоковольтных выключателей и подключения первичных обмоток преобразовательных трансформаторов к сети 10 (6) кВ, практически всегда происходят броски тока, вызывающие кратковременные просадки напряжения, которые могут превышать допустимые значения и вызывать сбои оборудования, получающего питания от этой же сети 10 (6) кВ [105 – 107]. Для борьбы с этим явлением могут применяться специальные технические решения [108], которые, при работе системы резервирования мощности необходимо использовать в обязательном порядке.

Упрощенная структурная схема типовой тяговой подстанции с двумя преобразовательными агрегатами, на которой отражены элементы

коммутации преобразовательных агрегатов с цепями управления и контроля, представлена на рисунке 2.1.

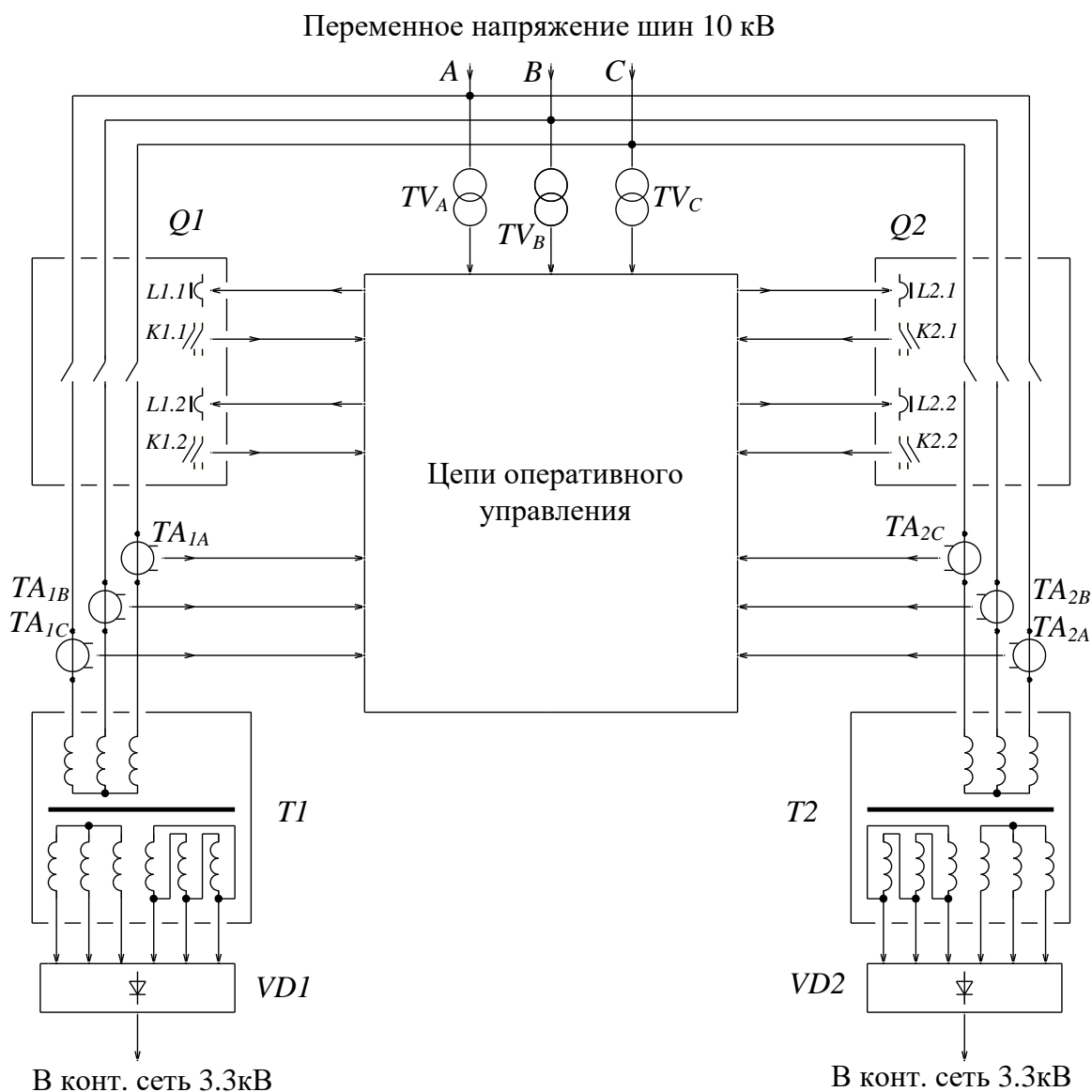


Рисунок 2.1 – Структурная схема тяговой подстанции с двумя преобразовательными агрегатами.

Переменное напряжение шин 10 кВ поступает на высоковольтные выключатели  $Q1$ ,  $Q2$ , а так же на трансформаторы напряжения  $TV_A$ ,  $TV_B$ ,  $TV_C$ , которые формируют набор вторичных напряжений, поступающих в цепи оперативного управления подстанции, где используются для работы схем блокировок и защит. Следует сказать, что за исключением трансформаторов

напряжения, структурная схема имеет симметричный вид, поэтому далее будет рассмотрена только левая часть схемы, относящаяся к первому преобразовательному агрегату, для второго преобразовательного агрегата все выглядит аналогично. Выходы высоковольтного выключателя  $Q1$  через трансформаторы тока  $TA_{IA}$ ,  $TA_{IB}$ ,  $TA_{IC}$  подключены к первичным обмоткам преобразовательного трансформатора  $T1$ , вторичные обмотки которого подключены к входам выпрямителя  $VD1$ , питающего контактную сеть. Выходные сигналы трансформаторов тока  $TA_{IA}$ ,  $TA_{IB}$ ,  $TA_{IC}$  поступают в цепи оперативного управления подстанции, где, так же как и сигналы трансформаторов напряжения, используются для работы схем блокировок и защит. Коммутация высоковольтного выключателя  $Q1$  осуществляется подачей напряжения на его управляющие соленоиды, один из которых,  $L1.1$ , обеспечивает отключение, а второй,  $L1.2$ , включение выключателя. Контроль текущего состояния высоковольтного выключателя обеспечивается посредством набора блок-контактов  $K1.1$  и  $K1.2$ , причем контакты  $K1.1$  замкнуты когда  $Q1$  отключен, и разомкнуты когда он включен, а контакты  $K1.2$  соответственно наоборот. Формирование напряжений для управляющих соленоидов и анализ состояния блок-контактов высоковольтного выключателя так же выполняется цепями оперативного управления тяговой подстанцией.

Несмотря на то, что большинство современных тяговых подстанций постоянного тока содержат микропроцессорные системы управления, способные выполнять функции системы резервирования мощности, в ОАО «РЖД» эксплуатируется большое количество физически и морально устаревших тяговых подстанций, либо не имеющих подобных систем, либо имеющих устаревшие системы, не способные реализовать необходимые функции. Как правило это системы, построенные на релейной логике, и не способные реализовать эффективные управляющие алгоритмы. При этом практически везде отсутствуют технические решения для исключения просадок напряжения в процессе высоковольтных коммутаций.

Подавляющее большинство этих систем создавались персоналом дистанций электроснабжения на основе интуитивного подхода, без глубокой научной проработки, и не описаны в научной литературе. Кроме того, практически во всех известных конструкциях этих систем вместо прямого измерения постоянного тока на выходах преобразовательных агрегатов, производится его расчет на основе сигналов штатных трансформаторов тока входных обмоток преобразовательных трансформаторов ( $TA_{IA}$ ,  $TA_{IB}$ ,  $TA_{IC}$ ), что не позволяет получить значение выходного тока агрегата с высокой точностью. Аппаратная часть этих систем реализована на основе релейной логики с элементами задержек, что принципиально не позволяет реализовать современный эффективный алгоритм на основе математических вычислений.

На основе изложенного предлагается усовершенствованный способ повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов управления технологическими режимами автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока с использованием прямого измерения выходного тока каждого преобразовательного агрегата и заменой релейной логики на микропроцессорное вычислительное устройство с математическим управляющим алгоритмом.

Поскольку оснащение тяговых подстанций современными системами резервирования мощности является актуальной задачей, которая, к тому же, требует меньших затрат в сравнении с остальными рассмотренными способами, в качестве способа повышения эффективности системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока посредством автоматического управления режимами работы тяговых подстанций был выбран усовершенствованный способ автоматического резервирования их выходной мощности.

## **2.3 Разработка технических решений электротехнического комплекса автоматического резервирования мощности тяговых подстанций**

При построении электротехнического комплекса резервирования мощности следует принимать во внимание, что система обязательно должна содержать в своем составе техническое решение, исключающее возникновение бросков тока перемagnetивания и просадок питающего напряжения в моменты коммутации преобразовательных агрегатов выше значения, допускаемого ГОСТ 13109-97. Так же система должна обеспечивать контроль напряжения на шинах 3,3 кВ тяговой подстанции, а так же контроль переменного тока на входах преобразовательных трансформаторов или постоянного тока на выходах выпрямительных агрегатов. При отключении питания системы резервирования, ее цепи не должны оказывать влияния на функционирование цепей оперативного управления подстанции и их работоспособность не должна нарушаться.

Анализ известных способов снижения бросков тока при включении трехфазных трансформаторов [109] показал, что большинство из них либо не могут быть применены на тяговых подстанциях системы электроснабжения железнодорожного транспорта, либо их применение является экономически нецелесообразным.

Известен способ снижения броска тока включения трансформатора, основанный на фиксированном времени задержки на отключение с последующим включением с привязкой к кривой питающего напряжения (синхронное включение-выключение) [110]. Этот способ достаточно эффективен, но он вызывает задержку отключения трансформатора в пределах одного периода питающего напряжения. Применительно к тяговым подстанциям это является недопустимым, т.к. в случае срабатывания защиты от короткого замыкания в контактной сети, на шинах 3,3 кВ подстанции, или в преобразовательном агрегате, задержка отключения преобразовательного

трансформатора на значение до 20 мс может иметь катастрофические последствия.

Намного лучшим вариантом снижения броска тока включения преобразовательного трансформатора, применительно к тяговым подстанциям, является способ, заключающийся в фиксировании значения фазы синусоиды питающего напряжения в момент выключения трансформатора с последующим включением трансформатора в момент времени, когда фаза равна зафиксированному значению (синхронное включение) [111]. При реализации такого способа отключение трансформатора может происходить мгновенно в произвольный момент времени, что исключает возникновение недопустимых задержек на отключение, а включение, в свою очередь, будет происходить с задержкой в пределах одного периода питающего напряжения, подстраиваясь под требуемое значение его фазы. Задержка включения преобразовательного трансформатора в пределах 20 мс на практике никак не влияет на функционирование подстанции, поэтому такой метод снижения броска тока включения можно использовать при проектировании системы резервирования мощности тяговой подстанции.

Устройством, реализующим рассматриваемый способ коммутации, является устройство синхронного включения тягового трансформатора (УСВТ) [108, 112], что позволяет использовать эту конструкцию в качестве основы при создании аналогичного устройства для работы в составе системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока.

Разработанная аппаратная часть системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока представляет собой набор электрических модулей, имеющих электрические соединения между собой, а так же набор клемм для соединения с цепями оперативного управления тяговой подстанции. Структурная схема блока



управления разработанной системы резервирования представлена на рисунке 2.2.

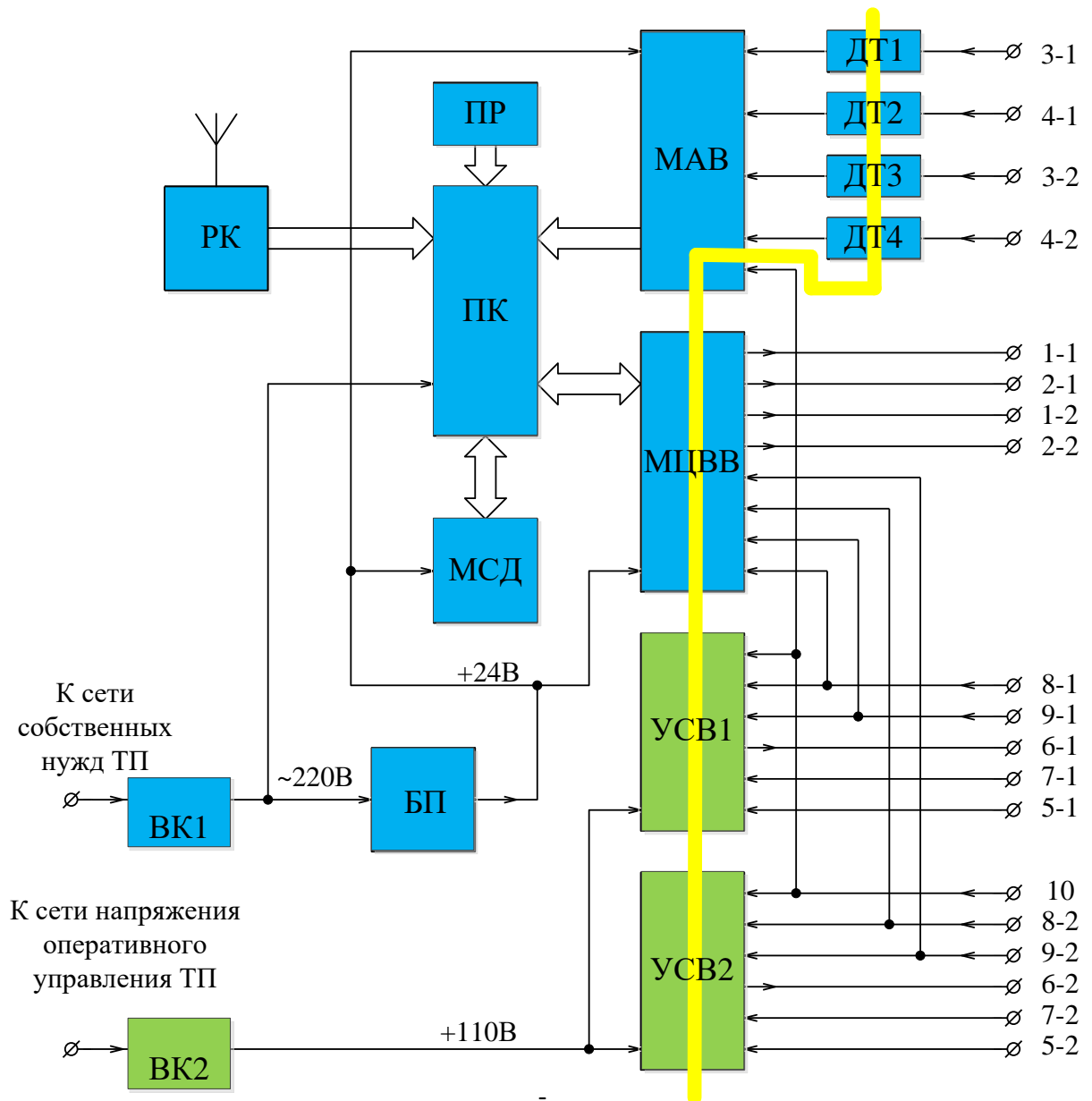


Рисунок 2.2 – Структурная схема блока управления системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока

Разработанная система резервирования мощности тяговой подстанции состоит из двух отдельных подсистем: подсистемы управления (ПУ), блоки которой на рисунке 2.2 выделены синим цветом и подсистемы синхронного

включения агрегатов (ПСВА), блоки которой имеют зеленый цвет. Эти подсистемы не имеют общей гальванической связи, питаются от разных питающих сетей и выполняют разные функции.

ПСВА обеспечивает синхронное включение каждого из двух преобразовательных агрегатов, состоит из двух отдельных устройств синхронного включения УСВ1 и УСВ2, имеющих одинаковую конструкцию, аналогичную конструкции устройства синхронного включения трансформаторов [108], и соединяется с цепями подстанции посредством набора клемм 5-1...9-1, 5-2...9-2 и 10 соответственно. Питание устройств обеспечивается от сети постоянного напряжения оперативного управления тяговой подстанции значением 110 В через автоматический выключатель ВК2.

Подсистема управления анализирует входные токи преобразовательных трансформаторов и на основе информации о текущем режиме работы, состояния блок-контактов высоковольтного выключателя и в соответствии с заложенным управляющим алгоритмом формирует сигналы на включение и отключение резервных преобразовательных агрегатов.

На наборы клемм 3-1, 4-1, 3-2, 4-2 поступают сигналы, пропорциональные значениям входных токов преобразовательных трансформаторов, которые обрабатываются датчиками тока ДТ1–ДТ4 и далее поступают на входы модуля аналогового ввода (МАН), обеспечивающего их измерение и передачу в программируемый контроллер ПК. В случае невозможности подключения к вторичным цепям трансформаторов тока, используются беспроводные датчики выходного тока преобразовательных агрегатов, установленных на их выходах, и передающие радиосигнал, принимаемый блоком радиоканала РК. В качестве программируемого контроллера использован стандартный программируемый логический контроллер «ОВЕН ПЛК-73». Для измерения токов трех фаз используется по два датчика ДТ, при этом токи двух фаз измеряются непосредственно, а третий вычисляется на основе известных двух. Кроме сигналов тока, МАН

производит измерение входного напряжения преобразовательного трансформатора, поступающего на набор клемм 10, информация о котором так же поступает в программируемый контроллер. Модуль цифрового ввода-вывода (МЦВВ) обеспечивает анализ состояния блок-контактов высоковольтных выключателей, поступающих на клеммы 8-1, 9-1, 8-2, 9-2 блока управления, передавая полученную информацию в ПК. Кроме того, на основе сигналов, полученных от ПК, модуль цифрового ввода-вывода формирует управляющие сигналы о включении и выключении преобразовательных агрегатов, которые поступают в цепи оперативного управления подстанции через наборы клемм 1-1, 2-1, 1-2, 2-2. Текущий режим работы системы резервирования задается переключателем ПР, имеющим три состояния: «ПВ1 основной», «Откл.», «ПВ2 основной». Согласно названию состояний, этот переключатель позволяет определять, который из преобразовательных агрегатов будет выполнять функции основного агрегата. В процессе работы, для равномерного износа высоковольтных выключателей, персоналу необходимо производить изменение режимов работы не реже одного раза в месяц. Выходной сигнал переключателя поступает напрямую в программируемый контроллер. В качестве регистратора, фиксирующего информацию о текущем состоянии системы резервирования, включая электрические параметры – токи и напряжения, с частотой не реже одного раза в секунду, использован стандартный модуль сбора данных (МСД) «ОВЕН МСД-200», подключенный к ПК посредством протокола передачи данных Modbus. Питание ПК обеспечивается от сети собственных нужд тяговой подстанции через автоматический выключатель ВК1. Эта же сеть питает блок питания (БП), формирующий постоянное напряжение значением 24 В, питающее все остальные модули подсистемы управления за исключением ДТ1–ДТ4.

Гальваническая развязка всех входных и выходных сигналов обеспечивается внутри модулей УСВ1, УСВ2, МЦВВ, ДТ1–ДТ4 посредством использования оптотранзисторных сборок, трансформаторов,

электромагнитных реле и условно изображена на рисунке линией желтого цвета. Для приема сигналов датчиков напряжения шин 3,3 кВ и тока фидеров контактной сети в состав подсистемы управления введен модуль радиосвязи РК, подключенный к программируемому контроллеру посредством протокола передачи данных Modbus.

Структурная схема беспроводного датчика постоянного преобразовательного агрегата совместно с элементами тяговой подстанции представлена на рисунке 2.3. Переменное напряжение, формируемое тяговым трансформатором, условно обозначенным как  $E_1$ , поступает на выпрямительный агрегат (ВА), где оно выпрямляется и далее постоянного напряжения номиналом 3.3 кВ подается в высоковольтную ячейку преобразовательного агрегата и через быстродействующий выключатель (БВ) и токовый шунт  $R_{ш}$  поступает на сборные шины тяговой подстанции. Беспроводной датчик тока (ДТ) монтируется в высоковольтной ячейке выпрямительного агрегата, состоит из микропроцессорного измерителя (МИ), антенны (А), источника питания (ИП) и подключается к электрическим цепям подстанции в трех точках 1-3. Сигнал выходного тока выпрямительного преобразователя снимается с токового шунта  $R_{ш}$ , измеряется посредством микропроцессорного измерителя и передается по радиоканалу через антенну А.

Все составные части электротехнического комплекса резервирования мощности можно реализовать посредством стандартных элементов за исключением источника питания датчика ИП, разработка которого представляет сложную техническую задачу [113].

Значение напряжения на шинах тяговых подстанций и в контактной сети железных дорог постоянного тока ОАО «РЖД» регламентируется рядом нормативных документов [114–116]. Диапазоны значений напряжения, установленные согласно этим документам для шин тяговых подстанций и токоприемников электроподвижного состава, представлены в таблице 2.1.

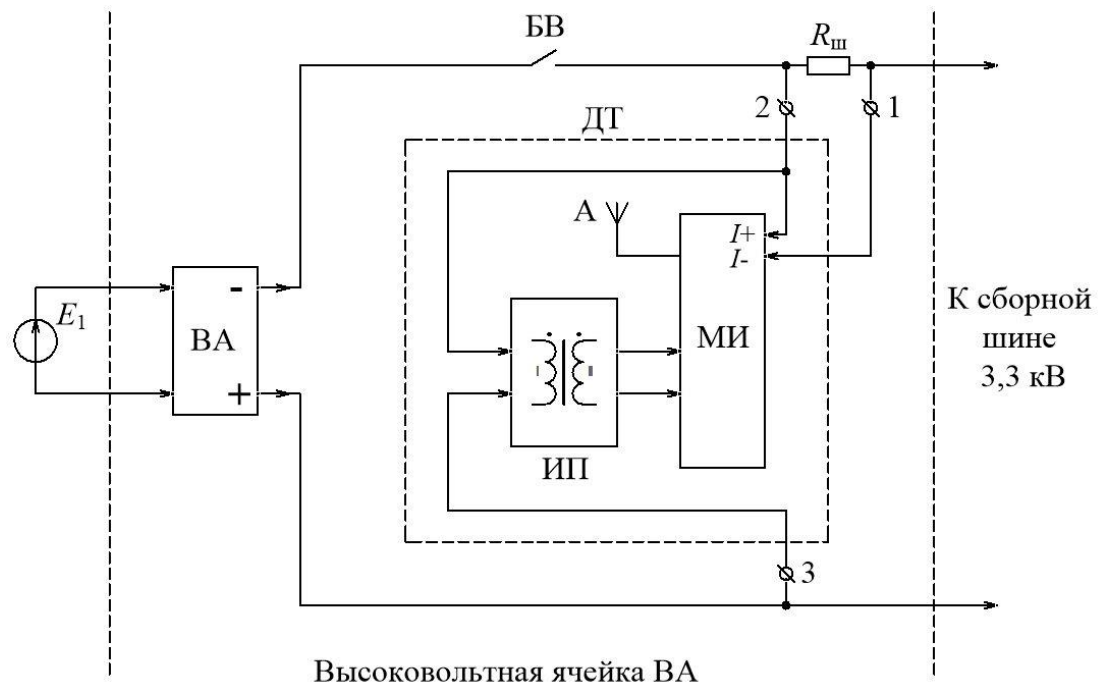


Рисунок 2.3 – Структурная схема беспроводного датчика выходного тока преобразовательного агрегата совместно с элементами тяговой подстанции

Таблица 2.1

Напряжение в системе тягового электроснабжения постоянного тока  
согласно нормативным документам

Напряжение в системе тягового электроснабжения постоянного тока, В					
На шинах тяговой подстанции			На токоприемнике электроподвижного состава		
Наимень- шее	Номиналь- ное	Наиболь- шее	Наимень- шее	Номиналь- ное	Наиболь- шее
2900	3300	3850	2200	3000	3850

На практике значения напряжения в контактной сети может сильно отличаться от регламентированных значений [117], поэтому для создания требований к диапазону входного напряжения источника питания, работающего от тяговой сети (ИПТС), способного питаться от постоянной

составляющей напряжения шин тяговой подстанции и контактной сети, используем исходные данные по входному постоянному напряжению, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2

## Исходные данные по напряжению для проектирования ИПТС

Режим работы	Продолжительность работы	Значение входного напряжения, кВ
Номинальный	бесконечно	2,0 – 4,1
Кратковременный	до 1 мин	4,1– 4,5
Импульсный	до 0,2 с.	4,5– 9,2

Согласно таблице 2.2, ИПТС должен обеспечивать работу в трех основных режимах: номинальном, кратковременном и импульсном. Номинальный режим – это основной режим работы, в котором источник должен сохранять работоспособность бесконечно долго. В кратковременном режиме ИПТС должен обеспечивать работоспособность не менее одной минуты, в импульсном не менее двух десятых секунды соответственно. Современная элементная база не позволяет создавать источники со столь высоким входным напряжением, что требует использование специальных схемотехнических решений.

Одним из способов, позволяющих обойти ограничение по входному напряжению современной элементной базы при построении ИПТС, может быть метод, при котором высокое напряжение сначала понижается, и только потом подается на вход источника питания. В этом случае источник питания можно было бы разработать на имеющейся элементной базе и его создание не представляло бы технических трудностей. В ходе анализа научно-технической литературы и патентного поиска удалось установить существование единственного решения, использующего представленный

подход, реализованный в патенте РФ №19327 «Счетчик электрической энергии постоянного тока для подвижного состава железнодорожного транспорта» [118], структурно-функциональная схема которого представлена на рисунке. 2.4.

Здесь устройство содержит измеритель 1, первый вход напряжения которого подключен к первой шине 2 контактной сети со стороны генератора непосредственно, второй вход напряжения подключен ко второй шине 3 контактной сети через высоковольтный делитель напряжения 4, а входы тока подключены к выходу измерительного шунта 5, включенному в разрыв провода 2, и импульсный преобразователь постоянного напряжения в постоянное 6 с гальванической развязкой, выходы которого соединены с шинами питания измерителя 1, делитель напряжения 7, состоящий из последовательно включенных первого 8 и второго 9 плеч, подключенных к первой 2 и второй 3 шинам соответственно, мостовой выпрямитель 10, входы которого подключены параллельно первому плечу 8 делителя напряжения 7, а выходы соединены с входами преобразователя напряжения 6, и конденсатор 11, подключенный параллельно выходу мостового выпрямителя 10.

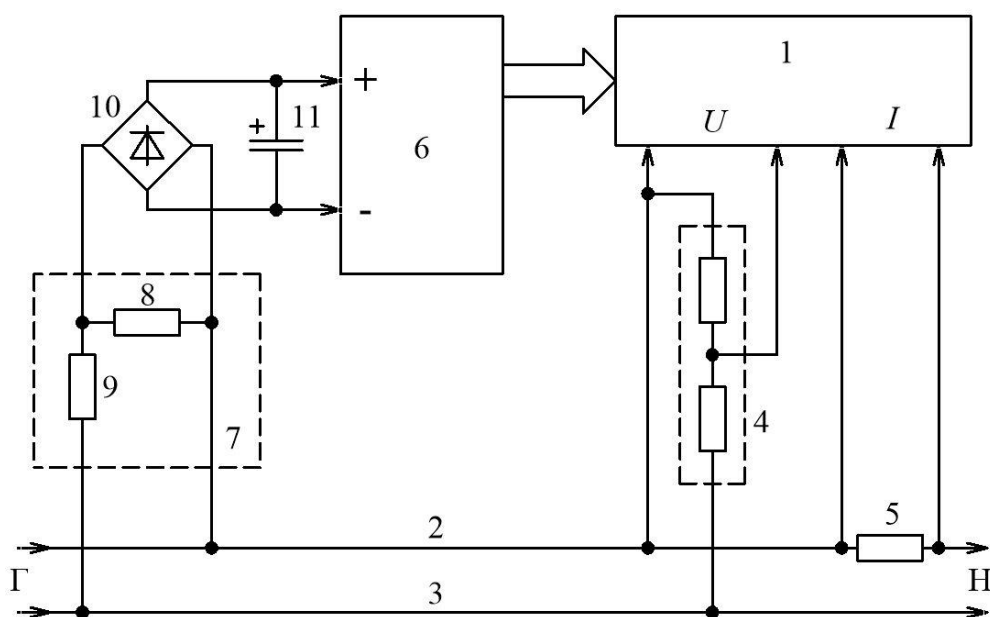


Рисунок 2.4 – Структурно-функциональная схема устройства патента РФ №19327

В этом устройстве в качестве преобразователя напряжения используется обычный импульсный источник питания, рассчитанный на работу от переменного напряжения значением 220 В промышленной частоты, а его входное напряжение формируется из напряжения контактной сети при помощи обычного резистивного делителя, понижающего напряжение контактной сети до уровня в несколько сотен вольт. При этом, как сказано в описании к патенту, в качестве первого плеча этого делителя может быть использован как резистор, так и стабилитрон.

К достоинствам представленного решения можно отнести необходимость использования только одного высоковольтного элемента в конструкции, а именно второго плеча 9 делителя напряжения 7. Именно на этом элементе падает большая часть высокого входного напряжения, благодаря чему после него работа остальной схемы (мостового выпрямителя 10, конденсатора 11 и преобразователя напряжения 6) происходит на сравнительно низком постоянном напряжении значением порядка трех сотен вольт. К следующему достоинству решения можно отнести построение прибора таким образом, что входные цепи измерителя 1 и правый вывод первого плеча 8 находятся под одинаковым потенциалом напряжения. Это значительно упрощает требования к показателям электрической прочности гальванической изоляции, обеспечиваемой преобразователем напряжения 6, которые могут соответствовать аналогичным требованиям для обычных сетевых источников питания. В противном случае, электрическая прочность гальванической изоляции должна была бы удовлетворять отраслевым требованиям к изоляторам контактной сети постоянного тока напряжением 3,3 кВ, которые обязаны выдерживать испытательное напряжение промышленной частоты значением 15 кВ в течение одной минуты. Выполнение отраслевых требований заставило бы применять изоляционные элементы, имеющие сравнительно большие размеры и массу, что повлекло бы увеличение размеров и массы всего источника, и, как следствие, всего устройства, в котором он применяется.



К недостаткам представленного решения можно отнести низкий коэффициент полезного действия источника питания. Это является обратной стороной его достоинств и обусловлено сравнительно низким значением напряжения, на котором происходит преобразование электрической энергии. В частности, если принять входное напряжение делителя напряжения 7 равным стандартным для контактной сети 3,3 кВ, а входное напряжение импульсного преобразователя 6 равным 300 В, можно обнаружить, что входное напряжение понижается более чем в десять раз при помощи обычных линейных элементов делителя 7. При этом входные токи делителя 7 и входные токи преобразователя 6 соизмеримы, что позволяет сделать вывод о том, что большая часть энергии, поступающей на вход, будет рассеиваться в виде тепла на элементах делителя 7, а значение коэффициента полезного действия рассматриваемого решения будет менее 10%. На практике такой невысокий КПД может оказаться вполне приемлемым только если мощность, потребляемая измерителем от источника питания, будет невелика. В этом случае, даже при низком КПД источника, уровень тепловых потерь может быть небольшой, что позволит создать конструкцию допустимой массы и габаритов. В противном случае большую часть конструкции будет составлять источник питания, теплоотводящие поверхности которого будут иметь повышенную массу и площадь.

Единственным возможным путем повышения КПД источника [118] без принципиального изменения его схемотехнического решения, является увеличение напряжения, подаваемого на вход его импульсного преобразователя напряжения. В этом случае для передачи той же мощности потребуются меньший входной ток преобразователя, и как следствие меньший входной ток всего источника, что, совместно с уменьшением коэффициента деления входного делителя позволит существенно снизить потери на его нагрев. При этом нужно учитывать, что для сохранения низкой стоимости конструкции следует воздержаться от применения дорогих высоковольтных полупроводников, достигнув увеличения входного

напряжения преобразователя применением распространенных радиоэлементов.

Поскольку существующая недорогая и распространенная элементная база не позволяет создать преобразователь постоянного напряжения в постоянное с допустимым входным напряжением более 590 В, было решено заменить единичный импульсный преобразователь напряжения цепочкой из нескольких одинаковых преобразователей постоянного напряжения в постоянное напряжение, соединенных последовательно по входам и выходам. Входное напряжение такой цепочки является суммой входных напряжений всех входящих в нее преобразователей, и, подбирая необходимое количество преобразователей, можно получить любое требуемое входное напряжение, на котором будет осуществляться преобразование электроэнергии.

Разработано «Устройство электропитания приборов мониторинга и учета электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока», реализующее предложенный принцип, на которое был получен патент РФ № 188203 [119] (рисунок 2.5).

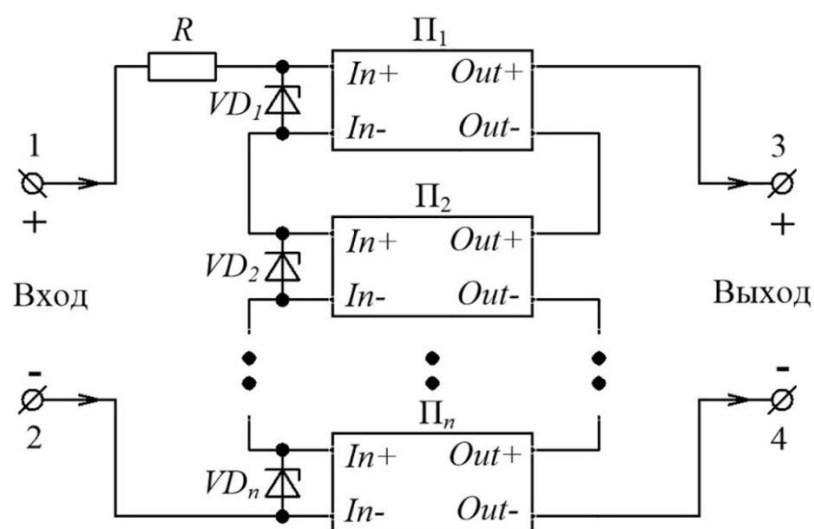


Рисунок 2.5 – Структурно-функциональная схема устройства питания (патент РФ № 188203)

Разработанное устройство состоит из  $n$  преобразователей напряжения  $\Pi_1 - \Pi_n$ , включенных последовательно по их входам и выходам. Входы

каждого из преобразователей защищены стабилитронами  $VD_1–VD_n$ , подавляющими возможные скачки напряжения на входах преобразователей, а так же симметрирующими схему [120]. Входное напряжение подается на клеммы 1 и 2 и далее через резистор  $R_1$ , включенный последовательно и выполняющий функции входного делителя, на вход цепочки преобразователей напряжения.

Для приведенного схемотехнического решения была разработана полная методика его электрического расчета [121]. Для проверки адекватности методики расчета был рассчитан, построен и исследован экспериментальный источник питания с расчетной выходной мощностью 5 Вт на основе четырех экспериментальных преобразователей напряжения.

Был проведен натурный эксперимент на экспериментальной высоковольтной установке [122], с помощью которой исследована работа источника в диапазоне напряжений 2000 – 4500 В. На рисунках 2.6 и 2.7 представлены графики расчетных и измеренных значений КПД и выходного тока разработанного источника питания. Присутствующее на графиках незначительное расхождение кривых можно объяснить погрешностями измерения и отличиями характеристик реальных элементов, в частности стабилитронов, от их идеальных моделей.

Для определения оптимального количества преобразователей в цепочке были выполнены электрические расчеты для источников, содержащих различное количество преобразователей, построенных на типовых силовых интегральных микросхемах. При этом оптимальный уровень входного напряжения составил 300 В.

В качестве диапазонов входных напряжений источника питания были использованы значения из таблицы 2.2. Выходная мощность источника была условно принята на уровне 1 Вт. Результаты расчетов представлены в виде графиков на рисунках 2.8 – 2.9.

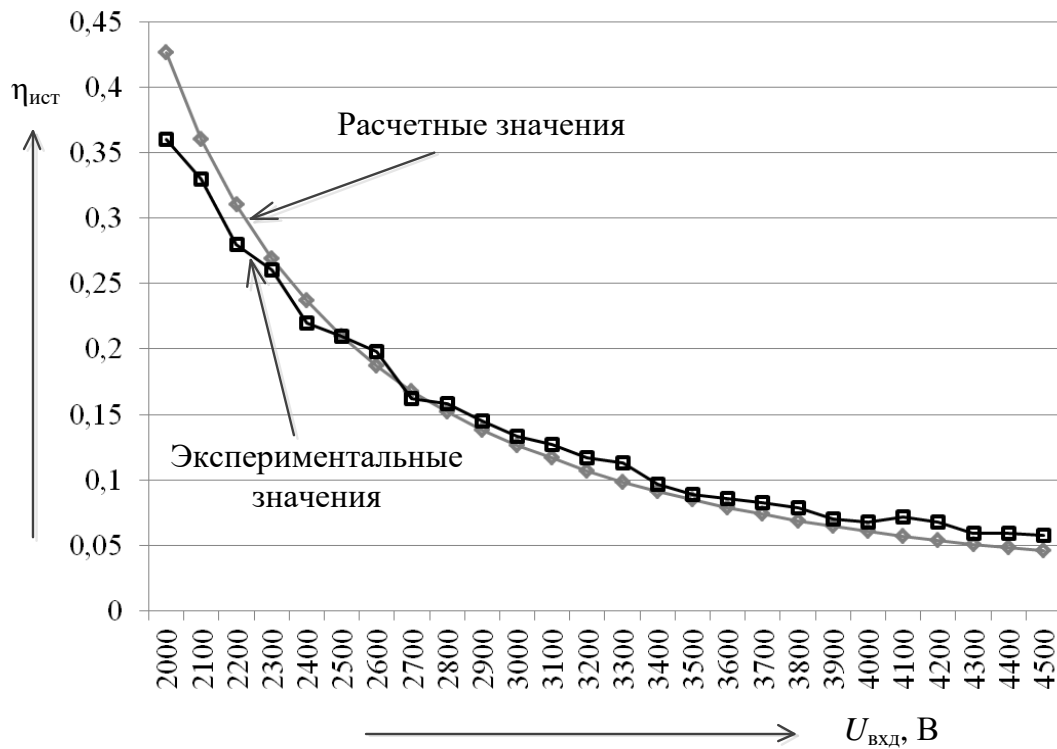


Рисунок 2.6 – Графики расчетной и экспериментальной зависимостей КПД разработанного источника питания от входного напряжения.

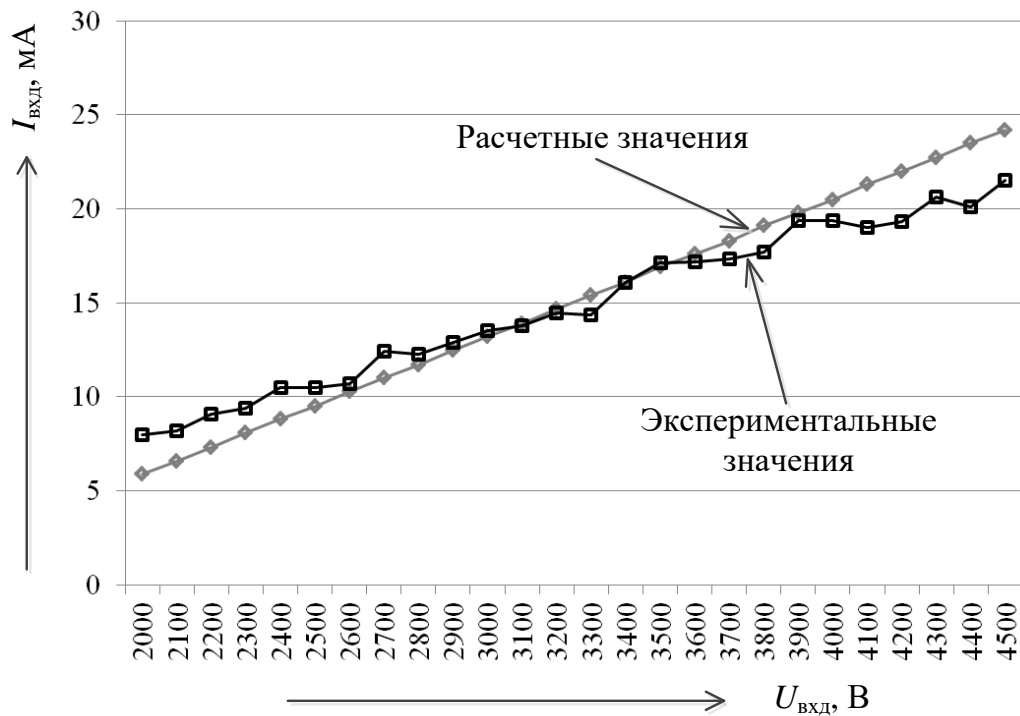


Рисунок 2.7 – Графики расчетной и экспериментальной зависимостей входного тока разработанного источника питания от входного напряжения.

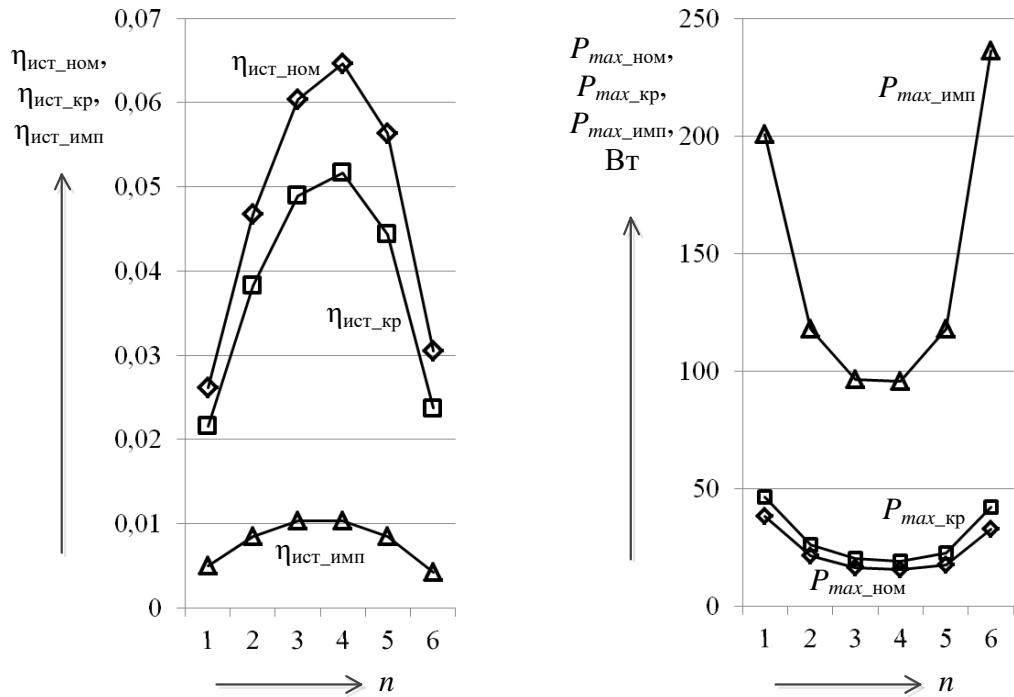


Рисунок 2.8 – Графики расчетных значений КПД и максимальной рассеиваемой мощности источника питания в зависимости от количества преобразователей

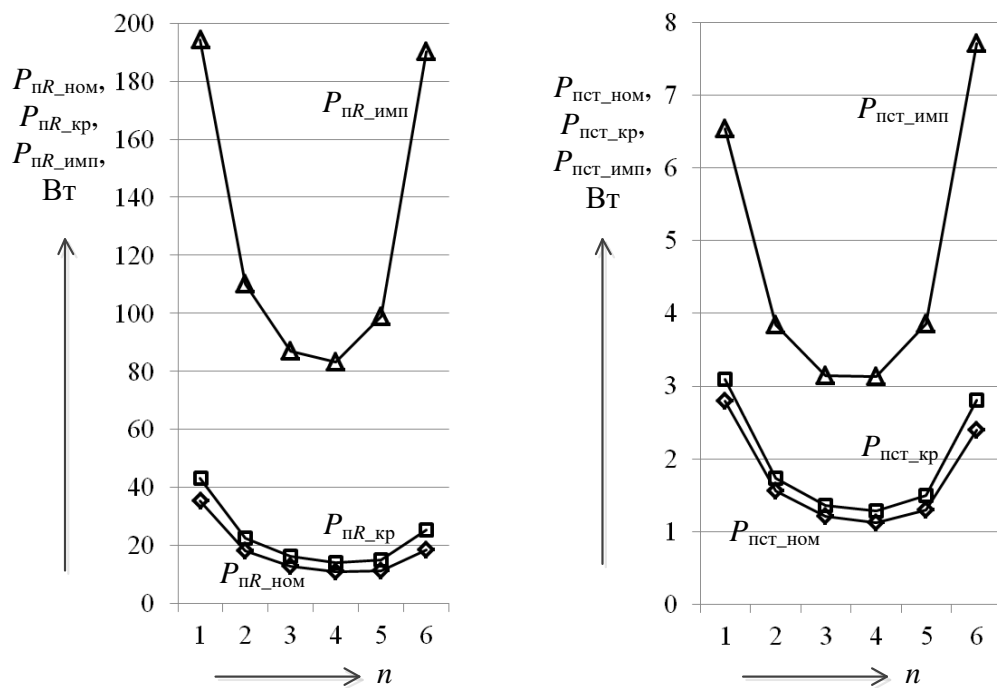


Рисунок 2.9 – Графики расчетных значений максимальных рассеиваемых мощностей входного резистора и стабилитронов в зависимости от количества преобразователей

Таким образом, на основании сравнения расчетных характеристик ИПТС, содержащих различное количество типовых преобразователей в цепочке, определено:

- для достижения максимального коэффициента полезного действия рекомендуется использование цепочки из четырех преобразователей напряжения;
- оптимальный вариант предлагаемого источника питания, построенный на четырех типовых преобразователях напряжения, при работе в номинальном режиме имеет КПД 0,0646 против 0,0262 у источника на одном преобразователе. Таким образом можно утверждать, что предлагаемое решение обладает в 2,47 раз большим КПД по сравнению со своим прототипом.

## **2.4 Практическая реализация предложенных технических решений электротехнических комплексов систем резервирования мощности тяговых подстанций**

Предложенные технические решения легли в основу разработанного блока управления системы резервирования мощности для тяговых подстанций постоянного тока с двумя преобразовательными агрегатами [123]. Блок управления смонтирован в стандартном металлическом электротехническом боксе, его внешний вид и внутреннее содержимое представлены на рисунке 2.10.

Структурная схема подключения блока управления системы резервирования к цепям тяговой подстанции представлена на рисунке 2.11, которая повторяет рисунок 2.1 с учетом добавленных вновь элементов и соединений. Все введенные вновь элементы выделены цветом, причем введенные вновь соединения выделены желтым цветом. Схема содержит минимальное количество подключений, необходимое для надежного функционирования системы резервирования [124].

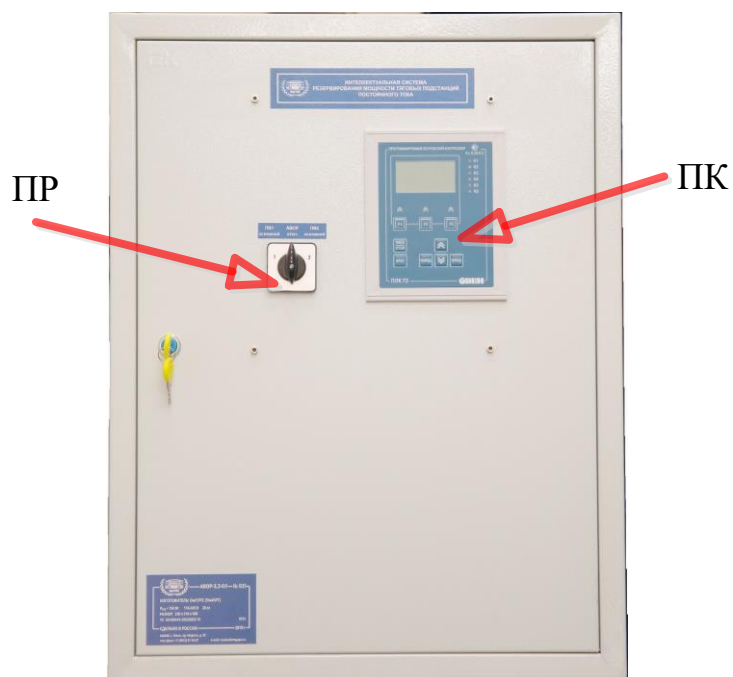
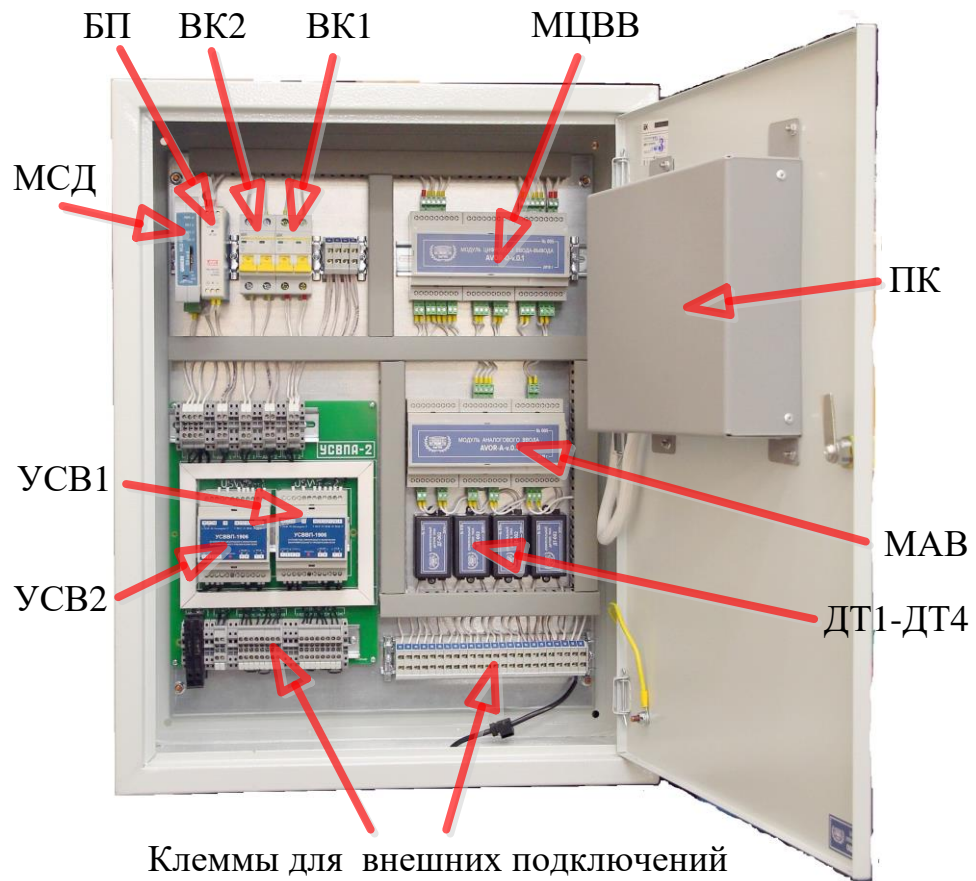


Рисунок 2.10 – Внешний вид блока управления системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока

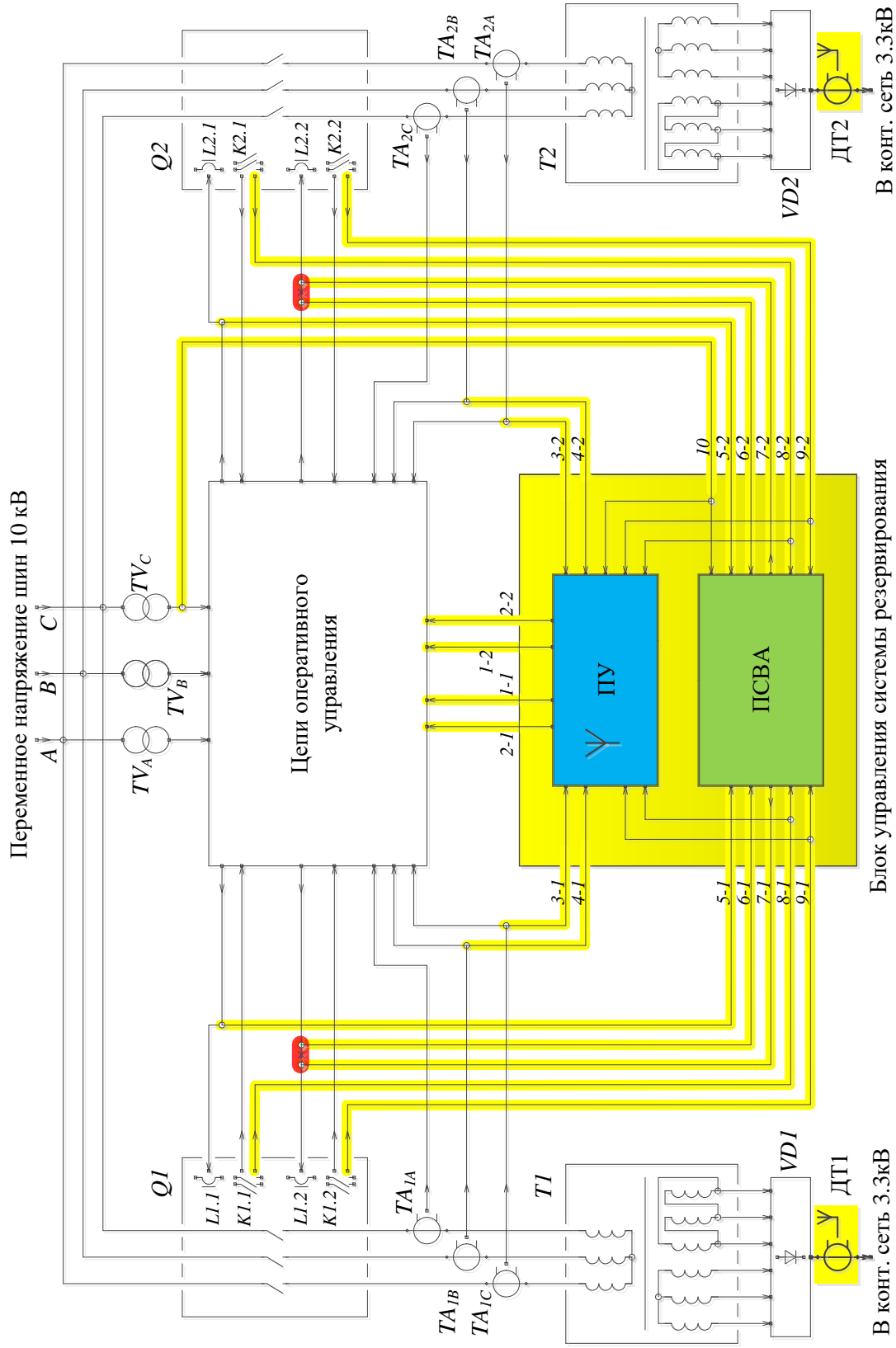


Рисунок 2.11 – Структурная схема подключения блока управления системы резервирования мощности к цепям тяговой подстанции



Подавляющее количество подключений производится «в параллель», за исключением цепей 6-1, 7-1 и 6-2, 7-2, где требуется произвести разрывы существующих цепей, выделенные на схеме красным цветом. Эти разрывы препятствуют прохождению стандартных сигналов включения преобразовательных агрегатов, обеспечения их синхронное включение от подсистемы синхронного включения агрегатов. Для восстановления разорванных сигналов при отключении питания ПСВА, в состав модулей УСВ1 и УСВ2 введены электромагнитные реле, нормально замкнутые контакты которых замыкают цепи 6-1, 7-1 и 6-2, 7-2 при отсутствии питания модулей. Все остальные входные и выходные цепи блока управления спроектированы таким образом, что при отсутствии питания они находятся в режиме высокого входного сопротивления, благодаря чему не оказывают влияния на цепи оперативного управления тяговой подстанции, и не нарушают ее работу.

В упрощенном виде схема подключения блока управления системы резервирования мощности тяговых подстанций (блока управления СРМ ТП) представлена на рисунке 2.12.

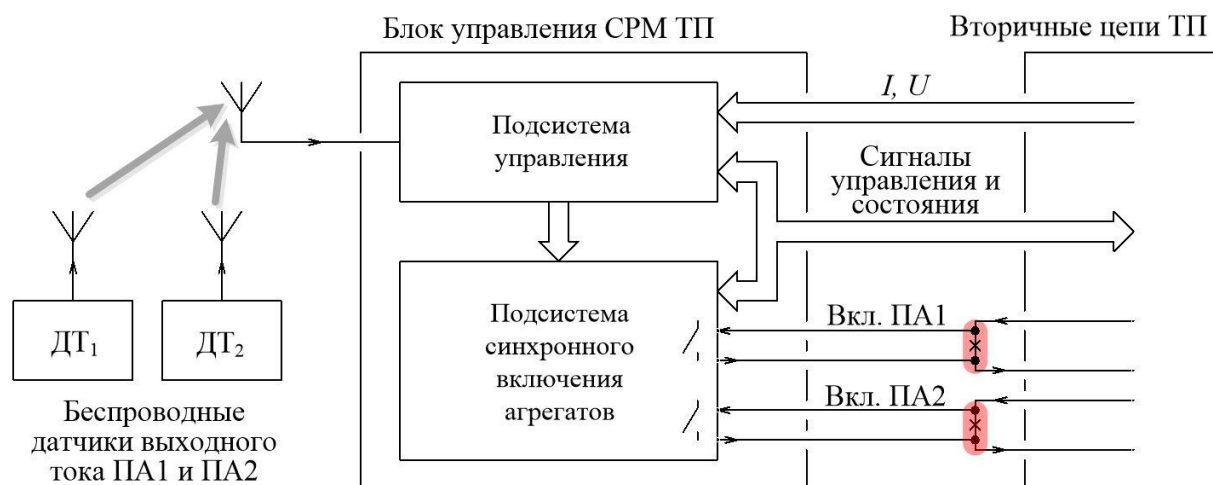


Рисунок 2.12 – Схема подключения блока управления системы резервирования к вторичным цепям тяговой подстанции

Таким образом, выполнена физическая реализация разработанных технических решений для системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами.

## 2.5 Выводы

1. На основании выполненного анализа влияния внешних воздействий на работоспособность электротехнических комплексов тяговых подстанций системы электроснабжения транспортных средств постоянного тока для повышения эффективности их функционирования предложен усовершенствованный способ управления технологическими режимами автоматического резервирования выходной мощности тяговых подстанций.

2. Предложена структура аппаратной части системы резервирования мощности для тяговых подстанций постоянного тока с двумя преобразовательными агрегатами, обеспечивающая управление высоковольтными выключателями преобразовательных трансформаторов на основе сигналов входного, либо выходного тока преобразовательных агрегатов.

3. Для элемента системы резервирования – беспроводного датчика выходного тока преобразовательного агрегата, разработан источник питания от напряжения тяговой сети, защищенный патентом на полезную модель.

4. Разработан блок управления системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока для тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами, реализующий предложенную структурную схему.

### 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

#### 3.1 Автоматическое управление резервированием мощности тяговых подстанций как средство повышения эффективности системы электроснабжения транспортных средств

Основным фактором, определяющим необходимость подключения или отключения резервного агрегата является значение выходного тока, отдаваемого тяговой подстанцией в контактную сеть [125]. Физическую сторону процесса поясняет рисунок 3.1, на котором изображен общий вид кривых потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах ( $\Delta P$ ) тяговой подстанции с двумя агрегатами в зависимости от тока нагрузки ( $I_d$ ).

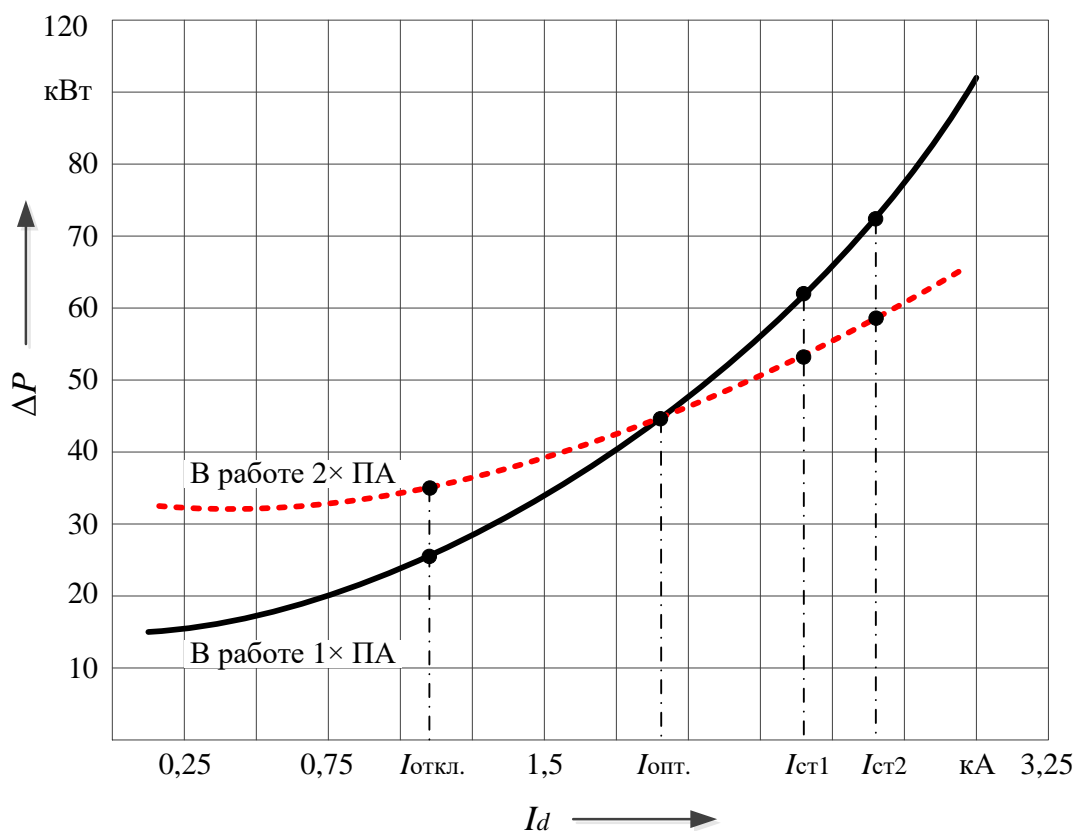


Рисунок 3.1 — Кривые потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах для тяговой подстанции с двумя агрегатами

Из представленного рисунка видно, что режим работы с одним ПА (сплошная кривая) имеет более «мягкую» характеристику по сравнению с работой двух агрегатов в параллель (пунктирная кривая). Такой режим обеспечивает меньшие потери на малых токах, что объясняется меньшими потерями холостого хода в тяговых трансформаторах, поскольку здесь включен один трансформатор вместо двух. В режиме малых нагрузок основными являются именно потери холостого хода трансформаторов, которые так же принято называть потерями «в стали», т.к. они ощутимо превышают потери на активных сопротивлениях преобразовательных агрегатов [126]. При увеличении нагрузочного тока вклад активных потерь возрастает, расстояние между кривыми уменьшается, и наступает момент, когда кривые пересекаются. Это происходит при значении тока, равном  $I_{онт}$ , при этом оба режима работы показывают одинаковую эффективность. В случае дальнейшего возрастания тока нагрузки, кривые снова расходятся, делая более эффективным режим параллельного включения двух ПА. Это объясняется большим уровнем активных потерь, которые значительно превышают потери «в стали» трансформаторов, и которые всегда уменьшаются при параллельном соединении агрегатов.

Таким образом, в режиме малых нагрузок всегда предпочтительно использование одного преобразовательного агрегата, в то время как при повышенном выходном токе эффективнее работа двух агрегатов в параллель.

В общем случае можно сформировать три основных требования, предъявляемых к управляющим алгоритмам систем резервирования.

Первое – алгоритм должен обеспечивать максимальную энергетическую эффективность от процесса резервирования преобразовательных агрегатов.

Второе – алгоритм должен учитывать тот факт, что применяемые на практике высоковольтные масляные и вакуумные выключатели обладают ограниченным ресурсом переключений, по истечении которого требуется их ремонт или замена. Поэтому количество суточных переключений должно

быть минимально необходимым. Выполненный поиск не позволил найти научное обоснование максимального количества суточных переключений, однако согласно внутреннему регламентирующему документу СТО РЖД 07.021.2 – 2015 их число для систем резервирования мощности не должно превышать восьми за сутки.

Третье – алгоритм должен обеспечивать безопасную эксплуатацию преобразовательных трансформаторов и подключение резервного преобразовательного агрегата в течение заданного времени в случае превышения значения выходного тока подстанции выше разрешенного для одного преобразовательного агрегата.

Анализируя рисунок 3.1 можно предложить наиболее простой и при этом наиболее эффективный с энергетической точки зрения алгоритм работы системы резервирования (алгоритм 1), который представлен в виде диаграммы состояний конечного автомата на рисунке 3.2.

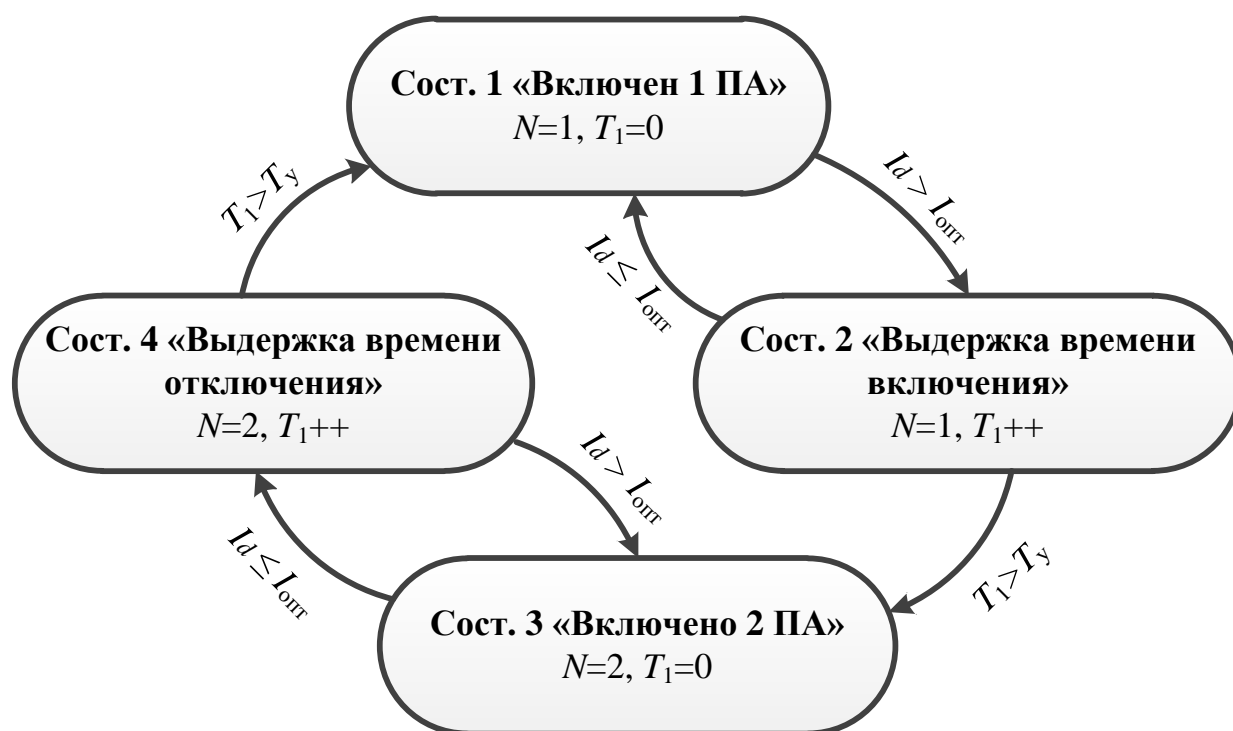


Рисунок 3.2 – Диаграмма состояний переходов конечного автомата алгоритма 1

Суть этого алгоритма заключается в том, чтобы использовать один агрегат, если ток нагрузки меньше либо равен  $I_{\text{опт}}$ , подключая второй агрегат только тогда, когда ток нагрузки превышает значение  $I_{\text{опт}}$ . Для исключения влияния помех, которые могут присутствовать в канале измерения тока нагрузки, переключения следует производить с некоторой задержкой  $T_y$ .

Алгоритм 1 оперирует тремя переменными, из которых одна является входной, и одна выходной, и двумя константами. Входной переменной алгоритма 1 является текущее значения тока нагрузки  $I_d$ , выходной переменной является количество агрегатов в работе  $N$ , а третьей переменной является переменная таймера  $T_1$ . Уставка по току и временной интервал задаются при настройке системы резервирования, в процессе работы не изменяются, поэтому являются константами:

- уставка по току переключения –  $I_{\text{опт}}$ ;
- выдержка времени между переключениями –  $T_y$ .

В любой момент времени алгоритм может находиться в четырех конечных состояниях, обозначенных на рисунке как «Сост.1» – «Сост.4».

В режиме «Сост. 1 «Включен 1 ПА»» включен один агрегат, таймер  $T_1$  сброшен, и система ожидает повышения нагрузочного тока  $I_d$  выше значения  $I_{\text{опт}}$ . Как только это происходит, алгоритм переходит в состояние 2.

В режиме «Сост. 2 «Выдержка времени включения»» включен один агрегат, а таймер  $T_1$  производит отсчет. Если  $I_d$  падает ниже либо становится равным  $I_{\text{опт}}$ , происходит возврат в состояние 1. При срабатывании таймера  $T_1$  осуществляется переход в состояние 3.

В режиме «Сост. 3 «Включено 2 ПА»» сбрасывается таймер  $T_1$ , включается второй агрегат, и производится ожидание ситуации, когда ток  $I_d$  упадет ниже либо станет равным  $I_{\text{опт}}$ , для совершения перехода в состояние 4.

В режиме «Сост. 4 «Выдержка времени отключения»» включены два агрегата, и производится выдержка времени по таймеру  $T_1$ . Если ток  $I_d$  вырастет, и превысит значение  $I_{\text{опт}}$ , произойдет возврат в состояние 3. Если

этого не произойдет, то наступит момент, когда сработает таймер  $T_1$ , что вызовет переход в состояние 1, которое отключит второй агрегат.

Алгоритм 1 обладает двумя преимуществами – он обеспечивает максимальную энергетическую эффективность, поскольку в любой момент времени определяет оптимальную работу подстанции с точки зрения количества включенных агрегатов, и при этом обеспечивает защиту включенного преобразовательного трансформатора при условии использования помехозащищенного канала измерения тока и выбора  $T_y$  в пределах нескольких секунд. Однако, при этом никак не ограничивается количество переключений высоковольтных выключателей в сутки. Экономический эффект от внедрения системы резервирования с таким алгоритмом работы скорее всего будет отрицательным, поскольку затраты на ремонт выключателей очень быстро превысят стоимость сэкономленной электроэнергии. Поэтому алгоритм 1 может быть интересен только в процессе разработки управляющего алгоритма системы резервирования как алгоритм, с которым можно сравнивать энергетическую эффективность разрабатываемого алгоритма без учета экономических моментов.

Несколько лучшими характеристиками обладает алгоритм, применяемый в настоящее время на тяговых подстанциях ОАО «РЖД», имеющий две уставки по току с двумя задержками по времени для подключения второго агрегата, и одну уставку по току и одну задержку по времени для его отключения (алгоритм 2) [124]. В этом случае подключение второго агрегата происходит, если ток нагрузки превышает значение, заданное соответствующей уставкой (на рисунке 3.1 это значения  $I_{cm1}$  и  $I_{cm2}$ ) в течение соответствующего интервала времени. Отключение второго агрегата происходит, если нагрузочный ток находится ниже уставки отключения ( $I_{откл.}$  на рисунке 3.1) в течение времени, равного или большего интервалу времени отключения. Графический вид алгоритма 2 в виде диаграммы состояний конечного автомата, представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Диаграмма состояний переходов конечного автомата алгоритма 2

Алгоритм 2 оперирует шестью константами, и пятью переменными, из которых одна является входной и одна выходной. Все уставки по току и временные интервалы являются константами:

- уставка по току включения первой ступени –  $I_{ct1}$ ;
- уставка по току включения второй ступени –  $I_{ct2}$ ;
- уставка по току отключения –  $I_{откл}$ ;
- выдержка времени включения по первой ступени –  $T_{1y}$ ;
- выдержка времени включения по второй ступени –  $T_{2y}$ ;
- выдержка времени отключения –  $T_{откл.у}$ .

Переменные включают в себя три переменных таймеров:



- таймер выдержки включения по первой ступени –  $T_1$ ;
- таймер выдержки включения по второй ступени –  $T_2$ ;
- таймер выдержки отключения –  $T_{\text{откл}}$ ,

а так же выходную переменную, определяющую количество преобразовательных агрегатов в работе –  $N$ , и входную переменную тока нагрузки  $I_d$ . В любой момент времени алгоритм может находиться в пяти конечных состояниях, обозначенных на рисунке как «Сост.1» – «Сост.5».

В режиме «Сост. 1 «Включен 1 ПА»» включен один преобразовательный агрегат, все таймеры выключены, и система резервирования ожидает повышения нагрузочного тока  $I_d$  выше значений  $I_{\text{ст1}}$  либо  $I_{\text{ст2}}$ . Как только это происходит, алгоритм переходит в состояния 2 или 3.

В режиме «Сост. 2 «Выдержка времени включения ступени 1»» включен один агрегат, таймер  $T_1$  производит отсчет, а таймер  $T_2$  выключен. Если происходит дальнейшее повышение тока  $I_d$  свыше значения  $I_{\text{ст2}}$ , Система переходит в состояние 3. Если  $I_d$  наоборот, падает ниже  $I_{\text{ст1}}$ , происходит возврат в состояние 1. При срабатывании таймера  $T_1$  осуществляется переход в состояние 4.

В режиме «Сост. 3 «Выдержка времени включения ступеней 1 и 2»» так же включен один агрегат, и оба таймера  $T_1$  и  $T_2$  производят отсчет. При срабатывании любого из них происходит переход в состояние 4. Если ток  $I_d$  падает ниже  $I_{\text{ст2}}$ , происходит переход в состояние 2.

В режиме «Сост. 4 «Включено 2 ПА»» выключаются все таймеры, включается второй агрегат, и производится ожидание ситуации, когда ток  $I_d$  упадет ниже значения  $I_{\text{откл}}$ , для совершения перехода в состояние 5.

В режиме «Сост. 5 «Выдержка времени отключения»» включены два агрегата, и производится выдержка времени по таймеру  $T_{\text{откл}}$ . Если ток  $I_d$  вырастет, и превысит значение  $I_{\text{откл}}$ , произойдет возврат в состояние 4. Если этого не произойдет, то наступит момент, когда сработает таймер  $T_{\text{откл}}$ , что вызовет переход в состояние 1, которое отключит второй агрегат.

В отличие от алгоритма 1, алгоритм 2 имеет отдельную логическую ступень (ступень 2) для подключения резервного преобразовательного агрегата, что позволяет реализовать быстрое включение резервного агрегата при возникновении перегрузки основного, обеспечивая безопасность его работы. Кроме того, логика работы с разными уставками по току включения и отключения позволяет реализовать характеристику с гистерезисом по току, что, совместно с отдельными выдержками времени позволяет снизить количество переключений в сутки до экономически эффективного значения. Однако, определение и практическое использование оптимальных уставок, при которых будет наблюдаться максимально возможный технический эффект представляет собой достаточно сложную задачу. Теоретически, ее можно решить путем расчета или моделирования, но на практике это придется делать достаточно часто, подстраиваясь под изменения поездной обстановки, причем индивидуально для каждой подстанции, что будет очень неудобно. При этом, в процессе функционирования, алгоритм 2 не учитывает количество коммутаций для достижения наилучшего эффекта.

Поэтому, несмотря на принципиальную работоспособность, алгоритм 2 не может быть рекомендован для использования в составе современной системы резервирования мощности.

Принимая во внимание изложенное выше, были сформированы следующие требования к программной части системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока.

Алгоритм управления системой резервирования мощности тяговых подстанций должен обеспечивать:

- эффективность работы системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств при изменении поездной ситуации;
- минимизацию количества суточных переключений преобразовательных агрегатов для увеличения ресурса работы высоковольтных выключателей;

- исключение перегрузки основного преобразовательного агрегата путем подключения резервного агрегата при резком возрастании тока нагрузки свыше допустимого;
- использование типовых вычислительных ресурсов и объема памяти с целью обеспечения возможности его реализации на базе программируемого логического контроллера «ОВЕН ПЛК-73», примененного в аппаратной части системы, или аналогичного ему.

### **3.2 Разработка алгоритма управления электротехническим комплексом резервирования мощности тяговых подстанций**

Достоинством алгоритмов, представленных ранее, является отсутствие ресурсоемких операций при определении управляющих воздействий. Благодаря этому эти алгоритмы легко реализуются на базе программируемого логического контроллера.

Дальнейшее повышение эффективности работы системы резервирования мощности тяговых подстанций связано с выбором оптимального режима управления, при котором будут реализованы:

- более быстрое реагирование на изменение выходного тока, что приводит к снижению потерь электрической энергии и исключению перегрузки преобразовательного агрегата;
- минимизация переключений ПА, что приведет к увеличению ресурса коммутационного оборудования.

Эти два аспекта являются взаимоисключающими, так как самое быстрое реагирование на изменение выходного тока приведет к наибольшему числу коммутаций резервного преобразовательного агрегата. На рисунке 3.4 изображена временная диаграмма подключения резервного ПА, где показан график изменения выходного тока тяговой подстанции. Подключение резервного ПА целесообразно в случае, когда ток превышает некоторое

оптимальное значение  $i_{\text{опт}}$ . Однако включение резервного преобразовательного агрегата только в моменты времени  $t_1..t_2$ ,  $t_3..t_5$  и  $t_6..t_7$  приведет к большому количеству срабатываний высоковольтных выключателей и, соответственно, снижению их ресурса. Поэтому экономически обоснованным является включение резервного ПА в момент времени  $t_3$  а отключение – в  $t_7$ .

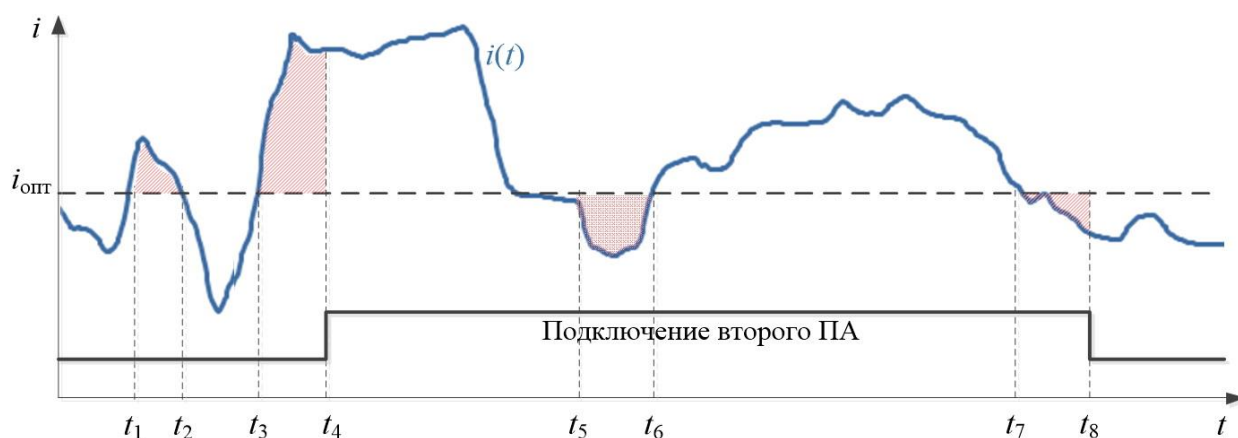


Рисунок 3.4 – Временная диаграмма выходного тока и состояния преобразовательного агрегата

При использовании любого алгоритма управления, принимающего решение на основе анализа текущего графика электропотребления, включение и отключение резервного преобразовательного агрегата будет выполняться с некоторой задержкой. Поэтому фактически второй ПА будет подключен в момент времени  $t_4$  (задержка включения  $\Delta t_{\text{вкл}} = t_4 - t_3$ ), а отключен в  $t_8$  (задержка отключения  $\Delta t_{\text{откл}} = t_8 - t_7$ ).

Помимо минимизации задержек  $\Delta t_{\text{вкл}}$  и  $\Delta t_{\text{откл}}$  важным свойством управляющего алгоритма является минимизация ложных срабатываний. Например, на участке  $t_1..t_2$ , несмотря на превышение током оптимального значения второй преобразовательный агрегат подключаться не должен, так как превышение тока незначительно и длительность интервала мала. Эксплуатационные затраты на подключение второго ПА в данном случае

перекроют эффект от снижения потерь электроэнергии. При отключении важно отсутствие ложных срабатываний (например, на участке  $t_5..t_6$  отключение второго ПА не целесообразно).

В рассмотренном выше алгоритме переключения преобразовательного агрегата необходимость коммутации определяется тремя фиксированными уставками по току: уставками по току включения первой и второй ступеней и уставкой по току отключения. При этом для каждой уставки определена фиксированная выдержка времени, в течение которой ток должен находиться в установленном диапазоне значений.

Динамическое изменение выдержки времени на основе значения тока позволит более гибко реагировать на изменение тока нагрузки. При этом наиболее критичным из трех условий является включение резервного преобразовательного агрегата при достижении током значения уставки второй ступени, так как в этом случае ток превышает номинальное значение основного ПА и подключение резервного преобразовательного агрегата должно быть выполнено в течение нескольких секунд в целях предотвращения его повреждения.

В результате для определения необходимости включения резервного ПА предложено использовать выдержку времени  $T_{\text{вкл}}$ :

$$T_{\text{вкл}} = t_2 \left( \frac{I_n - I_{\text{кр}}}{I - I_{\text{кр}}} \right)^N, \quad (3.1)$$

где  $I_n$  – значение номинального выходного тока одного ПА;

$t_2$  – выдержка времени, в течение которого должен подключиться резервный ПА при превышении выходным током номинального значения  $I_N$  основного преобразовательного агрегата;

$I_{\text{кр}}$  – граничное, или критическое значение, при превышении которого запускается счетчик времени;

$N$  – некоторое число, подбираемое экспериментально;

$I$  – текущее значение выходного тока тяговой подстанции.

При малых значениях  $N$  выдержка времени слабо зависит от отклонения тока, что приводит к росту чувствительности системы управления и нежелательному росту количества коммутаций преобразовательного агрегата. Оптимальными значениями  $N$  могут быть 4, 6 или 8, поскольку использование целых чисел  $N$  практически не накладывает дополнительных вычислительных затрат на логический контроллер при совершении операции возведения в степень, а четные значения необходимы для гарантированного получения положительного результата выражения при любых значениях его составляющих.

Отключение резервного преобразовательного агрегата при таком подходе должно выполняться при превышении счетчиком выдержки времени  $T_{\text{откл}}$ , рассчитываемой по аналогичной формуле, содержащей уже описанные составляющие:

$$T_{\text{откл}} = t_2 \left( \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{кр}} - I} \right)^N. \quad (3.2)$$

Выражение 3.2 имеет смысл, когда ток  $I$  становится ниже критического значения  $I_{\text{кр}}$ , а выдержка отсчитывается от этого момента времени.

При такой реализации системы принятия решения о выборе оптимального режима работы тяговой подстанции алгоритм работы микроконтроллера принимает вид, аналогичный изображенному на рисунке 3.2, с тем отличием, что граничное значение  $I_y$  является не фиксированным, а функционально зависит от значения выходного тока ТП. Графическая схема полученного алгоритма приведена на рисунке 3.5.

Переменная  $T$  является общим счетчиком на включение и отключение резервного ПА. Переменная  $State$  определяет количество работающих преобразовательных агрегатов в данный момент времени, и может принимать значения 1 или 2. Сброс счетчика  $T$  происходит при изменении режима работы тяговых подстанций или при выполнении условия  $I < I_{\text{кр}}$  при одном

работающем ПА и  $I > I_{кр}$  при двух работающих преобразовательных агрегатах.

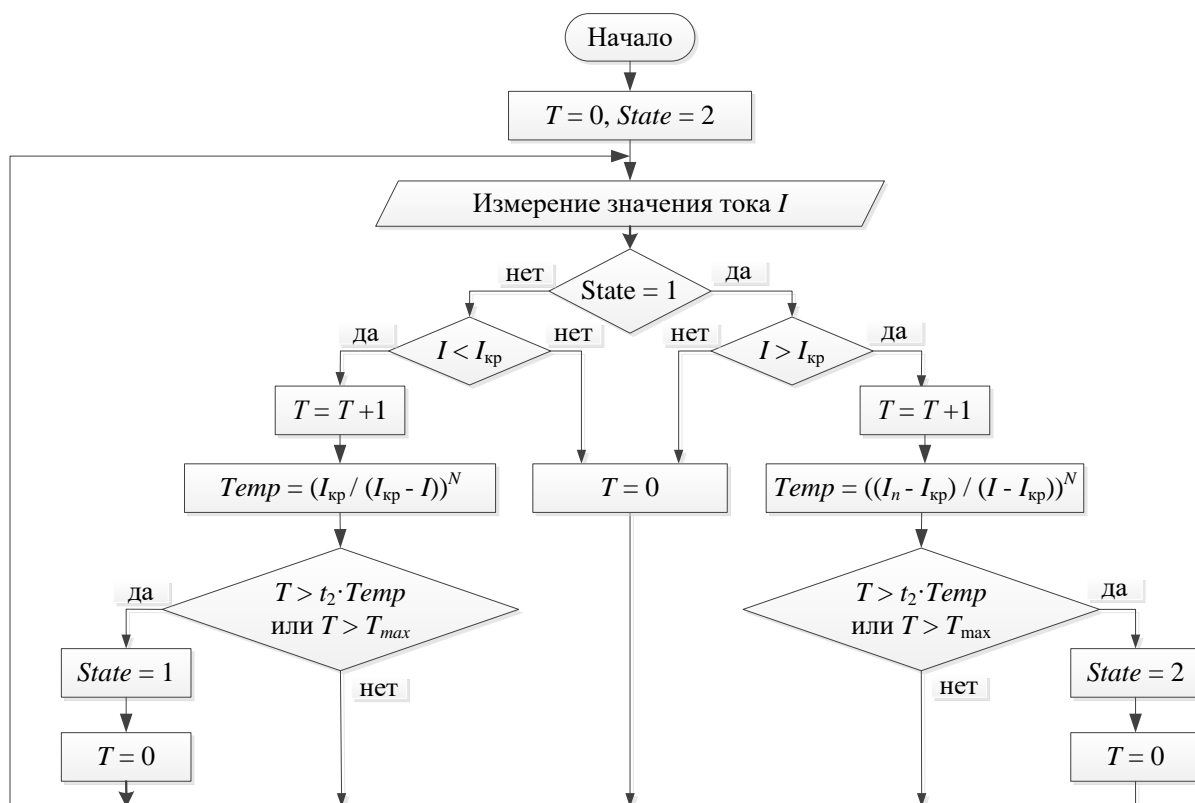


Рисунок 3.5 – Графическая схема алгоритма работы микроконтроллера

При значениях выходного тока, близких к граничному значению, выдержка времени сильно увеличивается. Поэтому с практической точки зрения есть смысл ограничить выдержку времени значением  $T_{max}$ , определяемой на практике исходя из поездной обстановки, и имеющей значение порядка 10 мин, если ток держится в установленном диапазоне более  $T_{max}$  – выполнять переключение в подходящий режим.

Достоинством такого подхода к регулированию режима резервирования мощности тяговой подстанции является малое количество параметров, влияющих на процесс принятия решения. В данном случае регулируемые параметрами являются только степень  $N$  и граничное значение  $I_{кр}$ , в то время как номинальный ток  $I_n$  и значение выдержки

времени, в течение которого должен подключаться второй ПА при токе  $I = I_n$ , являются величинами постоянными.

Это позволяет применить к алгоритму принципы нейросетевого моделирования, когда устройство в процессе работы непрерывно самообучается и тестируется на предмет возможного улучшения своих характеристик. Степень  $N$  меняется в узком диапазоне фиксированных значений, поэтому ее не стоит выбирать в качестве регулируемого параметра. Что касается граничного значения выходного тока  $I_{кр}$ , при котором должна происходить смена режима работы тяговой подстанции, его значение должно подбираться автоматически в процессе работы алгоритма, что позволит увеличить энергетическую эффективность процесса резервирования мощности.

Начальное значение  $I_{кр}$  может быть определено расчетным путем или при помощи моделирования процесса переключения ПА на основе данных о токовой нагрузке. Используя известную методику моделирования режимов работы системы резервирования мощности для тяговых подстанций постоянного тока, оснащенных двумя преобразовательными агрегатами в условиях реальной токовой нагрузки [127], можно определить начальное значение  $I_{кр}$ .

Затем предлагается осуществлять работу системы регулирования в установленном режиме, параллельно моделируя процесс переключения ПА с различными значениями граничного тока. По истечении некоторого интервала времени (например, суток) выполняется сравнение эффективности существующего режима и нескольких смоделированных. По критерию эффективности выбирается наиболее оптимальный режим и система переводится в новый режим работы. Подобный подход является рациональным при построении управляющих алгоритмов, реализующих принципы нейросетевого моделирования, и при этом работающих на вычислительных устройствах с типовыми вычислительными возможностями, к которым можно отнести большинство недорогих программируемых



промышленных контроллеров [128]. При наличии мощного вычислительного устройства с достаточным объемом оперативной памяти было бы рациональней записать массив данных выходного тока за определенное время, после чего его проанализировать. Но, поскольку программируемый контроллер не обладает требуемым объемом памяти, использование подхода, реализующего «параллельное» моделирование в процессе работы с сохранением результатов в виде нескольких переменных, накапливающих свои значения, является эффективным.

Критерием эффективности работы управляющего алгоритма в первую очередь будет являться количество срабатываний высоковольтных выключателей за заданный период, в частности за сутки. Большую эффективность будет иметь метод, обеспечивающий меньшее количество переключений, при этом вторым критерием может служить суммарное время, в течение которого система находилась в «неэффективном» режиме: суммарное время задержек включения  $\Delta t_{\text{вкл}}$  и отключения  $\Delta t_{\text{откл}}$  на рисунке 3.4. Чтобы реализовать оперативное сравнение моделей работы с различными значениями граничного тока в алгоритм работы системы необходимо включить возможность автоматизированного определения задержек включения и отключения резервного преобразовательного агрегата.

Началом фиксации задержки включения является момент превышения выходного тока оптимального значения:  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_6$ , (рисунок 3.4). Если впоследствии ток принял значение меньше оптимального и включение второго преобразовательного агрегата не произошло (момент времени  $t_2$ ), то начало задержки включения сбрасывается (участок  $t_1..t_2$  не будет рассматриваться как задержка включения). Также не будет фиксироваться начало задержки включения, если превышение током оптимального значения происходит при уже включенном резервном ПА (момент времени  $t_6$ ). Завершение фиксации задержки включения происходит собственно при включении резервного преобразовательного агрегата. Таким образом, задержка включения будет содержать только интервал  $t_3 .. t_4$ .

Аналогичным образом выполняется фиксация задержек времени отключения резервного преобразовательного агрегата. Началом задержки считается момент времени, когда ток принимает значение ниже оптимального при работающем резервном ПА, если до момента отключения преобразовательного агрегата ток так и не принял значение больше оптимального (участок  $t_7 \dots t_8$  на рисунке 3.4).

Также в процессе работы необходимо фиксировать количество включений резервного ПА. В итоге в алгоритм работы микроконтроллера предлагается ввести переменную *time* – время работы, которое непрерывно растёт в течение суток, а так же  $T_{high}$  и  $T_{low}$  – моменты времени последнего пересечения током оптимального значения в большую и меньшую стороны соответственно. На их основе можно рассчитать задержки времени включения и отключения резервного преобразовательного агрегата.

Итоговая графическая схема алгоритма работы микроконтроллера с возможностью определения временных задержек включения и отключения резервного ПА приведена на рисунке 3.6.

Суммарная задержка времени включения резервного ПА накапливается в переменной  $T_{err1}$ , задержка отключения – в переменной  $T_{err2}$ , а количество срабатываний высоковольтных выключателей – в переменной  $N_{switch}$ .

Реализация «параллельного» моделирования заключается в том, что в процессе работы в промышленном контроллере запускается несколько одинаковых процессов, реализующих алгоритм, представленный на рисунке 3.6, имеющие разные имена переменных. При этом один из процессов непосредственно управляет состоянием высоковольтных выключателей преобразовательных агрегатов. Остальные процессы являются моделирующими, смысл их работы состоит в накоплении значений переменных  $T_{err1}$ ,  $T_{err2}$  и  $N_{switch}$ . Управляющий процесс использует для расчетов текущее значение критического тока  $I_{кр}$ , в то время как

моделирующие процессы работают со своими значениями этого параметра, незначительно отличающимися от  $I_{кр}$ , в большую или меньшую сторону.

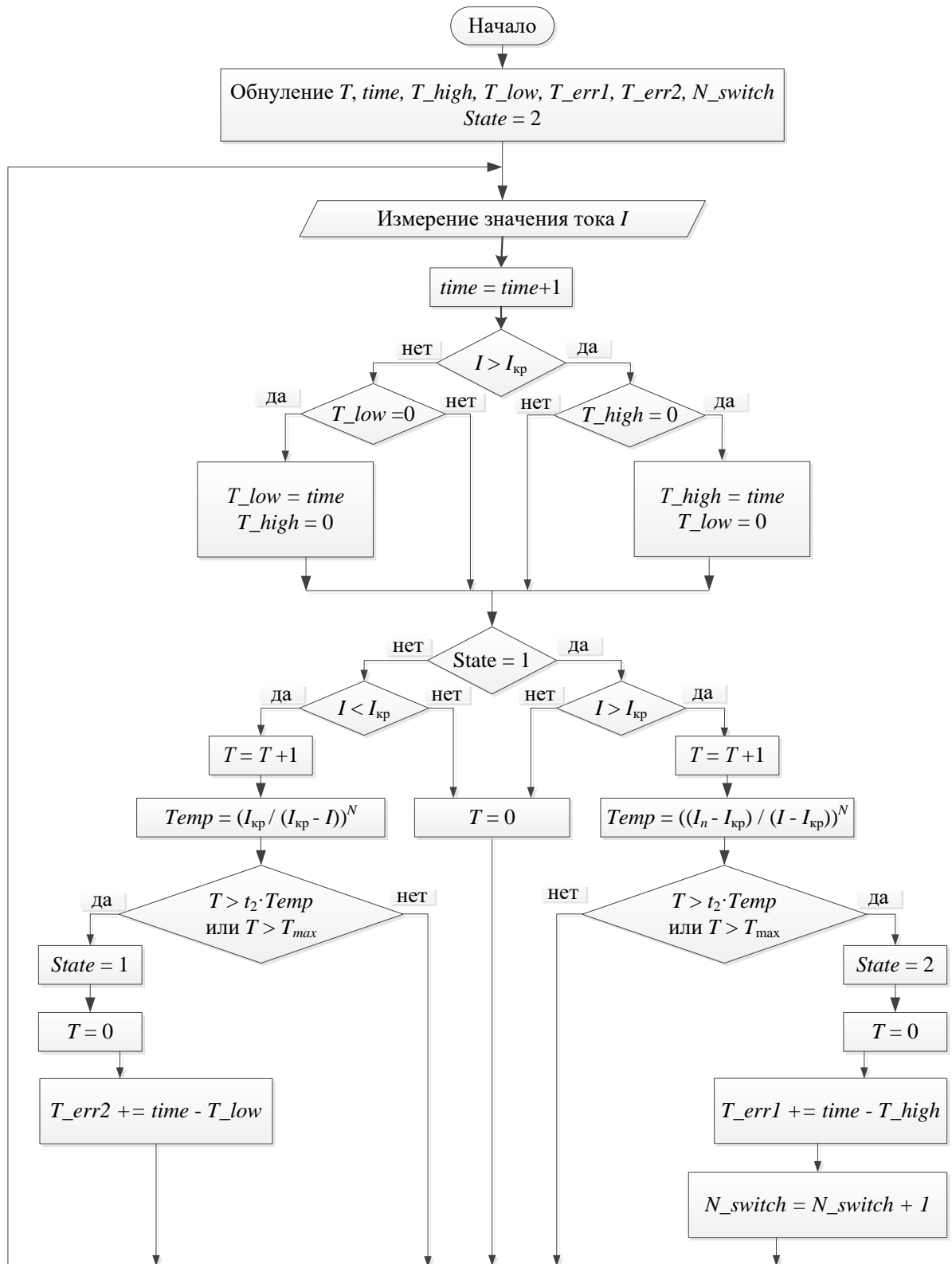


Рисунок 3.6 – Алгоритм работы микроконтроллера с возможностью определения временных задержек включения и отключения резервного ПА

В частности, при реализации одного управляющего и четырех моделирующих процессов, моделирующие процессы могут работать со значениями критического тока, составляющими 90 %, 95 %, 105 % и 110 % от текущего значения  $I_{кр}$ . По окончании периода моделирования необходимо произвести принятие решения о корректировке значения  $I_{кр}$  в большую или меньшую сторону, либо оставить его неизменным. Принятие решения о необходимости изменения влияющего параметра необходимо принимать, основываясь на однотипных парах вариантов, а именно пары значений, отвечающих за уменьшение влияющего параметра (на 5 % и на 10%) и пары значений, отвечающих за увеличение влияющего параметра (на 5 % и на 10%). В случае если оба однотипных варианта оказываются эффективными по двум критериям (количество переключений не увеличилось, а задержки времени оказались меньше), производится корректировка значения граничного тока в нужную сторону на заданный шаг. Таким образом, в процессе работы, исходя из имеющейся поездной обстановки, алгоритм будет корректировать значение  $I_{кр}$ , подстраивая его под текущие условия работы тяговой подстанции. С целью снижения влияния случайной погрешности предлагается накапливать информацию о необходимости изменения граничного значения тока в течение нескольких суток. И только по истечении требуемого периода (например, трех суток) выполнять корректировку граничного значения тока в нужную сторону.

Общий алгоритм работы системы резервирования мощности тяговой подстанции с двумя преобразовательными агрегатами, реализующий принцип «параллельного» моделирования, содержащий один управляющий и четыре моделирующих процесса [129], а так же осуществляющий коррекцию критического тока один раз в сутки, представлен на рисунке 3.7.

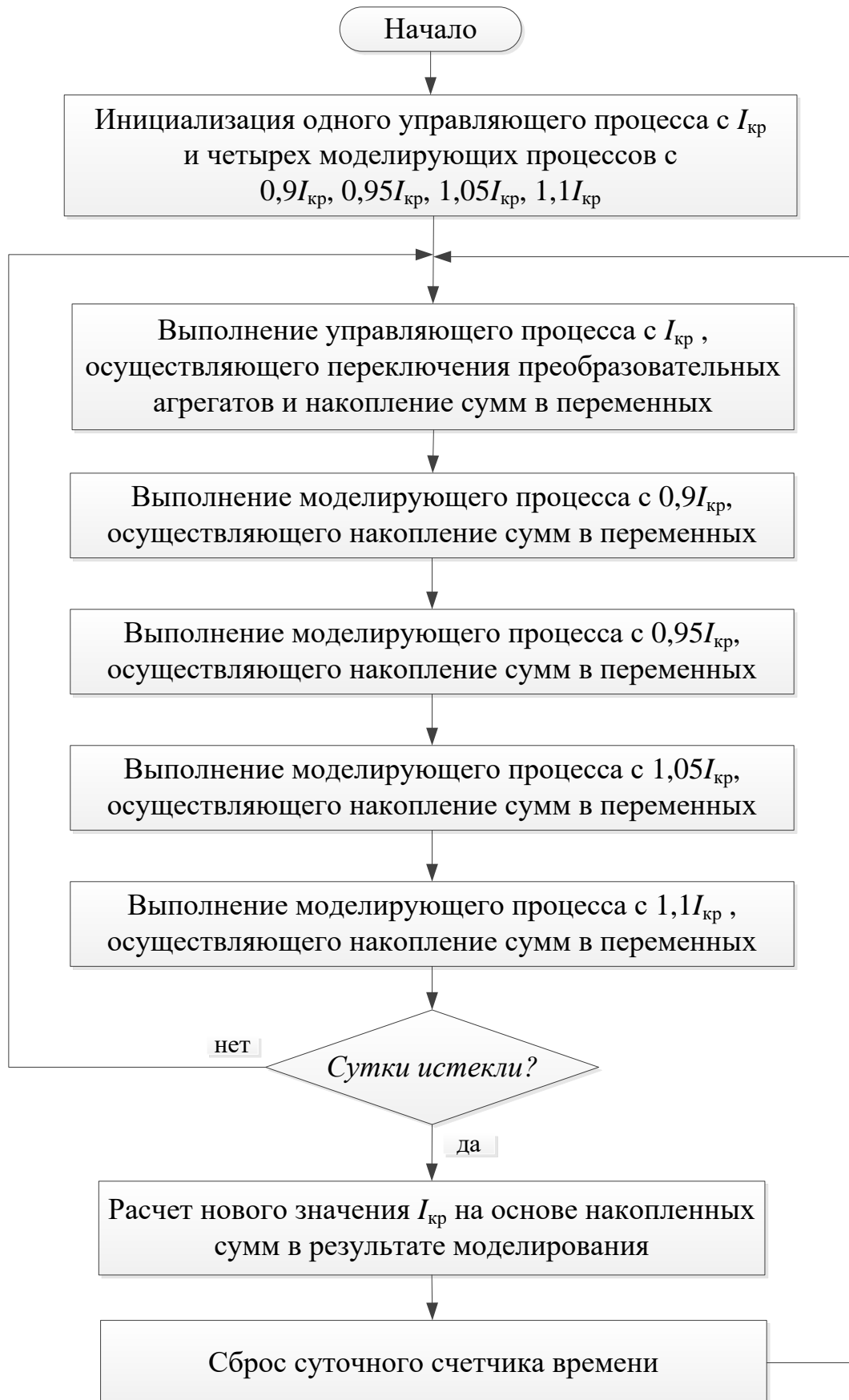


Рисунок 3.7 – Графическая схема общего алгоритма работы, реализующего принцип «параллельного» моделирования

Таким образом, разработанный управляющий алгоритм автоматической системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока, представленный на рисунках 3.6 и 3.7, обладает следующими преимуществами:

1. Реализована динамическая зависимость выдержки времени между переключениями резервного преобразовательного агрегата от значения выходного тока тяговой подстанции. При этом есть возможность установки минимально и максимально возможных значений выдержки времени, что исключает перегрузки основного преобразовательного агрегата путем подключения резервного агрегата при резком возрастании тока нагрузки свыше допустимого.

2. Реализована возможность самообучения в процессе функционирования, в результате которого подбирается оптимальное значение фактора, влияющего на режим работы системы резервирования мощности тяговой подстанции. Это позволяет получать максимальный энергетический эффект благодаря подстройке алгоритма под текущую поездную ситуацию.

3. Алгоритм не требует больших объемов дополнительной памяти или вычислительных мощностей и может быть реализован на базе программируемого логического контроллера «ОВЕН ПЛК-73» или аналогичного.

### **3.3 Апробация алгоритма управления системой резервирования мощности тяговых подстанций путем моделирования его работы в условиях реальной тяговой нагрузки**

Исследование эффективности разработанного управляющего алгоритма системы резервирования мощности тяговых подстанций

постоянного тока было выполнено с помощью моделирования режимов работы системы резервирования в условиях реальной тяговой нагрузки.

Для этого были получены данные о значениях выходного тока шести тяговых подстанций одного из участков Омской дистанции электроснабжения. Измерения проводились с интервалом 1 сек, при этом фиксировались значение тока каждого трансформатора (основного и резервного), в результате суммирования которых вычислялся общий выходной ток тяговой подстанции, режимы работы трансформаторов и другая служебная информация. На основе полученных данных были построены графики изменения тока с течением времени, а также фактического режима работы резервного преобразовательного агрегата.

С помощью моделирования по фактическому графику токопотребления были получены графики режима работы резервного ПА для различных алгоритмов работы системы резервирования мощности ТП:

- существующий (действующий) алгоритм, представленный на рисунке 3.3, с тремя рассчитанными уставками по току;
- предложенный алгоритм, представленный на рисунке 3.5, при  $N = 8$  и  $N = 6$ ;
- предложенный алгоритм, представленный на рисунке 3.5, при  $N = 4$ ;
- модифицированный алгоритм, представленный на рисунке 3.6, при  $N = 4$  с корректировкой граничного значения тока.

Полученные графики режимов работы исследовались как визуально, так и аналитически на основе предложенных выше коэффициентов эффективности. На рисунках 3.8 – 3.10 изображены графики токопотребления и моделирования режима включения резервного преобразовательного агрегата при различных поездных ситуациях на трех различных тяговых подстанциях.

Из анализа графиков можно сделать следующие выводы.

Во-первых, переключения модели действующего алгоритма и фактического переключения резервного ПА совпадают.

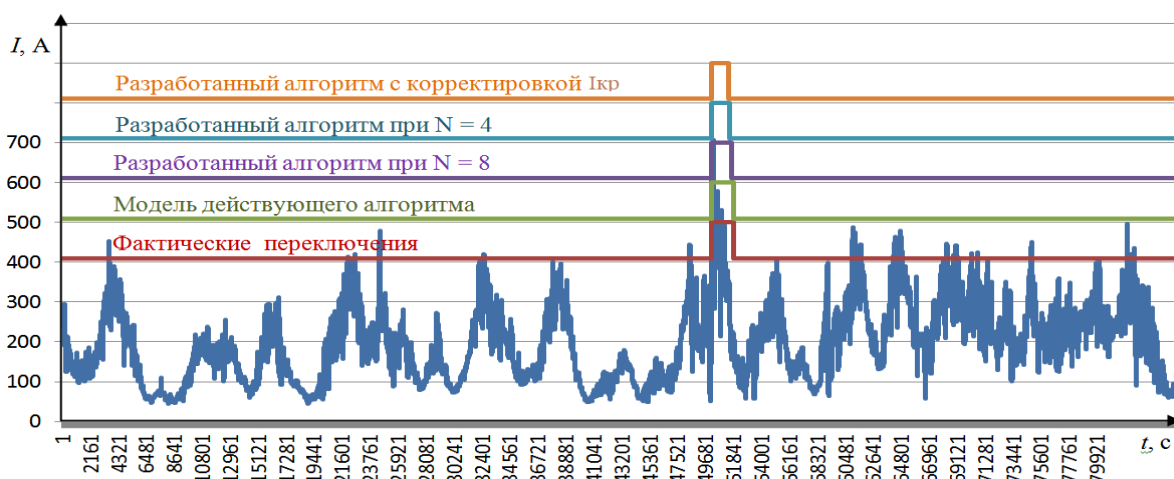


Рисунок 3.8 – График токопотребления и моделирования режима включения резервного ПА при невысокой поездной активности

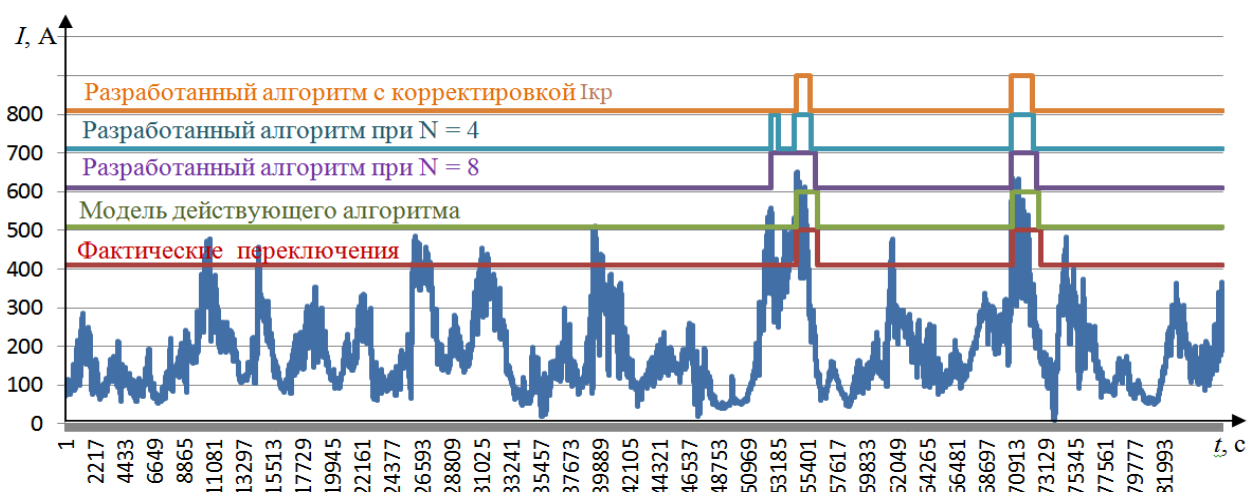


Рисунок 3.9 – График токопотребления и моделирования режима включения резервного ПА при средней поездной активности

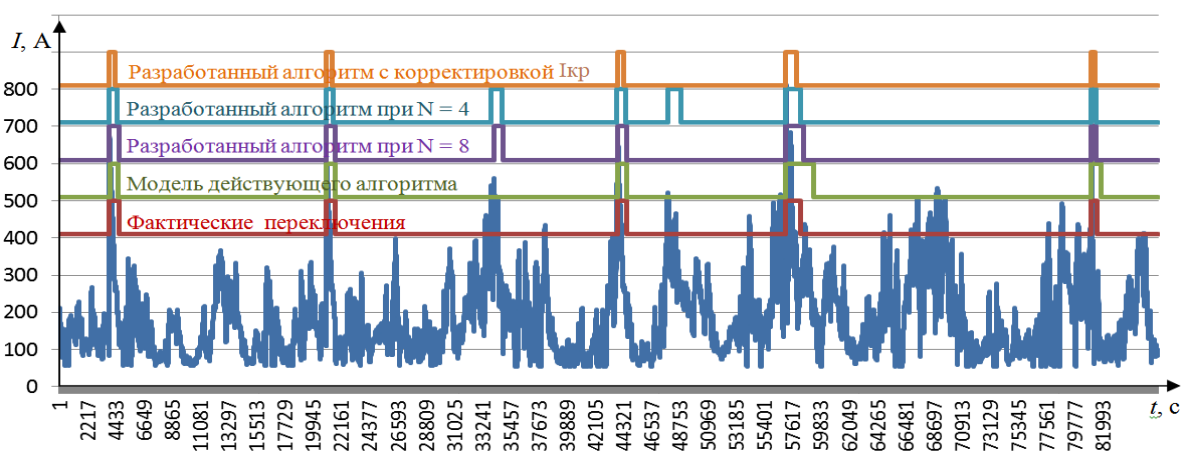


Рисунок 3.10 – График токопотребления и моделирования режима включения резервного ПА при высокой поездной активности



Отличия составляют около двух секунд и только в одном случае обнаружено несовпадение момента выключения резервного ПА (фактически ПА отключился раньше, чем того требовал действующий алгоритм). Это объясняется тем, что фактически ПА мог быть отключен вручную, так как по действующему алгоритму отключение не происходило, а необходимости в резервировании основного преобразовательного агрегата уже не было. Это подтверждает правомерность использования полученной модели в качестве оценки работы реальной системы резервирования в настоящее время.

Во-вторых, расчетным путем определено, что на всех трех рисунках оптимальное значение критического выходного тока составляет  $I_{кр} = (415 \pm 5)$  А. Это позволяет увидеть реакцию каждого алгоритма на изменение выходного тока. В целом все алгоритмы выполняют переключения обоснованно.

Алгоритм с  $N = 8$  на втором рисунке грамотно отработал первую коммутацию, включив резервный ПА на больший интервал времени. Однако на третьем рисунке видно, что алгоритм привел к лишнему срабатыванию высоковольтного переключателя, в то время как существующий алгоритм обошелся без этого срабатывания.

Алгоритм с  $N = 4$  без корректировки граничного значения тока  $I_{кр}$  реагирует на изменение тока более резко, что привело к одной лишней коммутации на втором графике и двум лишним коммутациям на третьем графике. По умолчанию в качестве начального значения граничного тока  $I_{кр}$  было принято значение

$$I_{кр} = \frac{I_{ст2} - I_{откл}}{2}, \quad (3.3)$$

где  $I_{ст2}$  – ток уставки второй ступени, а  $I_{откл}$  – ток уставки отключения.

Лишние включения говорят о заниженном значении граничного тока  $I_{кр}$ . Поэтому было выполнено моделирование этого же алгоритма с корректировкой значения  $I_{кр}$ . На всех графиках скорректированные значения

$I_{кр}$  лежат в пределах  $I_n / 1,25 < I_{кр} < I_n / 1,15$ . Полученные алгоритмы реагировали на изменение выходного тока так же оперативно, но не приводили к необоснованным срабатываниям.

Более детально график одного из переключений при различных алгоритмах работы системы резервирования приведен на рисунке 3.11. Оптимальное значение тока  $I_{кр}$  для этой тяговой подстанции составляет  $I_{кр} = 419$  А. При превышении этого значения есть смысл подключить резервный ПА. Как видно из рисунка скорректированный алгоритм с граничным значением тока  $I_{кр} = I_n / 1,15$  обеспечил наиболее оптимальный режим включения резервного ПА – отключение ПА произошло значительно ближе к тому моменту времени, когда ток принял значение меньше оптимального  $I_{кр} = 419$  А.

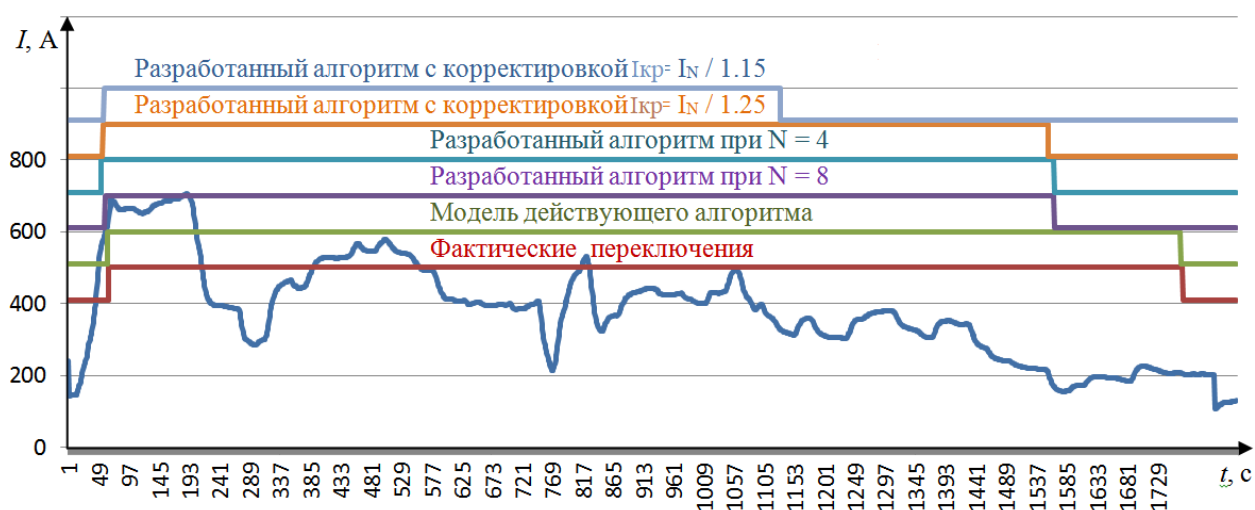


Рисунок 3.11 – Увеличенный участок графика токопотребления и моделирования режима включения резервного ПА

Результаты моделирования режима работы системы резервирования мощности ТП постоянного тока приведены в таблице 3.1, где отражены задержки включения и выключения в секундах по каждой коммутации для четырех тяговых подстанций. Закрашенные ячейки означают, что этой коммутации при данном алгоритме работы системы резервирования не произошло.

Таблица 3.1

## Сравнение временных задержек для различных алгоритмов

Алгоритм	ТП_1				ТП_2				ТП_3				ТП_4						
	1	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7				
Задержки включения резервного ПА, с																			
Текущий	18	560	84		37				8	8		99		26	28				
N = 8	10	20	37		18	28			1	1	31	66		16	15				
N = 4	8	41	30	32	45	55	14	28	1	1	41	32	73	15	30				
N = 4 (корректировка)	11	547	54		32				1	1		72		18	19				
Задержки отключения резервного ПА, с																			
Текущий	687	700	754		421				416	416		416		675	766				
N = 8	486	552	602		301	301			431	431	389	432		826	301				
N = 4	386	438	359	405	300	321	301	349	304	304	300	304	370	602	371				
N = 4 (корректировка)	284	141	228		171				180	180		180		277	295				

По результатам моделирования работы алгоритмов в условиях реальной тяговой нагрузки можно сделать следующие выводы:

1) текущий алгоритм управления системой резервирования мощности тяговых подстанций в среднем работает с временной задержкой включения резервного преобразовательного агрегата 96,4 с, а отключения – 583,4 с;

2) оптимальным значением числа  $N$  – величины возведения в степень в предложенном алгоритме является 4;

3) алгоритмы без корректировки граничного значения тока показали хорошее реагирование на изменение выходного тока ТП (низкое значение задержки включения и отключения резервного ПА), но привели к дополнительным срабатываниям высоковольтных выключателей. Количество срабатываний увеличилось на 22% и 67%, чем при действующем алгоритме. Это приводит к отрицательному эффекту за счет роста затрат на обслуживание и ремонт высоковольтных выключателей, обусловленных уменьшением их ресурса;

4) при наличии корректировки значения  $I_{кр}$  по разработанному алгоритму лишние коммутации не происходили, а временные задержки снизились. В среднем временная задержка включения резервного ПА составила 83,9 с (снижение на 13 %), а отключения – 215,1 с (снижение на 63,1 %). Сокращение временных задержек на фоне отсутствия дополнительных срабатываний ПА приводит к сокращению потерь электрической энергии и, как следствие, к более энергетически эффективному режиму работы тяговых подстанций постоянного тока.

Таким образом, согласно результатам моделирования, предлагаемый алгоритм с динамической корректировкой значения  $I_{кр}$  в процессе работы обладает лучшими характеристиками энергетической эффективности по сравнению со штатным алгоритмом, применяемым в ОАО «РЖД» в настоящее время.

### 3.4 Выводы

1. Выполнен анализ известных алгоритмов управления электротехническими комплексами резервирования мощности тяговых подстанций, на основе которого предложено направление совершенствования управляющего алгоритма путем использования математического алгоритма с самообучением в процессе работы.

2. Разработан усовершенствованный алгоритм автоматического управления системой резервирования мощности тяговых подстанций, реализующий работу по предложенным математическим формулам и осуществляющий корректировку управляющего параметра путем самообучения в процессе работы.

3. Сравнительные исследования путем моделирования в условиях реальной тяговой нагрузки показали большую эффективность предложенного алгоритма в сравнении с известными аналогами за счет

уменьшения временных задержек на включение и отключение резервного преобразовательного агрегата при неизменном количестве суточных переключений.

## **4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА МЕСТ УСТАНОВКИ СИСТЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ И АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ**

### **4.1 Выбор критериев для определения мест установки автоматических систем резервирования мощности**

Система автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока предназначена для реализации оптимальных режимов работы резервных выпрямительно-преобразовательных агрегатов, посредством автоматического управления приводами выключателей первичных обмоток преобразовательных трансформаторов на основании анализа значений либо токов первичных обмоток преобразовательных трансформаторов, либо выходных токов преобразовательных агрегатов в соответствии с алгоритмом эффективного управления и задаваемыми параметрами.

Выбор мест внедрения систем резервирования мощности на этапе предпроектного обследования должен основываться на комплексном анализе различных критериев, которые можно условно разделить на две группы, а именно:

экономические критерии – характеризующиеся уровнем снижения потерь электрической энергии в ПА, соотнесенным к уровню капитальных затрат на протяжении всего жизненного цикла внедряемой системы;

технические критерии – характеризующиеся уровнем надежности работы как самой системы резервирования мощности, так и оборудования системы тягового электроснабжения, в том числе с точки зрения обеспечения перевозочного процесса.

Далее рассмотрим факторы, на основе которых можно принять решение о целесообразности внедрения на тяговой подстанции системы автоматического резервирования мощности.

Основным (первоочередным) критерием выбора мест установки системы резервирования мощности является режим работы ПА тяговой подстанции. Обязательным является условие, что нормальный режим работы тяговой подстанции предусматривает одновременную (параллельную) работу как минимум двух ПА. При этом в случае снижения тяговой нагрузки, либо при полном ее отсутствии в границах смежных с рассматриваемой тяговой подстанцией межподстанционных зонах, отключение одного из двух агрегатов приведет к оптимальной загрузке преобразовательного трансформатора и тем самым к снижению потерь холостого хода.

Вторым критерием, позволяющим на начальном этапе оценить целесообразность внедрения системы резервирования мощности, является график движения поездов. В данном случае наибольший эффект от внедрения системы будет наблюдаться в условиях пакетного (рисунок 4.1а) или частично-пакетного графика движения, то есть, когда на перегоне может находиться несколько поездов попутного направления, в сравнении с пачечным (рисунок 4.1 б) либо непакетным (обычным) графиком.

Это объясняется тем, что при пакетном графике движения тяговая нагрузка распределена не равномерно в течение суток, обеспечивая наличие пиковых значений, в момент возникновения которых необходимо подключение резервного ПА. В этом случае наблюдается снижение случаев включений/отключений преобразовательных агрегатов, что в свою очередь снижает возможный износ высоковольтных выключателей тяговых подстанций и повышает надежность работы самой системы резервирования мощности.

Третий критерий – расход электрической энергии на тягу поездов по тяговой подстанции. Как уже было отмечено, эффективность системы резервирования мощности характеризуется уровнем снижения потерь электрической энергии, достигаемого за счет выбора оптимального режима совместной работы преобразовательных агрегатов. В случае снижения значения тягового тока подстанции ниже некоторого расчетного значения

( $I_{\text{опт}}$ ), зависящего от параметров преобразовательных трансформаторов, параллельная работа ПА становится не эффективной, так как в этом случае возрастают потери холостого хода трансформаторов, что было наглядно показано на рисунке 3.1 и подробно описано ранее.

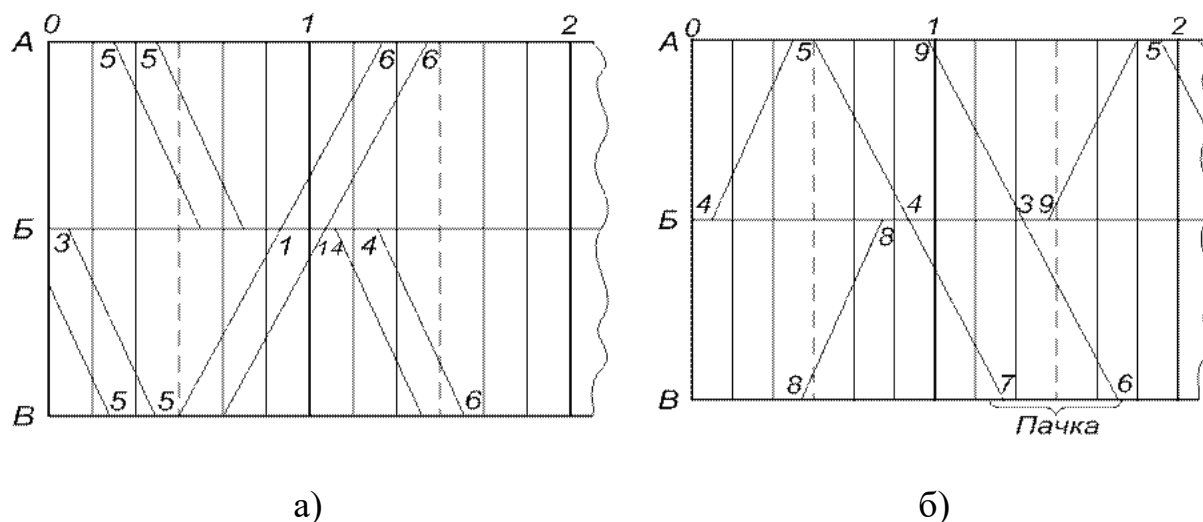


Рисунок 4.1 – График движения на однопутном участке: а – пакетный; б – пачечный

При анализе данного критерия расход электроэнергии необходимо сопоставлять с параметрами преобразовательного трансформатора, а точнее – с его номинальной мощностью.

Четвертым основным критерием, анализ которого возможен только на этапе предпроектного обследования самой тяговой подстанции, является оценочное значение возможного количества переключений системы резервирования мощности. В соответствии с СТО РЖД 07.021.2 – 2015 [130] число переключений системы не должно превышать шести – восьми раз в сутки. При этом следует понимать, что количество переключений можно регулировать выбором соответствующих токовых и временных уставок включения и отключения ПА в случае использования штатного алгоритма работы (рисунок 3.3), либо выбором соответствующего алгоритма работы системы резервирования мощности ТП. На участках со сложным профилем



пути, когда даже при проследовании одиночного поезда может наблюдаться резкое возрастание тягового тока, работа системы может привести как к постоянному переключению трансформаторов, что в свою очередь приведет к быстрому износу высоковольтных выключателей, так и вызвать просадку напряжения в контактной сети, в случае отсутствия специальных систем, снижающих броски тока намагничивания первичных обмоток преобразовательных трансформаторов.

#### **4.2 Научное обоснование выбора тяговых подстанций на участке железной дороги для установки систем резервирования мощности**

Выбор мест установки систем резервирования мощности следует разделить на два этапа:

предварительный этап, включающий анализ параметров участка (суточные графики исполненного движения или заданные размеры движения по участку для грузового, пассажирского, пригородного движения, расход электроэнергии по тяговым подстанциям на тягу поездов, характеристики тяговой подстанции, категории и веса поездов);

этап предпроектного обследования, предусматривающего необходимость инструментального обследования выбранных на первом этапе тяговых подстанций.

Алгоритм выбора мест установки систем резервирования мощности тяговых подстанций в общем виде представлен на рисунке 4.2.

Основной задачей предварительного этапа является выбор тяговых подстанций с наиболее большим возможным технико-экономическим эффектом в случае установки системы резервирования мощности. Первым шагом является выбор только тех тяговых подстанций, на которых при нормальном режиме два ПА находятся в параллельной работе. В случае раздельного режима работы, то есть, когда в работе находится только один

ПА, установка системы резервирования мощности по своей сути является не целесообразной.

Далее выполняется анализ параметров пути. Основным источником анализируемых данных является автоматизированная система путевого хозяйства АСУ-П. Предпочтительными участками для применения системы резервирования мощности являются те зоны, у которых суммарная длина близко расположенных вредных спусков не превысит соответствующее значение  $l_{вр.min}$ , указанное в таблице 4.1. При этом особое внимание уделяется участкам с продольным профилем пути III и IV типов (расчетный подъем от 7 до 12 %) с крутизной затяжных вредных спусков 5,5 ‰ и более.

Третьим шагом выполняется анализ суточного графика исполненного движения и заданных размеров движения по участку для грузовых, пассажирских и пригородных поездов. Источником исходных данных является информационная система ГИД «Урал-ВНИИЖТ». Как уже было отмечено в разделе 4.1 приоритетными являются участки с пакетным или частично-пакетным графиком движения.

Далее (четвертый шаг) выполняется группировка тяговых подстанций по номинальной мощности преобразовательных трансформаторов с последующим анализом расхода электроэнергии на тягу поездов. Источником данных для анализа является информационно-измерительная система АСКУЭ ТП или отчетная форма по расходу электрической энергии ЭО-8. Исходя из того, что технико-экономический эффект от внедрения системы резервирования мощности достигается за счет снижения технических потерь холостого хода в преобразовательных трансформаторах, преимущество имеют тяговые подстанции с наименьшим расходом электрической энергии на тягу поездов.

По итогам выбора наиболее перспективных для внедрения систем резервирования мощности тяговых подстанций необходимо выполнить оценку технико-экономической эффективности системы.

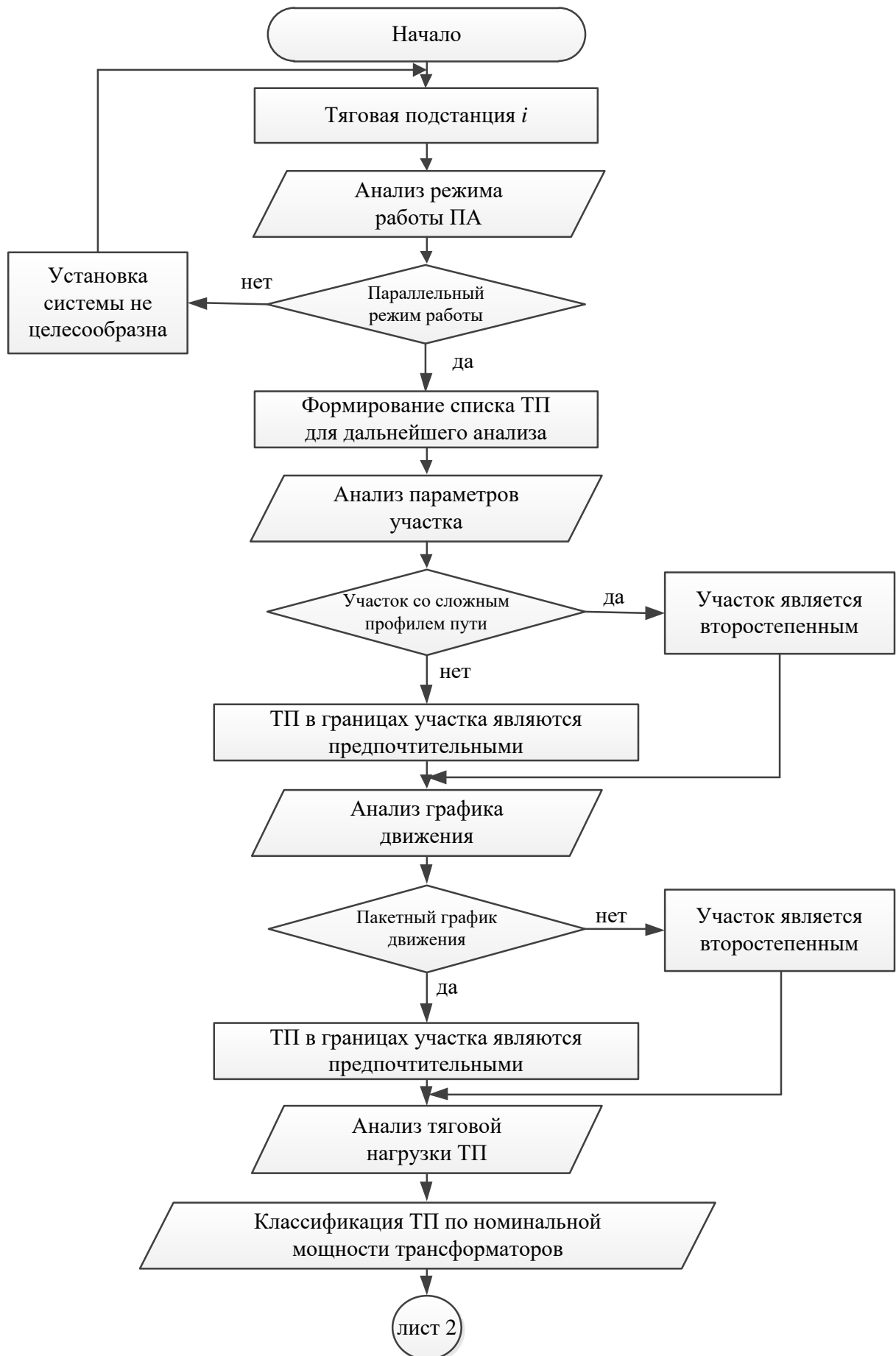


Рисунок 4.2, лист 1

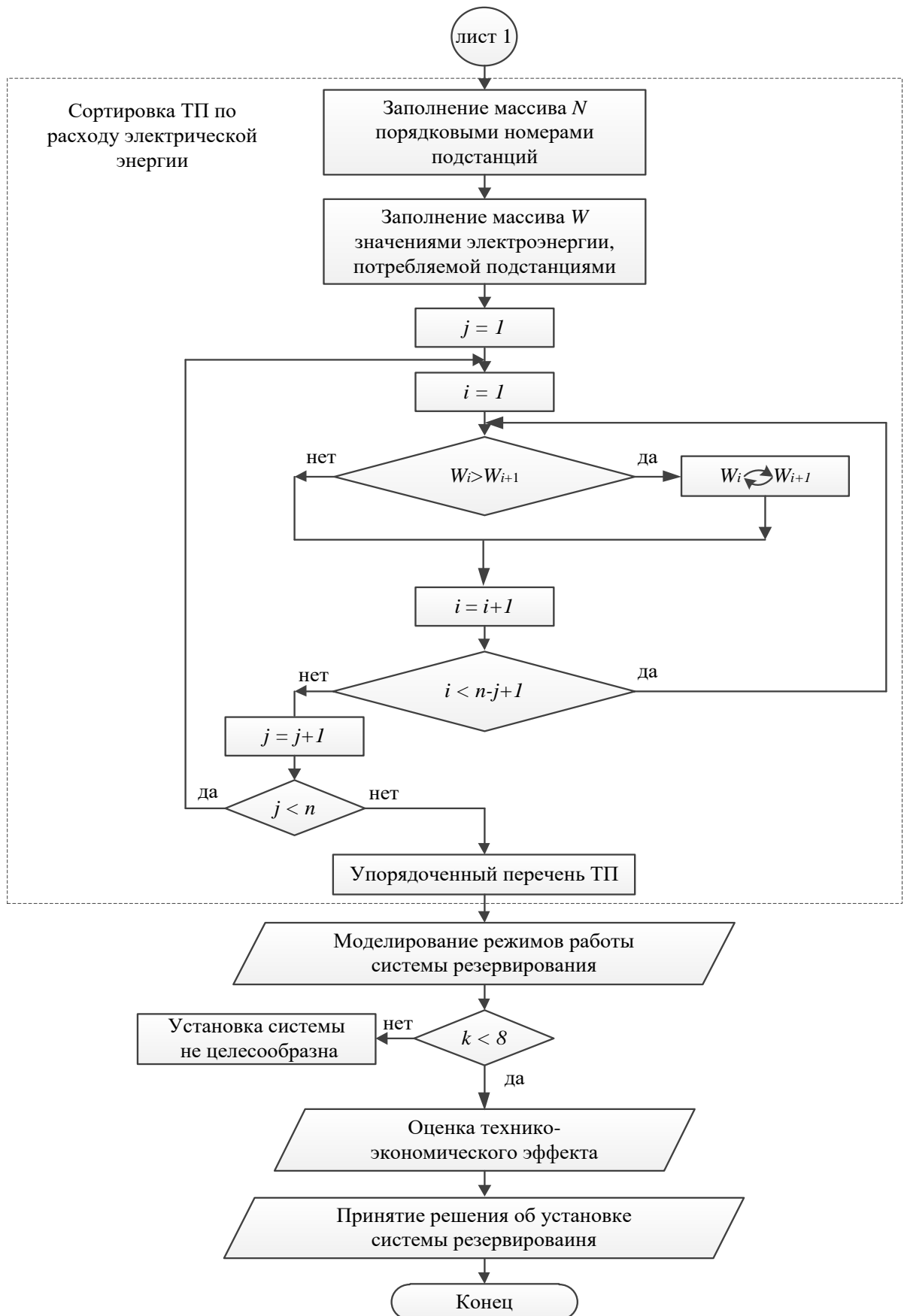


Рисунок 4.2 – Алгоритм выбора мест установки системы резервирования мощности

Параметры вредных спусков

Место расположения вредных спусков	Крутизна вредного спуска, ‰	Значение $l_{вр. min}$ для поездов, км	
		Вес груженых более 3 000 т	Вес порожних до 1 500 т
В непосредственной близости от места остановки поезда	До 9	от 5,8 до 4,3	от 4,4 до 4,0
	Свыше 9	от 4,4 до 4,0	от 4,1 до 3,9
После затяжного подъема	До 9	от 4,7 до 3,2	от 3,3 до 3,0
	Свыше 9	от 3,3 до 2,9	от 3,0 до 2,9
После не затяжного подъема от 3 до 7 ‰	До 9	от 4,0 до 2,7	от 2,8 до 2,6
	Свыше 9	от 2,8 до 2,5	от 2,6 до 2,5
После площадки или подъема до 3 ‰ при $v_{нач} \leq v_{доп} = 80$ км/ч	До 9	от 3,3 до 2,3	от 2,4 до 2,2
	Свыше 9	от 2,4 до 2,1	от 2,2 до 2,1
После площадки и малого подъема, если $v_{нач} > v_{доп} = 80$ км/ч	До 9	1,5	1,5
	Свыше 9		

Оценка выполняется на основе данных, полученных по результатам инструментальных измерений тягового тока и моделирования режимов работы тяговой подстанции.

Технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения системы резервирования мощности выполняется в соответствии с общепринятыми подходами при разработке инновационных проектов внедрения ресурсосберегающих технологий [131]. При этом методика расчета экономического эффекта основана на разнице экономических показателей до и после внедрения системы резервирования мощности. Основным показателем эффективности применения системы является снижение технических потерь электрической энергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока.

Порядок расчета ожидаемого технико-экономического эффекта выглядит следующим образом. В качестве исходных данных используются

значения тяговой нагрузки отдельно по каждому ПА, полученные по данным регистратора тока с односекундным интервалом времени. Далее используя компьютерное моделирование на основе алгоритма работы системы резервирования мощности, с заданными значениями исходных токовых и временных уставок, получаем новый файл, содержащий расчетные значения тяговых токов каждого ПА, а также количество переключений системы за сутки.

Снижение потерь электрической энергии в ПА за счет внедрения системы резервирования за период времени  $T$  рассчитывается по выражению, кВт·ч:

$$\Theta_T = \sum_T \Delta W_{\text{исх.}}^{\text{ПА}} - \sum_T \Delta W^{\text{ПА}}, \quad (4.1)$$

где  $\sum_T \Delta W_{\text{исх.}}^{\text{ПА}}$  – потери электрической энергии в ПА, приведенные к базовому периоду (до внедрения Системы), кВт·ч;

$\sum_T \Delta W^{\text{ПА}}$  – потери электрической энергии в ПА в отчетном периоде, кВт·ч.

Потери электроэнергии в ПА определяются по формуле, кВт·ч:

$$\sum_T \Delta W^{\text{ПА}} = \sum_j \sum_{i=1}^T (\Delta W_{ji}^{\text{ПТ}} + \Delta W_{ji}^{\text{В}}), \quad (4.2)$$

где  $\Delta W_{ji}^{\text{ПТ}}$  – потери электроэнергии в  $j$ -м преобразовательном трансформаторе в  $i$ -ом расчетном периоде, определяемые по формуле, кВт·ч:

$$\begin{aligned} \Delta W_{ji}^{\text{ПТ}} = \Delta W_{\text{xx}ji}^{\text{ПТ}} + \Delta W_{\text{н}ji}^{\text{ПТ}} = \Delta P_{\text{xx}j} \sum_{i=1}^T t_{\text{p}ji} \cdot \left( \frac{U_{\text{л}i}}{U_{\text{лном}}} \right)^2 + \\ + \Delta P_{\text{к.з}j} \cdot \sum_{i=1}^T t_{\text{p}ji} \cdot \left( \frac{I_{dji}}{I_{d\text{ном}j}} \right)^2, \end{aligned} \quad (4.3)$$

- где  $t_{pji}$  – продолжительность работы  $j$ -го преобразовательного агрегата в  $i$ -ом интервале усреднения измерений Системы (интервал усреднения равен 1 секунде), ч;
- $\Delta P_{к.з.j}$ ,  $\Delta P_{х.х.j}$  – потери холостого хода и короткого замыкания  $j$ -го преобразовательного трансформатора, определяемые в соответствии с паспортными данными на трансформатор, либо по результатам контрольных замеров (согласно паспортным либо справочным данным), кВт;
- $U_{1i}$  – действующее значение линейного напряжения первичной обмотки трансформатора в интервале усреднения (по данным Системы), В
- $U_{1ном}$  – номинальное значение линейного напряжения первичной обмотки трансформатора, В
- $I_{dji}$  – среднее значение выпрямленного тока  $j$ -го преобразователя в  $i$ -ом интервале усреднения, А:

$$I_{dji} = \frac{I_{1ji} \cdot b_j}{k_{тпа_j}}, \quad (4.4)$$

- где  $I_{1ji}$  – действующее значение тока нагрузки  $j$ -го преобразовательного трансформатора в  $i$ -ом интервале усреднения (по данным Системы), А;
- $b_j$  – коэффициент приведения выпрямленного тока в зависимости от схемы выпрямителя (согласно справочным данным);
- $k_{тпа_j}$  – коэффициент трансформации  $j$ -го преобразовательного трансформатора:

$$k_{тпа_j} = \frac{U_{1j}}{U_{2j}}, \quad (4.5)$$

где  $U_{1j}, U_{2j}$  – действующие значения линейных напряжений первичной и вторичной вентильных обмоток  $j$ -го преобразовательного трансформатора (согласно паспортным либо справочным данным), В

$I_{d \text{ ном } j}$  – номинальный ток  $j$ -го преобразовательного трансформатора, приведенный к цепи выпрямленного напряжения (согласно паспортным либо справочным данным), А.

$\Delta W_{ji}^B$  – потери электроэнергии в  $j$ -м выпрямительном преобразователе тяговой подстанции в  $i$ -ом интервале усреднения, определяемые по формуле, кВт·ч:

$$\Delta W_{ji}^B \approx \frac{k_{cxj} s_j U_{0j} I_{dji}}{10^3} \left( 1 + \frac{k_{cxj} R_{dj} I_{dji}}{2 \cdot a_j U_{0j}} \right), \quad (4.6)$$

где  $k_{cxj}$  – коэффициент схемы выпрямления  $j$ -го выпрямительного преобразователя, для мостовых схем  $k_{cx} = 2$ , для нулевых схем  $k_{cx} = 1$ ;

$s_j, a_j$  – число последовательно и параллельно включенных диодов в вентильном плече  $j$ -го выпрямительного преобразователя соответственно, определяемое в соответствии с паспортными (справочными) данными;

$U_{0j}$  – пороговое напряжение диода  $j$ -го выпрямительного преобразователя, определяемое в соответствии с паспортными (справочными) данными, В;

$R_{dj}$  – усредненное динамическое сопротивление прямой ветви вольт-амперной характеристики диода  $j$ -го выпрямительного преобразователя, определяемое в соответствии с паспортными (справочными) данными, Ом.

Потери электрической энергии в ПА, приведенные к базовому периоду

$\sum_T \Delta W_{\text{исх.}}^{\text{ПА}}$ , рассчитываются по выражениям (4.2 – 4.6) с учетом параллельной



работы ПА. В этом случае взамен  $I_{d_{ji}}$  принимаются значения  $I'_{d_{ji}}$ , рассчитанные по выражениям, А:

$$\begin{cases} I'_{d_{1i}} = k_{\text{нер}} \cdot \sum_j I'_{d_{ji}}; \\ I'_{d_{2i}} = (1 - k_{\text{нер}}) \cdot \sum_j I'_{d_{ji}}, \end{cases} \quad (4.7)$$

где  $k_{\text{нер}}$  – коэффициент, характеризующий неравномерность загрузки ПА в режиме параллельной работы:

$$k_{\text{нер}} = \frac{I''_{d_{1i}}}{\sum_j I''_{d_{ji}}} = \frac{I''_{d_{1i}}}{I''_{d_{1i}} + I''_{d_{2i}}}, \quad (4.8)$$

где  $I''_{d_{1i}}, I''_{d_{2i}}$  – соответственно средние значения выпрямленного тока первого и второго преобразователя в  $i$ -ом интервале усреднения, когда в работе находились оба ПА, А.

Расчет годового эффекта, достигаемого за счет внедрения системы резервирования, по односекундным интервалам усреднения (в ручном режиме, который может быть реализован в системе) весьма трудоемкий. В связи с этим расчет эффекта целесообразно выполнять по данным контрольных суток. В этом случае годовой эффект рассчитывается по выражению, кВт·ч:

$$\Theta_{\Gamma} = \delta_T \cdot W_{\text{тяг.}}, \quad (4.9)$$

где  $\delta_T$  – доля снижения потерь электроэнергии в ПА от расхода электрической энергии на тягу поездов по тяговой подстанции, о.е.:

$$\delta_T = \frac{\Theta_T}{W_{T \text{ тяг.}}}, \quad (4.10)$$

где  $W_{T \text{ тяг.}}$  – расход электрической энергии на тягу поездов по тяговой подстанции за контрольные сутки (по данным АСКУЭ), кВт·ч;

- $\mathcal{E}_T$  – снижение потерь электрической энергии в ПА за счет внедрения Системы за контрольные сутки, рассчитанное по выражениям (4.1) – (4.8), кВт·ч;
- $W_{\text{тяг.}}$  – годовой расход электрической энергии на тягу поездов по тяговой подстанции (по отчетным данным), кВт·ч.

В итоге, формула оценки снижения потерь электрической энергии в ПА на основе его входного тока  $I_{\text{ТВХ}}$  и входного напряжения  $U_{\text{ТВХ}}$  за период времени  $t_p$  принимает вид [132]:

$$W_{\text{п. ПА}} \approx P_{\text{хх}} t_p \left( \frac{U_{\text{ТВХ}}}{U_{\text{ТНОМ}}} \right)^2 + P_{\text{кз}} t_p \left( \frac{U_{\text{ТНОМ}}}{I_{\text{ТВЫХ\_НОМ}} I_{\text{ТВХ}} b U_{\text{ТВЫХ\_НОМ}}} \right)^2 + \frac{t_p k_{\text{сх}} s U_0 I_{\text{ТВЫХ}}}{10^3} \cdot \left( 1 + \frac{k_{\text{сх}} R_{\text{д}} I_{\text{ТВЫХ}}}{2a U_0} \right), \quad (4.11)$$

где  $P_{\text{хх}}$ ,  $P_{\text{кз}}$  – потери холостого хода и короткого замыкания преобразовательного трансформатора,  $U_{\text{ТНОМ}}$  – его номинального входное напряжение,  $I_{\text{ТВЫХ\_НОМ}}$  – его номинальный выходной ток,  $s$ ,  $a$  – количество последовательных и параллельных диодов в плече выпрямительного преобразователя,  $U_0$  – падение напряжения на одном из его диодов,  $R_{\text{д}}$  – усредненное динамическое сопротивление ВАХ диода,  $b$  – коэффициент приведения в зависимости от схемы выпрямления,  $k_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы выпрямления (1 – для нулевых, 2 – для мостовых).

Критерием принятия решения о целесообразности внедрения системы резервирования мощности является следующая функция:

$$K = f(\mathcal{E}_T, 3), \quad (4.12)$$

где 3 – необходимые капитальные и эксплуатационные затраты при внедрении системы резервирования на протяжении всего жизненного цикла системы.

### **4.3 Апробация и внедрение разработанных технических и технологических решений резервирования мощности тяговых подстанций в условиях реального производства**

Апробация и внедрение разработанных технических и технологических решений резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока были выполнены на действующем участке Омской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» в условиях реального производства.

В границах обследуемого участка расположено шесть тяговых подстанций, технические характеристики преобразовательных агрегатов которых приведены в таблицах 4.2, 4.3.

Расчет технико-экономического эффекта выполняется исходя из условия, что на рассматриваемых тяговых подстанциях применяется параллельный режим работы ПА.

Участок имеет продольный профиль пути I типа, представленный на рисунке 4.3. Максимальный подъем составляет 2,5 %.

На рассматриваемом участке применяется частично-пакетный график движения. На рисунке 4.4 приведены графики тягового тока за контрольные сутки, а также результаты моделирования режимов работы ПА при внедрении системы резервирования мощности.

Таблица 4.2

## Характеристики преобразовательных трансформаторов тяговых подстанций

Тяговая подстанция	Номер ввода	Тип трансформатора	Расход электроэнергии на тягу поездов (за 2020 г.), кВт·ч	Характеристики преобразовательного трансформатора		
				номинальный ток ( $I_{d_{ном j}}$ ), А	мощность холостого хода ( $P_{xx j}$ ), кВт	мощность короткого замыкания ( $P_{кз j}$ ), кВт
ТП №1	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	12 390 257	3200	15,0	70,1
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1		3200	16,5	68,5
ТП №2	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	27 460 240	3200	14,2	69,6
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1		3200	14,2	69,6
ТП №3	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	27 728 730	3200	15,7	71,2
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1		3200	15,7	71,2
ТП №4	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	24 038 846	3200	15,8	67,7
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1		3200	15,7	72,4
ТП №5	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	28 423 887	3200	15,0	69,1
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1		3200	16,5	71,4
ТП №6	Ввод 1	ТРДП-12500/10ЖУ1	20 074 015	3200	15,0	68,1
	Ввод 2	ТРДП-12500/10ЖУ1		3200	15,0	67,6

Таблица 4.3

## Характеристики выпрямителей тяговых подстанций

Тяговая подстанция	Номер ввода	Характеристики тягового преобразователя						
		тип выпрямителя	тип диодов	схема выпрямления	пороговое напряжение диодов ( $U_{0j}$ ), В	усредненное динамическое сопротивление ( $R_{dj}$ ), Ом	количество диодов в плече	
							соединенных параллельно ( $a_j$ )	соединенных последовательно ( $s_j$ )
ТП №1	Ввод 1	ТПЕД-3150-3,3к-У1	ДЛ133-500	12-пульс. паралл.	0,85	0,00041	3	8
	Ввод 2	ТПЕД-3150-3,3к-У1	ДЛ133-500	12-пульс. послед.	0,85	0,00041	6	4
ТП №2	Ввод 1	ПВЭ-5У1	ВЛ-200-12	12-пульс. паралл.	1,12	0,0007	5	7
	Ввод 2	ТПЕД-3150-3,3к-У1	ДЛ133-500	12-пульс. паралл.	0,85	0,00041	3	8
ТП №3	Ввод 1	ПВЭ-3	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	0,0007	5	9
	Ввод 2	БСЕ-1 4ВД5-Д5	Д453-2000	12-пульс. паралл.	0,8	0,0003	1	4
ТП №4	Ввод 1	ПВЭ-5У1	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	0,0007	5	7
	Ввод 2	БСЕ-1 4ВД5-Д5	Д453-2000	12-пульс. паралл.	0,8	0,0003	1	4
ТП №5	Ввод 1	ПВЭ-5У1	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	0,0007	5	7
	Ввод 2	БСЕ-1 4ВД5-Д5	Д453-2000	12-пульс. паралл.	0,8	0,0003	1	4
ТП №6	Ввод 1	ТПЕД-3150-3,3к-У1	ДЛ133-500	12-пульс. паралл.	0,85	0,00041	3	8
	Ввод 2	ПВЭ-3	ВЛ-200	12-пульс. паралл.	1,12	0,0007	5	9

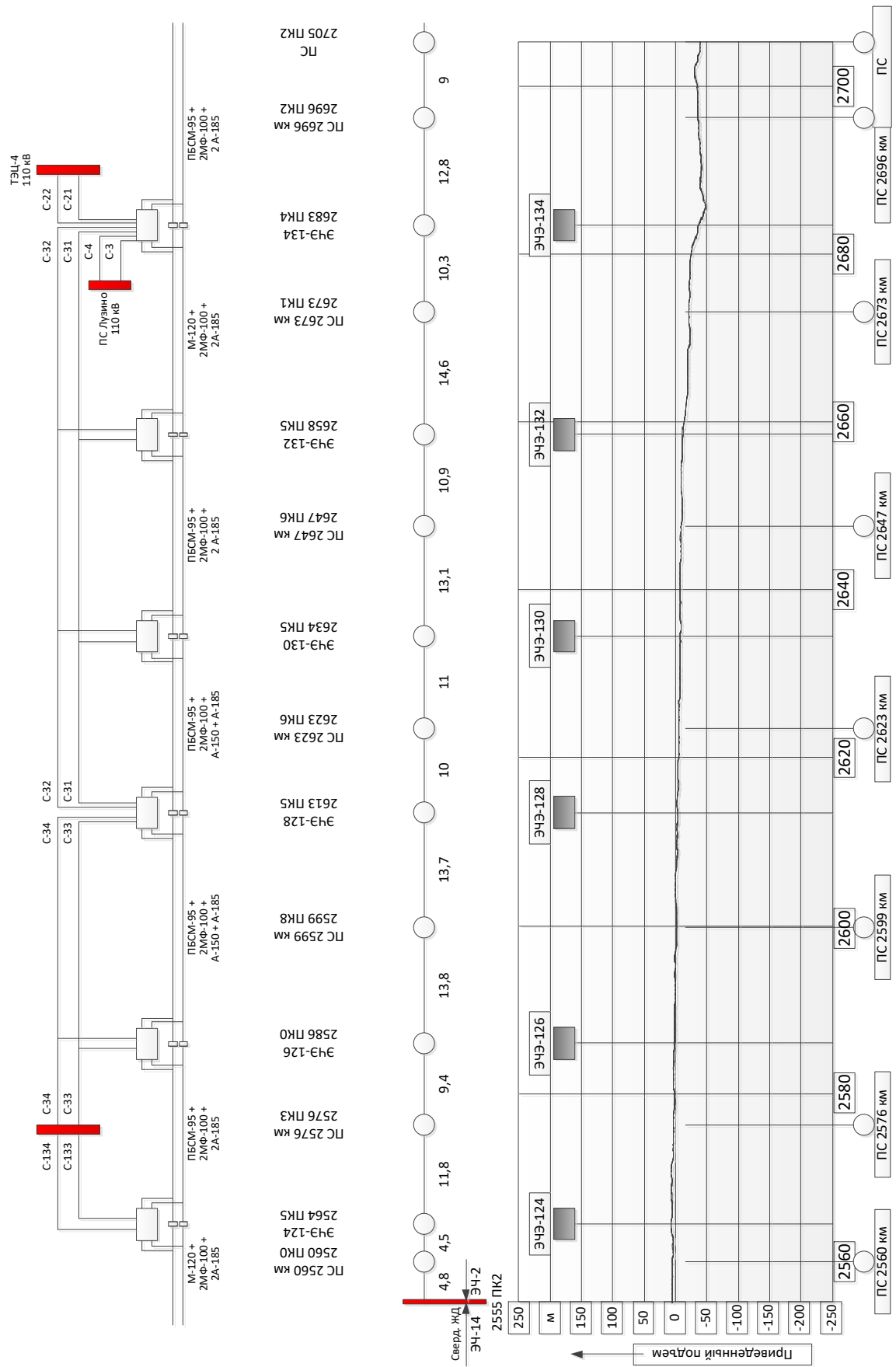
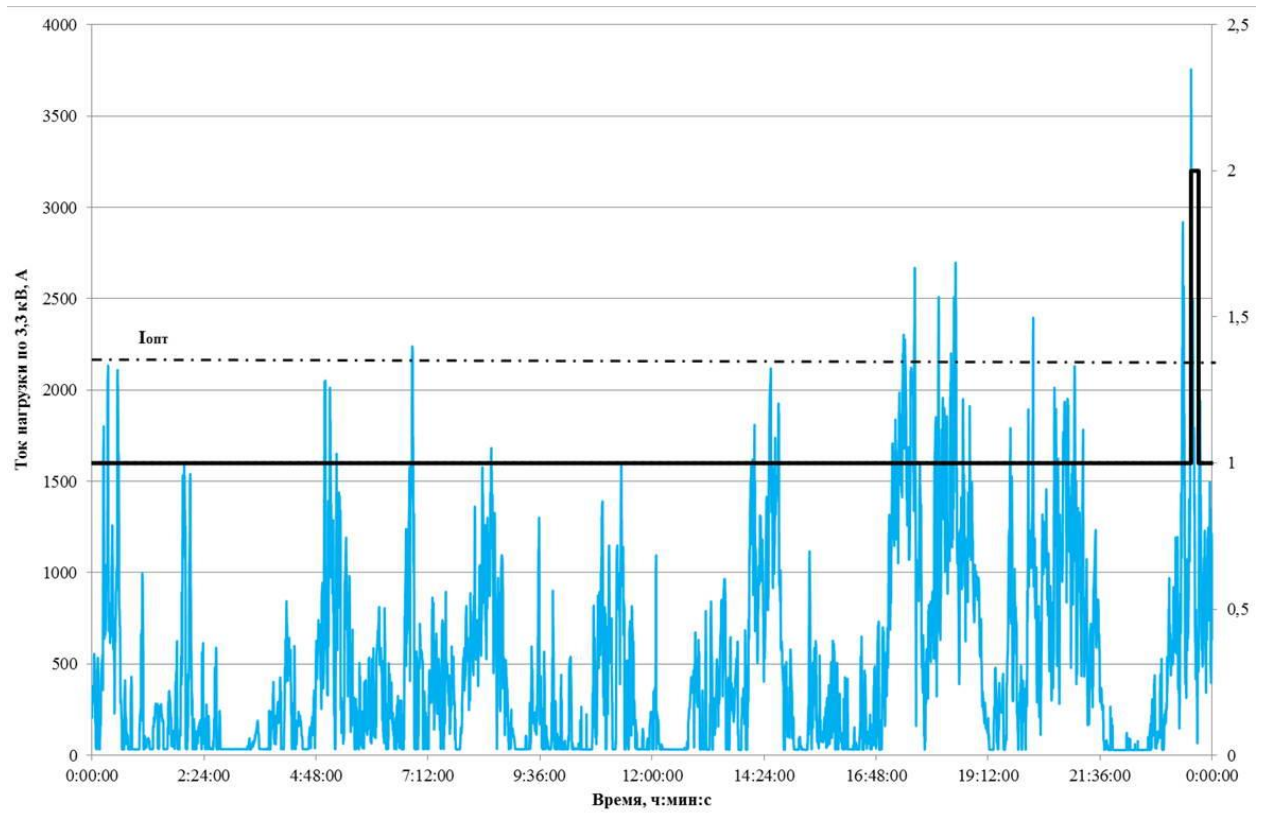
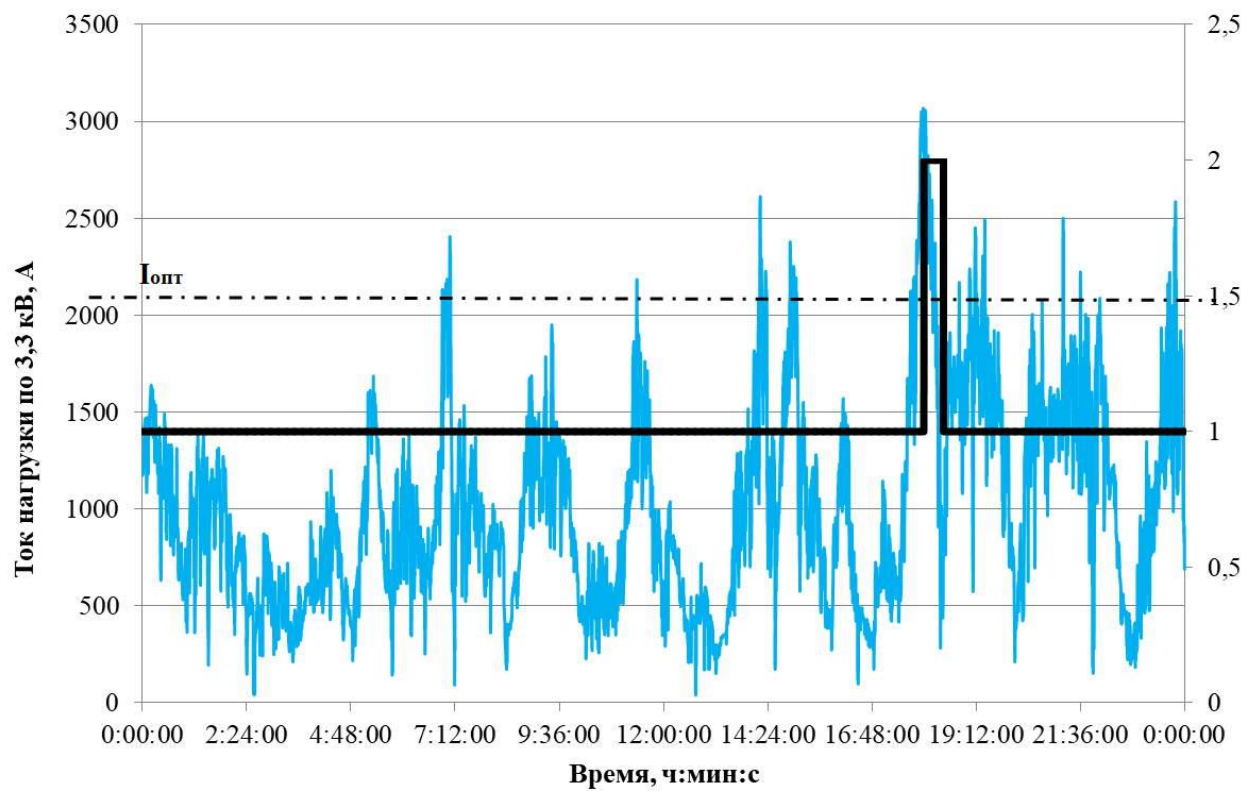


Рисунок 4.3 – Схема рассматриваемого участка Омской дистанции электроснабжения

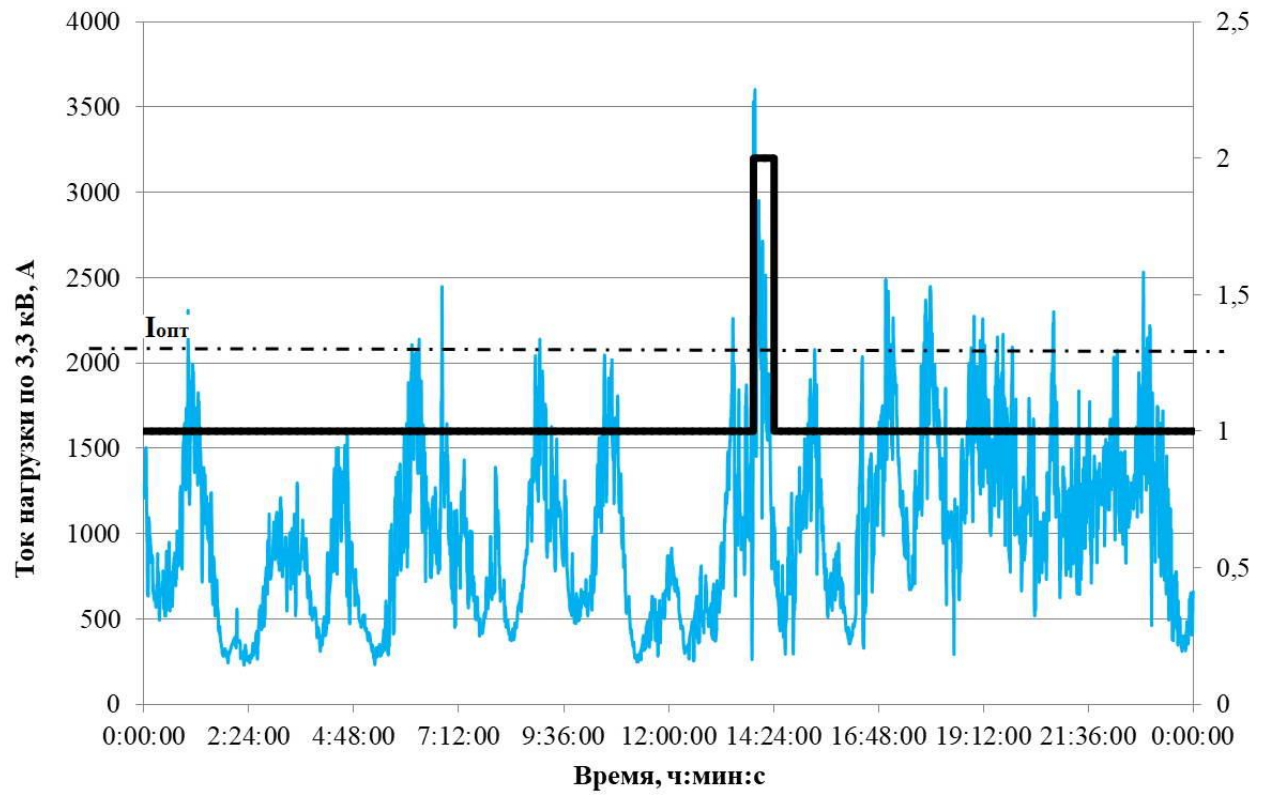


а)

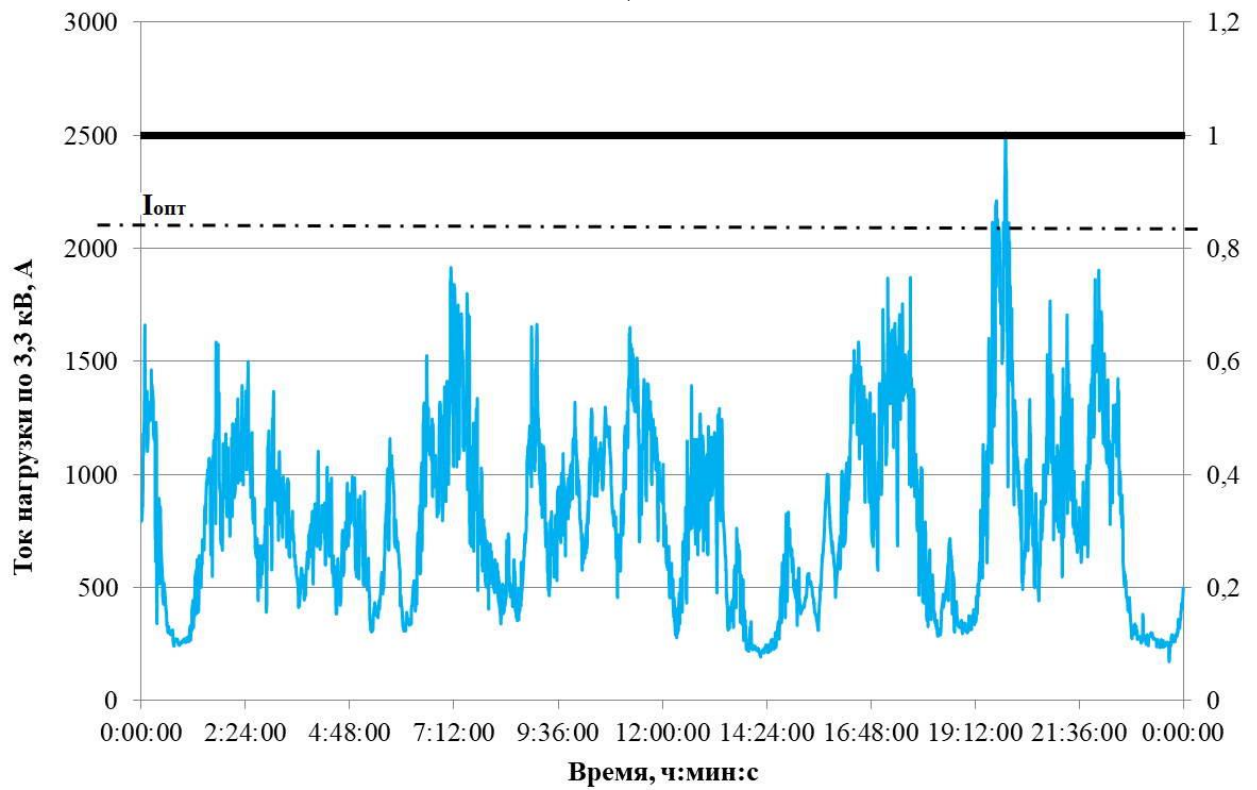


б)

Рисунок 4.4, лист 1



в)



г)

Рисунок 4.4, лист 2



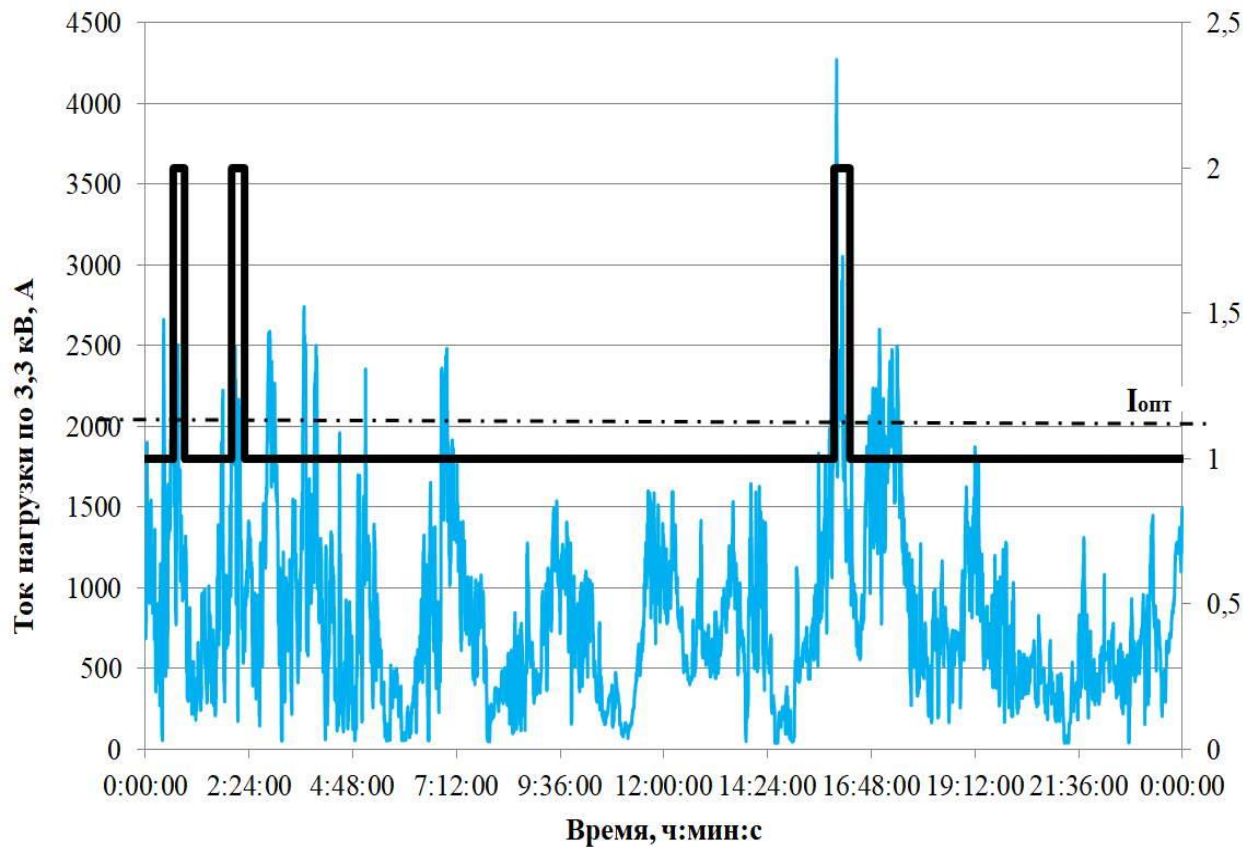
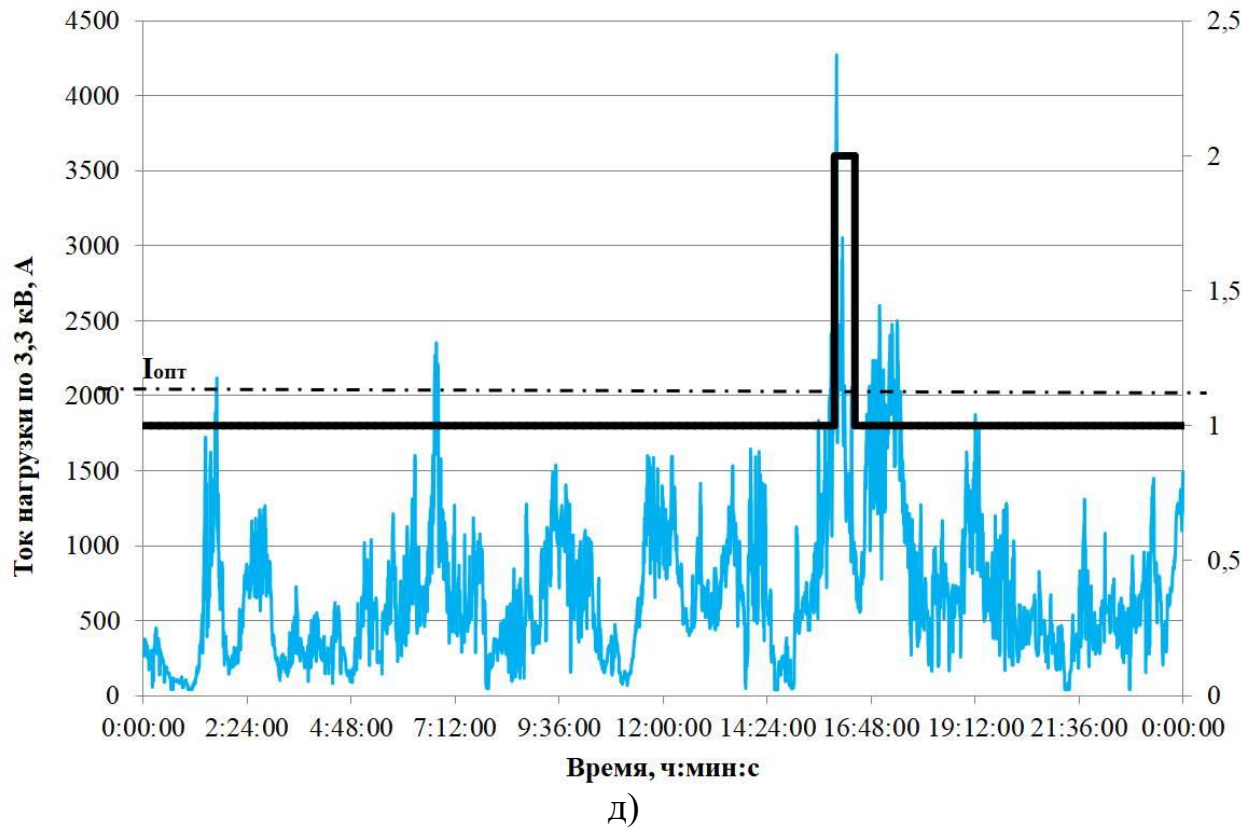


Рисунок 4.4 – Суточный график тягового тока по тяговым подстанциям в границах исследуемого участка: а – ТП №1, б – ТП №2, в – ТП №3, г – ТП №4, д – ТП №5, е – ТП №6

Значение тока тяговой нагрузки, при которой целесообразна параллельная работа двух трансформаторов, находится по выражению:

$$I_{\text{опт}} = I_{\text{днт}} \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{\text{мд}}} n(n+1)}, \quad (4.13)$$

где  $I_{\text{днт}}$  – номинальный выпрямленный ток, А;

$\Delta P$  – постоянные потери мощности в ПА, не зависящие от нагрузки, кВт:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{хх}} + \Delta P_{\text{ст.ур}} + \Delta P_{\text{охл}}, \quad (4.14)$$

$\Delta P_{\text{хх}}$  – потери холостого хода преобразовательного трансформатора, кВт;

$\Delta P_{\text{ст.ур}}$  – потери в стали уравнительного реактора, кВт;

$\Delta P_{\text{охл}}$  – потери мощности в системе охлаждения выпрямительного преобразователя, кВт.

$\Delta P_{\text{мд}}$  – суммарное значение потерь мощности в меди обмоток преобразовательных трансформаторов и силовых диодах, зависящие от квадрата нагрузки, кВт:

$$\Delta P_{\text{мд}} = \Delta P_{\text{кз}} + \frac{3 \cdot n_{\text{посл}} \cdot s \cdot R_{\text{д}} \cdot I_{\text{днт}}^2 \cdot 10^{-3}}{n_{\text{кат}} \cdot a}, \quad (4.15)$$

где  $n_{\text{кат}}$  – число плеч выпрямителя в катодной группе;

$n_{\text{посл}}$  – число плеч выпрямителя в последовательной цепи между анодом и катодом.

$n$  – количество преобразовательных агрегатов тяговой подстанции.

Расчет технико-экономического эффекта выполнен на основе выражений (4.1) – (4.15). Результаты расчета снижения суточных потерь электрической энергии за контрольные сутки приведены в таблице 4.4.

На основе данных, полученных по результатам моделирования режимов работы системы резервирования мощности, можно сделать вывод, что внедрение системы резервирования на тяговых подстанциях в границах рассматриваемого участка является целесообразным. Как видно из графиков нагрузки (см. рисунок 4.4) значения тягового тока находятся ниже уровня, при котором целесообразным является параллельная работа двух ПА. При этом на тяговой подстанции ТП №3 оптимальным является режим с одним рабочим ПА, а установка системы резервирования целесообразна только с учетом увеличения тяговой нагрузки, например, в случае повышения размеров движения или увеличения массы поездов.

Таблица 4.4

## Результаты расчета потерь электрической энергии в ПА

Наименование оборудования	Потери электроэнергии, кВт·ч	
	«без проекта»	«с проектом»
<b>Тяговая подстанция ТП №1</b>		
Преобразовательный трансформатор №1	390	447
Преобразовательный трансформатор №2	423	3
Выпрямитель №1	88	179
Выпрямитель №2	39	1
Суммарные потери	939	630
Снижение потерь за контрольные сутки, в том числе:		
кВт·ч		309
% от расхода на тягу поездов		0,78
Фактический расход электроэнергии на тягу поездов за 2020 г. (по данным АСКУЭ), кВт·ч		12 390 257
Расчетное значение снижения потерь за 2020 г., кВт·ч/год		96 209
<b>Тяговая подстанция ТП №2</b>		
Преобразовательный трансформатор №1	393	534
Преобразовательный трансформатор №2	384	9
Выпрямитель №1	214	429
Выпрямитель №2	172	7
Суммарные потери	1163	979
Снижение потерь за контрольные сутки, в том числе:		
кВт·ч		184
% от расхода на тягу поездов		0,22
Фактический расход электроэнергии на тягу поездов за 2020 г. (по данным АСКУЭ), кВт·ч		27 460 240
Расчетное значение снижения потерь за 2020 г., кВт·ч/год		61 044
<b>Тяговая подстанция ТП №3</b>		
Преобразовательный трансформатор №1	431	11
Преобразовательный трансформатор №2	451	587
Выпрямитель №1	234	10
Выпрямитель №2	111	229
Суммарные потери	1227	836
Снижение потерь за контрольные сутки, в том числе:		
кВт·ч		391
% от расхода на тягу поездов		0,45
Фактический расход электроэнергии на тягу поездов за 2020 г. (по данным АСКУЭ), кВт·ч		27 728 730
Расчетное значение снижения потерь за 2020 г., кВт·ч/год		125 199

Окончание таблицы 4.4

<b>Тяговая подстанция ТП №4</b>		
Преобразовательный трансформатор №1	409	481
Преобразовательный трансформатор №2	408	0
Выпрямитель №1	136	287
Выпрямитель №2	61	0
Суммарные потери	1014	768
Снижение потерь за контрольные сутки, в том числе:		
кВт·ч		246
% от расхода на тягу поездов		0,42
Фактический расход электроэнергии на тягу поездов за 2020 г. (по данным АСКУЭ), кВт·ч		24 038 846
Расчетное значение снижения потерь за 2020 г., кВт·ч/год		100 271
<b>Тяговая подстанция ТП №5</b>		
Преобразовательный трансформатор №1	384	462
Преобразовательный трансформатор №2	425	8
Выпрямитель №1	109	238
Выпрямитель №2	114	5
Суммарные потери	1032	714
Снижение потерь за контрольные сутки, в том числе:		
кВт·ч		318
% от расхода на тягу поездов		0,58
Фактический расход электроэнергии на тягу поездов за 2020 г. (по данным АСКУЭ), кВт·ч		28 423 887
Расчетное значение снижения потерь за 2020 г., кВт·ч/год		163 930
<b>Тяговая подстанция ТП №6</b>		
Преобразовательный трансформатор №1	410	142
Преобразовательный трансформатор №2	430	524
Выпрямитель №1	167	63
Выпрямитель №2	300	478
Суммарные потери	1306	1206
Снижение потерь за контрольные сутки, в том числе:		
кВт·ч		100
% от расхода на тягу поездов		0,12
Фактический расход электроэнергии на тягу поездов за 2020 г. (по данным АСКУЭ), кВт·ч		20 074 015
Расчетное значение снижения потерь за 2020 г., кВт·ч/год		24 244

Внешний вид блока управления системы резервирования мощности, смонтированного на одной из тяговых подстанций рассматриваемого участка железной дороги представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Внешний вид блока управления системы резервирования мощности, смонтированного на одной из тяговых подстанций

Результаты расчета снижения суточных и годовых потерь электроэнергии за 2020 год представлены в таблице 4.5 и приведены в виде диаграммы на рисунке 4.6.

Таблица 4.5

Результаты расчета снижения суточных и годовых потерь электроэнергии за 2020 год

Тяговая подстанция	Расчетное снижение суточных потерь		Расчетное снижение потерь за 2020 г.
	кВт·ч	% от расхода на тягу поездов	кВт·ч
ТП №1	309	0,78	96209
ТП №2	184	0,22	61044
ТП №3	391	0,45	125199
ТП №4	246	0,42	100271
ТП №5	318	0,58	163930
ТП №6	100	0,12	24244

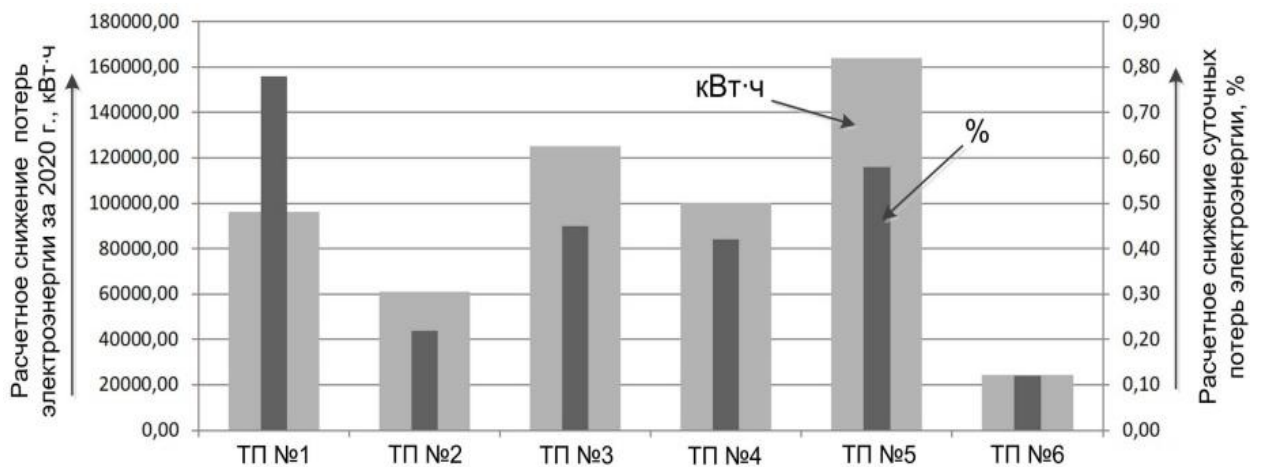


Рисунок 4.6 – Диаграмма результатов расчета снижения суточных и годовых потерь электроэнергии за 2020 год

Снижение потерь электрической энергии при внедрении системы резервирования мощности на шести тяговых подстанциях участка составило 570,8 тыс. кВт·ч в год, или 0,45 % от расхода электрической энергии на тягу поездов в границах рассматриваемого участка.

#### 4.4 Выводы

1. Разработана методика выбора мест установки автоматических систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока для повышения эффективности функционирования системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств. В качестве исходных данных методики используются показания штатных приборов учета тяговой подстанции, известные параметры установленного на ней оборудования, а так же результаты натурных измерений. Применение методики позволяет оценить эффект от использования системы резервирования мощности на конкретной тяговой подстанции, выраженный в количестве электрической энергии, сэкономленной за расчетный период.

2. Выполнена практическая апробация и внедрение разработанных технических и технологических решений по эффективному функционированию систем резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в условиях реальной эксплуатации на участке железной дороги. Результаты апробации показали эффективность и работоспособность представленных решений, что позволило увеличить энергетическую эффективность участка дороги на 0,45 %, что эквивалентно снижению потерь электроэнергии на 570,8 тыс. кВт·ч в год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на обеспечение эффективного управления технологическими режимами тяговых подстанций постоянного тока. Их применение позволит повысить энергетическую эффективность системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств за счет управления работой тяговых подстанций в режимах автоматического резервирования мощности.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Исследовано влияние внешних воздействий на работоспособность электротехнических комплексов тяговых подстанций в системе электроснабжения транспортных средств постоянного тока и предложен усовершенствованный способ повышения ее энергетической эффективности посредством управления технологическими режимами автоматического резервирования мощности тяговых подстанций.

2. Разработана аппаратная часть электротехнического комплекса автоматического резервирования мощности для тяговых подстанций с двумя преобразовательными агрегатами, обеспечивающая управление высоковольтными выключателями преобразовательных трансформаторов на основе сигналов выходного, либо входного токов преобразовательных агрегатов. Помимо использования типовых решений, для элемента аппаратной части – беспроводного датчика выходного тока преобразовательного агрегата разработан оригинальный источник питания от напряжения тяговой сети, защищенный патентом на полезную модель.

3. Разработан управляющий алгоритм, позволяющий реализовать технологические режимы эффективного функционирования электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока в системах электроснабжения



железнодорожных транспортных средств с использованием оригинальных математических выражений и корректировкой управляющего параметра путем самообучения в процессе работы. Сравнительные исследования методами моделирования в условиях реальной тяговой нагрузки показали повышение энергетической эффективности системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств при управлении режимами автоматического резервирования мощности тяговых подстанций с использованием предложенного алгоритма за счет снижения временных задержек на включение и отключение резервного преобразовательного агрегата при неизменном количестве суточных переключений.

4. Разработана методика выбора мест установки электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока, позволяющая выполнять оценку энергетической эффективности системы электроснабжения железнодорожных транспортных средств при установке на конкретную тяговую подстанцию и производить отбор наиболее выгодных мест установки по ожидаемому энергетическому эффекту. В качестве исходных данных для применения методики используются показания штатных приборов учета тяговой подстанции и результаты натурных измерений, выполненных при помощи регистратора, устанавливаемого в ее вторичных цепях.

5. Разработанные технические и технологические решения были использованы при создании и внедрении шести интеллектуальных электротехнических комплексов автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока на одном из участков Омской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги, обеспечивших эффективное управление технологическими режимами и повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения участка за счет снижения потерь электроэнергии в среднем на 570 тыс. кВт•ч в год.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается совершенствование управляющего алгоритма и дальнейшая модернизация аппаратной части электротехнического комплекса резервирования мощности тяговых подстанций для управления тремя преобразовательными агрегатами в системе электроснабжения железнодорожных транспортных средств постоянного тока.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Белозеров, О. В. Доклад генерального директора - председателя правления открытого акционерного общества «Российские железные дороги» О. В. Белозерова на итоговом заседании правления ОАО «РЖД» / О. В. Белозеров. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 7–16.

2. Гапанович, В. А. Энергетическая стратегия и электрификация российских железных дорог / В. А. Гапанович, С. Н. Епифанцев, В. А. Овсейчук. – Москва : Эко-Пресс, 2012. – 195 с. – Текст : непосредственный.

3. Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 26.12.2014 № 512. – Москва : ОАО «РЖД», 2015. – Текст : непосредственный.

4. Игин, В. Н. Концепция развития энергетической стратегии / В. Н. Игин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2016. – № 5 (713). – С. 10–12.

5. Игин, В. Н. Концепция развития энергетической стратегии / В. Н. Игин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2016. – № 6 (714). – С. 17–19.

6. Давыдов, Б. И. Анализ энергетической эффективности тяги поездов (на участках Дальневосточной железной дороги) (Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск) / Б. И. Давыдов, О. А. Култашова. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2006. – № 2. – С. 43–47.

7. Васильев, И. П. Пути повышения энергетической эффективности электровозов переменного тока с коллекторным приводом / И. П. Васильев. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2017. – № 2 (722). – С. 43–46.

8. Игин, В. Н. Энергоэффективность локомотивов: планирование и прогнозирование / В. Н. Игин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2016. – № 4 (712). – С. 10–13.

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

10. Анализ способов и технических решений повышения коэффициента мощности электровозов переменного тока в режиме рекуперативного торможения / В. С. Томилов, О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, С. В. Власьевский. – Текст : непосредственный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 2. – С. 448–452.

11. Повышение эффективности систем тягового электроснабжения переменного и постоянного тока и сокращение потерь электрической энергии в них : научная монография / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, Ю. В. Кондратьев [и др.]. – Омск : Омский государственный университет путей сообщения, 2014. – 144 с. – Текст : непосредственный.

12. Набойченко, И. О. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока / И. О. Набойченко, Б. А. Аржанников. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. – С. 31–34.

13. Бурков, А. Т. Индустриальные технологии, мобильность и энергоэффективность электрической тяги рельсового транспорта / А. Т. Бурков, Л. С. Блажко, И. А. Иванов. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 7–13.

14. Игин, В. Н. Резервы сбережения топливно-энергетических ресурсов / В. Н. Игин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2015. – № 6 (702). – С. 11–15.

15. Котельников, А. В. К вопросу о потенциале повышения энергоэффективности технических средств железнодорожного транспорта / А. В. Котельников. – Текст : непосредственный // Вестник ВНИИЖТа. – 2012. – № 2. – С. 19–21.

16. Никифоров, М. М. Энергетическое обследование электрической тяги переменного тока / М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Транспорт Евразии XXI века: современные цифровые технологии на рынке транспортных и логистических услуг : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Алматы : Академия транспорта и телекоммуникаций имени М. Тынышпаева, 2018. – С. 356–361.

17. Сидорова, Е. А. Влияние массы грузового поезда на удельный расход электроэнергии на тягу поездов / Е. А. Сидорова, С. О. Вялкова. – Текст : непосредственный // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2014. – С. 88–95.

18. Баринов, И. А. Интервальное прогнозирование динамики удельного расхода электроэнергии на тягу поездов в контексте развития технологии рекуперации энергии / И. А. Баринов, В. С. Иванов. – Текст : непосредственный // Молодая наука Сибири. – 2018. – № 1 (1). – С. 42–48.

19. Давыдов, А. И. Определение тренда изменения удельного расхода электроэнергии на тягу поездов при долгосрочном прогнозировании / А. И. Давыдов, М. М. Никифоров, О. О. Комякова. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 2 (74). – С. 140–148.

20. Каштанов А. Л. Особенности проведения энергетических обследований дистанций электроснабжения-структурных подразделений железных дорог - филиалов ОАО «Российские железные дороги / А. Л. Каштанов, А. А. Комяков, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 148 – 151.

## 21. ASSESSMENT OF TRAIN TRACTION ELECTRIC ENERGY LOSSES

Cheremisin V.T., Nikiforov M.M., Ushakov S.Y. В сборнике: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 2019. С. 8602528.

22 Никифоров М. М. Оценка технологических потерь электроэнергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока // М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. В. Язов. – Текст: непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы науч. -практ. конф., посвященной Дню Российской науки /Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 40 – 45.

23. Незевак, В. Л. Аспекты задачи оптимизация графика движения поездов по критерию энергоэффективности перевозочного процесса / В. Л. Незевак, С. С. Саркенов. – Текст : непосредственный // Транссиб: на острие реформ : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Чита : Забайкальский институт железнодорожного транспорта, 2016. – С. 294–299.

24. Черемисин, В. Т. Оценка влияния пакетной организации движения на объем электроэнергии на тягу на участках постоянного тока с I типом профиля / В Т Черемисин, В Л Незевак, С С Саркенов. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3 (55). – С. 135–144. – DOI 10.26731/1813-9108.2017.3(55).135-144.

25. Саркенов, С. С. Учет влияния нормообразующих факторов на электропотребление тяги поездов при пакетной организации движения поездов / С. С. Саркенов. – Текст : непосредственный // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности : материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский госу. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 297–304.

26. Черемисин, В. Т. Система постоянного контроля и мониторинга удельного расхода и небаланса электрической энергии на тягу поездов в

границах Западно-Сибирской железной дороги / В. Т. Черемисин, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Ресурсосберегающие технологии в структурных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги : материалы науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2005. – С. 17–19.

27. Яковлева, Т. Д. Нормализация напряжений высших гармоник на нагрузке, подключенной к сети, питающей тяговые нагрузки / Т. Д. Яковлева, С. Г. Тигунцев. – Текст : непосредственный // Энергетика в современном мире : материалы междунар. заочной науч.-практ. конф. – Чита : Забайкальский государственный университет, 2017. – С. 143–147.

28. Машкин, А. Г. Эффективное усиление тягового электроснабжения / А. Г. Машкин, А. П. Балаганский. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – № 1-2. – С. 40–45.

29. Богданов, Ю. В. Оценка изоляторов контактной сети / Ю. В. Богданов. – Текст : непосредственный // Мир транспорта. – 2010. – Т. 8. – № 3(31). – С. 50–55.

30. Лукьянов, А. М. Надежность и долговечность полимерных изоляторов контактной сети / А. М. Лукьянов, Ю. Г. Чепелев, А. А. Лукьянова. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77. – № 2. – С. 110–117. – DOI 10.21780/2223-9731-2018-77-2-110-117.

31. Кейно, М. Ю. Современный подход к исследованию режимов работы локомотивов / М. Ю. Кейно. – Текст : непосредственный // Автоматизация в промышленности. – 2007. – № 1. – С. 36–38.

32. Уразаева, В. Н. Вопросы взаимодействия системы внешнего электроснабжения, системы тягового электроснабжения переменного тока и нетяговых потребителей / В. Н. Уразаева. – Текст : непосредственный // Повышение эффективности работы железнодорожного транспорта : сб. науч.

ст. аспирантов и студентов ун-та. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2006. – С. 175–178.

33. Бочарников, Ю. В. Моделирование системы тягового электроснабжения для оценки электромагнитной совместимости со смежными системами / Ю. В. Бочарников. – Текст : непосредственный // Технологии электромагнитной совместимости. – 2008. – № 1 (24). – С. 45–55.

34. Упрощенное моделирование внешней сети при расчетах систем тягового электроснабжения / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Н. А. Абрамов, С. М. Асташин. – Текст : непосредственный // Информационные и математические технологии в науке и управлении : труды всерос. конф. – Иркутск : Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2007. – С. 160–167.

35. Никифоров, М. М. Влияние условий сопряжения систем внешнего и тягового электроснабжения на уровень потерь электроэнергии в тяговой сети / М. М. Никифоров, Ю. В. Кондратьев, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Красноярск : Гротеск, 2005. – С. 101–104.

36. Маслов, Г. П. Влияние схемы внешнего электроснабжения на напряжение на шинах тяговых подстанций / Г. П. Маслов, А. Р. Гергерт, Р. Б. Скоков. – Текст : непосредственный // Вестник инженеров электромехаников железнодорожного транспорта. – Самара : Самарская гос. акад. путей сообщения, 2003. – С. 139–142.

37. Genethliou D. Statistical approaches to electric load forecasting. State University of New York at Stony Brook, ProQuest, *UMI Dissertations Publishing*, 2005, 82 p.

38. Almeshaiei E., Soltan H. A methodology for Electric Power Load Forecasting, *Alexandria Engineering Journal*, 2011, no. 50(2), pp. 137-144.

39. Мороз, А. И. К теории движения железнодорожного транспорта с внеграфиковыми поездами / А. И. Мороз. – Текст : непосредственный //



Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2013. – № 3. – С. 12–15.

40. Долгий, И. Д. Прогнозирование поездной обстановки в автоматизированных системах диспетчерского управления на основе иерархической нейронной сети / И. Д. Долгий, С. В. Криволапов. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2013. – № 1 (49). – С. 71–74.

41. Бакланов, А. А. Тяговый подвижной состав нового поколения в структуре управления перевозочным процессом с использованием принципов полигонных технологий / А. А. Бакланов, К. И. Доманов, О. Д. Юрасов. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 2 (78). – С. 36–44.

42. Терещенко, О. А. Методика оценки энергоэффективности графика движения поездов / О. А. Терещенко, Ю. С. Сидорович. – Текст : непосредственный // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. – 2017. – № 2 (35). – С. 103–105.

43. Обучение машинистов энергосберегающим и безопасным методам управления поездами / Л. А. Мугинштейн, И. А. Ябко, В. И. Рахманинов [и др.]. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9. – С. 37–40.

44. Аннин, В. А. Рекуперация электроэнергии – основное направление энергосбережения / В. А. Аннин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2013. – № 7 (679). – С. 8–11.

45. Евстафьев, А. М. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения пригородных электропоездов постоянного тока / А. М. Евстафьев, А. П. Зеленченко, В. М. Мищенко. – Текст : непосредственный // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 3 (40). – С. 63–69.

46. Игин, В. Н. Больше внимания рекуперативному торможению / В. Н. Игин. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2015. – № 4 (700). – С. 7–9.

47. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения (с сетевой школы) / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. С. Вильгельм, В. А. Кващук. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2013. – № 8 (680). – С. 7–10.

48. Черемисин, В. Т. Оценка технологических потерь в тяговой сети в условиях применения электроподвижным составом рекуперативного торможения / В. Т. Черемисин, А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак. – Текст : непосредственный // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 2 (54). – С. 106–111.

49. Виноградов, С. А. Технические решения, необходимые для разработки комплексной системы обучения машинистов энергооптимальным приемам управления движением поездов / С. А. Виноградов, Л. А. Мугинштейн. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2009. – № 5. – С. 16–18.

50. Мугинштейн, Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. – Текст : непосредственный // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 6. – С. 3–13.

51. Михин, Д. Н. Оценка инновационных методов диагностирования неисправностей электрических цепей локомотивов / Д. Н. Михин. – Текст : непосредственный // Современная наука и молодые ученые : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2020. – С. 39–42.

52. Wang J., Li L., Niu D., Tan Z. An annual load forecasting model based on support vector regression with differential evolution algorithm, *Applied Energy*, 2012, no. 94, pp. 65-70.

53. Bunnoon P., Chalermyanont K., Limsakul C. Multi-substation control central load area forecasting by using HP-filter and double neural networks (HP-DNNs), *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, no. 44 (1), pp. 561-570.

54. Чекулаев, В. Е. Энергодиспетчер – главный управляющий электроустановками дистанции электроснабжения / В. Е. Чекулаев, Е. Н. Горожанкина. – Текст : непосредственный // Локомотив. – 2014. – № 8 (692). – С. 39–41.

55. Соколов, Д. А. Снижение непроизводительных затрат, вызванных ошибочными действиями энергодиспетчеров железных дорог / Д. А. Соколов, В. М. Артимович. – Текст : непосредственный // Развитие экономической науки на транспорте: проблема оптимизации бизнеса : сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург : Международный центр научно-исследовательских проектов, 2016. – С. 446–452.

56. Bunnoon P., Chalermyanont K., Limsakul C. Mid-Term Load Forecasting: Level Suitably of Wavelet and Neural Network based on Factor Selection, *Energy Procedia*, 2012, no. 14, pp. 438-444.

57. Badri A., Ameli Z., Birjandi A. M. Application of Artificial Neural Networks and Fuzzy logic Methods for Short Term Load Forecasting, *Energy Procedia*, 2012, no. 14, pp. 1883-1888.

58. Тимофеев, А. Н. Моделирование аварийных режимов с целью решения основных проблем при проектировании тяговой подстанции / А. Н. Тимофеев. – Текст : непосредственный // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тезисы докладов. – Москва : «Центр полиграфических услуг "РАДУГА"», 2018. – С. 484.

59. Шевлюгин, М. В. Переходные процессы в тяговой сети при аварийных режимах / М. В. Шевлюгин, Г. В. Дожина. – Текст : непосредственный // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». – 2005. – Т. 3. – № 2. – С. 126–132.

60. Zhang W., Zhao W., Du X. Short-term Forecast Technology in Load of Electrified Railway based on Wavelet-extreme Learning Machine, *Journal of Networks*, 2014, no. № 9 (6), pp. 1502-1508.

61. Park C. B., Lee B. S., Lee H. W. Prediction and analysis of the energy consumption considering the electric railway vehicle's driving, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 2012, no. 61 (5), DOI 10.5370/KIEE.2012.61.5.777.

62. Перспективы электрической тяги. – Текст : непосредственный // Железные дороги мира. – 2018. – № 5. – С. 59–64.

63. Граматунова, Н. А. Пути решения проблемы обледенения контактных проводов / Н. А. Граматунова, В. А. Леонтьева. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. – С. 134–138.

64. Гавриленко, Е. Н. Моделирование процессов электрокоррозии подземных конструкций тяговых подстанций / Е. Н. Гавриленко, Г. Е. Асеев. – Текст : непосредственный // Наука промышленность оборона : труды всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Новосибирский гос. техн. ун-т, 2019. – С. 53–56.

65. Грачева, Е. И. Влияние потерь холостого хода трансформаторов на величину потерь электроэнергии в электрических сетях / Е. И. Грачева, О. В. Наумов. – Текст : непосредственный // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2016. – № 3 (45). – С. 20–29.

66. Плотников, Ю. В. Влияние внешних воздействий на эффективность работы системы тягового электроснабжения постоянного тока / Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Орел : Орловский гос. ун-т имени И. С. Тургенева, 2021. – С. 22–27.

67. Черемисин В. Т. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения и электроподвижного состава / В. Т. Черемисин,

М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: Материалы научно-практической конференции, посвященной Дню Российской науки / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2012. С. 9 – 15.

68. Черемисин В. Т. Оценка потенциала повышения энергетической эффективности системы тягового электроснабжения // В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // «Известия Транссиба» Научно-технический журнал / Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013, № 2 (14). С. 75 – 84.

69. Плотников, Ю. В. Пути совершенствования режимов работы тяговых подстанций постоянного тока / Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Наука и образование транспорту : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Самара : Самарский гос. ун-т путей сообщения, 2021. – Т. 2. – С. 57–60.

70. Обоснование необходимости создания единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов (ЕАСУЭ Т) / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов, Д. В. Пашков. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 49–55.

71. Черемисин, В. Т. Единая автоматизированная система учета электроэнергии на электроподвижном составе (ЕАСУЭ ЭПС) постоянного тока / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2013. – № 3 (15). – С. 108–114.

72. Черемисин, В. Т. Концепция единой автоматизированной системы учета электрической энергии на тягу поездов / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, А. Л. Каштанов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2013. – № 4 (39). – С. 83–86.

73. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности электроподвижного состава в границах зон учета электроэнергии железных

дорог : монография / В. Т. Черемисин, С. Г. Истомин, С. Ю. Ушаков. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – 165 с. – Текст : непосредственный.

74. Черемисин, В. Т. Автоматизированный мониторинг энергетической эффективности работы электроподвижного состава ОАО «РЖД» / В. Т. Черемисин, Д. В. Пашков, С. Ю. Ушаков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 87–91.

75. Никифоров, М. М. Экспериментальная оценка потерь электроэнергии в преобразовательных агрегатах тяговых подстанций постоянного тока за счет применения АСУЭ ФКС / М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 234–241.

76. Этапы реализации автоматизированной системы мониторинга энергоэффективности перевозочного процесса / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, Д. В. Пашков, М. М. Никифоров. – Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45–49.

77. Черемисин, В. Т. Контроль нерационального использования электрической энергии на тягу поездов с применением бортовых информационно-измерительных комплексов учета электроэнергии / В. Т. Черемисин, С. Ю. Ушаков, С. Г. Истомин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2015. – № 1 (21). – С. 69–74.

78. Гречишников, В. А. АСУЭ, как развивающийся инструмент информационно-аналитической системы управления энергетическим хозяйством железных дорог России / В. А. Гречишников, А. А. Бурмистров. – Текст : непосредственный // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 2. – С. 47–50.

79. Незевак, В. Л. Оперативная оценка энергоэффективности системы тягового электроснабжения по результатам анализа электропотребления

тяговых подстанций / В. Л. Незевак, А. Г. Зверев, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2012. – С. 35–40.

80. Анализ показателей работы силового оборудования системы тягового электроснабжения ОАО «РЖД» на основе мониторинга тяговых подстанций в режиме реального времени / М. П. Бадер, В. А. Гречишников, М. В. Шевлюгин, Ю. Н. Король. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 5-6. – С. 5–8.

81. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2010. – 174 с. – Текст : непосредственный.

82. Аржанников, Б. А. Система управляемого тягового электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных и тяжеловесных поездов / Б. А. Аржанников. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2012. – № 1 (32). – С. 134–137.

83. Аржанников, Б. А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2015. – 258 с. – Текст : непосредственный.

84. Аржанников, Б. А. Разработка системы и устройств тягового электроснабжения с повышенными технико-энергетическими показателями / Б. А. Аржанников, И. А. Баева. – Текст : непосредственный // Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 20–26.

85. Аржанников, Б. А. Повышение технико-энергетических показателей электрифицированного участка с системами автоматического регулирования

напряжения / Б. А. Аржанников, И. А. Баева. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2019») : труды междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 162–165.

86. Шевлюгин, М. В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин. – Текст : непосредственный // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». – 2007. – Т. 4. – № 1. – С. 35–38.

87. Быкадоров, А. Л. Применение сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии для повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения постоянного тока / А. Л. Быкадоров, Т. А. Заруцкая. – Текст : непосредственный // Практическая силовая электроника. – 2020. – № 1 (77). – С. 49–52.

88. Шевлюгин, М. В. Энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Шевлюгин Максим Валерьевич ; Московский гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2013. – 48 с. – Текст : непосредственный.

89. Крюков, А. В. Моделирование режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, А. В. Черепанов. – Текст : непосредственный // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2015. – Т. 1. – С. 113–120.

90. Афанасьев, М. М. Применение накопителей энергии – ионистров (суперконденсаторов) на электропоездах метрополитена / М. М. Афанасьев, Д. В. Клоков, Ю. М. Иньков. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 1. – С. 30–32.



91. Barrero R., Tackoen X., & van Mierlo J. (2010). Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(3), 207-225, DOI 10.1243/09544097jrtr322.

92. Radu P. V., Drazek Z. Analysis of wayside energy storage devices for DC heavy rail transport, *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 180, pp. 1-6

93. Zhao W., Wu G. etc. Energy transfer and utilization efficiency of regenerative braking with hybrid energy storage system, *Journal of Power Sources*, 2019, vol. 427, pp. 174-183.

94. Shtang A. A., Xiaogang W. etc. Calculation of hybrid bus power demands by standard driving cycles, *19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. IEEE Computer Society*, 2019, pp. 469-472.

95. Manandhar U., Tummuru N. R., Kollimalla S. K. Validation of Faster Joint Control Strategy for Battery-and Supercapacitor-Based Energy Storage System, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2018, vol. 65, pp. 3286-3295.

96. Kollimalla S. K., Mishra M. K., Narasamma N. L. Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2014, vol. 5, pp. 1137-1144.

97. Liu W. Hybrid electric vehicle system modelling and control, *Wiley*, 2017, 584 p.

98. Носков, В. Н. Об энергоемкости накопителя энергии для тепловоза / В. Н. Носков, М. Ю. Пустоветов. – Текст : непосредственный // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2008. – № 5. – С. 42–44.

99. Опыт пуска электроподвижного состава при помощи «накопительных» тяговых подстанций на Московском метрополитене / М. В. Шевлюгин, Д. В. Ермоленко, А. Н. Стадников, А. Е. Голицына. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2017. – № 11. – С. 75–80.

100. Плотников, Ю. В. Повышение эффективности автоматического резервирования мощности в системах электроснабжения транспортных средств постоянного тока / Ю. В. Плотников, С. Г. Шантаренко. – Текст : непосредственный // Инновационные производственные технологии и ресурсосберегающая энергетика : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2021. – С. 448–456.

101. Каштанов, А. Л. Методы выбора уставок срабатывания системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, А. Д. Дмитриев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 1 (41). – С. 50–58.

102. Поплавный, С. Современные АВР: проблемы и способы их решения / С. Поплавный. – Текст : непосредственный // Силовая электроника. – 2014. – Т. 2. – № 47. – С. 56–58.

103. Жуков, В. А. Повышение эффективности работы быстродействующего АВР / В. А. Жуков. – Текст : непосредственный // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2010. – № 7. – С. 27–30.

104. Очнев, П. Г. Разработка стандартной логики АВР / П. Г. Очнев, Ю. Б. Щемелева. – Текст : непосредственный // Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и автоматика (ПАРУСА-2020) : сборник трудов всерос. науч. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Ростов-на-Дону, Таганрог, 2020. – С. 297–302.

105. Сидоров, О. А. Влияние системы тягового электроснабжения на надежность электропитания устройств СЦБ и связи / О. А. Сидоров, П. В. Тарута, М. А. Карабанов. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2009. – № 4 (23). – С. 95–97.

106. Тарута, П. В. Экспериментальная оценка величины провала напряжения при подключении резервного выпрямительного агрегата / П. В. Тарута, М. А. Карабанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2010. – № 2 (2). – С. 76–80.

107. Сидоров, О. А. Анализ влияния отклонения напряжения питания на надежность функционирования сигнальной точки / О. А. Сидоров, М. А. Карабанов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2011. – № 1 (5). – С. 100–104.

108. Патент № 108233 U1 Российская Федерация, МПК H02H 9/02. Устройство для снижения бросков тока при включении трансформатора : № 2011108012/07 : заявлено 02.03.2011 : опубликовано 10.09.2011 / Кващук В. Н., Лапенко Н. М., Карабанов М. А. ; патентообладатель открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – 10 с : ил. – Текст : непосредственный.

109. Мамалимов, Д. О. Броски тока намагничивания мощных трансформаторов и методы их снижения / Д. О. Мамалимов. – Текст : непосредственный // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2013» : сборник докладов междунар. науч.-техн. конф. – Казань : Казанский гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2013. – С. 263–269.

110. Михаличенко, П. Е. Способ снижения бросков тока в системе электрической тяги в аварийном режиме «снятия-восстановления» напряжения на токоприемники / П. Е. Михаличенко. – Текст : непосредственный // Электротехника и электромеханика. – 2012. – № 4. – С. 60–64.

111. Лазарев, Н. С. Управляемая коммутация трансформаторов / Н. С. Лазарев, А. Р. Шульга, Р. Н. Шульга. – Текст : непосредственный // Электротехника. – 2011. – № 7. – С. 27–32.

112. Черемисин, В. Т. Снижение провалов напряжения при коммутациях преобразовательных агрегатов на тяговых подстанциях / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, М. А. Карабанов. – Текст : непосредственный // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 3 (34). – С. 46–49.

113. Окишев, А. С. Изолированный источник питания для системы учета электрической энергии в тяговой сети / А. С. Окишев, Ю. В. Плотников. –

Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2016. – С. 112–119.

114. ГОСТ Р 57670-2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 49 с. – Текст : непосредственный.

115. ГОСТ 6962-75 Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 8 с. – Текст : непосредственный.

116. Приказ Минтранса РФ от 21 декабря 2010 г. № 286 «Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации (с изменениями и дополнениями) // base.garant.ru : сайт. – Текст : электронный. – URL: <https://base.garant.ru/55170488/> (дата обращения: 31.01.2022).

117. Кващук, В. А. Мониторинг напряжений в контактной сети на участках постоянного тока в условиях применения рекуперативного торможения / В. А. Кващук, А. С. Вильгельм. – Текст : непосредственный // Инновационное развитие железнодорожного транспорта России : материалы всерос. науч.-практ. конф. / Омский гос. ун-т. путей сообщения. – Омск, 2012. – С. 119–128.

118. Патент № 19327 Российская Федерация, МПК G01R 22/00 (2000.01). Счетчик электрической энергии постоянного тока для подвижного состава железнодорожного транспорта : № 2001102415/20 : заявлено 25.01.2001 : опубликовано 20.08.2001 / Павлов Л. Н., Корбут А. А., Щедрин Н. Л., Белов Ю. И. ; патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 8 с. : ил. – Текст : непосредственный.

119. Патент № 188203 Российская Федерация, МПК H02M 3/00 (2006.01). Устройство электропитания приборов мониторинга и учета электрической энергии тяговой сети железных дорог постоянного тока : № 2018132891 : заявлено 14.09.2018 : опубликовано 03.04.2019 / Никифоров М. М.,

Плотников Ю. В., Черемисин В. Т. ; патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный.

120. Плотников, Ю. В. Источник питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения / Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2021. – № 1 (175). – С. 50–54.

121. Плотников, Ю. В. Методика расчета источника питания приборов мониторинга и учета электроэнергии тяговой сети постоянного тока на основе последовательной цепочки преобразователей напряжения / Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2021. – № 2(176). – С. 41-45.

122. Плотников, Ю. В. Экспериментальная лабораторная установка для исследования блоков питания измерителей параметров тяговой сети постоянного тока 3,3 кВ / Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 14–20.

123. Плотников, Ю. В. Аппаратная часть системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Чебоксары : Чувашский гос. ун-т имени И. Н. Ульянова, 2021. – С. 175–181.

124. Каштанов, А. Л. Интеллектуальная система резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 370–375.

125. Луковенко, А. С. Повышение надежности оборудования электрических подстанций тягового электроснабжения при работе в критических режимах / А. С. Луковенко, Р. М. Христинич. – Текст : непосредственный // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2016. – № 2. – С. 36–40.

126. Биятто, Е. В. Снижение потерь электроэнергии на собственные нужды подстанций за счет использования энергоэффективных трансформаторов / Е. В. Биятто, К. К. Привалихина, Т. Л. Долгопол. – Текст : непосредственный // Главный энергетик. – 2016. – № 10. – С. 58–62.

127. Каштанов, А. Л. Моделирование режимов работы интеллектуальной системы резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 5. – С. 22–26.

128. Программируемые логические контроллеры в автоматизированных системах управления / И. Г. Минаев, В. М. Шарапов, В. В. Самойленко, Д. Г. Ушкур. – Текст : непосредственный // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2011. – № 7. – С. 101–102.

129. Каштанов, А. Л. Управляющий алгоритм системы автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, Ю. В. Плотников, А. В. Пономарев. – Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 9. – С. 512–518.

130. СТО РЖД 07.021.2-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения. – Москва: ОАО «РЖД», 2016. – 24 с. – Текст : непосредственный.

131. Агеева, О. А. Существующие стратегические решения разработки инновационного проекта / О. А. Агеева, Е. И. Щербинина. – Текст :

непосредственный // Вопросы экономики и управления. – 2017. – № 2 (9). – С. 71–73.

132. Каштанов, А. Л. Методика выбора мест установки систем автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока / А. Л. Каштанов, Ю. В. Плотников. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2021. – № 4 (178). – С. 63–66.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ПАТЕНТ НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 188203

**Устройство электропитания приборов мониторинга и учета  
электрической энергии тяговой сети железных дорог  
постоянного тока**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Омский  
государственный университет путей сообщения" (RU)*

Авторы: *Никифоров Михаил Михайлович (RU), Плотников  
Юрий Викторович (RU), Черемисин Василий Титович (RU)*

Заявка № 2018132891

Приоритет полезной модели 14 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 03 апреля 2019 г.Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает 14 сентября 2028 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт  
информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте  
(АО «НИИАС»)

### АКТ

От «29» июля 2021 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

г. Москва

Зам. начальника Департамента  
комплексной реализации  
индустриальных проектов

Об использовании результатов научных  
исследований и  
разработок в производстве



П. П. Процовский

июля 2021 г.

Основание: Разработки Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), выполненные при личном участии аспиранта Плотникова Ю. В.

Выполнены работы по разработке, изготовлению, доставке и вводу в эксплуатацию интеллектуальных систем автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока участка Называевская – Московка для нужд Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД».

Разработки были выполнены в ходе исполнения работ по договору № 277-19-00020/ЗТЭ-2019/1-1и от 14 мая 2019 г., заключенного между акционерным обществом «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС») (заказчик) и федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ОмГУПС (ОмИИТ)) (исполнитель).

Составлен комиссией в составе:

Представитель предприятия:

руководитель Центра программ ресурсосбережения НТК РТиУЭР  
АО «НИИАС» Лихоманова Ю. Ю.

Представители ОмГУПС:

проректор по научной работе, д.т.н Шантаренко С. Г.;

заместитель директора НИИ энергосбережения на железнодорожном транспорте, к.т.н. Никифоров М. М.;

аспирант Плотников Ю. В.

1. Разработки ОмГУПС, характеризующиеся основными особенностями (признаками):

Разработанная интеллектуальная система автоматического резервирования мощности тяговых подстанций постоянного тока (далее Система) позволяет реализовать режим резервирования мощности на тяговых подстанциях постоянного тока, оборудованных двумя преобразовательными агрегатами. Содержит в своем составе подсистему синхронного включения агрегатов, что позволяет снизить броски тока намагничивания первичной обмотки преобразовательного трансформатора, ограничить просадки напряжения на шинах 10 (6) кВ при включении агрегатов, что позволяет предотвратить сбои в оборудовании, питаемом от шин 10 (6) кВ. Система позволяет анализировать тяговый ток как с использованием штатных трансформаторов тока, установленных на входе преобразовательных трансформаторов, так и на выходе выпрямительных агрегатов при помощи специальных беспроводных датчиков. Применяемый в Системе управляющий алгоритм имеет функцию корректировки управляющего параметра посредством самообучения в процессе работы в соответствии с текущей поездной обстановкой.

Разработанная методика выбора мест установки Системы позволяет определить тяговые подстанции, обеспечивающие наибольший энергетический эффект при установке Системы.

2. Технико-экономическая эффективность:

Разработанная и прошедшая апробацию при личном участии аспиранта Плотникова Ю. В. Система позволяет повысить энергетическую эффективность тяговых подстанций, оборудованных двумя преобразовательными агрегатами, за счет реализации процесса автоматического резервирования мощности. Энергетический эффект достигается за счет снижения потерь холостого хода преобразовательных трансформаторов при работе одного преобразовательного агрегата в режиме малых нагрузок, а так же за счет снижения потерь электроэнергии от уменьшения общего выходного сопротивления тяговой подстанции в режиме больших нагрузок.

3. Суммарный расчетный энергетический эффект от использования шести Систем на участке Называевская – Московка Омской дистанции электроснабжения за 2020 г. составил 570,8 тыс. кВт·ч в год, что эквивалентно повышению энергетической эффективности системы тягового электроснабжения участка в среднем на 0,45%.

4. Предложения о дальнейшем использовании и другие замечания:

Рекомендуется широкое использование указанных в акте разработок ОмГУПСа на тяговых подстанциях постоянного тока, не оборудованных системами резервирования мощности.

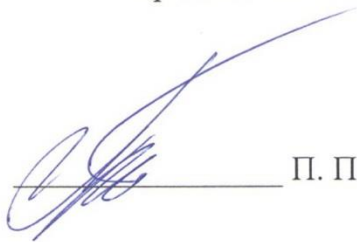
Составлен в трех экземплярах:

1-й экземпляр – ОмГУПС, НИЧ;

2-й экземпляр – АО «НИИАС»;

3-й экземпляр – ОмГУПС, разработчику.

Председатель комиссии



П. П. Процовский

Члены комиссии



Ю. Ю. Лихоманова



С. Г. Шантаренко



М. М. Никифоров



Ю. В. Плотников