

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Уральский государственный университет путей сообщения
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи

Баева Ирина Анатольевна



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА
НА ОСНОВЕ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Аржанников Борис Алексеевич

Екатеринбург – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Основные теоретические сведения системы тягового электроснабжения на основе устройств регулирования напряжения.....	11
1.1 Обзор существующих методов усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока.....	12
1.2 Общие сведения и выбор метода исследования системы тягового электроснабжения.....	19
1.3 Основные положения теории расчета системы тягового регулируемого электроснабжения	24
1.4 Критерии оценки технико-энергетической эффективности движения СП и применения устройств регулирования напряжения.....	28
Глава 2 Совершенствование методики электрического расчета системы тягового регулируемого электроснабжения при движении одиночных или соединенных поездов.....	33
2.1 Оценка технико-энергетических показателей работы СТЭ при пропуске соединенного и одиночных поездов.....	33
2.2 Особенности выполнения электрического расчета в программном комплексе КОРТЭС.....	36
2.3 Теоретические основы алгоритма сравнительного электрического расчета СТЭ и СТРЭ участка с движением одиночных или соединенных поездов.....	39
2.4 Проверка изменения технико-энергетических показателей СТЭ и СТРЭ при использовании поправочных токовых коэффициентов...	44
2.5 Совершенствование методики электрического расчета технико-энергетической эффективности СТЭ.....	54
Глава 3 Моделирование работы системы тягового электроснабжения при	

движении одиночных или соединенных поездов.....	58
3.1 Влияние СП на потери ЭЭ в тяговой сети системы с устройствами регулирования напряжения.....	58
3.2 Условия для моделирования работы системы тягового нерегулируемого и регулируемого электроснабжения	64
3.3 Техничко-энергетические показатели СТЭ при пропуске одного СП и двух ОП с введением устройств регулирования напряжения.....	68
3.4 Экспериментальная проверка достоверности предложенной методики электрического расчета.....	82
3.5 Экономическая эффективность СТРЭ при организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов.....	86
Глава 4 Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения за счет применения устройств регулирования напряжения	94
4.1 Исследование энергетической эффективности СТЭ в условиях увеличения скорости движения поездов.....	95
4.2 Исследование энергетической эффективности СТЭ в условиях снижения времени межпоездного интервала.....	104
4.3 Исследование энергетической эффективности СТЭ в условиях работы регулируемых ТП и нерегулируемой одноагрегатной тяговой подстанции ОТП	112
Заключение.....	120
Список использованных источников.....	122
Приложение А. Результаты электрических расчетов.....	138
Приложение Б. Акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы.....	151
Приложение В. Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Одной из задач энергетической стратегии компании ОАО «Российские железные дороги» [1] на перспективу до 2030 года является энергетическое обеспечение перевозочного процесса. Стратегия развития холдинга «Российские железные дороги» [2] на период до 2030 года, Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации [3], а также решение научно-технического совета ОАО «Российские железные дороги» по вопросам организации движения тяжеловесных грузовых поездов [4] предусматривают повышение весовых норм, позволяющих обеспечить возрастающие объемы грузовых перевозок. Распоряжением ОАО «РЖД» № 1799р от 1 сентября 2016 г. [5] введенная в действие инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины (ПМД) и соединенных поездов (СП), которая «направлена на повышение пропускной и провозной способности участков и направлений...». Однако указанная категория поездов на ряде электрифицированных на постоянном токе участков вызывает снижение напряжения на токоприемнике электровоза и, как следствие, скорости движения. Поэтому необходимо усиление системы тягового электроснабжения (СТЭ) с целью обеспечения беспрепятственного пропуска ПМД и СП.

На железной дороге в качестве одного из вариантов совершенствования энергетических показателей СТЭ применяется система бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН. Она направлена на повышение пропускной и провозной способности участков и образует систему тягового регулируемого электроснабжения (СТРЭ).

Оценка пропускной способности участков по системе электроснабжения осуществляется по результатам электрических расчетов по известным аналитическим методам, в том числе с использованием метода имитационного моделирова-

ния. Однако для достоверности оценки технико-энергетических показателей при введении на электрифицированных железных дорогах движения соединенных грузовых поездов возникает необходимость в разработке дополнения к методике расчета при СТЭ и СТРЭ.

Совершенствование методики электрических расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ позволяет оценить технико-энергетическую эффективность устройств электроснабжения до и после введения соединенных грузовых поездов, что является актуальной задачей, в том числе и при введении устройств регулирования напряжения.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области совершенствования режимов работы системы тягового электроснабжения занимаются такие организации, как АО «ВНИИЖТ», ДвГУПС, ИрГУПС, ОмГУПС, ПГУПС, РГУПС, РУТ (МИИТ), СамГУПС, УрГУПС и др.

Совершенствованием методики электрического расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ связано с трудами российских и зарубежных ученых:

– проектирование и совершенствование системы тягового электроснабжения: Б. А. Аржанников [6-18], М. П. Бадёр [14, 19], А. Т. Бурков [11, 14, 20], К. Г. Марквардт [21-23], А. Н. Марикин [24, 25], И. О. Набойченко [9, 11, 14], В. Н. Пупынин [26], В. Т. Черемисин [27-31], *Careglio Giuseppe* [32], *Mayer Lucio* [33], Миура Адзуки [34];

– моделирование системы тягового электроснабжения: А. С. Вильгельм [31, 35-38], М. А. Гаранин [39-42], Е. В. Добрынин [41,42], В. П. Закарюкин [43, 44], А. В. Крюков [43, 44], Г. Г. Марквардт [45, 46], В. Е. Марский [47, 48], Р. И. Мирошниченко [49-51], Э. В. Тер-Оганов [52-55], Т. П. Третьяк [56], В. Т. Черемисин [57-59], *Yulong Che* [60], *Shaobing Yang* [61], *Gang Zhang* [62], *P. Arboleya* [63], *Pablo Martínez Fernandez* [64].

Тема диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки): пункт 1 и пункт 4.

Целью диссертационной работы является совершенствование метода расчета системы электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ в режимах работы нерегулируемого и регулируемого электроснабжения при движении одиночных и соединенных грузовых поездов, направленное на повышение пропускной способности участков (направлений) с учетом технико-энергетических показателей системы тягового электроснабжения.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих способов усиления, а также методов электрического расчета СТЭ. Определить критерии оценки технико-энергетической эффективности СТЭ с устройствами регулирования напряжения при пропуске СП.

2. Разработать дополнение к методике электрических расчетов системы тягового регулируемого электроснабжения при организации движения соединенных поездов.

3. На основе разработанного дополнения к методике произвести моделирование работы СТЭ и технико-энергетический анализ организации движения соединенных поездов, в том числе с применением устройств регулирования напряжения.

4. Оценить технико-энергетическую эффективность СТЭ за счет применения устройств регулирования напряжения в условиях увеличения скорости движения, снижении времени межпоездного интервала, а также в условиях работы регулируемых ТП и нерегулируемой ОТП.

Объект исследования. Устройства электроснабжения железных дорог.

Область исследования. Системы электроснабжения железных дорог. Методы и средства снижения потерь электроэнергии. Улучшение эксплуатационных показателей устройств электроснабжения.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Усовершенствована методика электрических расчетов СТРЭ за счет применения поправочных токовых коэффициентов, определяемых на основе метода итерации, при пропуске соединенных и одиночных грузовых поездов с оценкой уровня напряжения на токоприемнике электровоза.

2. Выполнена оценка влияния соединенного поезда на технико-энергетические показатели СТЭ при различных скоростях движения, профилей пути и типов локомотивов.

3. Разработана методика оценки технико-энергетической эффективности применения устройств регулирования напряжения в условиях увеличения скорости движения и снижении времени межпоездного интервала.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость:

1. Выполнена оценка технико-энергетической эффективности организации движения соединенных поездов и применения устройств регулирования напряжения.

2. С помощью теоретических положений определено влияние СП на потери электрической энергии в тяговой сети на основе устройств регулирования напряжения.

3. Использование методики оценки технико-энергетической эффективности позволило определить рациональный режим работы СТЭ.

Практическая значимость:

1. Повышена точность моделирования работы СТЭ за счет проверки равенства расхода ЭЭ электровозов двух ОП и одного СП поездов и дополнительной оценки напряжения на токоприемнике электровоза.

2. По результатам технико-энергетических показателей СТЭ доказано, что при организации движения соединенных поездов снижается уровень напряжения в контактной сети, приводящий к уменьшению скорости движения, уменьшается

расход электрической энергии по счетчикам электроподвижного состава, увеличиваются потери электрической энергии в тяговой сети.

3. Практическая значимость подтверждается получением свидетельств о государственной регистрации программного продукта и актами внедрения результатов научно-исследовательской работы.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории последовательных приближений, теории систем автоматического регулирования, теории тягового электроснабжения с основами математического моделирования. При математическом моделировании использовался программный комплекс расчетов тягового электроснабжения ПК КОРТЭС. Экспериментальная часть включает в себя моделирование СТРЭ реального участка и сравнение полученных результатов с реальными показаниями приборов в условиях эксплуатации СТРЭ на Свердловской железной дороге.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа способов усиления и методов расчета СТЭ. Критерии оценки технико-энергетической эффективности.

2. Дополнение к методике электрических расчетов технико-энергетической эффективности СТЭ при пропуске одиночных и соединенных грузовых поездов. Проверка изменения технико-энергетических показателей СТЭ при использовании уточненной методики.

3. Результаты моделирования режимов работы нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ для различных профилей пути, скорости движения и локомотивов при пропуске двух ОП и одного СП. Результаты проверки достоверности предложенной методики.

4. Результаты исследования технико-энергетической эффективности СТЭ в условиях увеличения скорости движения, снижения времени межпоездного интервала (МПИ) и в условиях работы основных регулируемых ТП и нерегулируемой ОТП.

Степень достоверности результатов подтверждается сходимостью результатов расчетов с реальными показаниями приборов на тяговых подстанциях с погрешностью не более 5 %, сопоставимой с инструментальной погрешностью приборов и расчета, а также подтверждается актами внедрения на Свердловской дирекции по энергообеспечению структурного подразделения Трансэнерго филиала ОАО «Российские железные дороги», Института дополнительного профессионального образования Академии корпоративного образования УрГУПС (ИДПО АКО УрГУПС) и Форатек Энерготрансстрой.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, симпозиумах, семинарах: Международная научно-практическая конференция «Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог» (г. Екатеринбург, 2016 г.); Всероссийская конференция «Техника и технологии наземного транспорта» (г. Екатеринбург, 2017, 2018 г.); Международный симпозиум «Элтранс» (г. Санкт-Петербург, 2017 г., 2019 г.); Международная научно-техническая конференция «Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования» (г. Екатеринбург, 2017 г.); X Международная научно-практическая конференция «Будущее транспорта России – 2018» (г. Екатеринбург, 2018 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Наука и образование транспорту» (г. Екатеринбург, 2018 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Инновации и новые технологические разработки для системы тягового электроснабжения» (г. Екатеринбург, 2018 г.); 3 Международная научно-практическая конференция «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (г. Омск, 2018 г.); Научный семинар аспирантов УрГУПС (г. Екатеринбург, 2016, 2017, 2018, 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта» (г. Екатеринбург, 2019 г.); Международная научная конференция «Инновационные технологии развития транспортной отрасли» (г. Хабаровск, 2019 г.); Междуна-

родная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТранПромЭк-2019») (г. Ростов-на-Дону, 2019 г.), расширенном заседании кафедры «Электро-снабжения транспорта» УрГУПС (г. Екатеринбург, 2020).

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в 15 печатных работах, в том числе 1 статья опубликована в издании, входящем в международную систему цитирования *Scopus*, и 4 – в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций». Общий объем 7,27 печ. л., из которых автору принадлежит 5,29 печ. л.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 124 наименований и приложений. Диссертация представлена на 157 страницах, содержит 137 страниц основного текста, 29 таблиц, 30 рисунков, и три приложения на 20 страницах.

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В России с повышением массы и длины поездов происходит приближение к предельному значению пропускной способности на участках железных дорог. «Исчерпание» пропускной способности участка может происходить с уменьшением участковой скорости движения поездов [65-67].

Согласно Энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» [1] проводится работа по увеличению массы и длины грузовых поездов. В 2009 г. на сети железных дорог пропущено более 9000 СП, к 2010 г. этот показатель увеличился на 10 %. Для дальнейшего развития пропуска СП и поездов ПМД требуется усиление элементов инфраструктуры.

Для увеличения пропускной способности участка Курган – Колчедан на Южно-Уральской железной дороге (ЮУЖД) разработан вариантный график, по которому можно пропускать 10 пар соединенных поездов СП в сутки весом до 12 000 т [68]. В 2015 году на ЮУЖД были сформированы и проведены 2951 СП [69].

Забайкальская железная дорога с января по март 2019 года обеспечила пропуск в границах своего полигона 4044 соединенных грузовых поездов (в 2,2 раза больше, чем за 2018 год) [70].

С организацией пропуска поездов ПМД и СП устройства электроснабжения на участках, электрифицированных на постоянном токе 3,0 кВ, ограничивают пропускную способность. Снижается напряжение на токоприемнике ЭПС, что приводит к потере скорости движения поезда, увеличению тока нагрузки в проводах контактной сети [6].

Ограничение пропускной способности по устройствам электроснабжения возможно по следующим показателям:

- уровень напряжения на токоприемнике электроподвижного состава;
- температура нагрева проводов контактной сети;

– мощность силового оборудования тяговых подстанций (понижающих и преобразовательных трансформаторов, выпрямительных блоков).

С целью снятия ограничений необходимо выполнение проверочных электрических расчетов системы тягового электроснабжения до и после введения мероприятий по усилению.

В главе рассматриваются существующие методы усиления СТЭ, методы и программные комплексы для выполнения электрических расчетов, а также их достоинства и недостатки.

Из всех вариантов выбирается существующие и эксплуатируемые ОАО «Российские железные дороги» метод усиления и программный комплекс для выполнения электрических расчетов СТЭ. Предлагаются критерии оценки технико-энергетической эффективности применения выбранного метода усиления СТЭ.

1.1 Обзор существующих методов усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока

Основные методы усиления СТЭ [6-9, 24, 39, 53] можно подразделить условно на 3 категории (рисунок 1.1).

Строительство дополнительной промежуточной тяговой подстанции [71, 72] является дорогим, по капитальным затратам, способом усиления. Увеличение сечения контактной подвески, применение постов секционирования (ПС) и пунктов параллельного соединения (ППС) при организации маршрутов движения ПМД и СП способствует усилению, но является малоэффективным способом.

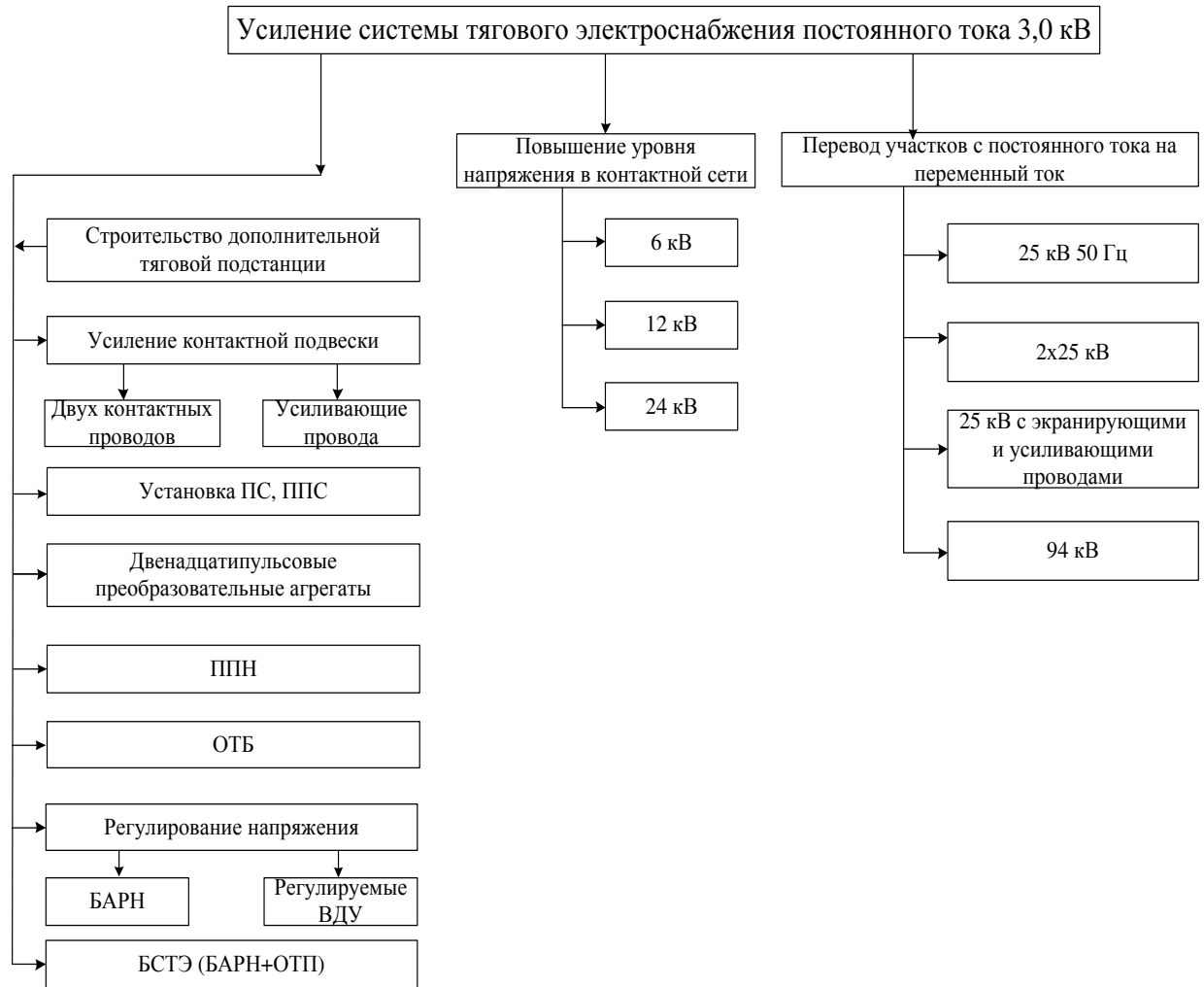


Рисунок 1.1 – Основные методы усиления системы тягового электроснабжения

К менее дорогостоящим способам относятся: применение вольтодобавочных устройств (ВДУ) [6, 7, 21, 25, 34, 73-75]; сооружение пунктов повышенного напряжения (ППН) [6, 7, 25, 32, 33, 56, 72, 76]; одноагрегатный тяговый блок (ОТБ) [6, 7, 10].

Перевод участков на переменный ток оправдан величиной напряжения, но приводит к дополнительным недостаткам, присущим переменному току. Потребуются крупные капитальные вложения при организации реконструкции в условиях непрерывного движения поездов [9, 26, 40].

Повышение напряжения постоянного тока в контактной сети до 6, 12, 24 кВ по сравнению с переменным током 25 кВ 50 Гц повысит энергетическую эффек-

тивность по симметрированию нагрузки в питающих сетях внешнего электроснабжения, но появляются сложности создания системы, а именно: разработка преобразователя 6, 12, 24/3 кВ, коммутирующей и защитной аппаратуры на тяговых подстанциях и на электровозах [11, 14, 19, 20]. Преобразователи на напряжение 6, 12, 24 кВ могут создать большие трудности в обеспечении электромагнитной совместимости со смежными системами железнодорожной автоматики [9].

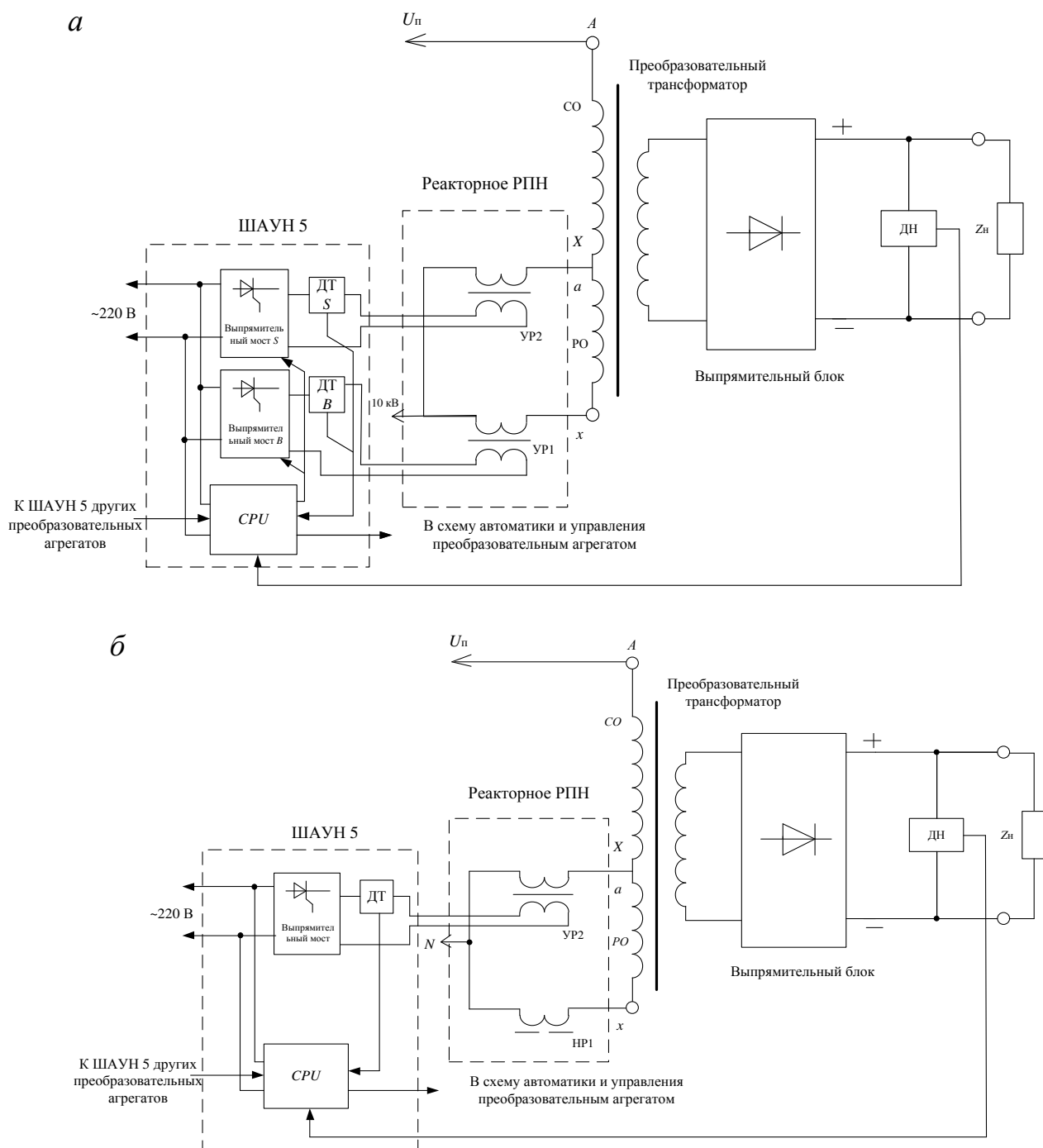
К известным способам регулирования напряжения трансформаторов [15, 77] относят плавное контактное («роликовое»), плавное бесконтактное (реакторное), ступенчатое контактное, ступенчатое бесконтактное (тиристорное).

Применение регулируемых преобразовательных агрегатов [6, 7, 12, 13, 16, 17, 50, 78-89] с трансформаторами повышенной мощности в системе бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) позволяет произвести автоматическую стабилизацию уровня напряжения преобразовательного агрегата тяговой подстанции в диапазоне от $U_{d \text{ ст}} = 3500 \text{ В}$ до $U_{d \text{ ст}} = 3700 \text{ В}$ с погрешностью регулирования плюс-минус 0,6 % ступенями через 50 В.

Функциональная схема системы БАРН представлена на рисунке 1.2. Объектом регулирования является преобразовательный агрегат (ПА) (преобразовательный трансформатор (ПТ) и выпрямительный блок (ВБ)). В качестве регулирующего органа используются управляемые реакторы УР1 и УР2 (рисунок 1.2, а), подключенные к отводам ПТ. Автоматическим регулятором в системе БАРН служит шкаф автоматического управления напряжением ШАУН 5 [18].

Шкаф ШАУН 5 получает сигнал от датчиков напряжения (ДН) об уровне напряжения на шинах ПА и сравнивает его с заданным уровнем стабилизации в соответствии с результатом, контроллер шкафа подает сигнал управления на тиристорные мосты для подмагничивания управляемыми реакторами, для стабилизации выпрямленного напряжения ПА на заданном уровне.

На современном этапе развития переключающего устройства один управляемый реактор УР1 заменен на неуправляемый НР1, как показано на рисунке 1.2, б.



ДН – датчик напряжения; ДТ – датчик тока тиристорных мостов; СО, РО – сетевая и регулировочная обмотки ПТ; Z_n – полное сопротивление нагрузки

a – двумя управляемыми реакторами УР1-УР2;

б – с управляемым и неуправляемым реакторами НР1-УР2

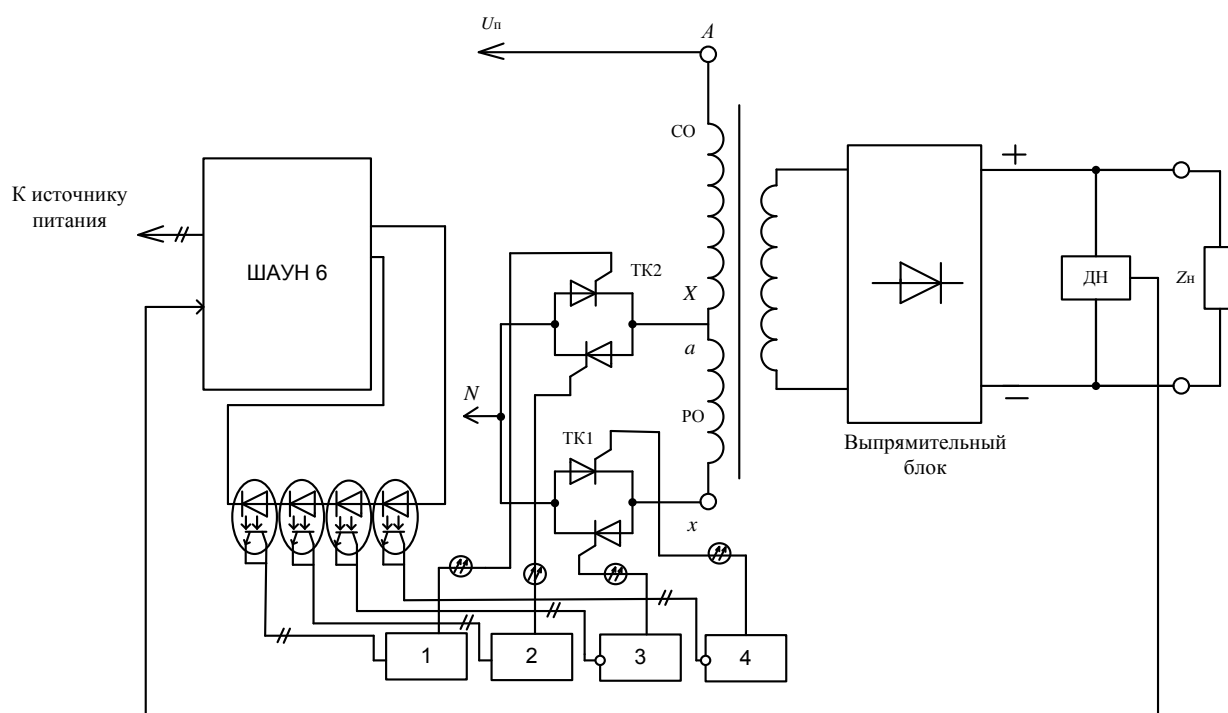
Рисунок 1.2 – Функциональная схема системы автоматического регулирования напряжения БАРН

В системе БАРН применяются регулируемые преобразовательные трансформаторы ТРДП – 16000/10 ЖУ1 с диапазоном регулирования 20 %.

Главным недостатком существующей системы БАРН являются значительные потери в стали и меди реакторов, а также их массогабаритные параметры.

В Уральском государственном университете путей сообщения на кафедре «Электроснабжение транспорта» ведутся работы по разработке системы БАРН с тиристорным переключающим устройством ТПУ (рисунок 1.3) [15, 18].

По предварительным подсчетам, по сравнению с реакторными устройствами регулирования напряжения, замена УР2 на тиристорный ключ ТК2 приведет к снижению потерь в переключающем устройстве в 5 раз, а при замене дополнительно НР1 на ТК1 – в 10 раз. Замена реакторов на тиристорные ключи позволит существенно снизить стоимость переключающих устройств.



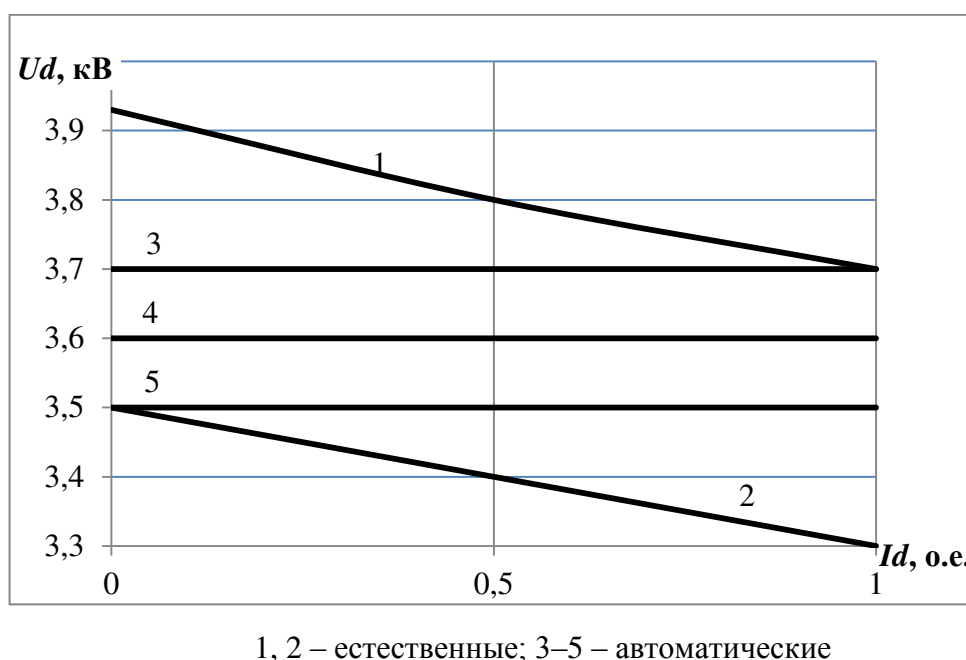
1, 2, 3, 4 – формирователи светового сигнала на электроды управления фототиристоров ключей ТК1 и ТК2

Рисунок 1.3 – Функциональная схема системы БАРН ТПУ

Система БАРН ТПУ в качестве регулирующего органа использует тиристорные ключи ТК1 и ТК2, подключенные к отводам первичной обмотки ПТ, а в качестве регулятора – шкаф ШАУН 6. Как и шкаф ШАУН 5, он сравнивает

напряжение на шинах ПА с заданным, и в соответствии с результатом сравнения подает сигналы управления на формирователи. Формирователи 1, 2 имеют прямые входы и предназначены для управления тиристорами ключа ТК1, а формирователи 3, 4 имеют инверсные входы и предназначены для управления ключом ТК2.

На рисунке 1.4 представлены внешние характеристики преобразовательного агрегата с системой БАРН.



1, 2 – естественные; 3–5 – автоматические

Рисунок 1.4 – Внешние характеристики преобразовательного агрегата с системой БАРН ТПУ

Буферная система тягового электроснабжения (БСТЭ) применяется тогда, когда система БАРН не обеспечивает увеличения пропускной способности участков (направлений). Она содержит две двух-, трехагрегатные тяговые подстанции с БАРН и питающие «непроходимую» межподстанционную зону, на которой устанавливается одноагрегатная тяговая подстанция ОТП с питанием от соседних тяговых подстанций по ЛЭП-10 (35) кВ (рисунок 1.5, 1.6). ОТП выполняет роль «буфера», не позволяя снизиться напряжению в контактной сети ниже, например,

2700 В с отдачей в контактную сеть мощности, не превышающей мощности подстанции [9, 90, 91].

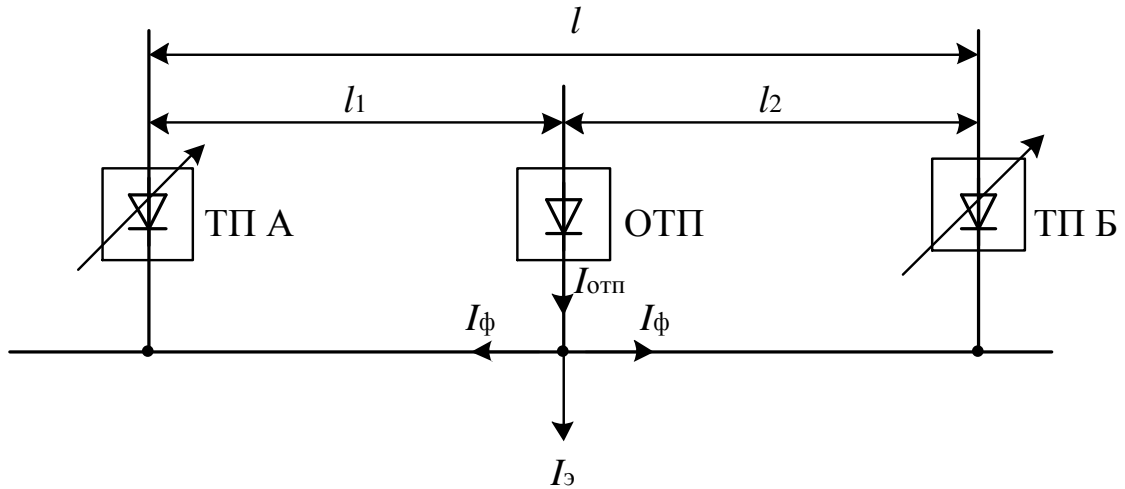


Рисунок 1.5 – Схема питания и распределения тока электровоза

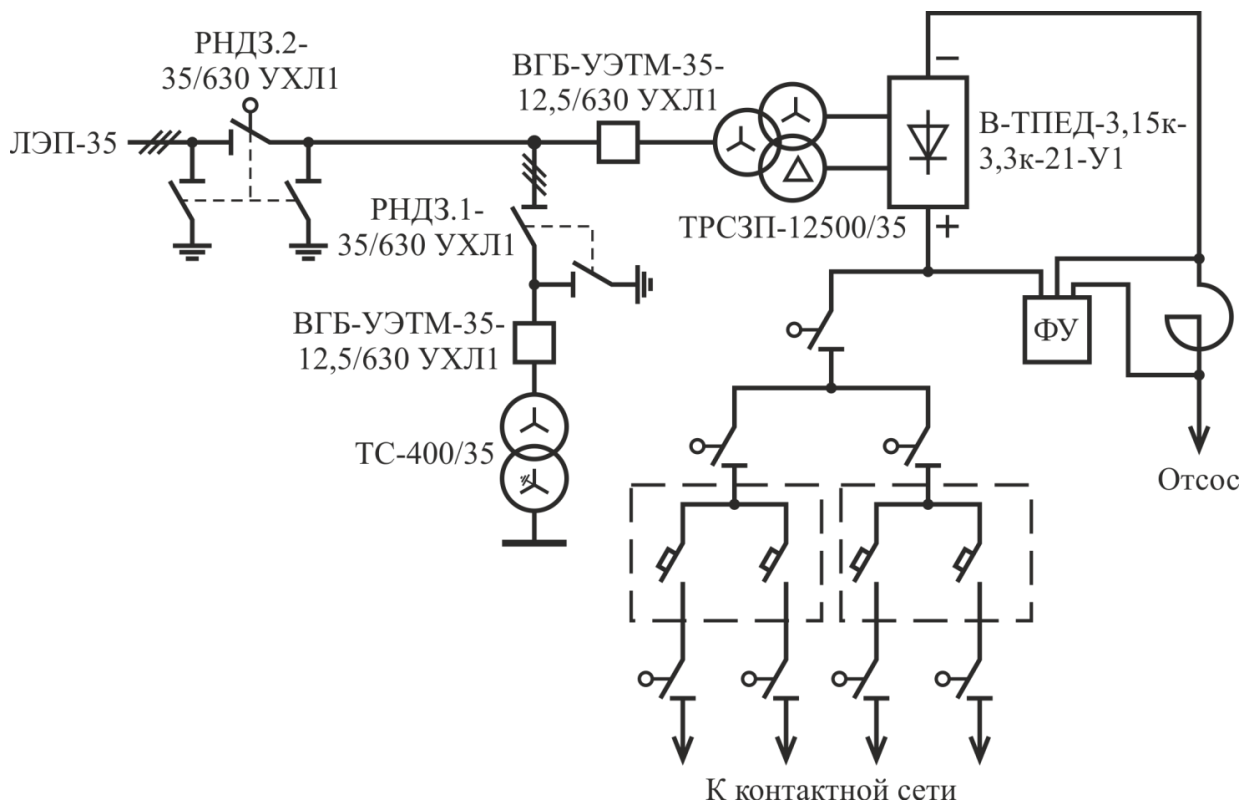


Рисунок 1.6 – Принципиальная однолинейная схема одноагрегатного тягового блока

1.2 Общие сведения и выбор метода исследования системы тягового электроснабжения

Электрический расчет необходим для оценки работы системы тягового электроснабжения в нормальных и вынужденных режимах. В результате расчета системы в нормальном режиме осуществляется выбор параметров устройств электроснабжения с целью получения необходимого напряжения на токоприемниках электровозов, обеспечивающего наименьшие потери электрической энергии и напряжения в контактной сети, работу оборудования в течение заданного срока службы и соблюдение заданных размеров движения поездов в нормальных условиях, а в вынужденных режимах – размеры перевозок в соответствии с энергодиспетчерской регулировкой [9].

Существующие методы электрического расчета СТЭ [7, 22, 23, 29, 39, 41, 44-46, 49, 53, 92-97] (рисунок 1.7) разделены две группы: по заданному графику движения и по заданным размерам движения поездов. К основным недостаткам рассматриваемых методов можно отнести: сложность и трудоемкость выполнения расчета. Влияние параметров каждого из устройств электроснабжения на показатели пропускной способности рассматривается без учета их совместной работы, а также степени вклада в результирующую нагрузочную способность всей системы.

Наиболее эффективным методом исследования работы СТЭ, а также расчета пропускной способности по устройствам тягового электроснабжения является метод имитационного моделирования работы СТЭ на ЭВМ (рисунок 1.8) [18, 27, 28, 30, 31, 35-38, 42, 43 47-49, 51, 52, 54, 55, 57-64, 99-103]. К достоинствам можно отнести возможность оценить большее количество факторов, влияющих на систему, также решение задач, которые не могут быть решены аналитически.



Рисунок 1.7 – Методы электрического расчета системы тягового электроснабжения

Необходимые исходные данные для проведения электрических расчетов СТЭ:

- характеристика участка (координаты расположения отдельных пунктов);
- данные для выполнения тяговых расчетов (профиль пути участка, характеристики электроподвижного состава, данные о вагонах, о характеристике буксового состояния вагонов, масса состава);
- данные для моделирования графика движения поездов (массы грузовых поездов, размеры движения для различных типов поездов, допустимые минимальные межпоездные интервалы);
- сведения о режиме работы оборудования и параметрах СТЭ.

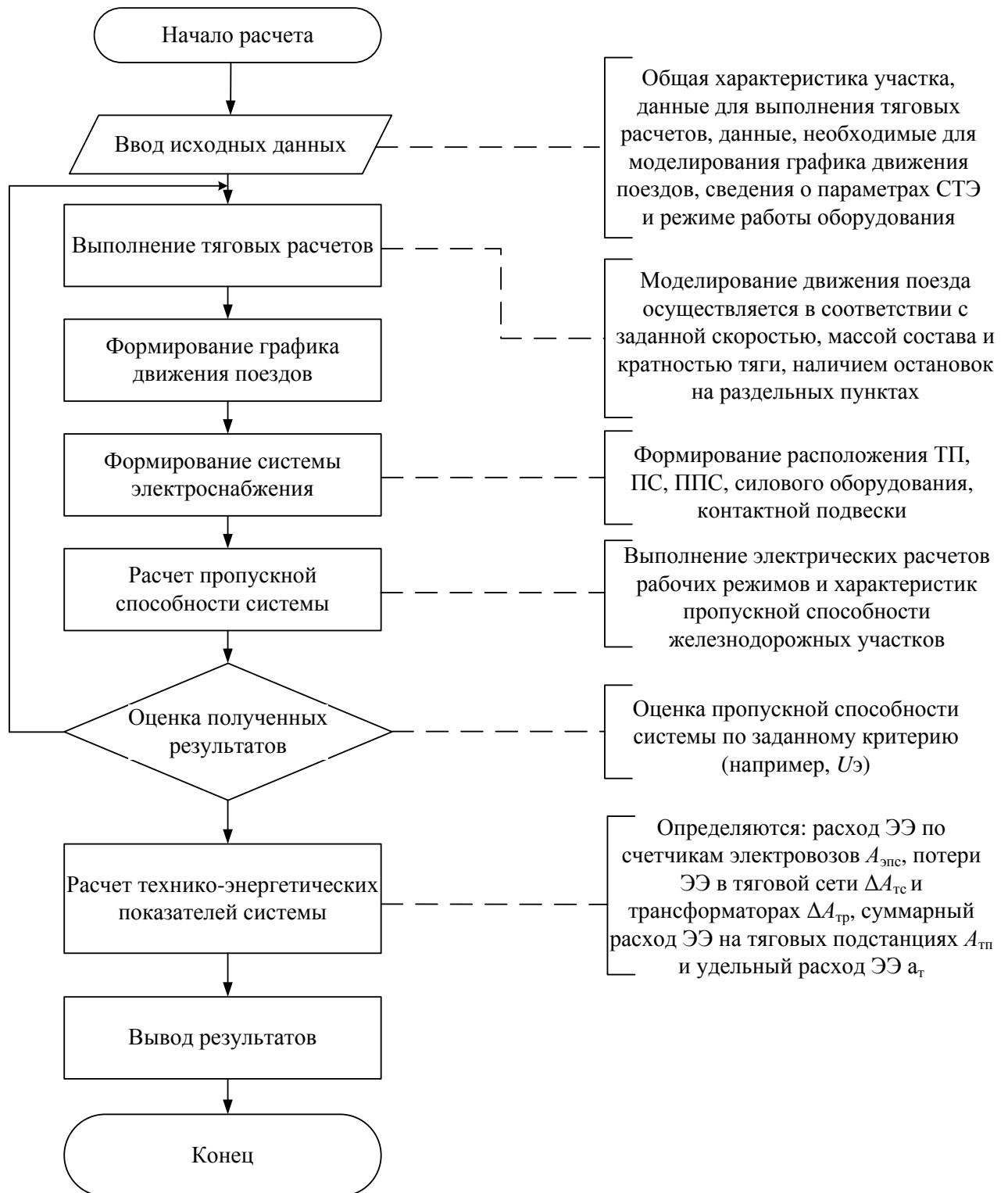


Рисунок 1.8 – Блок-схема имитационной модели системы электроснабжения при реализации ее на ЭВМ

При расчете расхода электровозами электрической энергии на тягу желательно учитывать следующую, может быть неполную, априорную (начальную)

информацию: скорость движения поезда, силу тяги двигателей (определяемую током двигателей), величину напряжения на двигателе, ЭДС вращения якоря тягового двигателя, состояние магнитного потока магнитопровода, электрические и магнитные потери двигателя, механические потери колесомоторного блока, а также сопротивление движения поезда, зависящее от скорости движения поезда, состояния пути и бандажей колес, скорости ветра и его направления относительно направления движения поезда, от температуры окружающей среды, состояния поверхности катания рельсов и других условий, связанных с состоянием устройств тягового электроснабжения.

Кроме необходимости введения в электрический расчет расхода электрической энергии на тягу такого объема информации задача усложняется тем, что на участке железной дороги могут находиться несколько переменных во времени и пространстве и пар поездов (прямое и обратное направления движения) с дискретным состоянием процесса работы системы электровозов и тягового электроснабжения.

Применение в электрических расчетах полного объема исходной информации с возможным увеличением рабочей информации, в результате появления новых задач и требований в системе тягового электроснабжения, ведет к усложнению и затруднению электрических расчетов.

Использование в электрических расчетах расхода электрической энергии на тягу неполного объема исходной информации потребовало применения разделов математической статистики и теории вероятности с использованием цифровых вычислительных машин.

Программный комплекс Энерго, разработанный в УрГУПС [52, 54, 55], состоит из 12 блоков, выполняет тяговые и электрические расчеты, определяет оптимальные точки расположения ППС, осуществляет оценку вероятностно-статистических характеристик показателей работы СТЭ. Является наиболее многофункциональным программным комплексом, удобен в исследовании параметров СТЭ.

Однако данный программный комплекс не получил дальнейшего развития, вследствие чего имеет ряд недостатков:

- ограниченная база данных участков (только часть Свердловской и Южно-Уральской железных дорог);
- отсутствие возможности пополнять и обновлять базы данных;
- отсутствует возможность формирования пакета грузовых поездов;
- отсутствует возможность напрямую выводить полученные данные на печать.

Для электрических расчетов системы тягового электроснабжения научно-исследовательским институтом АО «ВНИИЖТ» [30, 31, 48, 104, 105] разработан и на электрифицированных участках железных дорог постоянного тока внедрен программный комплекс (ПК) КОРТЭС позволяющий выполнять электрические расчеты пропускной способности по устройствам электроснабжения, расчеты режимов коротких замыканий, а также расчеты режимов борьбы с гололёдом, но с ограниченным объемом исходной и рабочей информации и предназначенный для решения на ЭВМ расчетных задач, связанных с определением характеристик режимов, выбором параметров, а также нагрузочной способности СТЭ и их отдельных элементов.

Для выполнения электрических расчетов СТЭ с оценкой технико-энергетической эффективности системы БАРН при пропуске грузовых поездов ПМД и СП в диссертации используется программный комплекс КОРТЭС. Как и все имитационные модели, КОРТЭС обеспечивает выдачу выходного сигнала (расход и потери электрической энергии и т.д.), если на вход поступают возмущающие воздействия (например, изменение исходных данных, параметров подстанции), поэтому для оценки точности полученных результатов необходимо выполнение нескольких вариантных электрических расчетов. Однако ПК КОРТЭС требует ряд доработок и усовершенствований [30], а именно:

- проработка возможности увеличения длины моделируемого участка;

- возможность пересчёта значений тока электровоза (в редакторе параметров тяговой нагрузки) с точностью до 0,001;
- возможность дополнительного представления результатов электрического расчета: напряжения на шинах тяговых подстанциях и в расчетных точках контактной сети; потери ЭЭ на тяговых подстанциях (отдельно в регулирующем устройстве ТП, выпрямительных агрегатах, сглаживающих устройств, реакторах);
- проработка возможности получения и анализа нагрузочных кривых во времени для элементов расчетной схемы;
- включение в программу расчета функции для формирования схем с системой БАРН с различными видами регулирующих устройств;
- включение проверки достоверности выполненных электрических расчетов с введением устройств регулирования напряжения, а также при пропуске соединенных грузовых поездов;
- возможность изменения напряжения холостого хода одноагрегатной тяговой подстанции.

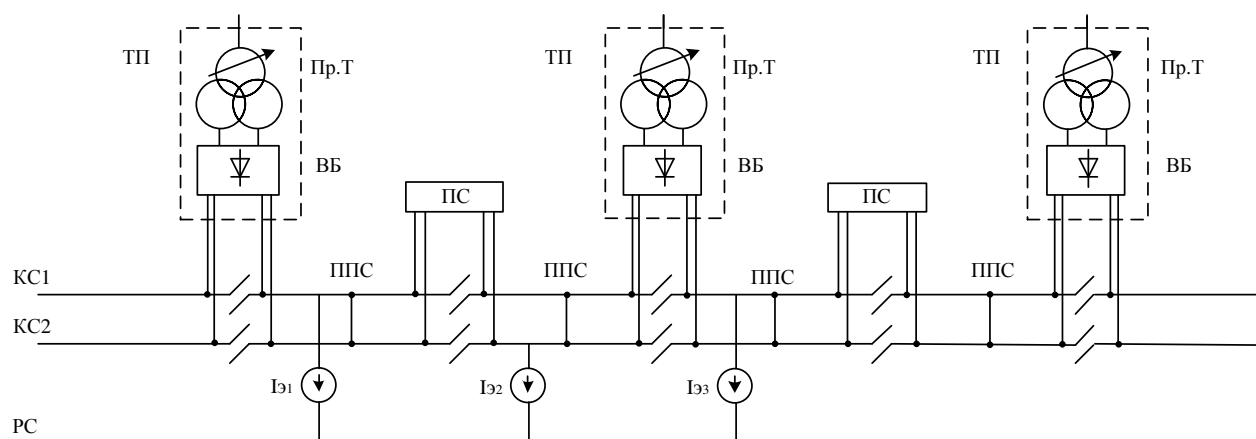
1.3 Основные положения теории расчета системы тягового регулируемого электроснабжения

Выполнение электрических расчетов выполняются методом мгновенных схем [7, 22, 37, 38, 48, 53, 96, 98]. Первоначально выполняются тяговые расчеты, по результатам которых имеем зависимость с шагом по времени 0,5 мин:

$$I_3, l = f(t). \quad (1.1)$$

Электрические расчеты технико-энергетических показателей СТЭ производят путем моделирования графика движения поездов на основе тяговых расчетов. Определяется количество и месторасположение поездов, а также значение тока

электровоза для данных поездов. На рисунке 1.9 представлена расчетная схема двухпутного участка с двусторонним питанием с применением на тяговых подстанциях устройств регулирования напряжения системой БАРН.



Пр.Т – преобразовательный трансформатор; ВБ – выпрямительный блок; $I_{э1,2,3}$ – токи электровозов 1,2 и 3

Рисунок 1.9 – Расчетная схема параллельной схемы двухпутного участка с двусторонним питанием

Далее для мгновенной расчетной схемы СТЭ составляются уравнения на основе схемы замещения тяговой подстанции и тяговой сети всего участка. Рассчитываются следующие показатели: токи фидеров, токи тяговых подстанций, потери напряжения и мощности межподстанционных зон. При определении показателей рассматриваемого участка используют методов контурных токов или узловых потенциалов с применением ЭВМ [7, 22, 37, 38, 53].

После выполнения электрических расчетов из всего множества значений напряжений на токоприемнике электровозов $U_{эi}$ определяют межподстанционные зоны с минимальным напряжением $U_{эmin}$ и выполняют сравнение с минимально допустимым уровнем напряжении менее 2700 В

$$\begin{cases} U_{эmin} = \min \{U_{эi}\} \\ U_{эmin} \geq U_{миндоп} \end{cases} \quad (1.2)$$

Если условие выполняется, то далее определяются расход и потери электрической энергии. Если условие не выполняется, то повышается уровень стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанциях.

Расход ЭЭ на тягу тяговых подстанций с введением устройств регулирования напряжения БАРН определяется по следующей формуле

$$A_{\text{тп}} = A_{\text{т}} + \Delta A_{\text{тр}} + \Delta A_{\text{пу}} = A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}} + \Delta A_{\text{тр}} + \Delta A_{\text{пу}}, \quad (1.3)$$

где $A_{\text{т}}$ – расход электрической энергии на тягу;

$\Delta A_{\text{тр}}$ – потери электрической энергии в головном и преобразовательном трансформаторах тяговых подстанций;

$\Delta A_{\text{пу}}$ – потери электрической энергии в регулирующем устройстве БАРН;

$A_{\text{эпс}}$ – расход электрической энергии по счетчикам ЭПС;

$\Delta A_{\text{тс}}$ – потери электрической энергии в тяговой сети.

$A_{\text{т}}$ расход электрической энергии на тягу:

$$A_{\text{т}} = A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}}. \quad (1.4)$$

$A_{\text{эпс}}$ расход электрической энергии по счетчикам ЭПС [7, 22, 53] определяется:

$$A_{\text{эпс}} = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n U_i I_i t_{Ti}. \quad (1.5)$$

$\Delta A_{\text{тс}}$ потери ЭЭ в тяговой сети [7, 22, 53, 97] определяются:

$$\Delta A_{\text{тс}} = r \sum_{i=1}^m I_i^2 \cdot \Delta t_i \cdot l_i. \quad (1.6)$$

Суммарные потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{тр}}$ состоят из постоянных потерь $\Delta A_{\text{тр.хх}}$ (относят магнитные потери, зависящие от основного магнитного потока) и от переменных потерь $\Delta A_{\text{тр.нагр}}$ (состоят из электрических потерь в обмотках, зависящих от квадрата тока нагрузки).

Таким образом, потери электрической энергии в трансформаторах тяговых подстанций равны:

$$\Delta A_{\text{тр}} = \Delta A_{\text{тр.хх}} + \Delta A_{\text{тр.нагр}}, \quad (1.7)$$

где $\Delta A_{\text{тр.хх}}$ – потери электрической энергии в трансформаторах в режиме холостого хода;

$\Delta A_{\text{тр.нагр}}$ – потери электрической энергии в трансформаторах в режиме нагрузки.

Потери электрической энергии в регулирующем устройстве БАРН равны:

$$\Delta A_{\text{ру}} = \Delta A_{\text{ру.хх}} + \Delta A_{\text{ру.нагр}}, \quad (1.8)$$

где $\Delta A_{\text{ру.хх}}$ – потери электрической энергии в регулирующем устройстве БАРН в режиме холостого хода;

$\Delta A_{\text{ру.нагр}}$ – потери электрической энергии в регулирующем устройстве БАРН в режиме нагрузки.

После подстановки формул 1.4-1.8 в 1.3 и получим

$$A_{\text{тп}} = \left(\sum_{i=1}^n U_i I_i t_{Ti} \right) + \left(r \sum_{i=1}^m I_i^2 \cdot \Delta t_i \cdot l_i \right) + (\Delta A_{\text{тр.хх}} + \Delta A_{\text{тр.нагр}}) + (\Delta A_{\text{ру.хх}} + \Delta A_{\text{ру.нагр}}). \quad (1.9)$$

Далее определяется удельный расход ЭЭ

$$a_{\text{тп}} = \frac{A_{\text{тп}}}{A_{\text{уч}}} = \frac{A_{\text{тп}}}{L * m}, \quad (1.10)$$

где $A_{\text{уч}}$ – тонно-километровая работа;

L – длина участка;

m – масса составов.

Эффективность применения системы БАРН, относительно существующей системы тягового электроснабжения

$$\Delta_{\text{барн}} = \frac{a_{\text{тп(сущ)}} - a_{\text{тп(барн)}}}{a_{\text{тп(сущ)}}} * 100\%, \quad (1.11)$$

где $a_{\text{тп(сущ)}}$ – удельный расход ЭЭ существующей СТЭ;

$a_{\text{тп(барн)}}$ – удельный расход ЭЭ с применением системы БАРН.

1.4 Критерии оценки технико-энергетической эффективности движения СП и применения устройств регулирования напряжения

В диссертационном исследовании для оценки технико-энергетической эффективности системы тягового электроснабжения до и после введения устройств регулирования напряжения, а также двух схем движения грузовых поездов (одиночные и соединенные) используются следующие критерии:

1. Напряжение на токоприемнике электровоза.
2. Потери ЭЭ в тяговой сети и в трансформаторах тяговых подстанций, с учетом потерь ЭЭ в регулирующем устройстве.
3. Удельный расход электрической энергии на тягу тяговых подстанций.

Напряжение на токоприемнике электровоза

Данная величина ограничивает пропуск грузовых поездов повышенной массы и длины, а также соединенных грузовых поездов.

В период 27.11.2018 г. по 21.12.2018 на участках Инская – Входная – Курган – Седельниково, Курган – Челябинск (Западно-Сибирской, Южно-Уральской и Свердловской железных дорог) в нечетном направлении проводились тягово-энергетические испытания возможности вождения соединенных поездов массой до 14200 тонн при вождении грузовыми электровозами серии 2ЭС6, оборудованных ИСАВП-РТ [106].

При проведении опытной поездки были допущены отказы по условиям тягового электроснабжения: нарушение требований ПТЭ [107] и распоряжения ОАО «РЖД». № 2412 от 25.11.2010г [108], регламентирующего напряжения в контактной сети не менее 2,7 кВ и не более 4 кВ.

Выявленные несоответствия в обеспечении энергоснабжением контактной сети приводят к эксплуатации электровозов в недопустимых режимах, появляется возможность излома автосцепки в составе поезда, выхода из строя тягового оборудования электровозов и не исключаются риски в выполнении графика движения.

В связи с этим по результатам проведения электрических расчетов СТЭ производится оценка уровня напряжения на токоприемнике электровоза по формуле

$$U_{\text{эmin}} \leq U_{\text{э}} \leq U_{\text{эmax}}, \quad (1.12)$$

а также определяется количество межподстанционных зон с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В [107]

$$N_{\text{мпз}} \leq 2700 \text{ В} \quad (1.13)$$

Потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах ТП

При оценке технико-энергетической эффективности двух вариантов движения поездов (одного соединенного и двух одиночных грузовых поездов), в т. ч. при сравнении работы тяговых подстанций по естественным внешним характеристикам (нерегулируемая СТЭ) и стабилизированным внешним характеристикам (СТРЭ) учитывается величина снижения потерь ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ и величина снижения потерь ЭЭ в трансформаторах тяговых подстанций $\Delta A_{тр}$.

У соединенного поезда суммарный ток равен сумме токов электровозов двух одиночных поездов $2I_э$, где $I_э$ получен из тягового расчета для одного одиночного поезда. Таким образом, величина потерь ЭЭ в тяговой сети у одного СП выше, чем у двух ОП.

Снижение потерь ЭЭ является целевой задачей СТЭ в определении энергетической эффективности электрической тяги, особенно электрифицированных на постоянном токе, где величина потерь ЭЭ выше переменного тока [1].

Применение системы БАРН позволяет снижать потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах ТП.

Удельный расход электрической энергии на тягу тяговых подстанций

По формуле 1.10 определяется удельный расход ЭЭ.

В качестве критерия оценки выбирается эффективность применения системы БАРН, относительно существующей системы тягового электроснабжения по формуле 1.11.

Таким образом, критерии оценки технико-энергетической эффективности движения СП и применения устройств регулирования напряжения принимают следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{\text{тп}} = \sum_{i=1}^k a_{\text{тпи}} \rightarrow \min \\ U_{\text{эmin}} \leq U_{\text{э}} \leq U_{\text{эmax}} \\ \Delta A_{\text{тс}} = \sum_{i=1}^k \Delta A_{\text{тси}} \rightarrow \min \\ \Delta A_{\text{тп}} = \sum_{i=1}^k \Delta A_{\text{тпи}} \rightarrow \min \\ \Delta_{\text{барн}} = \frac{a_{\text{тп(сущ)}} - a_{\text{тп(барн)}}}{a_{\text{тп(сущ)}}} * 100\% \end{array} \right. \quad (1.14)$$

где k – количество вариантов электрического расчета

Выводы по первой главе

1. Определен вариант совершенствования энергетических показателей системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ – система бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН, направленная на стабилизацию напряжения преобразовательного агрегата тяговой подстанции в диапазоне от $U_{d\text{ст}} = 3500$ В до $U_{d\text{ст}} = 3700$ В, на снижение потерь электрической энергии и на повышение пропускной и провозной способности направлений (участков). Применение системы БАРН образует систему тягового регулируемого электроснабжения СТРЕ.

2. Определено, что рациональным средством для моделирования работы СТЭ и анализа технико-энергетических показателей является программный комплекс КОРТЭС. Анализ его функциональных возможностей показал необходимость внесения некоторых доработок, среди основных является проверка достоверности выполнения электрических расчетов СТЭ на основе введения устройств регулирования напряжения и при пропуске СП.

3. Для технико-энергетической оценки пропускания СП и сравнении двух режимов работы ТП (нерегулируемая СТЭ с напряжением $U_{dxx} = 3500$ В (естественная внешняя характеристика) и стабилизированным внешним характеристикам с напряжением $U_{dcr} = 3500 - 3700$ В (СТРЭ)) определены критерии оценки в виде математической модели. К ним отнесены: уровень напряжения на токоприемнике электровоза, потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах ТП, удельный расход ЭЭ на тягу тяговых подстанций и энергетическая эффективность системы БАРН.

ГЛАВА 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОДИНОЧНЫХ ИЛИ СОЕДИНЕННЫХ ПОЕЗДОВ

Данная глава посвящена совершенствованию методики проведения электрического расчета СТРЭ при двух вариантах движения грузовых поездов. Проведена оценка достоверности выполнения электрических расчетов в программном комплексе КОРТЭС с введением устройств регулирования напряжения при пропуске соединенных грузовых поездов. Разработанное дополнение к методике проведения электрических расчетов представлено в виде алгоритма.

2.1 Оценка технико-энергетических показателей работы СТЭ при пропуске соединенного и одиночных поездов

Оценка технико-энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения участка с движением с одинаковой массой одиночных поездов с установленным межпоездным интервалом и при введении на участке движения соединенных поездов производится и определяется совместной работой устройств электроснабжения (тяговой сети, тяговых подстанций) и электроподвижного состава (электровозов).

Общим требованием при оценке технико-энергетических показателей работы электровозов для двух вариантов движения поездов является обеспечение при заданной технической скорости равенства времени хода по участку и обеспечение одинаковой тонно-километровой работы.

При этом известно, что при одинаковой тонно-километровой работе и одинаковой заданной технической скорости движения поездов затрачивается одина-

ковая механическая работа, откуда следует, что имеет место одинаковый по счетчикам электровозов расход электрической энергии на тягу.

Если в процессе исследований аналитические доказательства подтверждаются практическими действиями по поддержанию неизменным расхода электрической энергии электровозами при движении двух одиночных поездов с межпоездным интервалом или в соединенном поезде, тогда технико-энергетическая оценка работы двух схем движения поездов зависит и определяется показателями работы тяговой сети, головных понизительных трансформаторов и преобразовательных агрегатов.

Известно [7], что в режиме тяги результирующая сила тяги, действующая на поезд, определяется как разность силы тяги электровоза F_k и сопротивления движению поезда W :

$$F = F_k - W. \quad (2.1)$$

Сила тяги электровоза определяется по следующей формуле:

$$F_k = n_d \cdot F_{k.d}, \quad (2.2)$$

где n_d – число тяговых двигателей электровоза;

$F_{k.d}$ – сила тяги двигателя на ободе колеса.

Сила тяги двигателя на ободе колеса $F_{k.d}$ равна

$$F_{k.d} = 3,6 C \Phi I_a - \Delta F, \quad (2.3)$$

где C – постоянная двигателя;

Φ – магнитный поток;

ΔF – потеря силы тяги;

- $I_{я}$ – ток якоря тягового двигателя;
 $3,6$ – коэффициент.

Потеря силы тяги, вызванная механическими ($\Delta P_{\text{мех}}$) и магнитными ($\Delta P_{\text{магн}}$) потерями в двигателе и в зубчатой передаче ($\Delta P_{\text{з.п.}}$), определяется по формуле

$$\Delta F = 3,6 \frac{\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{з.п.}}}{V}. \quad (2.4)$$

Ток якоря тягового двигателя определяется по формуле

$$I_{я} = \frac{U_{д} - E}{R}, \quad (2.5)$$

- где $U_{д}$ – напряжение, подводимое на двигатель;
 R – сопротивление якорной цепи двигателя;
 $E = C\Phi V$ – ЭДС вращения якоря.

При подстановке формул (2.2-2.5) в формулу (2.1), получим выражение зависимости результирующей силы тяги, действующей на поезд, от напряжения на токоприемнике электровоза:

$$F = n_{д} \cdot 3,6 \left[\frac{C\Phi}{R} \cdot (U_{д} - C\Phi V) \cdot \frac{\Delta P_{\text{магн}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{з.п.}}}{V} \right] - W. \quad (2.6)$$

У соединенного поезда суммарный ток равен сумме токов электровозов двух одиночных поездов $2I_3$, где I_3 получен из тягового расчета для одного одиночного поезда.

Суммарный ток двух электровозов соединенного поезда вызывает повышение потерь напряжения в тяговой сети и, соответственно, снижение напряжения на электроподвижном составе, что (как известно $V \equiv U_3$) вызывает снижение скоро-

сти движения. При этом, как видно из формул (2.1-2.6), появляется сложная зависимость результирующей силы тяги F тяговых двигателей электровоза от снижения напряжения на токоприемнике электровоза. При снижении скорости движения уменьшаются ЭДС вращения якоря тягового двигателя и сопротивление движения поезда, увеличивается потеря силы тяги и в конечном итоге снижается расход электрической энергии на тягу.

Для поддержания скорости движения поезда машинист электровоза увеличением тока якоря повышает силу тяги двигателя. Для этого вводится другой режим работы тяговых двигателей электровоза, а именно, перевод с серийно-параллельной схемы соединения тяговых двигателей на параллельную схему с возможным введением в указанных схемах ограничения возбуждения магнитного потока двигателей ОВ1, ОВ2, ОВ3 и ОВ4.

2.2 Особенности выполнения электрического расчета в программном комплексе КОРТЭС

В данном пункте рассматриваются особенности выполнения электрического расчета системы тягового регулируемого электроснабжения с устройствами БАРН в программном комплексе КОРТЭС.

При повышении напряжения в контактной сети происходит изменение мощности электровоза, величина которой зависит от тока I_3 электровоза, необходимого для получения определенной силы тяги (формула 2.6) при движении поезда.

В эксплуатации величина тока I_3 определяется многими условиями и требованиями организации движения поездов на участке.

Для теоретической оценки технико-энергетической эффективности работы участка при повышении и стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций в дополнительных разработках к программному комплексу КОРТЭС элек-

трического расчета системы тягового электроснабжения предусматриваются два варианта использования мощности электровоза: увеличение мощности – первый вариант; второй – сохранение мощности неизменной.

В первом варианте – при повышении напряжения U_3 на токоприемнике – ток электровоза I_3 принимается из тяговых расчетов с движением поезда на участке с постоянным напряжением $U_3 = 3000$ В. В результате повышения напряжения и, соответственно, мощности увеличивается результирующая сила тяги (формула 2.6), увеличивается техническая скорость движения V , что ведет к увеличению пропускной способности участка и к увеличению общего расхода ЭЭ по тяговым подстанциям $A_{\text{ТП}}$ ($A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}} + \Delta A_{\text{тр}}$).

Второй вариант состоит в сохранении неизменными технической скорости движения V (сохранении пропускной способности) и расхода ЭЭ за счет снижения среднего тока электровоза I_3 при повышении напряжения U_3 (формула 1.5). В результате снижаются потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$, в головном и преобразовательном трансформаторах $\Delta A_{\text{тр}}$ и регулирующем устройстве $\Delta A_{\text{ру}}$ (формула 1.9).

Для проведения оценки технико-энергетической эффективности при повышении напряжения в контактной сети воспользуемся программным комплексом КОРТЭС.

В дальнейшем потери ЭЭ в регулирующем устройстве $\Delta A_{\text{ру}}$ учтены в потерях ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{тр}}$ тяговых подстанций.

При выполнении электрического расчета в ПК КОРТЭС, с введением устройств регулирования напряжения на заданном уровне стабилизации напряжения 3500 В, 3600 В и 3700 В, токи электровозов, полученные из тягового расчета, остаются неизменными. В результате расчета происходит увеличение расхода ЭЭ на тягу, с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети, а также увеличение потерь ЭЭ в головном и преобразовательном трансформаторах (формула 1.9). Таким образом, в ПК КОРТЭС оценка технико-энергетической эффективности при повышении напряжения в контактной сети возможна только при первом варианте, т. е. с увеличением технической скорости движения.

Для проведения второго варианта необходима разработка дополнительной методики проведения электрических расчетов системы тягового регулируемого электроснабжения, заключающаяся в ограничении величины тока электровоза, полученного по результатам тягового расчета. Методика расчета должна быть основана на условии равенства расхода электрической энергии электровозом нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ, т. е. одинаковой механической работе при одинаковых технических скоростях и массе поезда.

При пропуске одного соединенного или двух одиночных грузовых поездов одинаковой массы по участку с реальным профилем пути и заданной скоростью движения затрачивается одинаковая тонно-километровая работа, следовательно, электрическая энергия, затрачиваемая электровозами одного СП и двух ОП, тоже одинаковая.

При выполнении электрических расчетов в ПК КОРТЭС нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ при пропуске одного СП и двух ОП с одинаковой тонно-километровой работой, расход ЭЭ ЭПС, полученный в результате расчета при пропуске СП, оказался ниже, чем при пропуске двух ОП. Это связано (см. разд. 2.1), с тем, что суммарный ток двух электровозов соединенного поезда вызывает снижение напряжения U_3 и, соответственно, скорости движения и расхода ЭЭ. Следовательно, другой задачей, разрабатываемой дополнительной методикой является выполнение электрических расчетов нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ при организации движения соединенных поездов СП, в том числе со сравнительной технико-энергетической оценкой одиночных и соединенных поездов. Для этого необходимо путем увеличения токов электровоза, полученных по результатам тягового расчета, повысить расход ЭЭ $A_{\text{эпс}}$ с целью поддержания скорости движения электровоза. Методика должна быть основана на обеспечении равенства расхода ЭЭ ЭПС при пропуске одного СП и двух ОП одинаковой массы нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ.

Разработка дополнительной методики позволит произвести совместную оценку технико-энергетических показателей при пропуске одиночных или соединенных поездов нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ.

2.3 Теоретические основы алгоритма сравнительного электрического расчета СТЭ и СТРЭ участка с движением одиночных или соединенных поездов

Сравнительный анализ работы электровозов одиночных и соединенных поездов проводится по результатам расчетов расхода на тягу и потери ЭЭ с учетом скорости движения и при условии выполнения одинаковой тонно-километровой работы, т. е. при движении на участке поездов составами одинаковой массы.

Работа преобразовательных агрегатов тяговых подстанций предусматривается в двух режимах: первый режим работы – по естественным внешним характеристикам с напряжением холостого хода $U_{dxx} = 3500$ В; второй режим работы [109] – по стабилизированным внешним характеристикам на уровне U_{dct} от 3500 В до 3700 В.

При повышении со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях, соответственно и в контактной сети, независимо от типа поезда ОП или СП определяется технико-энергетическая эффективность за счет увеличения технической скорости движения, т. е. увеличения пропускной способности или при неизменной технической скорости (сохранении пропускной способности) за счет уменьшения среднего тока электровозов, т. е. уменьшения потерь ЭЭ в тяговой сети.

Алгоритм и программа расчета системы тягового электроснабжения при работе тяговых подстанций с естественными внешними характеристиками с напряжением холостого хода (в т. ч. и с $U_{dxx} = 3500$ В) разработан и представлен в программном комплексе КОРТЭС.

Для оценки технико-энергетических показателей работы электровозов, после введения в систему тягового электроснабжения устройств регулирования напряжения при независимом или сравнительном анализе движения на участке одиночных или соединенных поездов, в диссертации приведены теоретические разработки дополнительных методик в программном комплексе КОРТЭС, предназначенных для расчета СТЭ без регулирования напряжения и с регулированием напряжения СТРЭ.

Теоретическим основанием для разработки дополнительных методик к программному комплексу КОРТЭС является соотношение тонно-километровой работы и электрической энергии при выполнении электровозами одиночных и соединенных поездов одинаковой тонно-километровой работы.

С учетом принятого положения в обеспечении равенства расхода ЭЭ по счетчикам поездов одинаковой массы, движущихся по участку по схемам ОП или СП, первоначально производится электрический расчет участка с движением двух одиночных поездов, разделенных минимальным временем межпоездного интервала 10 минут и с напряжением холостого хода $U_{dxx} = 3500$ В (с естественными внешними характеристиками ТП).

При этом в электрический расчет СТЭ участка в качестве исходного начального приближения вводятся токи электровоза, полученные из тяговых расчетов при напряжении на токоприемнике электровозов 3000 В. Полученный с использованием программного комплекса КОРТЭС общий расход ЭЭ по счетчикам ЭПС двух одиночных поездов при нерегулируемом напряжении тяговых подстанций $U_{dxx} = 3500$ В принимается за базовый $A_{эпс, б}$.

Затем проводится электрический расчет СТЭ участка с движением одного СП массой, равной двум ОП, также при нерегулируемом напряжении тяговых подстанций $U_{dxx} = 3500$ В. Отмечено ранее (см. разд. 2.1), что повышенный при СП суммарный ток двух электровозов по сравнению с токами двух ОП, но разнесенными на межподстанционной зоне через время межпоездного интервала, вызывает снижение напряжения на токоприемнике электровоза, снижение скорости

движения и, как следствие, снижение расхода электрической энергии по счетчикам ЭПС. Поэтому в электрическом расчете СТЭ участка с движением СП также при нерегулируемом напряжении тяговых подстанций $U_{dxx} = 3500$ В для повышения расхода ЭЭ до принятого базового значения при пропуске двух ОП и равного $A_{\text{эпс, б}}$ вводится поправочный токовый коэффициент $K_{Ixx} > 1$ в относительных единицах (о. е.), увеличивающий ток электровозов СП.

Расчет коэффициентов $K_{Ixx} > 1$ производится с использованием «метода итерации» (последовательных приближений) [110]. В программу электрического расчета комплекса КОРТЭС через блок корректировки (рисунок 2.1, блок №1) в разрабатываемую дополнительную методику расчета СТЭ вводятся токи электровоза, полученные из тягового расчета при напряжении $U_3 = 3000$ В и умноженные на один из искомых поправочных токовых коэффициентов $K_{Ixx} > 1$, полученного в процессе последовательного приближения расчетной величины $A_{\text{эпс}}$ при движении СП к базовой величине $A_{\text{эпс, б}}$, полученной ранее при движении двух ОП с заданной погрешностью, например не более 1 %.

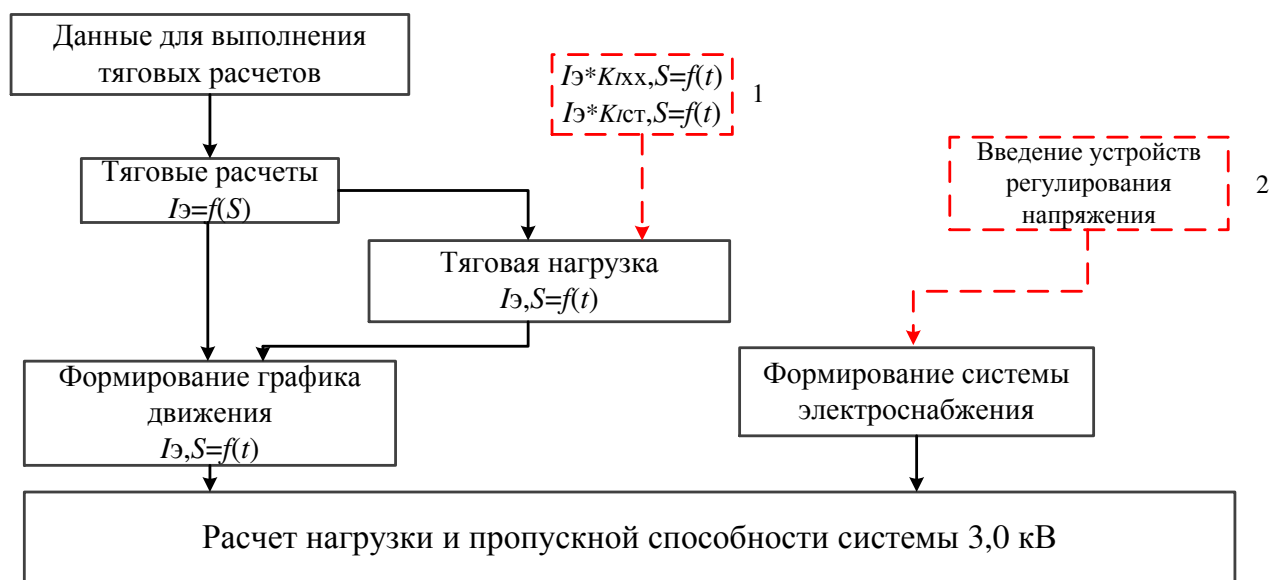


Рисунок 2.1 – Структурная схема проведения электрических расчетов СТЭ в КОРТЭС с введением поправочных токовых коэффициентов и устройств регулирования напряжения

При возможном (более 1 %) различии в расходе электрической энергии электровозами $A_{\text{эпс}}$ производится уточнение расчетного поправочного коэффициента $K_{I(\text{расч})}$ с учетом погрешности:

$$\delta \% = 100 - \frac{A_{\text{эпс}}}{A_{\text{эпс, б}}} 100 \% . \quad (2.6)$$

Величина уточненного поправочного токового коэффициента равна

$$K_{I(\text{уточн})} = K_{I(\text{расч})} \left(\frac{1 \pm \delta \%}{100 \%} \right), \quad (2.7)$$

где знак (–) относится к случаю, если расход электрической энергии электровозов, полученный в первом расчете СТЭ, больше, чем базовый.

При необходимости производится второй итерационный расчет СТЭ с введением уточненного поправочного коэффициента.

После проведения электрического расчета СТЭ при соблюдении условия $A_{\text{эпс}} = A_{\text{эпс, б}}$ с точностью не более 1 %, необходимо выполнить проверку технико-энергетических показателей СТЭ для обеспечения требуемой (перспективной) пропускной способности участков. Если в ходе выполнения проверки найдется хотя бы один ограничивающий показатель, то потребуются введение устройств регулирования напряжения системой БАРН.

Второй режим работы преобразователей ТП по стабилизированным внешним характеристикам на уровне напряжений от 3500 В до 3700 В – продолжение развития метода электрического расчета СТЭ участка с повышенным стабилизированным напряжением на шинах ТП.

При повышении напряжения на токоприемнике электровоза, при введении устройств регулирования напряжения, для сохранения неизменными технической скорости движения и расхода $A_{\text{эпс}}$ машинист электровоза изменяет схему соеди-

нения и (или) изменяет степень ослабления возбуждения магнитного потока тяговых двигателей. При выполнении электрических расчетов системы тягового электроснабжения для сохранения неизменными технической скорости движения и расхода ЭЭ $A_{\text{эпс}}$ необходимо уменьшить величину тягового тока электровоза, полученного по результатам электрических расчетов СТЭ в программном комплексе КОРТЭС с естественными внешними характеристиками ТП с $U_{dxx} = 3500$ В, путем введения поправочных токовых коэффициентов $K_{\text{лт}}$, величина которых должна быть меньше единицы [7, 9, 109, 111]. В результате полученный расход ЭЭ по счетчикам ЭПС при работе ТП по стабилизированным внешним характеристикам снизится до уровня расхода ЭЭ по счетчикам ЭПС $A_{\text{эпс}}$ при работе ТП по естественным внешним характеристикам.

Исследование изменения поправочного токового коэффициента с использованием метода итерации (см. таблицу 2.1) произведено на примере участка Богданович-Войновка с движением только в нечетном направлении двух ОП массой каждого по 6000 т с межпоездным интервалом 10 минут с применением системы БАРН на уровне стабилизации 3700 В.

Таблица 2.1 – Результаты определения поправочного токового коэффициента методом итерации

Поправочный токовый коэффициент K_I , о.е.	Расход ЭЭ на тягу, кВт*ч	Потери ЭЭ в тяговой сети, кВт*ч	Расход ЭЭ по счетчикам ЭПС, кВт*ч	$\delta\%$	Расчетный поправочный коэффициент $K_{I(\text{расч})}$ с учетом погрешности
База	26495	1582	24913	-	-
1	28655	1462	27193	-9,151	0,908
0,90	25801	1185	24616	1,192	0,911
0,91	26083	1211	24872	0,164	0,911

Выберем некоторое начальное приближение, например $K_{I(\text{расч})1} = 1$, и умножим его на токи электровоза, полученные по результатам тягового расчета:

$$I_{\text{э (уточн)}} = I_{\text{э}} * K_{I(\text{расч})}. \quad (2.8)$$

Далее выполняется электрический расчет СТЭ с уточненным током электровоза $I_{\text{э (уточн)}}$ и второй итерационный цикл уточнения $I_{\text{э}}$ с расчетным поправочным коэффициентом $K_{I(\text{расч})2} = 0,908$. Т. к. в ПК КОРТЭС пересчет значений тока электровоза (в редакторе параметров тяговой нагрузки) возможен только с точностью до 0,01, то значение расчетного коэффициента округляется до двух знаков после запятой.

В результате после третьего приближения расчетный поправочный коэффициент при стабилизации напряжения на уровне 3700 В равен $K_{I_{\text{ст}}} = 0,91$.

Таким образом, с применением метода итерации после третьего цикла уточнения токов электровозов $I_{\text{э}}$ погрешность расчетов расхода ЭЭ $A_{\text{эпс}}$ снизилась до 0,164 %.

2.4 Проверка изменения технико-энергетических показателей СТЭ и СТРЭ при использовании поправочных токовых коэффициентов

Для проверки изменения технико-энергетических показателей нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ при пропуске одного соединенного поезда и двух одиночных поездов проводится электрический расчет в программном комплексе КОРТЭС.

Вначале рассмотрим изменение технико-энергетических показателей при пропуске соединенного и одиночных поездов нерегулируемой СТЭ.

Для расчета взят участок Южно-Уральской ж.д. Курган – Колчедан с движением только в нечетном направлении одного соединенного грузового поезда массой по 6000 т [6000 т + 6000 т] или двух одиночных грузовых поездов с межпоездным интервалом 10 минут, массой каждого по 6000 т при изменении скорости движения поездов от 50 до 100 км/ч.

В таблице 2.2 представлены результаты проверочного электрического расчета нерегулируемой СТЭ без введения поправочных коэффициентов K_{Jxx} , где показаны расход электрической энергии на тягу A_T , с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети ΔA_{Tc} , и расход ЭЭ электровозами $A_{эпс}$, а также количество межподстанционных зон МПЗ с напряжением на электровозе менее 2700 В [107].

Таблица 2.2 – Результаты проверочного электрического расчета СТЭ с применением поправочного токового коэффициента $K_{Jxx} = 1$

V	Название поезда, масса	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{эпс} + \Delta A_{Tc}$	Потери ЭЭ в тяговой сети ΔA_{Tc}	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{эпс}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Снижение A_T после введения СП
км/ч	тыс. т	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт.	%
50	ОП 6 – 6	27888	1172	26716	-	0,41
	СП [6 + 6]	27774	1748	26026	-	
60	ОП 6 – 6	29939	1529	28410	-	0,51
	СП [6 + 6]	29786	2248	27538	-	
70	ОП 6 – 6	31511	1976	29535	-	0,73
	СП [6 + 6]	31283	2968	28315	-	
80	ОП 6 – 6	33566	2297	31269	-	1,02
	СП [6 + 6]	33226	3591	29635	2	
90	ОП 6 – 6	34046	2790	31256	-	1,41
	СП [6 + 6]	33573	4341	29232	4	
100	ОП 6 – 6	37839	3242	34597	-	1,68
	СП [6 + 6]	37237	5262	31975	10	

В результате выполнения электрических расчетов СТЭ (таблица 2.2) в ПК КОРТЭС полученный расход ЭЭ на тягу A_T при пропуске СП меньше, чем при пропуске двух ОП (от 0,41 % до 1,68 %), что подтверждает отмеченной в разд. 2.1 снижение скорости движения и пропускной способности участка. Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ оказались выше при СП по сравнению с пропуском ОП, так как суммарный ток двух электровозов вызывает большее увеличение потерь ЭЭ при пропуске СП.

При пропуске СП при скоростях движения от 80 км/ч до 100 км/ч наблюдается снижение напряжения менее 2700 В в контактной сети соответственно от 2 до 10 межподстанционных зон, что ограничивает пропускную способность данного участка.

Рассмотрим вариант введения в нерегулируемую СТЭ при пропуске СП и ОП поправочных токовых коэффициентов $K_{Ixx} > 1$ (таблица 2.3).

Результаты таблицы 2.3 соответствуют рассмотренному в разд. 2.3 варианту равенства расхода ЭЭ ЭПС $A_{эпс}$ при пропуске ОП и СП, т. е. сохранения скорости движения поездов и пропускной способности участка.

Таблица 2.3 – Результаты проверочного электрического расчета СТЭ с применением поправочного токового коэффициента $K_{Ixx} > 1$

V	Название поезда, масса	Поправочные коэффициенты K_{Ixx}	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{эпс} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{эпс}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение A_T после введения СП
км/ч	тыс. т	о. е.	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт.	%
1	2	3	4	5	6	7	8
50	ОП 6 – 6	1	27888	1172	26716	-	2,43
	СП [6 + 6]	1,03	28582	1855	26727	-	
60	ОП 6 – 6	1	29939	1529	28410	-	3,22
	СП [6 + 6]	1,04	30936	2436	28500	-	

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8
70	ОП 6 – 6	1	31511	1976	29535	-	3,87
	СП [6 + 6]	1,05	32780	3272	29508	-	
80	ОП 6 – 6	1	33566	2297	31269	-	5,28
	СП [6 + 6]	1,07	35437	4112	31325	4	
90	ОП 6 – 6	1	34046	2790	31256	-	6,50
	СП [6 + 6]	1,09	36412	5157	31255	6	
100	ОП 6 – 6	1	37839	3242	34597	-	7,84
	СП [6 + 6]	1,11	41060	6483	34577	10	

Из таблицы 2.3 следует, что расход ЭЭ ЭПС $A_{\text{эпс}}$ при пропуске одного СП и двух ОП практически совпадает (от 0 % до 0,32 % при скорости от 50 км/ч до 100 км/ч). Расход ЭЭ на тягу $A_{\text{т}}$, с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$ и расхода ЭЭ ЭПС $A_{\text{эпс}}$, возрастает при пропуске СП, по сравнению с пропуском ОП от 2,43 % до 7,84 % (рисунок 2.2). Также при пропуске СП в нерегулируемой СТЭ происходит на некоторых МПЗ снижение напряжения в контактной сети менее 2700 В при скоростях от 80 км/ч до 100 км/ч.

На рисунке 2.2 представлены графики увеличения расхода ЭЭ на тягу после введения СП при использовании в электрических расчетах поправочных токовых коэффициентов $K_{\text{Ixx}} = 1$ и $K_{\text{Ixx}} > 1$.

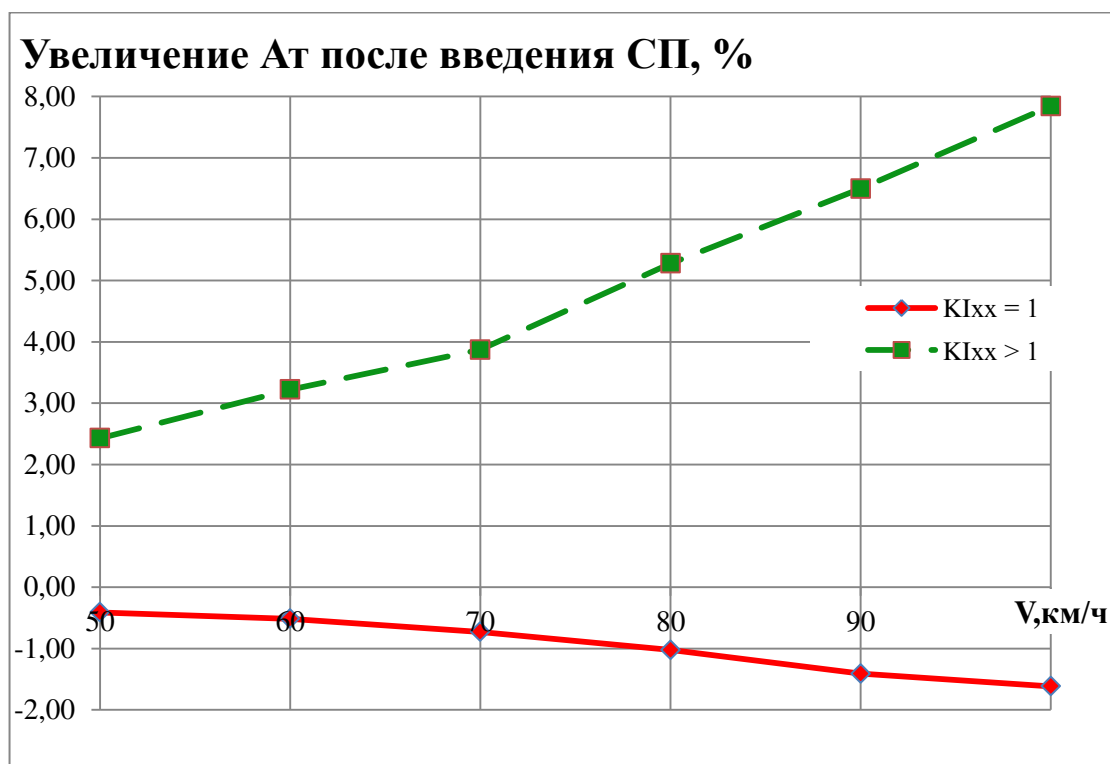


Рисунок 2.2 – Проверка поправочного токового коэффициента K_{Ixx}

Для обеспечения напряжения в контактной сети не менее 2700 В и сохранения неизменной (или для повышения) пропускной способности участка необходимо введение регулируемой СТРЭ.

При повышении и стабилизации напряжения на тяговых подстанциях на уровнях от 3500 В до 3700 В рассмотрен вариант введения поправочных токовых коэффициентов $K_{ICT} < 1$ при выполнении электрических расчетов регулируемой СТРЭ с оценкой технико-энергетических показателей: общего расхода ЭЭ на тягу тяговых подстанций $A_{тп}$, включающего расход ЭЭ $A_{элс}$, потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ и в трансформаторах тяговых подстанций $\Delta A_{тр}$. С помощью ПК КОРТЭС и разработанного к нему дополнения проведены электрические расчеты на трех участках, отличающихся друг от друга сложностью профиля пути [109].

Для получения достоверности расхода ЭЭ на тягу и потерь ЭЭ электрические расчеты участков рассмотрим при движении только в нечетном направлении одного одиночного поезда массой состава 6000 т с электровозами 2ЭС6, 2ЭС10 и 2хВЛ10. В четном направлении движение поездов отсутствует.

Результаты электрических тяговых расчетов и электрических расчетов нерегулируемой СТЭ на рассматриваемых участках железных дорог для одной скорости движения поездов 50 км/ч (с возможной шкалой до 100 км/ч) приведены в таблицах 2.4-2.6. Тяговые подстанции работают по естественным внешним характеристикам с напряжением холостого хода $U_{xx} = 3500$ В (таблица 2.4) и по стабилизированной характеристике с уровнем стабилизации $U_{ст} = 3700$ В (таблицы 2.5 и 2.6). В таблицах приведены результаты электрических расчетов расходов и потерь ЭЭ: тяговых $A_{тр}$, на тягу A_T с включением потерь в тяговой сети $\Delta A_{тс}$, на тягу по счетчикам ЭПС $A_{эпс}$, нагрузочных потерь ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{т, нагр}$ и общего расхода ЭЭ на тягу тяговой подстанции $A_{тп}$.

Таблица 2.4 – Расходы и потери ЭЭ в нерегулируемой СТЭ с естественными внешними характеристиками на ТП $U_{xx} = 3500$ В

Параметр		Величина параметра					
		Хрустальная – Шаля		Войновка – Богданович		Курган – Колчедан	
1		2		3		4	
Скорость движения поездов, уровень напряжения на ТП		50 км/ч, $U_{xx} = 3500$ В					
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10
Результаты, полученные из электрических тяговых расчетов	$A_{тр}$, кВт·ч	8781,0	8204,7	11391,0	11027,1	11978,1	12285,7
	I_3 , А	В тяговых расчетах КОРТЭС					
Результаты, полученные из электрических расчетов СТЭ, кВт·ч	A_T	9793	9065	12941	12411	13724	14037
	$\Delta A_{тс}$	642	528	491	549	430	519
	$A_{эпс}$	9151	8537	12450	11862	13294	13518
	$\Delta A_{т, нагр}$	25	20	16	17	16	20

Окончание таблицы 2.4

Параметр		Величина параметра					
Рассматриваемый участок		Хрустальная – Шаля		Войновка – Богданович		Курган – Колчедан	
1		2		3		4	
Результаты, полученные из электрических расчетов СТЭ, кВт·ч	$A_{\text{ТП}}$	9818	9085	12957	12428	13740	14057
Повышение $A_{\text{эпс}}$ по сравнению с $A_{\text{тр}}$, %		4,2	4,0	9,3	7,6	11,0	10,0

Представленные в таблице 2.4 электрические расчеты основных параметров нерегулируемой СТЭ определяют установившееся значение расхода ЭЭ по счетчикам электровозов $A_{\text{эпс}}$ и соответствующему этому расходу ЭЭ установившееся значение скорости движения поездов и, соответственно, пропускной способности участков (направлений).

При введении на участках электрифицированных на постоянном токе 3,0 кВ устройств регулирования напряжения с одновременным его повышением до допустимого [14] уровня 3700 В происходит повышение скорости и, соответственно, пропускной способности СТЭ участков, сопровождающихся при этом повышением расхода ЭЭ на тягу $A_{\text{т}}$ (отмечено в разд. 2.3). Результаты электрического расчета этого режима приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Расходы и потери ЭЭ в регулируемой СТЭ со стабилизацией напряжения на ТП на уровне 3700 В в режиме I увеличения скорости движения

Параметр		Величина параметра					
Рассматриваемый участок		Хрустальная – Шаля	Войновка – Богданович	Курган – Колчедан			
Скорость движения поездов, уровень напряжения на ТП		50 км/ч, $U_{ст} = 3700 \text{ В}, K_{I \text{ СТ}} = 1$					
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10
Результаты электрических расчетов СТЭ с $U_{ст} = 3700 \text{ В}$ и $K_{I \text{ СТ}} = 1$, кВт·ч (режим увеличения скорости дви- жения)	A_T	10456	9654	13816	13224	14630	14981
	$\Delta A_{тс}$	627	517	461	516	403	487
	$A_{эпс} = A_T - \Delta A_{тс}$	9829	9137	13355	12728	14227	14494
	$\Delta A_{т.нагр}$	37	29	27	30	27	33
	$A_{тп} =$ $= A_T + \Delta A_{т.нагр}$	10493	9683	13843	13274	14657	15014

Другим вариантом режима работы СТЭ при повышении со стабилизацией напряжения на шинах ТП на уровне $U_{дст} = 3700 \text{ В}$ является режим сохранения скорости и пропускной способности постоянными (расчеты режима в таблице 2.6) и, соответственно, равными при режиме работы СТЭ с режимом работы тяговых подстанций с внешними естественными характеристиками с напряжением холостого хода $U_{хх} = 3500 \text{ В}$ (расчеты представлены в таблице 2.4).

Таблица 2.6 – Расходы и потери ЭЭ в регулируемой СТРЭ со стабилизацией напряжения на ТП на уровне 3700 В с сохранением скорости движения

Параметр		Величина параметра					
Рассматриваемый участок		Хрустальная – Шаля	Войновка – Богданович	Курган – Колчедан			
Скорость движения поездов, уровень напряжения на ТП		50 км/ч, $U_{ст} = 3700 \text{ В}, K_{I, ст} < 1$					
Электровоз		2ЭС10	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10
Результаты электрических расчетов СТРЭ при $U_{ст} = 3700$ В, кВт·ч (ре- жим сохране- ния неизмен- ной скорости движения)	Поправочные коэффициенты $K_{I, ст}$ при $U_{ст} =$ 3700 В, о. е.	0,92	0,93	0,93	0,92	0,93	0,93
	A_T	9622	8980	12850	12185	13607	13933
	$\Delta A_{тс}$	531	447	399	437	349	421
	$A_{эпс} = A_T - \Delta A_{тс}$	9091	8533	12451	11754	13258	13512
	$\Delta A_{т.нагр}$	31	25	24	25	24	29
$A_{тп} = A_T + \Delta A_{т.нагр}$		9653	9005	12874	12210	13631	13962

Введение в электрический расчет СТРЭ поправочных токовых коэффициентов $K_{I, ст} < 1$ (таблица 2.6) обеспечивает в сравнении с расчетами в таблице 2.4 практически равенства расхода ЭЭ по счетчикам $A_{эпс}$, снижение потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$, снижение расхода ЭЭ на тягу A_T и общего расхода ЭЭ тяговых подстанций $A_{тп}$.

Практически этот вариант работы СТРЭ направлен на экономию ЭЭ при сохранении неизменной пропускной способности участка.

В таблице 2.7 показаны сравнительные значения работы системы СТРЭ при введении на тяговых подстанциях устройств регулирования напряжения с уровнем стабилизации 3700 В по сравнению с режимом работы СТЭ без устройств регулирования напряжения по внешним естественным характеристикам с $U_{хх} = 3500 \text{ В}$.

Таблица 2.7 – Сравнительная оценка работы регулируемой СТРЭ и нерегулируемой СТЭ

Режим	Величина параметра, %						
	Участок	Хрустальная – Шаля		Войновка – Богданович		Курган – Колчедан	
		Электровоз	2ЭС10	2хВЛ10	2ЭС6	2хВЛ10	2ЭС6
Увеличение скорости при введении $U_{ст} = 3700$ В по сравнению со скоростью при $U_{xx} = 3500$ В	Увеличение $A_{эпс}$	8,12	7,08	7,26	8,34	7,31	7,3
	Увеличение $\Delta A_{тс}$	18,0	15,7	15,5	18,1	15,5	15,7
	Увеличение $A_{тп}$	8,7	7,529	7,527	8,714	7,527	7,535
Сохранение скорости при введении $U_{ст} = 3700$ В и равной скорости при $U_{xx} = 3500$ В	Изменение $A_{эпс}$ ($U_{ст} = 3700$ В) по сравнению $A_{эпс}$ ($U_{xx} = 3500$ В)	-0,656	-0,047	0	+0,961	0	0
	Снижение $\Delta A_{тс}$ ($U_{ст} = 3700$ В) по сравнению $\Delta A_{тс}$ ($U_{xx} = 3500$ В)	17,3	15,2	20,4	18,7	18,8	18,9
	Снижение $A_{тп}$ ($U_{ст} = 3700$ В) по сравнению $A_{тп}$ ($U_{xx} = 3500$ В)	1,681	0,881	0,641	1,754	0,793	0,676

В начале таблицы 2.7 представлен сравнительный вариант режимов работы системы СТРЭ и СТЭ при увеличении скорости движения, а затем – при сохранении скорости движения на уровне движения нерегулируемой СТЭ.

В режиме работы СТРЭ со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях $U_{ст} = 3700$ В при повышении скорости движения поездов, соответственно и пропускной способности (таблица 2.5 $K_{ICT} = 1$), по сравнению с режимом без введения устройств регулирования напряжения на тяговых подстанциях и с движением поездов с неизменной скоростью (см. таблицу 2.4) увеличиваются потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ на всех рассматриваемых участках на 15,5 % – 18 %, расход ЭЭ по счетчикам ЭПС $A_{эпс}$ на 7,1 % – 8,34 % и расход ЭЭ по счетчикам тяговых подстанций $A_{тп}$ на 7,5 % – 8,7 %.

В режиме работы СТРЭ со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях $U_{ст} = 3700$ В без повышения скорости движения и равной скорости движения в режиме СТЭ без введения устройств регулирования напряжения с $U_{хх} = 3500$ В (см. таблицу 2.4) произошло снижение потерь ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$ на всех рассматриваемых участках на 15,2 – 20,4 % и снижение расхода ЭЭ на тягу на тяговых подстанциях $A_{тп}$ на 0,641 – 1,754 %. При сохранении неизменными массы и скорости движения грузовых поездов, соответственно и пропускной способности участков, расход ЭЭ $A_{эпс}$ остается практически (от 0 до 1%) постоянным.

2.5 Совершенствование методики электрического расчета технико-энергетической эффективности СТЭ

Дополненная разработанными в разд. 2.3 и проверенными в разд. 2.4 решениями методика расчета СТЭ [112, 113, 114] представлена в виде алгоритма (рисунок 2.3), имеющая следующие функциональные блоки:

- 1 – исходные данные;
- 2 – предназначен для выполнения тяговых расчетов;

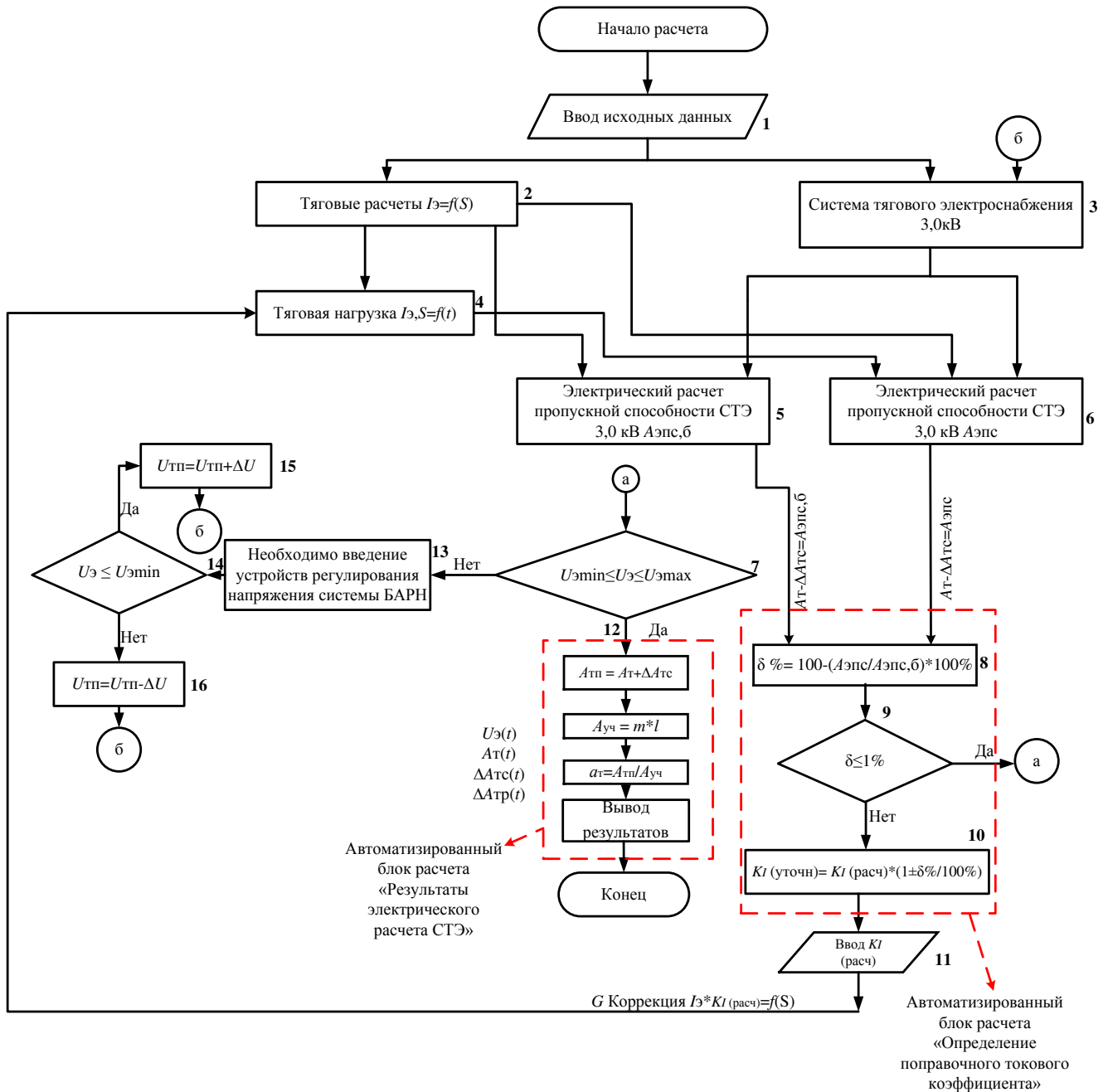


Рисунок 2.3 – Алгоритм электрического расчета технико-энергетической эффективности СТЭ и СТЭ при движении одиночных и соединенных поездов

3 – формирование схем, используемых при электрических расчетах СТЭ 3,0 кВ, в т. ч. с введением устройств регулирования напряжения;

4 – редактор параметров тяговой нагрузки, предназначенный для редактирования данных тяговой нагрузки, используемых при электрических расчетах;

5 – выполнение электрического расчета пропускной способности СТЭ при пропуске двух ОП или при напряжении на шинах тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ В (естественные внешние характеристики тяговых подстанций) режим I. Полученный расход электрической энергии по счетчикам ЭПС принимается за базовый;

6 – выполнение электрического расчета пропускной способности СТЭ при пропуске одного СП или при напряжении на шинах тяговых подстанций $U_{ст} = 3500 – 3700$ В (стабилизированные внешние характеристики с устройствами регулирования напряжения БАРН) режим II;

7 – проверка выполнения условия $U_{э \min} \leq U_{э} \leq U_{э \max}$;

8 – сравнение полученных величин между принятым базовым расходом электрической энергии по счетчикам ЭПС $A_{эпс,б}$ (пропуск двух ОП или нерегулируемая СТЭ с $U_{xx} = 3500$ В) и полученным расходом ЭЭ $A_{эпс}$ (пропуск одного СП или СТЭ $U_{ст} = 3500 – 3700$ В);

9 – определение погрешности расчета $A_{эпс,б}$ и $A_{эпс}$ ($\delta \leq 1$).

10 – при невыполнении условия из блока 9 выполняется итерационный цикл уточнения $K_{Ixx} > 1$ (при варианте расчета с пропуском одного СП) или $K_{Iст} < 1$ (при варианте расчета с введением устройств регулирования напряжения системы БАРН);

11 – ввод расчетного поправочного токового коэффициента;

12 – при выполнении условия из блока 7 ($U_{э \min} \leq U_{э} \leq U_{э \max}$) определяется удельного расхода электрической энергии и вывод результатов;

13 – при невыполнении условия из блока 7 ($U_{э \min} \leq U_{э} \leq U_{э \max}$) необходимо введение устройств регулирования напряжения системы БАРН при $U_{ст} = 3500 – 3700$ В;

14 – проверка выполнения условия $U_{э} \leq U_{э \min}$;

15, 16 – производится снижение или увеличение уровня напряжения на шинах ТП и переход в блок 3.

Красным пунктиром обозначены разработанные автоматизированные блоки расчета «Определение поправочного токового коэффициента» и «Результаты электрического расчета СТЭ».

Выводы по второй главе

1. После выполнения вариантных электрических расчетов определено, что в ПК КОРТЭС оценка технико-энергетической эффективности при повышении напряжения в контактной сети возможна только при увеличении технической скорости движения. Также определено, что при пропуске одного СП и двух ОП с одинаковой тонно-километровой работой, расход электрической энергии ЭПС, полученный в результате расчета при пропуске СП, оказался ниже, чем при пропуске двух ОП. Что требует разработки дополнений к методике электрического расчета.

2. Для уточнения оценки расхода электровозами электрической энергии по счетчикам ЭПС $A_{\text{эпс}}$ при введении на участке движения соединенных поездов рассчитывается поправочный токовый коэффициент $K_{I_{\text{xx}}} > 1$, а при повышении напряжения на токоприемнике электровозов за счет стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций при движении СП и ОП рассчитывается поправочный токовый коэффициент $K_{I_{\text{СТ}}} < 1$. При расчете $K_{I_{\text{xx}}} > 1$ и $K_{I_{\text{СТ}}} < 1$ используется метод итерации (последовательных приближений).

3. Произведено усовершенствование существующей методики проведения электрических расчетов системы тягового регулируемого электроснабжения при организации движения двух ОП с заданным межпоездным интервалом и одного СП, заключающееся во введении поправочных токовых коэффициентов, а также в дополнении проверкой уровня напряжения на токоприемнике электровоза. Если условие проверки выполняется, то производится расчет технико-энергетических показателей СТЭ, если нет, то изменяется уровень напряжения на шинах тяговых подстанций.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОДИНОЧНЫХ ИЛИ СОЕДИНЕННЫХ ПОЕЗДОВ

В данной главе выполняется моделирование работы системы тягового электроснабжения в двух режимах работы. Режим I – естественные внешние характеристики на шинах тяговых подстанций (с напряжением холостого хода 3500 В) и режим II – при стабилизации напряжения на шинах тяговых подстанций в пределах от 3500 В до 3700 В системой БАРН. Моделирование графика движения поездов производится в двух вариантах при пропуске одного соединенного поезда и при пропуске двух одиночных грузовых поездов с межпоездным интервалом 10 минут. Расчеты выполняются для трех различных по степени сложности профилей пути, скоростей движения от 50 до 100 км/ч, различных типов локомотивов. В разделе 3.1 определяется влияние соединенного поезда на потери электрической энергии в тяговой сети. В разделе 3.3 определяются технико-энергетические показатели СТРЭ при пропуске одного СП и двух ОП и выполняется оценка полученных результатов.

Достоверность предложенной методики электрического расчета проверяется путем сравнения результатов моделирования реального графика движения поездов в программном комплексе КОРТЭС с реальными показаниями приборов.

3.1 Влияние СП на потери ЭЭ в тяговой сети системы с устройствами регулирования напряжения

Определение потерь ЭЭ в тяговой сети возможно по результатам расхода ЭЭ на тягу или с использованием мгновенных значений тока электровоза (полученного по результатам тягового расчета или опытных поездок).

В данном разделе приводится расчет потерь ЭЭ в тяговой сети с использованием тока электровоза, полученного из тяговых расчетов. Для примера взят однопутный участок с двусторонним питанием, со стабилизированным на одном уровне напряжении на шинах тяговых подстанций.

Первоначально выполняется расчет для одного одиночного поезда (рисунок 3.1).

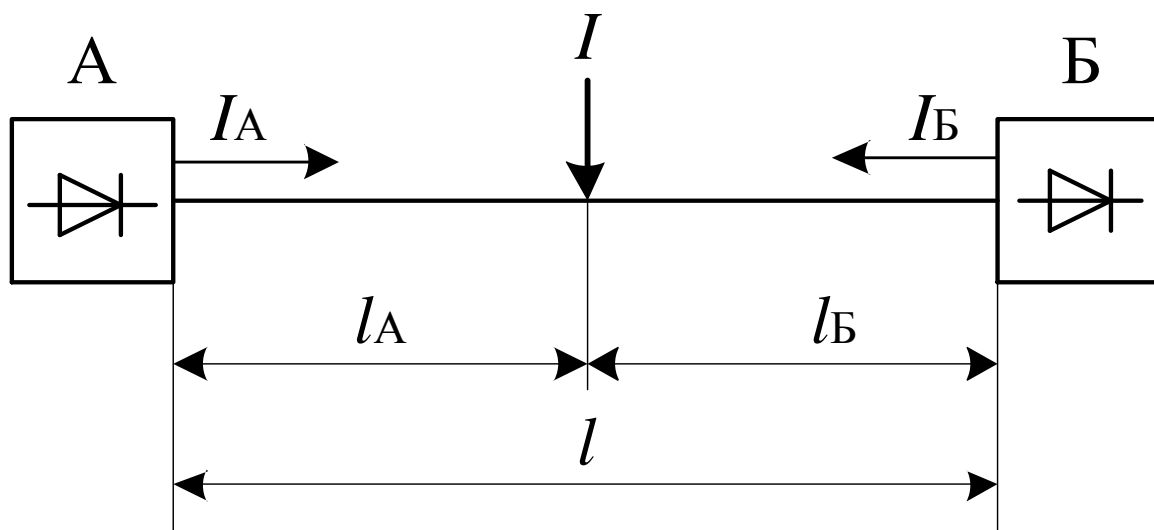


Рисунок 3.1 – Расчетная схема для одного одиночного поезда

На межподстанционной зоне (рисунок 3.1) находится один поезд с током электровоза

$$I = I_A + I_B, \quad (3.1)$$

где I_A – нагрузка питающего провода тяговой подстанции А;

I_B – нагрузка питающего провода тяговой подстанции Б.

При равенстве напряжений $U_A = U_B$ тяговых подстанциях нагрузка питающих проводов равна:

$$I_A = \frac{1}{l} I (l - l_A), \quad (3.2)$$

$$I_B = \frac{1}{l} I l_A, \quad (3.3)$$

где l – длина межподстанционной зоны;

l_A – расстояние от тяговой подстанции А до нагрузки I .

Токи фидеров (питающих проводов) создают потерю электрической энергии в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$. Потери ЭЭ на участках тяговой сети l_A и l_B межподстанционной зоны протяженностью $l = l_A + l_B$ определяются по формуле:

$$\Delta A_{\text{тс}} = \Delta A_{1\text{тс}} + \Delta A_{2\text{тс}}, \quad (3.4)$$

где

$$\Delta A_{1\text{тс}} = r t_{\text{т}} I_A^2 l_A; \quad (3.5)$$

$$\Delta A_{2\text{тс}} = r t_{\text{т}} I_B^2 (l - l_A). \quad (3.6)$$

После подстановки формул (3.5) и (3.6) в (3.4) получим формулу 3.7.

На межподстанционной зоне находятся два одиночных поезда с разделенным по времени межпоездным интервалом (рисунок 3.2).

$$\begin{aligned}
\Delta A_{\text{тс}} &= r t_{\text{т}} I_{\text{А}}^2 l_{\text{А}} + r t_{\text{т}} I_{\text{Б}}^2 (l - l_{\text{А}}) = \\
&= r t_{\text{т}} \left\{ \left[\frac{1}{l} I (l - l_{\text{А}}) \right]^2 l_{\text{А}} + \left[\frac{1}{l} I l_{\text{А}} \right]^2 (l - l_{\text{А}}) \right\} = \\
&= r t_{\text{т}} \left\{ \left(\frac{1}{l} \right)^2 I^2 (l - l_{\text{А}})^2 l_{\text{А}} + \left(\frac{l_{\text{А}}}{l} \right)^2 I^2 (l - l_{\text{А}}) \right\} = \\
&= r t_{\text{т}} \left\{ \frac{l_{\text{А}}}{l^2} I^2 (l^2 - 2l l_{\text{А}} + l_{\text{А}}^2) + \frac{l_{\text{А}}^2}{l^2} I^2 l - \frac{l_{\text{А}}^3}{l^2} I^2 \right\} = \\
&= r t_{\text{т}} \left\{ \frac{l_{\text{А}}}{l^2} I^2 l^2 - 2l l_{\text{А}} \frac{l_{\text{А}}}{l^2} I^2 + \frac{l_{\text{А}}^3}{l^2} I^2 + \frac{l l_{\text{А}}^2}{l^2} I^2 - \frac{l_{\text{А}}^3}{l^2} I^2 \right\} = \\
&= r t_{\text{т}} \left\{ I^2 l_{\text{А}} - 2 \frac{l_{\text{А}}^2}{l} I^2 + \frac{l_{\text{А}}^2}{l^2} I^2 \right\} = r t_{\text{т}} \left\{ I^2 l_{\text{А}} - I^2 \frac{l_{\text{А}}^2}{l} \right\} = r t_{\text{т}} I^2 l_{\text{А}} \left(1 - \frac{l_{\text{А}}}{l} \right)
\end{aligned} \quad (3.7)$$

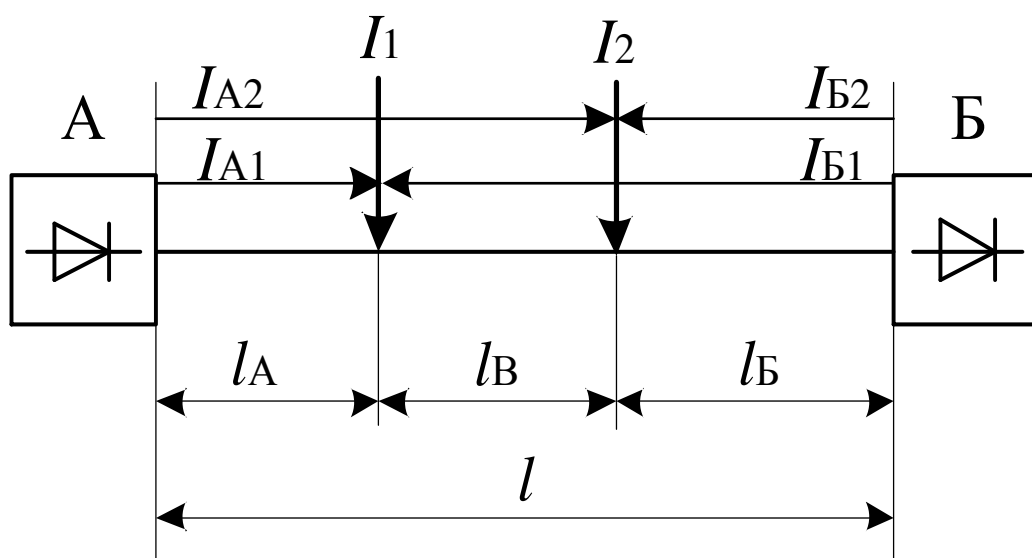


Рисунок 3.2 – Расчетная схема для двух одиночных поездов

Токи фидеров подстанции А и Б определяются по формуле

$$\begin{aligned}
I_{\text{А}} &= I_{\text{А1}} + I_{\text{А2}}, \\
I_{\text{Б}} &= I_{\text{Б1}} + I_{\text{Б2}},
\end{aligned} \quad (3.8)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют номеру электровозов 1 и 2, получающим токи питания от подстанций А и Б. Токи электровозов 1 и 2:

$$I_1 = I_{A1} + I_{B1}, \quad (3.9)$$

$$I_2 = I_{A2} + I_{B2},$$

где

$$\begin{cases} I_{A1} = I_1 \left(\frac{l - l_A}{l} \right) \\ I_{A2} = I_2 \left(\frac{l_B}{l} \right) = I_2 \frac{l - (l_A + l_B)}{l} \\ I_{B1} = I_1 \left(\frac{l_A}{l} \right) \\ I_{B2} = I_2 \left(\frac{l - l_B}{l} \right) = I_2 \frac{l_A + l_B}{l} \end{cases} . \quad (3.10)$$

Потери ЭЭ относительно подстанций А и Б:

$$\frac{1}{rt_T} \Delta A_{1TC} = I_{A1}^2 l_A + I_{A2}^2 (l_A + l_B); \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{rt_T} \Delta A_{2TC} = I_{B1}^2 (l - l_A) + I_{B2}^2 (l - l_A - l_B). \quad (3.12)$$

С учетом формул (3.11) и (3.12) потери ЭЭ в тяговой сети при движении двух одиночных поездов будут иметь вид формулы 3.13.

Полученная формула ΔA_{TC} двух одиночных поездов (3.13) соответствует формуле (3.7) одного одиночного поезда.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{rt_{\text{т}}} \Delta A_{\text{тс}} &= \left[I_1 \left(\frac{l-l_A}{l} \right) \right]^2 l_A + \left[I_1 \frac{l_A}{l} \right]^2 (l-l_A) + \left[I_2 \frac{l-(l_A+l_B)}{l} \right]^2 (l_A+l_B) + \\
&+ \left[I_2 \left(\frac{l_A+l_B}{l} \right) \right]^2 (l-l_A-l_B) = \frac{I_1^2 l_A}{l^2} (l-l_A)^2 + I_1^2 \frac{l_A^2}{l^2} (l-l_A) + \\
&+ \left[I_2 \frac{l-l_A-l_B}{l} \right]^2 (l_A+l_B) + I_2^2 \frac{l-l_A-l_B}{l^2} (l_A+l_B)^2 = \\
&= I_1^2 \frac{l_A}{l^2} (l-l_A) [(l-l_A)+l_A] + \frac{I_2^2 (l-l_A-l_B)(l_A+l_B)}{l^2} + \\
&+ \frac{I_2^2 (l_A+l_B)^2 (l-l_A-l_B)}{l^2} = I_1^2 \frac{l_A l}{l^2} (l-l_A) + \\
&+ \frac{I_2^2 (l-l_A-l_B)(l_A+l_B)}{l^2} (l-l_A-l_B+l_A+l_B) = \\
&= I_1^2 l_A - I_1^2 \frac{l_A^2}{l} + \frac{I_2^2 l (l_A+l_B)}{l} - \frac{I_2^2 (l_A+l_B)^2}{l} = \\
&I_1^2 l_A - I_1^2 \frac{l_A^2}{l} + I_2^2 (l_A+l_B) - \frac{I_2^2 (l_A+l_B)^2}{l} = \\
&= I_1^2 l_A \left[1 - \frac{l_A}{l} \right] + I_2^2 (l_A+l_B) \left[1 - \left(\frac{l_A+l_B}{l} \right) \right].
\end{aligned} \tag{3.13}$$

При пропуске соединенного поезда $l_B = 0$, тогда рисунок 3.2 будет соответствовать рисунку 3.1, но с суммарным током двух поездов $I_{\Sigma} = I_1 + I_2$. Следовательно, с учетом формулы (3.7) потери электрической энергии в тяговой сети для соединенного поезда будут определяться по формуле:

$$\frac{1}{rt_{\text{т}}} \Delta A_{\text{тс}} = (I_1 + I_2)^2 l_A - (I_1 + I_2)^2 \frac{l_A^2}{l} = (I_1 + I_2)^2 l_A \left(1 - \frac{l_A}{l} \right) \tag{3.14}$$

При расчете потерь ЭЭ в тяговой сети выполняется одно из правил умножения многочленов «квадрат суммы двух величин больше суммы квадратов этих величин». Из сравнения формул (3.13) и (3.14) следует, что потери электрической

энергии в тяговой сети при движении двух одиночных поездов меньше, чем при движении одного соединенного поезда.

3.2 Условия для моделирования работы системы тягового нерегулируемого и регулируемого электроснабжения

Для выполнения моделирования работы системы тягового регулируемого электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ используются участки с относительной сложностью профиля пути: легкий Войновка – Богданович (Свердловская ж. д.), средний Курган – Колчедан (Южно-Уральская ж. д.), тяжелый Подволошная – Вогулка (Свердловская ж. д.) [111, 116-117].

Профили пути, состав контактной подвески, тяговые подстанции с оборудованием представлены соответственно на рисунках 3.3, 3.4, 3.5, где обозначено: ▼ – тяговая подстанция с регулированием напряжения; ○ – пункт параллельного соединения; □ – пост секционирования.

Условия расчета:

1. С движением только в нечетном направлении двух ОП массой каждого по 6000 т с межпоездным интервалом 10 минут или одного СП. Время расчета – от момента отправки первого поезда со станции отправления до момента прихода последнего вагона второго поезда на конечную станцию.

2. Локомотивы 2ЭС6, 2ЭС10, 2хВЛ10.

3. Изменение скорости движения поездов от 50 до 100 км/ч с шагом 10 км/ч.

Электрические расчеты СТРЭ участков выполняются в ПК КОРТЭС. Программа дополнена разработанной методикой для уточнения тяговых токов электровозов при организации маршрутов движения СП, а также при повышении стабилизации напряжения ТП, что приводит к повышению точности расчетов расхода ЭЭ на тягу и потерь ЭЭ в оборудовании СТРЭ.

Продольный профиль пути																
		Богданович	Дубровский	Еланский	Камышлов	Аксариха	Ощепково	Талица	Чупино	Юшала	Тутулым	Кармак	Гужевое	Утяшево	Войновка	
Уклоны	нечетный			5,8		6,1		6,4			5,2	6,1		0,8	4,2	
	четный				6,1		0,2		6,3	5,1	0,0	6,7				
Состав контактной подвески		М120+2МФ100+2А185														
Длина межподстанционной зоны, км		9,7	17,3	18,6	16,3	20,0	30,1	14,1	19,5	19,7	16,9	12,1	19,0	18,6		
Тяговые подстанции		▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	
Посты секционирования, пункты параллельного соединения		□	○	○	○	○	○	○	□	○	○	□	○	○	○	□
Оборудование тяговой подстанции	понижительные трансформаторы	ТРДН-250000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТДН-16000/110	ТРДН-250000/110	ТРДН-250000/110	
	преобразовательные трансформаторы	ТМПУ-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	ТДП-16000/10	
	управляемые реакторы	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	РТДП-6300/10	
	количество преобразовательных агрегатов	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	

Рисунок 3.3 – Участок с легким горным профилем

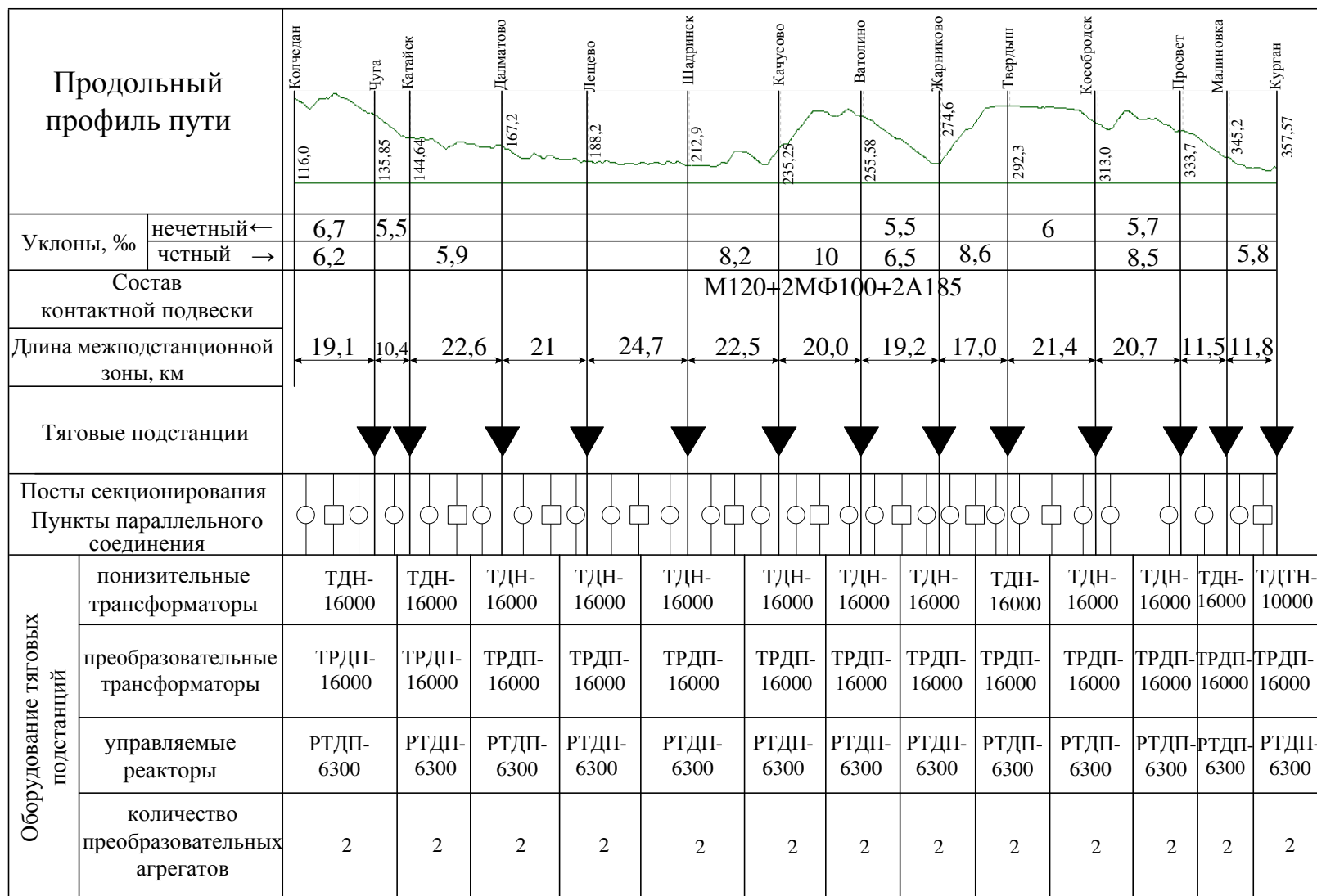


Рисунок 3.4 – Участок со средним профилем пути

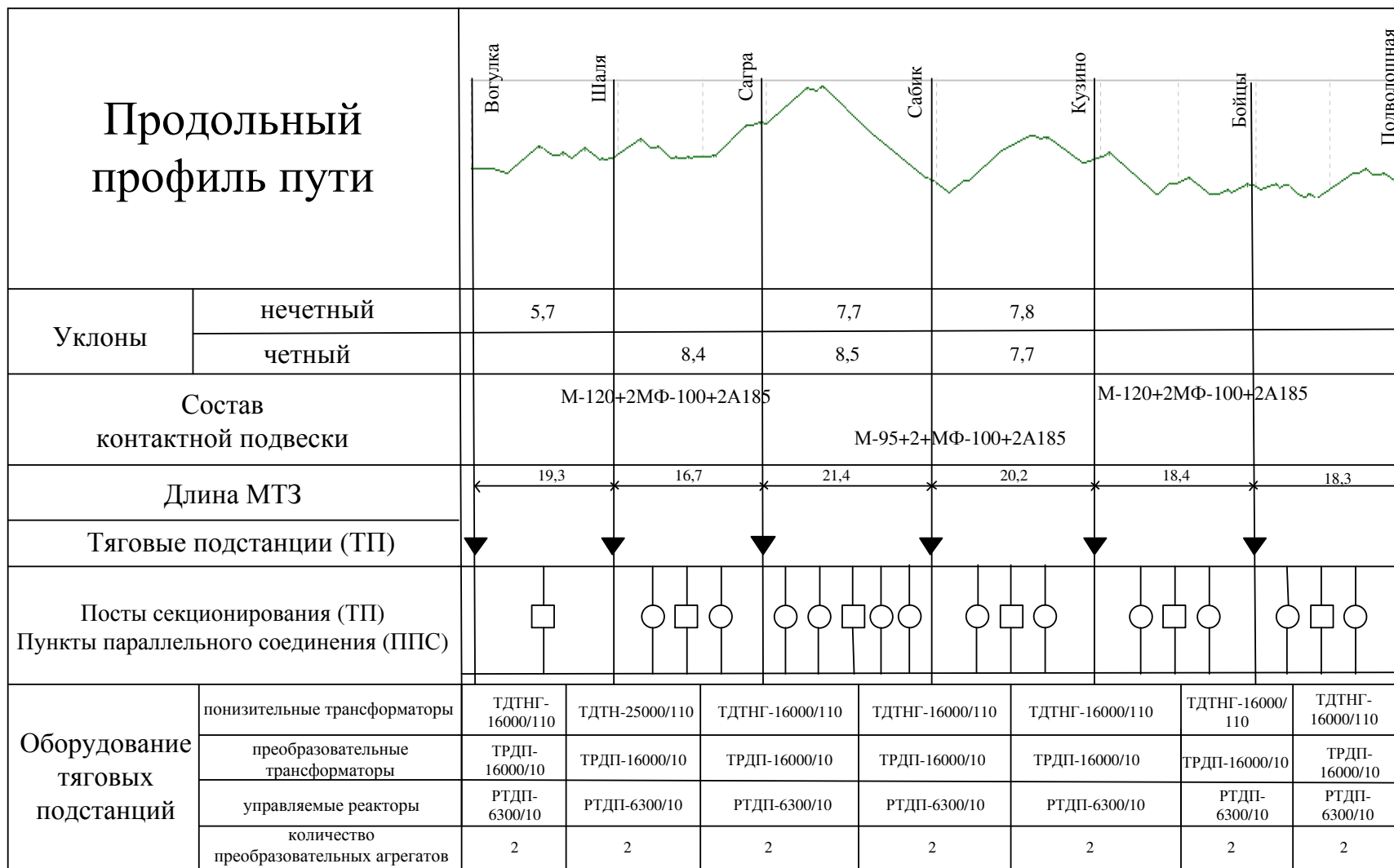


Рисунок 3.5 – Участок с тяжелым горным профилем

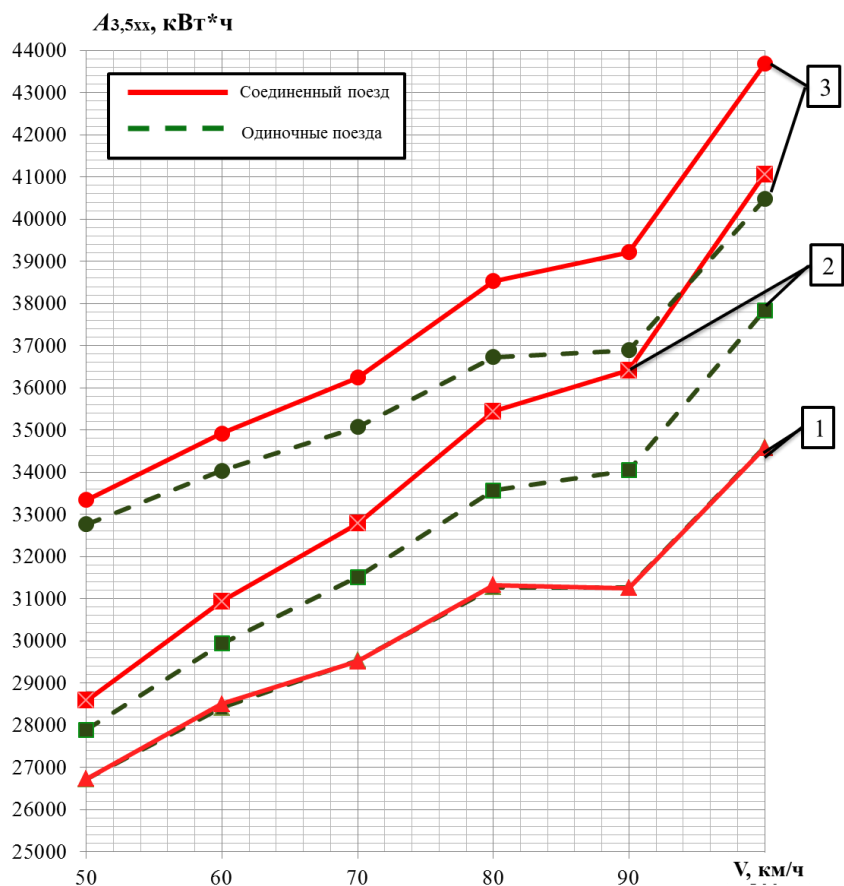
На ТП при пропуске по участкам поездов ОП повышенной массы и СП используется применяемая в эксплуатации рациональная по потерям ЭЭ схема работы количества понизительных и преобразовательных трансформаторов.

3.3 Техничко-энергетические показатели СТЭ при пропуске одного СП и двух ОП с введением устройств регулирования напряжения

Результаты электрического расчета нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТЭ постоянного тока 3,0 кВ участков Курган – Колчедан, Войновка – Богданович, Подволошная – Вогулка представлены соответственно на рисунках 3.6, 3.7, 3.8 и в приложении А, где в таблицах А.1 А.2 и А.3 приведен расход ЭЭ на тягу A_T , потери ЭЭ в тяговой сети ΔA_{TC} , расход ЭЭ по счетчикам электроподвижного состава $A_{ЭПС}$, потери ЭЭ в головных понизительных и в преобразовательных трансформаторах A_{TP} , суммарный расход ЭЭ на тяговой подстанции $A_{ТП}$ с включением A_T , ΔA_{TC} , $A_{ЭПС}$, ΔA_{TP} . Также приведено количество межподстанционных зон с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В [111, 115, 116] в функциональной зависимости от скорости движения поезда по участку V (от 50 км/ч до 100 км/ч) и от напряжения тяговых подстанций с напряжением холостого хода 3500 В (при естественных характеристиках) и на уровнях стабилизации 3500 В, 3700 В (стабилизированных характеристиках).

На рисунках 3.6, 3.7, и 3.8 зеленая пунктирная линия соответствует результатам расчета при пропуске двух одиночных грузовых поездов, красная сплошная линия – при пропуске одного соединенного поезда.

a



б

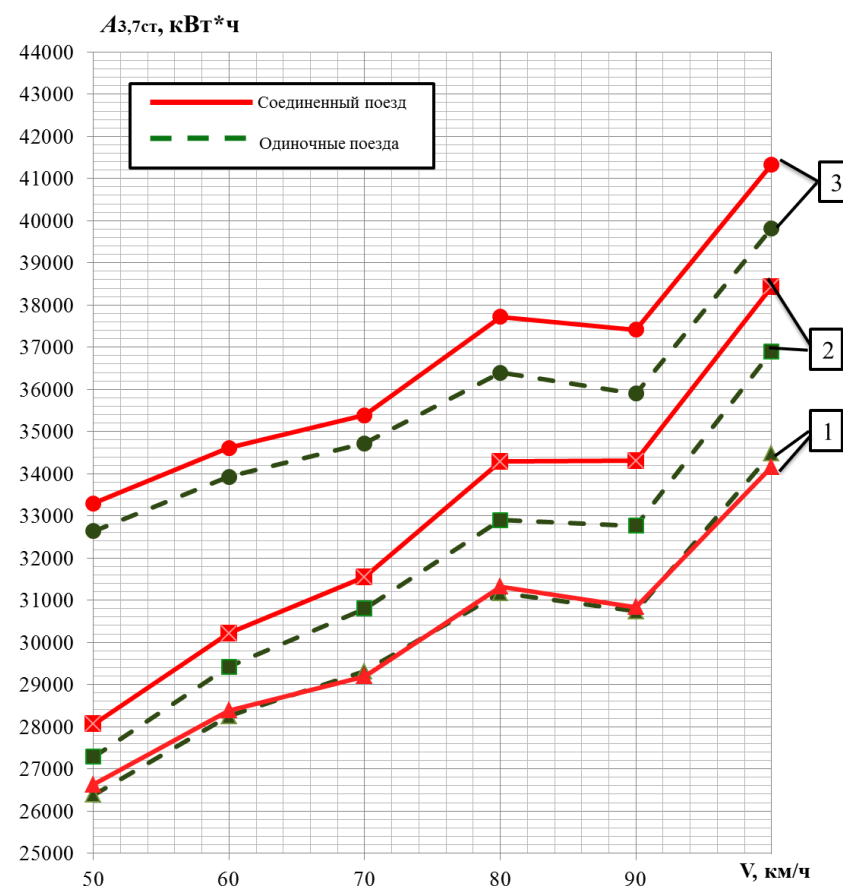


Рисунок 3.6 – Расход ЭЭ: по счетчикам ЭПС $A_{эпс}$ (1); с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети $A_{эпс} + \Delta A_{тс}$ (2) и в трансформаторах $A_{тп} = A_{эпс} + \Delta A_{тс} + \Delta A_{тр}$ (3) на участке Курган – Колчедан при напряжении на тяговых подстанциях участка: *a* – естественные с $U_{xx} = 3500$ В; *б* – стабилизированные $U_{ст} = 3700$ В

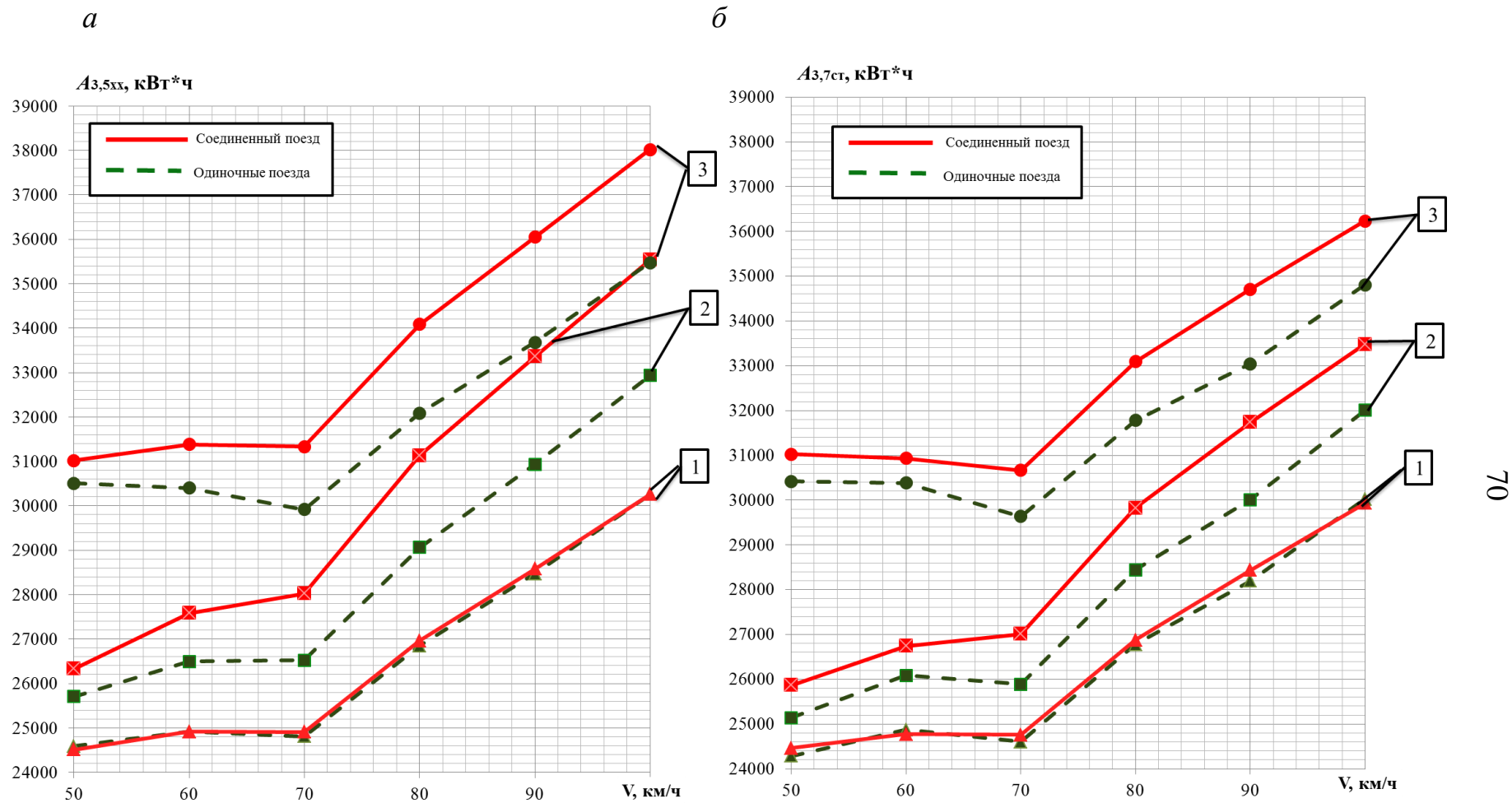


Рисунок 3.7 – Расход ЭЭ: по счетчикам ЭПС $A_{\text{эпс}}$ (1); с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети $A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}}$ (2) и в трансформаторах $A_{\text{тп}} = A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}} + \Delta A_{\text{тп}}$ (3) на участке Войновка – Богданович при напряжении на тяговых подстанциях участка: *а* – естественные с $U_{\text{хх}} = 3500 \text{ В}$; *б* – стабилизированные $U_{\text{ст}} = 3700 \text{ В}$

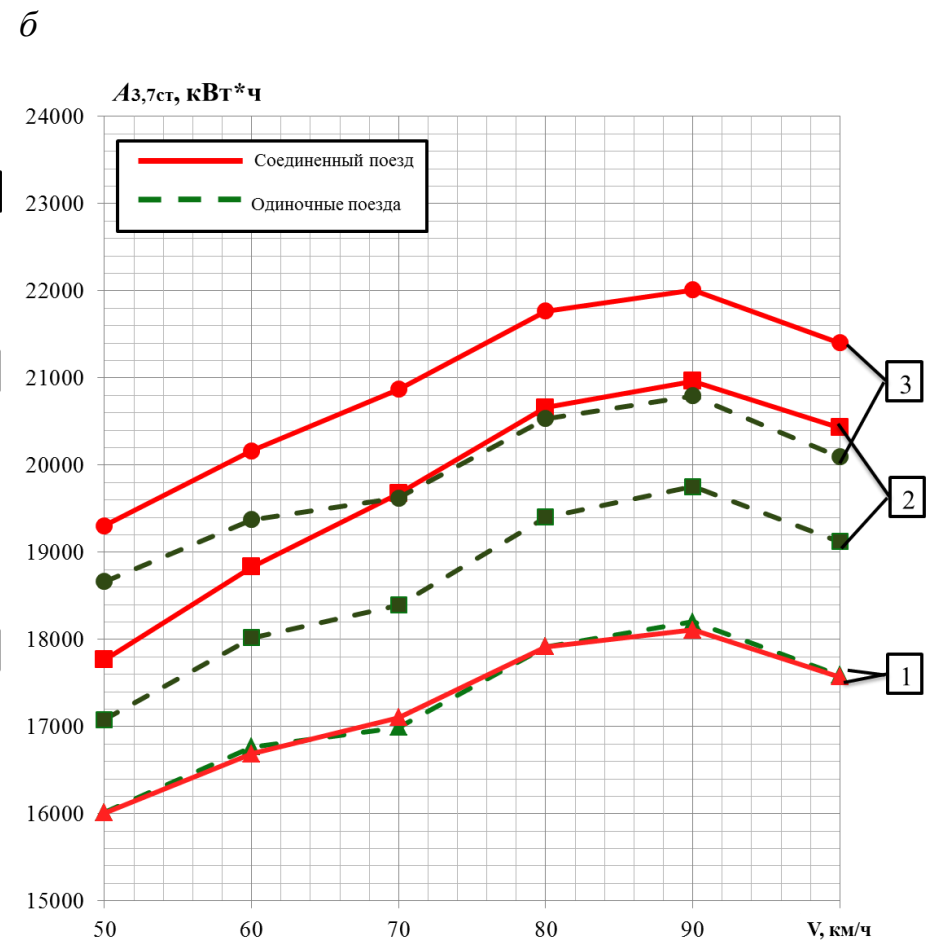
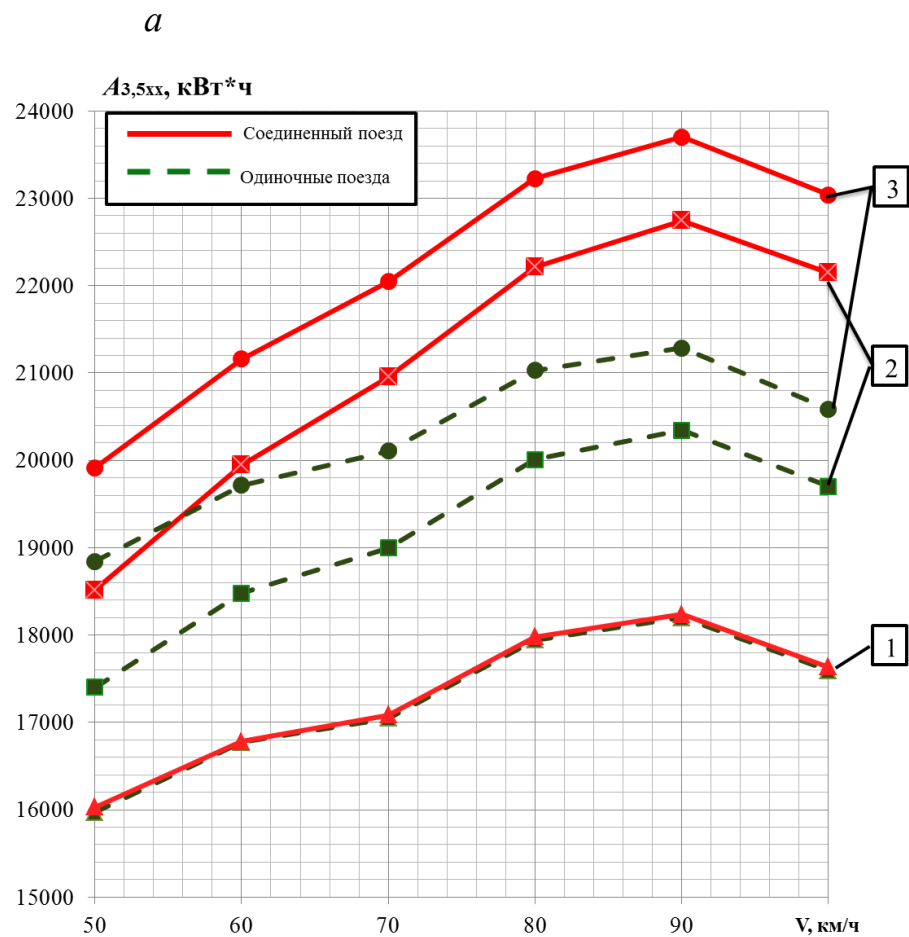


Рисунок 3.8 – Расход ЭЭ: по счетчикам ЭПС $A_{\text{эпс}}$ (1); с учетом потерь ЭЭ в тяговой сети $A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}}$ (2) и в трансформаторах $A_{\text{тп}} = A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}} + \Delta A_{\text{тп}}$ (3) на участке Подволошная – Вогулка при напряжении на тяговых подстанциях участка: *a* – естественные с $U_{\text{хх}} = 3500 \text{ В}$; *б* – стабилизированные $U_{\text{ст}} = 3700 \text{ В}$

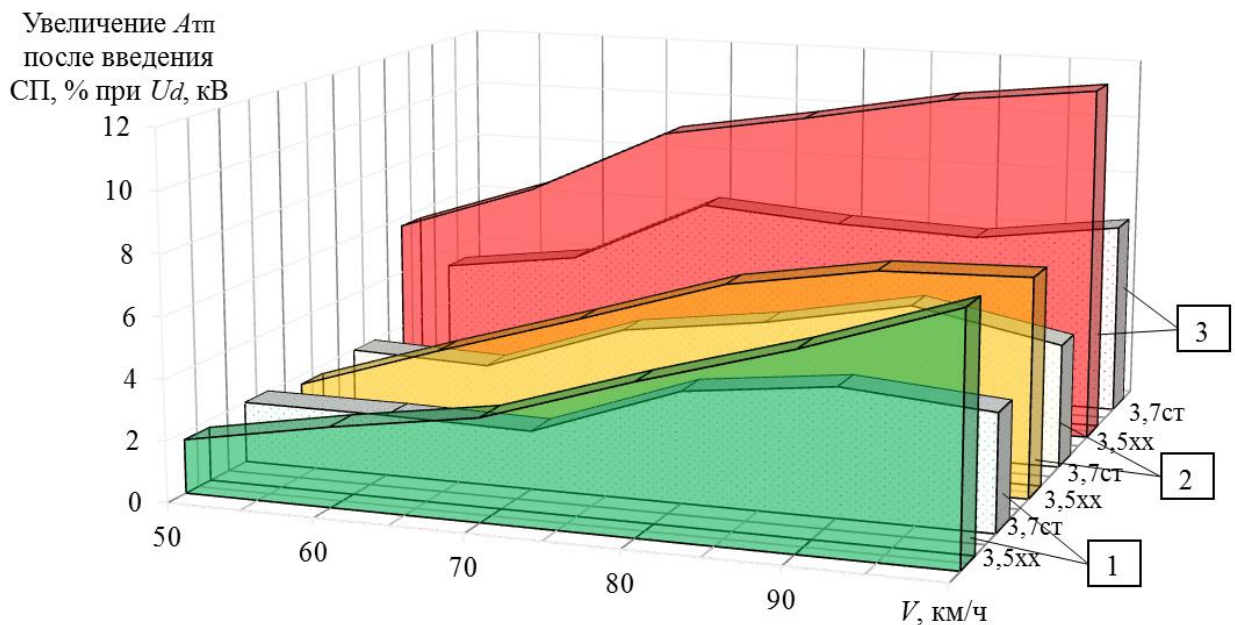
Из анализа результатов электрического расчета СТРЭ участков с различными профилями пути, с движением в нечетном направлении поездов с различными типами электровозов, но с одинаковыми массами грузовых поездов следует, что при движении поезда в соединенном состоянии (красная сплошная линия на рисунках 3.6, 3.7, 3.8) или одиночными поездами (пунктирная зеленая линия на рисунках 3.6, 3.7, 3.8) расход ЭЭ на тягу по счетчикам электроподвижного состава $A_{\text{элс}}$ одинаков (графики 3 на рисунках 3.6, 3.7, 3.8) при напряжении на тяговых подстанциях в режиме холостого хода 3500 В и стабилизации напряжения в пределах от 3500 В до 3700 В. Однако при движении поезда в соединенном состоянии суммарный ток двух электровозов соединенного поезда, одновременно воздействующий на контактную сеть практически в одной точке (месте), увеличивает потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах в большей степени, чем токи электровозов двух одиночных поездов, разделенных в пространстве по контактной сети участка через время межпоездного интервала. При этом величины суммарных токов двух электровозов соединенного поезда и особенно электровозов двух одиночных поездов различны и могут не совпадать, но потери электрической энергии в тяговой сети и в трансформаторах тяговых подстанций, определяемые квадратом величины тока, при движении поезда в соединенном состоянии больше, чем при движении одиночных поездов (графики 2 и 3 на рисунках 3.6, 3.7, 3.8).

Электрические расчеты СТРЭ на указанных участках показывают, что потери ЭЭ в тяговой сети и в трансформаторах при движении соединенного поезда превышают соответствующие потери ЭЭ при движении двух одиночных поездов, что отражено на графиках 2 и 3 рисунков 3.6, 3.7, 3.8. На рисунках по оси ординат показаны: $a - A_{3,5xx}$ – расход ЭЭ при работе тяговых подстанций с естественными внешними характеристиками с напряжением $U_{dxx} = 3500$ В; $b - A_{3,7ст}$ – расход ЭЭ при работе тяговых подстанций с повышенным стабилизированным напряжением на уровне 3700 В.

На рисунке 3.9 показано в процентном отношении увеличение расхода $A_{\text{тп}}$, с учетом расхода ЭЭ ЭПС, потерь ЭЭ в тяговой сети и в трансформаторах тяговых

подстанций при движении одного соединенного грузового поезда по сравнению с движением двух одиночных грузовых поездов на участках с различным профилем пути.

Так, в среднем на участках в зависимости от скорости движения от 50 км/ч до 100 км/ч происходит повышение суммарного расхода ЭЭ при напряжении на тяговых подстанциях $U_{dxx} = 3,5$ кВ (рисунок 3.9) на участке под цифрой 1 на 1,8 – 7,9 %, под цифрой 2 на 1,7 – 7,2 %, под цифрой 3 на 5,7 – 11,9 %; при стабилизации напряжения на уровне 3700 В – соответственно на участке под цифрой 1 на 2,0 – 3,9 %, под цифрой 2 на 2,0 – 4,1 %, под цифрой 3 на 3,4 – 6,5%.



Участки: Курган – Колчедан (1); Войновка – Богданович (2); Подволошная – Вогулка (3)

Рисунок 3.9 – Увеличение расхода ЭЭ на тяговой подстанции после введения СП на участках на тяговых подстанциях естественные характеристики, с напряжением холостого хода 3500 В (3,5xx) и стабилизированные характеристики 3700 В (3,7ст)

Сравнение по участкам результатов расчета показывает, что при введении движения соединенных поездов по сравнению с движением одиночных поездов происходит увеличение расхода ЭЭ на тягу по тяговым подстанциям $A_{тп}$ и что повышение расхода ЭЭ на тягу ТП при стабилизации напряжения на уровне $U_{dст} =$

3700 В по сравнению с естественными характеристиками с $U_{dxx} = 3500$ В происходит в меньшем объеме.

Из анализа результатов электрического расчета нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ (приложение А таблицы А.1, А.2, А.3) участков по уровню напряжения на токоприемнике электровоза можно сделать вывод:

1. На участке с тяжелым горным профилем протяженностью 114,3 км с 7-ю тяговыми подстанциями (шесть межподстанционных зон МПЗ):

а) двух ОП с межпоездным интервалом 10 минут с напряжением тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ В по уровню напряжения в контактной сети (более 2700 В) В при скорости:

1) 50 км/ч проходят все зоны;

2) от 60 км/ч до 100 км/ч не проходит одна МПЗ (при введении устройств регулирования напряжения $U_{ст} = 3500$ В проходят все шесть МПЗ).

б) одного СП с напряжением тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ по уровню напряжения в контактной сети (более 2700 В) В при скорости:

1) от 50 км/ч до 60 км/ч не проходят три МПЗ;

2) от 70 км/ч до 100 км/ч не проходят пять МПЗ;

3) от 50 км/ч до 100 км/ч при введении устройств регулирования напряжения $U_{ст} = 3700$ В проходят все шесть МПЗ.

2. На участке с легким горным профилем протяженностью 231,9 км с 13-ю тяговыми подстанциями (двенадцать МПЗ):

а) двух ОП с межпоездным интервалом 10 минут с напряжением тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ В по уровню напряжения в контактной сети (более 2700 В) В при скорости от 50 км/ч до 100 км/ч проходят все МПЗ.

б) одного СП с напряжением тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ В по уровню напряжения в контактной сети (более 2700 В) В при скорости:

1) от 50 км/ч до 60 км/ч проходят все двенадцать МПЗ;

2) 70 км/ч не проходят три МПЗ;

3) 80 км/ч не проходят четыре МПЗ;

4) от 90 км/ч до 100 км/ч не проходят шесть МПЗ;

5) от 70 км/ч до 100 км/ч при введении устройств регулирования напряжения $U_{ст} = 3700$ В проходят все двенадцать МПЗ.

3. На участке с горным профилем средней тяжести протяженностью 241,6 км с 13-ю тяговыми подстанциями (двенадцать МПЗ):

а) двух ОП с межпоездным интервалом 10 минут с напряжением тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ по уровню напряжения в контактной сети (более 2700 В) В при скорости от 50 км/ч до 100 км/ч проходят все МПЗ.

б) одного СП с напряжением тяговых подстанций $U_{xx} = 3500$ по уровню напряжения в контактной сети (более 2700 В) В при скорости:

1) от 50 км/ч до 70 км/ч проходят все двенадцать МПЗ;

2) 80 км/ч не проходят четыре МПЗ;

3) 90 км/ч не проходят шесть МПЗ;

4) 100 км/ч не проходят десять МПЗ;

5) от 80 км/ч до 100 км/ч при введении устройств регулирования напряжения $U_{ст} = 3700$ В проходят все двенадцать МПЗ.

На рисунке 3.10 и в таблицах 3.1-3.3 представлены результаты расчетов удельного расхода электрической энергии на участках при движении поездов по схемам СП и ОП в нечетном направлении и при выполненной одинаковой тонно-километровой работы на каждом отдельном участке (формула 1.10).

Тонно-километровая работа:

– На участке Войновка – Богданович

$$A_{уч} = 231,9 * 12000 = 278,28 * 10^4 \text{ Т·км.}$$

– На участке Курган – Колчедан

$$A_{уч} = 241,6 * 12000 = 289,9 * 10^4 \text{ Т·км.}$$

– На участке Подволошная – Вогулка

$$A_{\text{уч}} = 114,3 * 12000 = 137,16 * 10^4 \text{ т}\cdot\text{км.}$$

Таблица 3.1 – Удельный расход ЭЭ СТЭ и СТЭ участка Курган – Колчедан

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{ТП}}$	Удельный расход ЭЭ на тягу $a_{\text{ТП}}$	Увеличение $a_{\text{ТП}}$, % после введения СП при U_d , кВ	
					3,5хх	3,7ст
км/ч	тыс. т	кВ	кВт*ч	кВт*ч/10 ⁴ т*км		
50	ОП 6 – 6	3,5хх	32769	113,0	1,76	2,01
		3,7ст	32642	112,6		
	СП [6 + 6]	3,5хх	33345	115,0		
		3,7ст	33299	114,9		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	34033	117,4	2,61	2,00
		3,7ст	33929	117,0		
	СП [6 + 6]	3,5хх	34921	120,5		
		3,7ст	34608	119,4		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	35072	121,0	3,34	1,91
		3,7ст	34723	119,8		
	СП [6 + 6]	3,5хх	36245	125,0		
		3,7ст	35387	122,1		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	36734	126,7	4,90	3,64
		3,7ст	36393	125,5		
	СП [6 + 6]	3,5хх	38532	132,9		
		3,7ст	37717	130,1		
90	ОП 6 – 6	3,5хх	36895	127,3	6,30	4,20
		3,7ст	35902	123,8		
	СП [6 + 6]	3,5хх	39214	135,3		
		3,7ст	37411	129		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	40479	139,6	7,90	3,82
		3,7ст	39819	137,4		
	СП [6 + 6]	3,5хх	43684	150,7		
		3,7ст	41338	142,6		

Таблица 3.2 – Удельный расход ЭЭ СТЭ и СТРЭ участка Войновка – Богданович

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{тп}$	Удельный расход ЭЭ на тягу $a_{тп}$	Увеличение $a_{тп}$, % после введения СП при U_d , кВ	
					3,5хх	3,7ст
км/ч	тыс. т	кВ	кВт*ч	кВт*ч/10 ⁴ т*км		
50	ОП 6 – 6	3,5хх	30506	109,6	1,68	1,98
		3,7ст	30420	109,3		
	СП [6 + 6]	3,5хх	31019	111,5		
		3,7ст	31023	111,5		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	30398	109,2	3,24	1,81
		3,7ст	30383	109,2		
	СП [6 + 6]	3,5хх	31382	112,8		
		3,7ст	30934	111,2		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	29920	107,5	4,71	3,47
		3,7ст	29634	106,5		
	СП [6 + 6]	3,5хх	31329	112,6		
		3,7ст	30662	110,2		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	32083	115,3	6,24	4,12
		3,7ст	31782	114,2		
	СП [6 + 6]	3,5хх	34085	122,5		
		3,7ст	33091	118,9		
90	ОП 6 – 6	3,5хх	33677	121,0	7,04	5,06
		3,7ст	33040	118,7		
	СП [6 + 6]	3,5хх	36047	129,5		
		3,7ст	34712	124,7		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	35472	127,5	7,18	4,10
		3,7ст	34808	125,1		
	СП [6 + 6]	3,5хх	38020	136,6		
		3,7ст	36235	130,2		

Таблица 3.3 – Удельный расход ЭЭ СТЭ и СТЭ участка Подволошная – Вогулка

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{тп}$	Удельный расход ЭЭ на тягу $a_{тп}$	Увеличение $a_{тп}$, % после введения СП при U_d , кВ	
					3,5хх	3,7ст
км/ч	тыс. т	кВ	кВт*ч	кВт*ч/10 ⁴ т*км		
50	ОП 6 – 6	3,5хх	18842	137,4	5,70	3,45
		3,7ст	18665	136,1		
	СП [6 + 6]	3,5хх	19916	145,2		
		3,7ст	19305	140,8		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	19713	143,7	7,34	4,08
		3,7ст	19375	141,3		
	СП [6 + 6]	3,5хх	21160	154,3		
		3,7ст	20165	147		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	20107	146,6	9,64	6,37
		3,7ст	19621	143,1		
	СП [6 + 6]	3,5хх	22046	160,7		
		3,7ст	20871	152,2		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	21028	153,3	10,45	6,01
		3,7ст	20533	149,7		
	СП [6 + 6]	3,5хх	23225	169,3		
		3,7ст	21768	158,7		
90	ОП 6 – 6	3,5хх	21286	155,2	11,35	5,84
		3,7ст	20795	151,6		
	СП [6 + 6]	3,5хх	23702	172,8		
		3,7ст	22010	160,5		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	20588	150,1	11,90	6,55
		3,7ст	20094	146,5		
	СП [6 + 6]	3,5хх	23039	168,0		
		3,7ст	21403	156,1		

На рисунке 3.10 зеленая пунктирная линия соответствует результатам расчета при пропуске двух ОП, красная сплошная линия – при пропуске одного СП. Пара графиков под цифрой 1 соответствуют результатам расчета участка Курган –

Колчедан, под цифрой 2 – Войновка – Богданович, под цифрой 3 – Подволошная – Вогулка.

Полученные результаты электрических расчетов системы тягового электро-снабжения (таблицы 3.1, 3.2, 3.3) показывают, что на рассматриваемых участках удельные расходы ЭЭ тяговых подстанций увеличиваются при движении одного СП по сравнению с движением двух ОП.

При пропуске на электрифицированных участках движения соединенных грузовых поездов определяющими факторами повышения расхода электрической энергии на тягу тяговых подстанций и, соответственно, удельного расхода электрической энергии являются потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций.

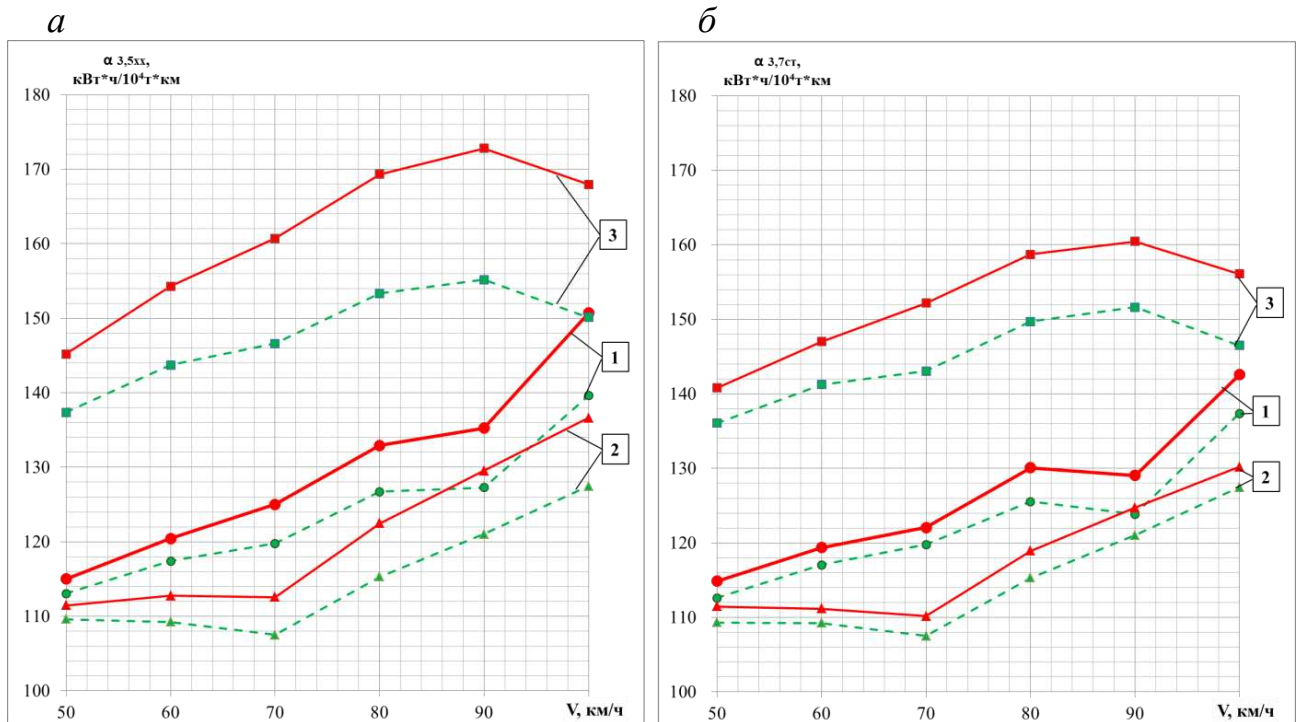


Рисунок 3.10 – Удельный расход электрической энергии на тяговых подстанциях: *а* – естественные характеристики с напряжением холостого хода 3500 В (3,5xx); *б* – стабилизированные характеристики 3700 В (3,7ст)

В соответствии с принятыми критериями (разд. 1.4) далее выполняется оценка технико-энергетической эффективности движения соединенных грузовых поездов и применения устройств регулирования напряжения.

1. Напряжение на токоприемнике электровоза (формула 1.12, 1.13). В таблице 3.4 сведено количество МПЗ $N_{МПЗ}$ с напряжением менее 2700 В на трех рассмотренных участках для всех скоростей движения.

Таблица 3.4 – Количество МПЗ $N_{МПЗ}$ с напряжением менее 2700 В

Поезд	Вогулка-Подволошная		Войновка-Богданович		Курган-Колчедан	
	СТЭ	СТРЭ	СТЭ	СТРЭ	СТЭ	СТРЭ
СП	5	0	6	0	10	0
ОП	1	0	0	0	0	0

При организации движения СП увеличивается количество МПЗ $N_{МПЗ}$ с напряжением на токоприемнике менее 2700 В (таблица 3.4), что нарушает требование ПТЭ [107].

При введении на участках устройств регулирования напряжения количество зон $N_{МПЗ}$ равно нулю, что подтверждает ее технико-энергетическую эффективность.

2. Потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах ТП при движении СП выше, чем при пропуске ОП на всех участках (рисунки 3.6-3.8).

3. Эффективность применения системы БАРН (формула 1.11), относительно существующей системы тягового электроснабжения в среднем для всех скоростей движения на участке:

3.1 Войновка – Богданович:

$$\Delta_{\text{барн ОП}} = \frac{115,03 - 113,83}{115,03} * 100\% = 1,043\% .$$

При пропуске двух ОП после введения системы БАРН удельный расход ЭЭ по сравнению с существующей системой снизился на 1,043 %.

$$\Delta_{\text{барн СП}} = \frac{120,91 - 117,78}{120,91} * 100\% = 2,589\% .$$

При пропуске одного СП после введения системы БАРН удельный расход ЭЭ по сравнению с существующей системой снизился на 2,589 %.

3.2 Вогулка – Подволошная:

$$\Delta_{\text{барн ОП}} = \frac{147,72 - 144,70}{147,72} * 100\% = 2,044\% ;$$

$$\Delta_{\text{барн СП}} = \frac{161,72 - 152,54}{161,72} * 100\% = 5,676\% .$$

3.3 Курган – Колчедан:

$$\Delta_{\text{барн ОП}} = \frac{124,17 - 122,69}{124,17} * 100\% = 1,191\% ;$$

$$\Delta_{\text{барн СП}} = \frac{129,90 - 126,34}{129,90} * 100\% = 2,740\% .$$

Таким образом, введение БАРН в системе СТЭ при движении СП более эффективнее, чем при движении ОП, хотя по сравнению с величинами удельного расхода ЭЭ в системе СТЭ без БАРН и в системе СТЭ с БАРН по рассмотренным участкам организация движения поездов с ОП является лучшим вариантом, чем с СП.

3.4 Экспериментальная проверка достоверности предложенной методики электрического расчета

С целью проверки достоверности предложенного дополнения к существующей методике проведения электрических расчетов системы тягового регулируемого электроснабжения необходимо сравнить полученные результаты электрических расчетов с реальными показаниями электросчетчиков АСКУЭ ОАО «Российские железные дороги». Для этого выбран участок Свердловской ж.д. Сабик – Подволошная (рисунок 3.11) с эксплуатируемой системой бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН.

Условия расчета:

1. График исполненного движения (ГИД) Урал в четном и нечетном направлениях (таблица 3.4).
2. Показания счетчиков часовых расходов электрической энергии на тягу по расчетной группе на выбранном участке Сабик – Подволошная.
3. Продолжительность расчета – 60 мин.

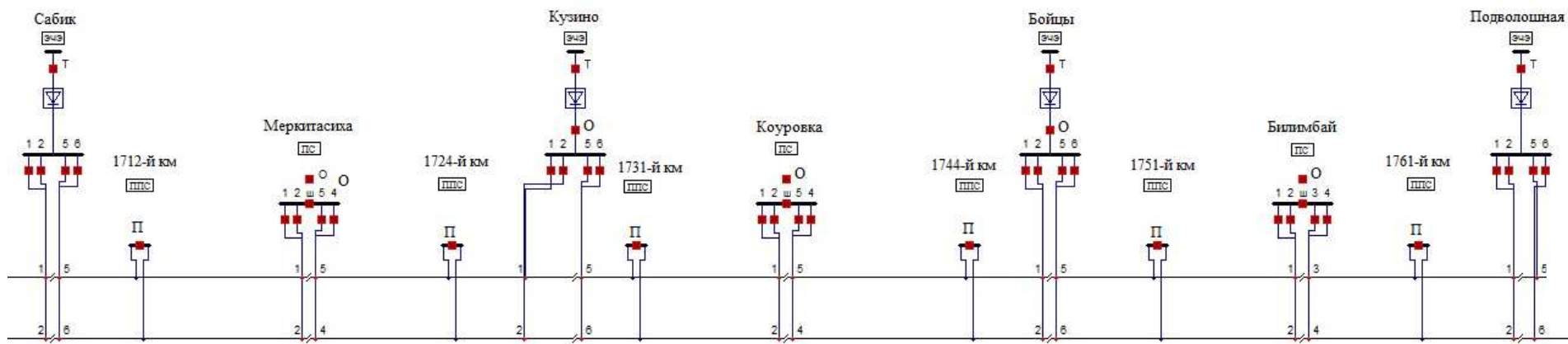


Рисунок 3.11 – Схема участка Сабик – Подволошная

Таблица 3.4 – Данные для моделирования графика движения поездов в ПК КОРТЭС

Отправление		Стоянка			Прибытие		Мас-са, т	Локо-мотив
станция	время, ч	станция	время прибытия	время от-правления	станция	время, ч		
Четное направление								
Сабик	6:59	-	-	-	Подволошная	8:04	2444	2ВЛ-11
	7:19	Кузино	7:41	7:54		8:37	2382	2ЭС10
	7:34	-	-	-		8:23	816	ЭП2К
	7:59	-	-	-		9:06	1474	2ЭС10
Нечетное направление								
Подволошная	6:24	-	-	-	Сабик	7:26	7953	3ЭС10
	6:56	-	-	-		8:02	7710	3ЭС10
	7:18	-	-	-		8:19	5631	1,5ВЛ-11
	7:29	-	-	-		8:30	5923	1,5ВЛ-11
	7:38	-	-	-		8:44	3228	2ЭС10

В таблице 3.5 представлены результаты проведения электрического расчета СТРЕ с применением разработанного во 2 главе дополнения к методике электрического расчета реального графика движения поездов (таблица 3.4). Стабилизация напряжения системой БАРН на уровне $U_{ст} = 3600$ В (на основании применяемого уровня напряжения указанных подстанций).

Таблица 3.5 – Результаты сравнения расхода электрической энергии на тягу по показаниям счетчиков ЭЭ и расчетных значений

Наименование подстанции	Показания счетчиков часовых расходов ЭЭ, кВт*ч	Результаты электрического расчета СТРЭ		
		расход ЭЭ на тягу, кВт*ч	потери ЭЭ в трансформаторах нагр/хх, кВт*ч	расход ЭЭ на тягу ТП, кВт*ч
Сабик	3797	2301	6/108	2415
Кузино	6098	6750	40/96	6886
Бойцы	4178	5259	27/96	5382
Подволошная	5439	3834	23/162	4019
Итого на МПЗ Сабик – Подволошная	19512	18145	96/462	18703

Достоверность предложенной методики электрического расчета СТРЭ подтверждается сходимостью результатов расчета и показаний счетчиков ЭЭ (рисунок 3.12) с допустимой погрешностью 4,15 %.

Предлагаемая в диссертационном исследовании методика электрического расчета может быть направлена на получение достоверных результатов электрического расчета системы тягового регулируемого электроснабжения при определении ряда эксплуатационно-технических задач.

Достоверность предлагаемого дополнения методики проведения электрического расчета СТРЭ подтверждается актом о внедрении.

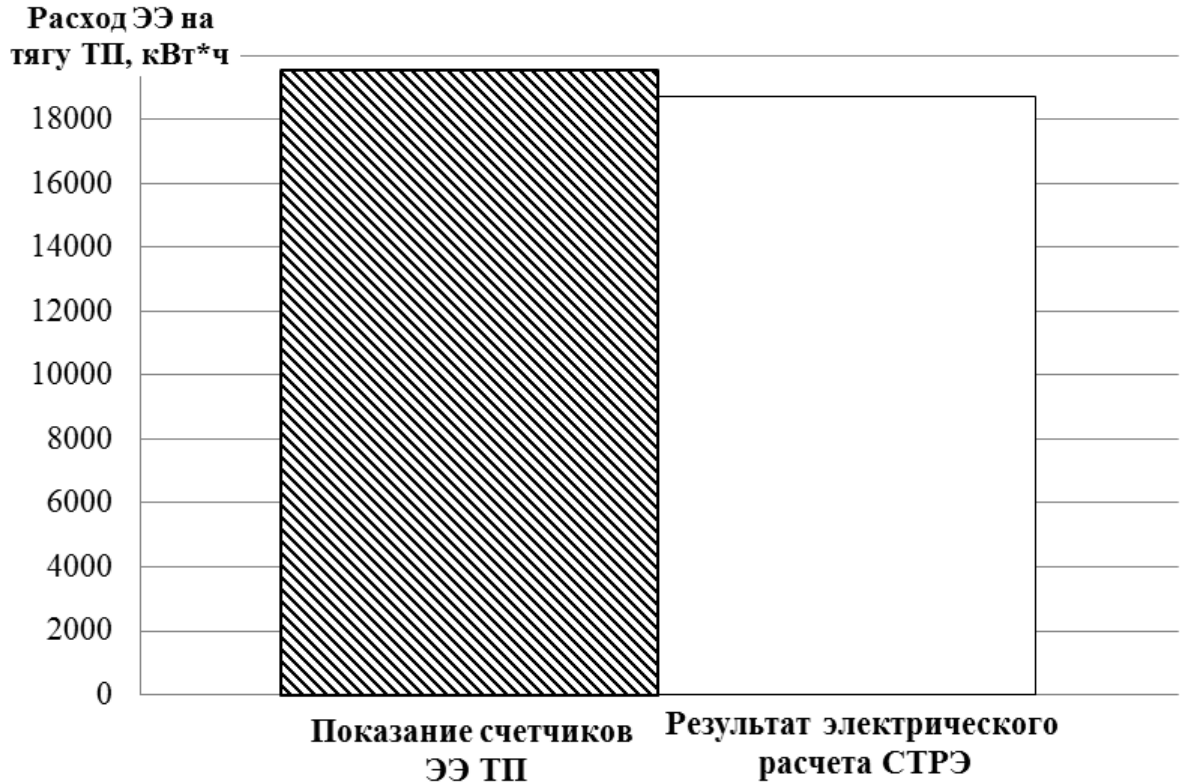


Рисунок 3.12 – Сравнение результатов электрического расчета СТРЕ и показания счетчиков ЭЭ

3.5 Экономическая эффективность СТРЕ при организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов

Определение экономической эффективности организации движения соединенных грузовых выполняется в соответствии с [118-120].

Расходы, связанные с пропуском грузовых поездов в зависимости от пробега определяются по следующей формуле

$$E = E_{\text{ваг-км}} + E_{\text{лок-км}} + E_{\text{лок-ч}} + E_{\text{бр-ч}} + E_{\text{т-км}} + E_{\text{э/т}} + E_{\text{ман-ч}} + E_{\text{го}}, \quad (3.15)$$

$E_{\text{лок-км}}$ – расходы, зависящие от линейного пробега локомотивов;

- $E_{\text{лок-ч}}$ – расходы, зависящие от времени работы поездных локомотивов;
- $E_{\text{бр-ч}}$ – расходы, зависящие от времени работы локомотивных бригад;
- $E_{\text{т-км}}$ – расходы, зависящие от объема перевозок;
- $E_{\text{э/т}}$ – расходы, зависящие от расхода электрической энергии на тягу поездов;
- $E_{\text{ман-ч}}$ – расходы, зависящие от времени работы маневровых локомотивов;
- $E_{\text{го}}$ – расходы, зависящие от нахождения грузовых отправок в пути следования.

При формировании и пропуске грузового соединенного поезда у ОАО «РЖД» появляются следующие дополнительные затраты:

$$E_{\text{соед}} = E_{\text{ф-р}} + E_{\text{под.пгс}} + E_{\text{зад}} + E_{\text{инфор}} + E_{\text{доп}}, \quad (3.16)$$

- где $E_{\text{ф-р}}$ – расходы, связанные с формированием и расформированием СП, руб.;
- $E_{\text{под.пгс}}$ – расходы, связанные с подготовкой одиночных грузовых поездов для соединения, руб.;
- $E_{\text{зад}}$ – расходы, связанные с задержкой поездов в связи с расформированием и формированием поездов, соединенных на станциях полигона, руб.;
- $E_{\text{ман}}$ – расходы, связанные с увеличением потребного числа маневровых локомотивов при занятии станционных путей расформированием и формированием СП, руб.;
- $E_{\text{инфр}}$ – расходы, связанные с подготовкой железнодорожной инфраструктуры к пропуску СП, руб.;
- $E_{\text{доп}}$ – расходы, связанные с пропуском грузовых СП, руб.

Дополнительно учитываются расходы, связанные с расформированием и формированием соединенных грузовых поездов определяются:

$$E_{\text{ф-р}} = N_{\text{одн}} \left(\sum Nt_{\text{ф}} \right) E_{\text{пч}}, \quad (3.17)$$

где $N_{\text{одн}}$ – число одиночных грузовых поездов в составе соединенного поезда;

$\sum Nt_{\text{ф}}, \sum Nt_{\text{р}}$ – сумма затрат поездо-часов на разъединение и соединение составов СП по железнодорожным станциям рассматриваемого полигона, определяемое как произведение числа разъединяемых m соединяемых поездов СП на норму времени;

$E_{\text{пч}}$ – расходная ставка на поездо-час простоя грузового поезда.

Также учитываются дополнительные расходы, связанные с подготовкой одинарных поездов для соединения по формуле

$$E_{\text{подг.пгс}} = N_{\text{одн}} * \sum Nt_{\text{подг.пгс}} * E_{\text{пч}} + t_{\text{м.подг.пгс}} * e_{\text{ман-ч}}, \quad (3.18)$$

где $\sum t_{\text{подг.пгс}}$ – суммарные затраты на подготовку одного одиночного грузового поезда для соединения, поездо-ч;

$e_{\text{ман-ч}}$ – расходная ставка на лок-час работы маневрового локомотива, руб./лок-ч;

$t_{\text{м.подг.пгс}}$ – время работы маневрового локомотива на подготовку одиночных грузовых поездов для соединения, ч.

В таблице 3.6 представлены исходные данные для определения экономической эффективности вождения СП [6 + 6] по сравнению с организацией движения ОП 6 – 6 трех участков пути (Подволошная – Вогулка, Войновка – Богданович и Курган – Колчедан). Для расчета взяты результаты технико-энергетического анализа работы системы тягового электроснабжения при движении СП или ОП. В соответствии с процессами работы участка и станций время на соединение поездов – 33 минуты, время на разъединение поездов – 14 минут, время переформиро-

Окончание таблицы 3.6

1	2	3	4	5	6	7
Расходная ставка на локомотиво-час поездных электровозов парка ОАО «РЖД», руб./лок-ч	341,44	341,44	500,91	500,91	500,91	500,91
Время вспомогательной работы локомотивных бригад, ч	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Расходная ставка на бригадо-час электровозной бригады, руб./бр-ч	1202,34	1202,34	1271,51	1271,51	1271,51	1271,51
Расходная ставка, руб./1000 т-км бр	6,08	6,08	12,34	12,34	12,34	12,34
Стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	3,49	3,49	3,72	3,72	3,72	3,72
Удельный расход ЭЭ на тягу, кВт·ч/10 ⁴ т·км	123,8	129	118,7	124,7	151,6	160,5
Время, связанное с подготовкой одинарных грузовых поездов для соединения, мин	0	34	0	34	0	34
Время расформирования СП, мин	0	14	0	14	0	14
Время формирования СП, мин	0	33	0	33	0	33
Расходная ставка на локомотиво-час работы маневрового локомотива, руб./лок-ч	0	995,54	0	995,54	0	995,54
Укрупненная расходная ставка на поездо-час простоя грузового поезда соответствующего вида тяги, руб./поездо-ч	0	1959,18	0	2094,81	0	2094,81

Результаты расчета экономической эффективности организации движения одного соединенных грузовых поездов, по сравнению с пропуском двух одиночных грузовых поездов массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 мин на рассматриваемых участках с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН на уровне 3700 В представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчета экономической эффективности вождения СП и ОП

Затраты, связанные с, руб.	Курган – Колчедан		Войновка – Богданович		Подволошная – Вогулка	
	ОП 6 – 6	ОП 6 – 6	ОП 6 – 6	СП [6 + 6]	СП [6 + 6]	ОП 6 – 6
временем работы поездных локомотивов	3621	3621	5099	5099	2513	2513
временем работы локомотивных бригад	14494	14494	14712	14712	7251	7251
пробегом грузовых вагонов	3088	3088	3952	3952	1948	1948
линейным пробегом локомотивов	16192	16192	14883	14883	7336	7336
тонно-километровой брутто работой вагонов и локомотивов	17627	17627	34340	34340	16926	16926
расходом электроэнергии на тягу поездов	125263	130525	122878	129090	77352	81893
подготовкой одинарных грузовых поездов для соединения	0	2785	0	2938	0	2938
формированием и расформированием соединенных поездов	0	6139	0	6564	0	6564
ИТОГО расход на движение	180285	194470	195864	211577	113325	127368

По результатам таблицы 3.7 построена гистограмма (рисунок 3.13) затрат на движение одного соединенного грузового поезда в сравнении с движением двух одиночных грузовых поездов с временем межпоездного интервала 10 минут. Расходы на движение по участку Войновка – Богданович – увеличиваются на 7,4 %, по участку Курган – Колчедан на 7,3 %, по участку Подволошная – Вогулка – на 11,0 %.

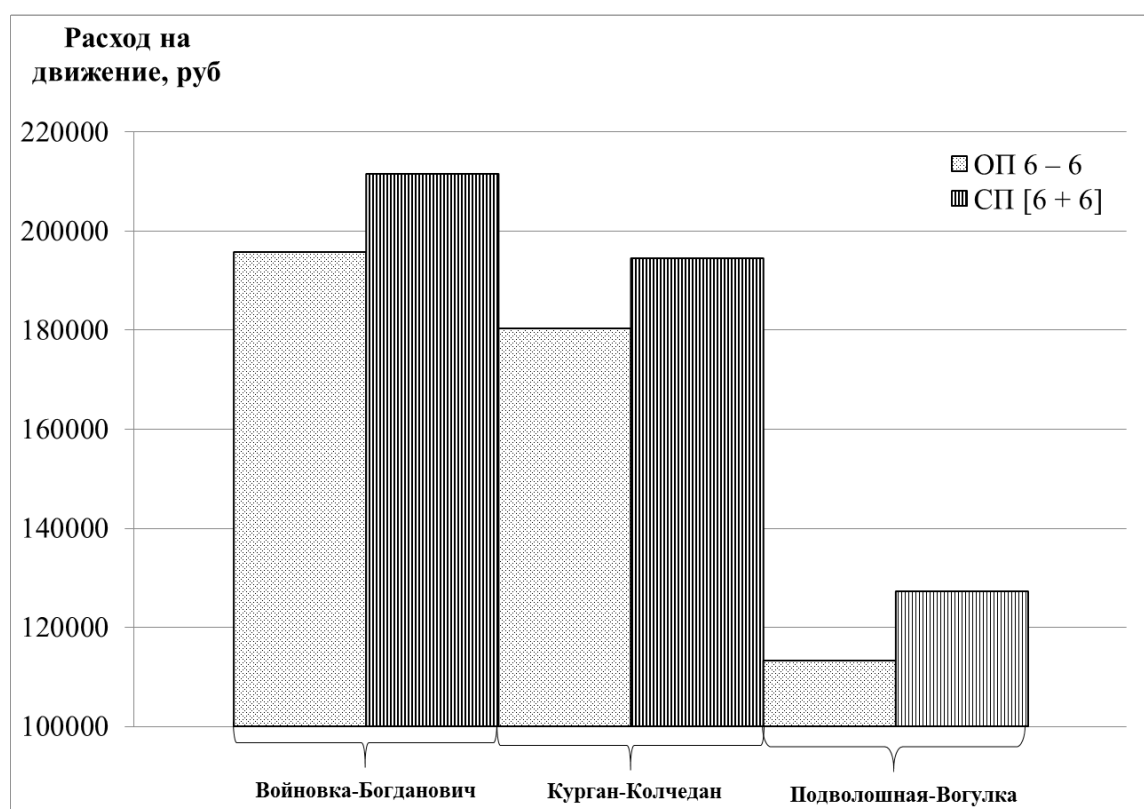


Рисунок 3.13 – Расход на движение на различных участках

Выводы по третьей главе

1. Пропуск одного СП вызывает большее увеличение потерь ЭЭ в тяговой сети, по сравнению с пропуском двух ОП. Выведены расчетные формулы потерь ЭЭ в тяговой сети для двух ОП и одного СП.

2. По результатам электрических расчетов определено:

1) расход ЭЭ по счетчикам ЭПС при пропуске одного СП и двух ОП одинаков (таблицы А.1, А.2, А.3);

2) расход ЭЭ на ТП с учетом расхода ЭЭ по счетчикам ЭПС, потерь ЭЭ в тяговой сети и в трансформаторах ТП увеличивается при пропуске СП (таблицы А.1, А.2, А.3, рисунки 3.6-3.8);

3) количество МПЗ с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В с нерегулируемой СТЭ при пропуске СП больше, чем при ОП.

3. Достоверность предлагаемой методики электрического расчета регулируемой СТРЭ подтверждается сходимостью результатов расчета с реальными показаниями приборов с погрешность не более 5 % (таблица 3.5).

4. Затраты на движение СП в сравнении с ОП увеличиваются на всех рассматриваемых участках дороги (рисунок 3.13).

ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Повышение энергетической эффективности системы тягового электро-снабжения в условиях роста грузооборота является актуальной задачей. В данной главе определяется энергетическая эффективность существующей системы СТЭ и системы с применением устройств регулирования напряжения СТРЭ в различных условиях: увеличения скорости движения, снижении времени межпоездного интервала.

В первом варианте рассматривается влияние повышения скорости движения от 50 км/ч до 100 км/ч на расход ЭЭ на тягу, в том числе расход ЭЭ по счетчикам ЭПС и потери ЭЭ в тяговой сети. При анализе используется участок железной дороги с реальным горным профилем пути Войновка – Богданович при пропуске двух одиночных поездов массой каждого по 6000 т с естественной внешней характеристикой на тяговых подстанциях с напряжением холостого хода 3500 В и с введением стабилизации напряжения на уровнях 3500 В, 3600 В и 3700 В.

Во втором варианте рассматривается уменьшение времени МПИ на примере того же участка Войновка – Богданович при различных скоростях движения поездов с напряжением холостого хода 3500 В на тяговых подстанциях и с введением стабилизации напряжения на уровне 3700 В.

Также в главе рассматривается вариант повышения энергетической эффективности системы с применением буферной системы тягового электро-снабжения БСТЭ на одной межподстанционной зоне реального участка Шаля – Кунгур Свердловской железной дороги. Моделирование графика движения осуществляется с перспективным пакетом грузовых поездов, состоящим из восьми поездов с массой состава 7100 т (8x7100 т), и существующим пакетом

6300 т – 9000 т – 6300 т с межпоездным интервалом внутри перспективного и существующего пакетов 8 минут.

4.1 Исследование энергетической эффективности СТЭ в условиях увеличения скорости движения поездов

Условия расчета:

1. Участок Войновка – Богданович Свердловская железная дорога.
2. Отсутствие движения в четном направлении и при движении в нечетном направлении двух грузовых поездов массой по 6000 т с межпоездным интервалом 10 минут и временем независимого электрического влияния поездов друг на друга (сокращенно обозначим ∞ минут).
3. Продолжительность расчета – от момента отправки первого поезда со станции отправления до момента прихода последнего вагона второго поезда на станцию прибытия.
4. Локомотив 2ЭС6.
5. Увеличение скорости движения поездов от 50 км/ч до 100 км/ч с интервалом 10 км/ч.
6. Естественная внешняя характеристика тяговых подстанций с напряжением холостого хода 3500 В.
7. Стабилизированная внешняя характеристика системой БАРН на уровнях 3500 В, 3600 В и 3700 В.

Электрические расчеты выполняются в программном комплексе КОРТЭС с применением разработанного во второй главе дополнения к методике, заключающегося в обеспечении равенства расхода электрической энергии по счетчикам ЭПС нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ.

Методика проведения оценки влияния повышения скорости движения на расход ЭЭ на тягу представлена на рисунке 4.1.

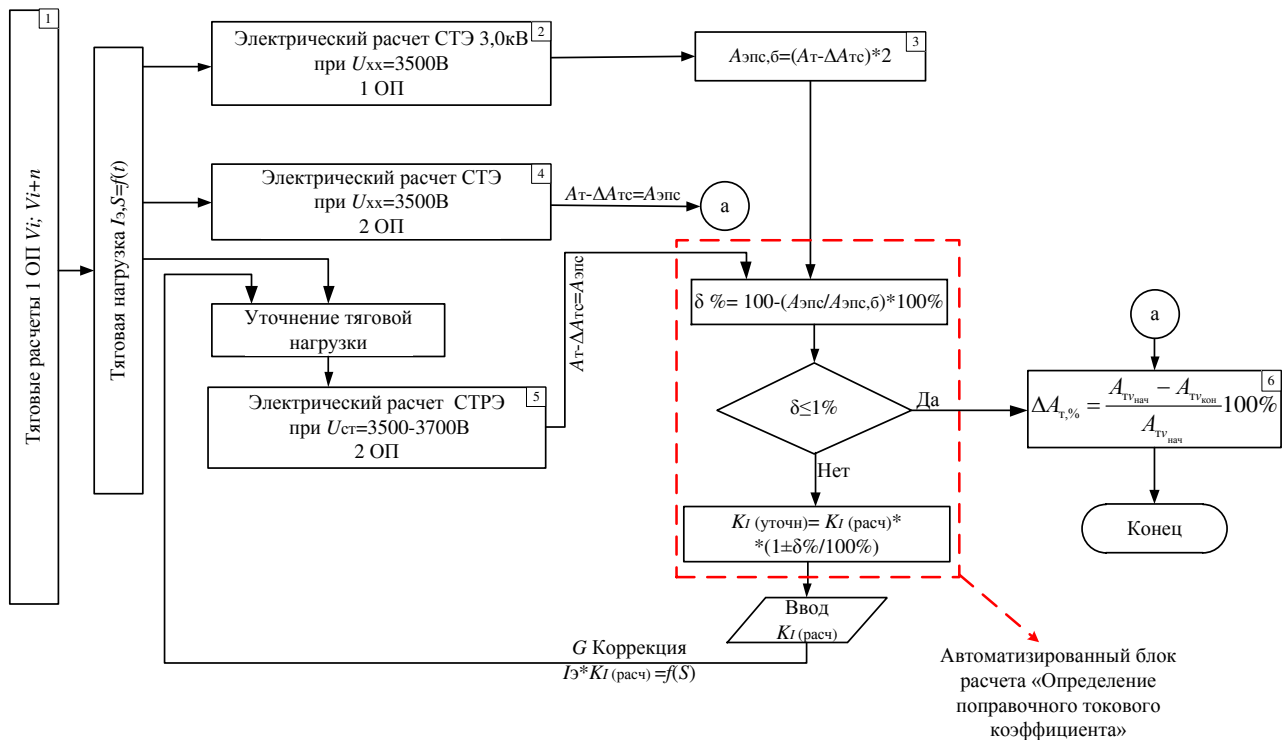


Рисунок 4.1 – Схема алгоритма методики проведения оценки энергетической эффективности СТЭ в условиях повышения скорости движения

Описание методики и ее практическое использование рассмотрено на примере на участка Войновка – Богданович Свердловской железной дороги.

Методика оценки представлена блоками и заключается в следующем:

1. На рассматриваемом участке для каждой скорости движения в диапазоне 50 км/ч – 100 км/ч с шагом 10 км/ч при напряжении на токоприемнике электровоза 3000 В выполняются тяговые расчеты с одним одиночным поездом ОП массой 6000 т (локомотив 2ЭС6).

2. Для каждой скорости движения выполняются электрические расчеты нерегулируемой СТЭ участка при напряжении на шинах тяговых подстанциях 3500 В только для одного ОП с массой состава 6000 т (обозначим ОП 6). Снижения скорости от влияния напряжения соседних грузовых поездов (в силу их отсутствия) не происходит, что не влияет на расход ЭЭ ЭПС $A_{эпс оп}$.

3. Полученный расход ЭЭ $A_{эпс оп}$ ОП 6 удваивается (т. е. берется расход ЭЭ двух поездов ОП 6 со временем межпоездного интервала, равного ∞ и при-

нимается за базовый расход ЭЭ двух ЭПС, не влияющих по напряжению друг на друга $A_{\text{эпс, б}} = 2 A_{\text{эпс оп}}$.

4. Далее проводятся для каждой скорости движения электрические расчеты нерегулируемой СТЭ при напряжении на шинах тяговых подстанциях 3500 В для двух ОП с межпоездным интервалом 10 минут. За счет взаимного влияния уменьшается напряжение электровозах, что ведет к снижению скорости движения поездов, соответственно снижается расход ЭЭ $A_{\text{эпс}}$ по сравнению с базовым $A_{\text{эпс, б}}$.

5. После этого проводятся электрические расчеты для двух ОП также с межпоездным интервалом 10 минут и для каждой скорости движения, но для регулируемой СТЭ при стабилизации напряжения на уровне 3500 В, 3600 В и 3700 В. Полученный в результате электрического расчета расход ЭЭ ЭПС $A_{\text{эпс}}$ сравнивается с $A_{\text{эпс, б}}$ и при расхождении результата не более 1 % расчет является завершенным. Если разница составляет более одного 1 %, то происходит итерационный цикл уточнения $A_{\text{эпс}}$ с применением поправочных токовых коэффициентов $K_{\text{Ист}} < 1$.

Результаты электрических расчетов представлены в таблице 4.1, где 2ОП б соответствует двум одиночным поездам массой по 6000 т с временем межпоездного интервала, равным ∞ , и с удвоенным значением расхода и потерь ЭЭ для одного поезда ОПб.

Таблица 4.1 – Результаты электрического расчета нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ при различных скоростях движения

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент KI	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{тр}$
км/ч	тыс.т	кВ	мин	ст	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч
50	2ОП 6	3,5 хх	∞	1	25882	982	24900	32/4608	30522
	ОП 6-6	3,5 хх	10	1	25704	1119	24585	48/4754	30506
		3,5 ст	10	0,99	25878	1012	24866	75/5211	31164
		3,6 ст	10	0,96	25804	952	24852	73/5211	31088
		3,7 ст	10	0,93	25693	893	24800	70/5211	30974
60	2ОП 6	3,5 хх	∞	1	26720	1464	25256	48/3690	30458
	ОП 6-6	3,5 хх	10	1	26495	1582	24913	68/3835	30398
		3,5 ст	10	0,98	26906	1406	25500	103/4204	31213
		3,6 ст	10	0,95	26491	1320	25171	102/4204	30797
		3,7 ст	10	0,92	26371	1238	25133	98/4204	30673
70	2ОП 6	3,5 хх	∞	1	27468	1628	25840	54/3179	30701
	ОП 6-6	3,5 хх	10	1	27280	1712	25568	75/3325	30680
		3,5 ст	10	0,98	27287	1522	25765	115/3644	31046
		3,6 ст	10	0,95	27191	1420	25771	111/3644	30946
		3,7 ст	10	0,92	27032	1342	25690	107/3644	30783
80	2ОП 6	3,5 хх	∞	1	29120	2134	26986	68/2785	31973
	ОП 6-6	3,5 хх	10	1	29061	2209	26852	91/2931	32083
		3,5 ст	10	0,97	28986	1937	27049	136/3213	32335
		3,6 ст	10	0,94	28895	1819	27076	131/3213	32239
		3,7 ст	10	0,90	28446	1667	26779	123/3213	31782

Окончание таблицы 4.1

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент K_I	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{эпс}}$	Потери ЭЭ в транс-форматорах $\Delta A_{\text{тр}} \text{ нагр/хх}$	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{ТП}} = A_T + \Delta A_{\text{тр}}$
км/ч	тыс.т	кВ	мин	ст	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч
90	2ОП 6	3,5 хх	∞	1	31214	2396	28818	78/2494	33786
	ОП 6-6	3,5 хх	10	1	30933	2457	28476	104/2640	33677
		3,5 ст	10	0,97	30924	2159	28765	154/2893	33971
		3,6 ст	10	0,94	30829	2027	28802	148/2893	33870
		3,7 ст	10	0,91	30683	1899	28784	142/2893	33718
100	2ОП 6	3,5 хх	∞	1	33298	2622	30676	82/2275	35655
	ОП 6-6	3,5 хх	10	1	32935	2675	30260	116/2421	35472
		3,5 ст	10	0,97	32927	2358	30569	168/2653	35748
		3,6 ст	10	0,94	32878	2214	30664	162/2653	35693
		3,7 ст	10	0,91	32723	2075	30648	155/2653	35511

6. Для конкретного участка по результатам расчета определяется увеличение в процентном отношении расход ЭЭ на тягу A_T , включающий расход ЭЭ по счетчикам ЭПС $A_{\text{эпс}}$ и потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$, при увеличении скорости движения от $V_{\text{нач}}$ до $V_{\text{кон}}$, по формуле

$$\Delta A_{T,\%} = \frac{A_{T_{\text{нач}}} - A_{T_{\text{кон}}}}{A_{T_{\text{нач}}}} 100\%, \quad (4.1)$$

где $A_{T_{\text{нач}}}$ – расход ЭЭ на тягу при $V_{\text{нач}}$ -скорости движения;

$A_{T_{\text{кон}}}$ – расход ЭЭ на тягу при $V_{\text{кон}}$ -скорости движения с шагом 10 км/ч до 100 км/ч.

На основании результатов таблицы 4.1 проведен анализ увеличения расхода электрической энергии на тягу в процентном отношении при повышении скорости движения от $V_{нач}$ до $V_{кон}$ с оценкой эффективности применения устройств регулирования напряжения при $U_{дст} = 3500-3700$ В (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Увеличение расхода электрической энергии на тягу A_T с повышением скорости движения с $V_{нач}$ до $V_{кон}$

$V_{кон},$ км/ч	$U_d,$ кВ	Увеличение расхода ЭЭ на тягу $\Delta A_{T,\%} = \frac{A_{Tв,нач} - A_{Tв,кон}}{A_{Tв,нач}} \cdot 100\%$				
		Начальная скорость $V_{нач},$ км/ч				
		50	60	70	80	90
60	3,5 хх	3,08	-	-	-	-
	3,5 ст	4,68	-	-	-	-
	3,6 ст	3,06	-	-	-	-
	3,7 ст	2,59	-	-	-	-
70	3,5 хх	6,13	2,96	-	-	-
	3,5 ст	6,16	2,99	-	-	-
	3,6 ст	5,79	2,63	-	-	-
	3,7 ст	5,17	2,03	-	-	-
80	3,5 хх	13,06	9,68	6,53	-	-
	3,5 ст	12,77	9,40	6,25	-	-
	3,6 ст	12,41	9,06	5,92	-	-
	3,7 ст	10,67	7,36	4,27	-	-
90	3,5 хх	20,34	16,75	13,39	6,44	-
	3,5 ст	20,31	16,72	13,36	6,41	-
	3,6 ст	19,94	16,36	13,01	6,08	-
	3,7 ст	19,37	15,81	12,47	5,58	-
100	3,5 хх	28,13	24,31	20,73	13,33	6,47
	3,5 ст	28,10	24,28	20,70	13,30	6,45
	3,6 ст	27,91	24,09	20,52	13,13	6,29
	3,7 ст	27,31	23,51	19,95	12,60	5,79

Из анализа результатов таблицы 4.2 следует, что при увеличении скорости движения увеличивается расход электрической энергии на тягу, но при введении регулируемой СТРЭ с $U_{дст} = 3700$ В увеличение расхода ЭЭ оказывается ниже в сравнении с нерегулируемой СТЭ. Что подтверждает энергетическую эффективность системы БАРН. При малых начальных скоростях движения 50 км/ч, при увеличении скорости соответственно до 60 км/ч и 70 км/ч при введении стабилизации напряжения на уровне $U_{дст} = 3500$ В, по сравнению с режимом без регулирования напряжения с $U_{дхх} = 3500$ В, происходит увеличение расхода ЭЭ на тягу. Это связано с дополнительными потерями в регулирующем устройстве системы БАРН, но при более высоких скоростях расход ЭЭ снижается.

7. Для наглядности по результатам таблицы 4.2 построены гистограммы зависимости увеличения расхода ЭЭ на тягу при увеличении скорости движения при различном напряжении на шинах ТП (рисунки 4.2 – 4.6).

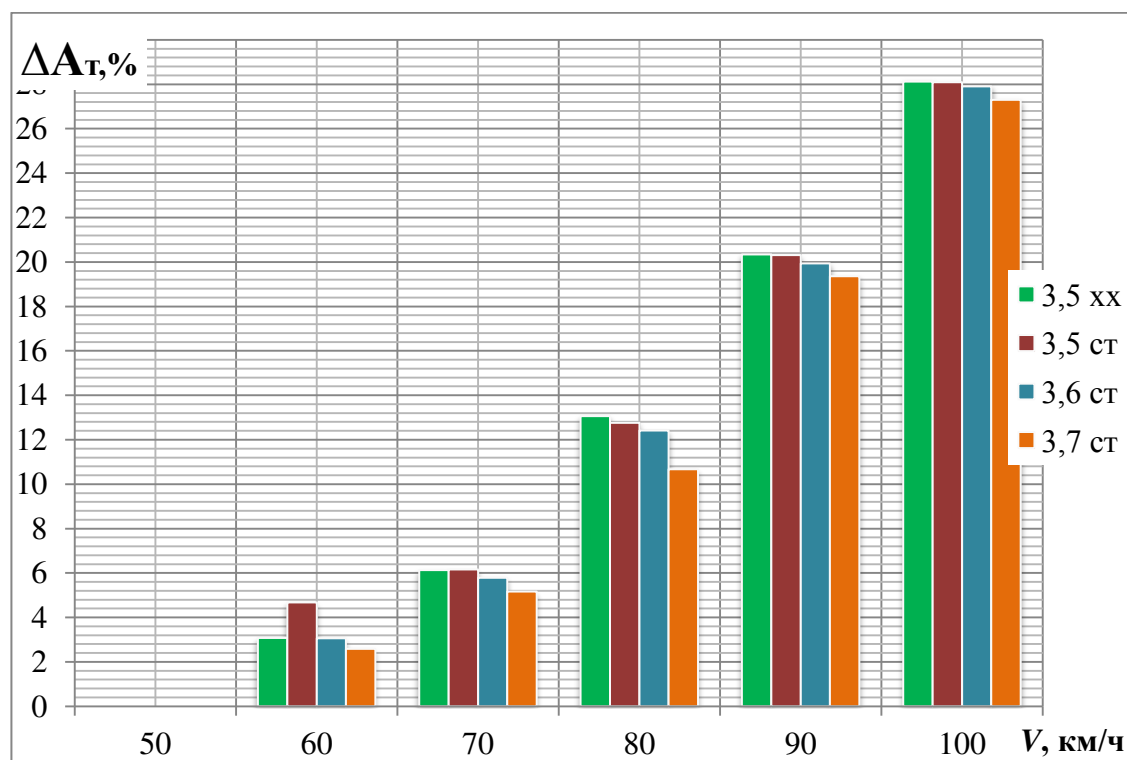


Рисунок 4.2 – Увеличение расхода ЭЭ на тягу при увеличении скорости движения от 50 км/ч до 100 км/ч

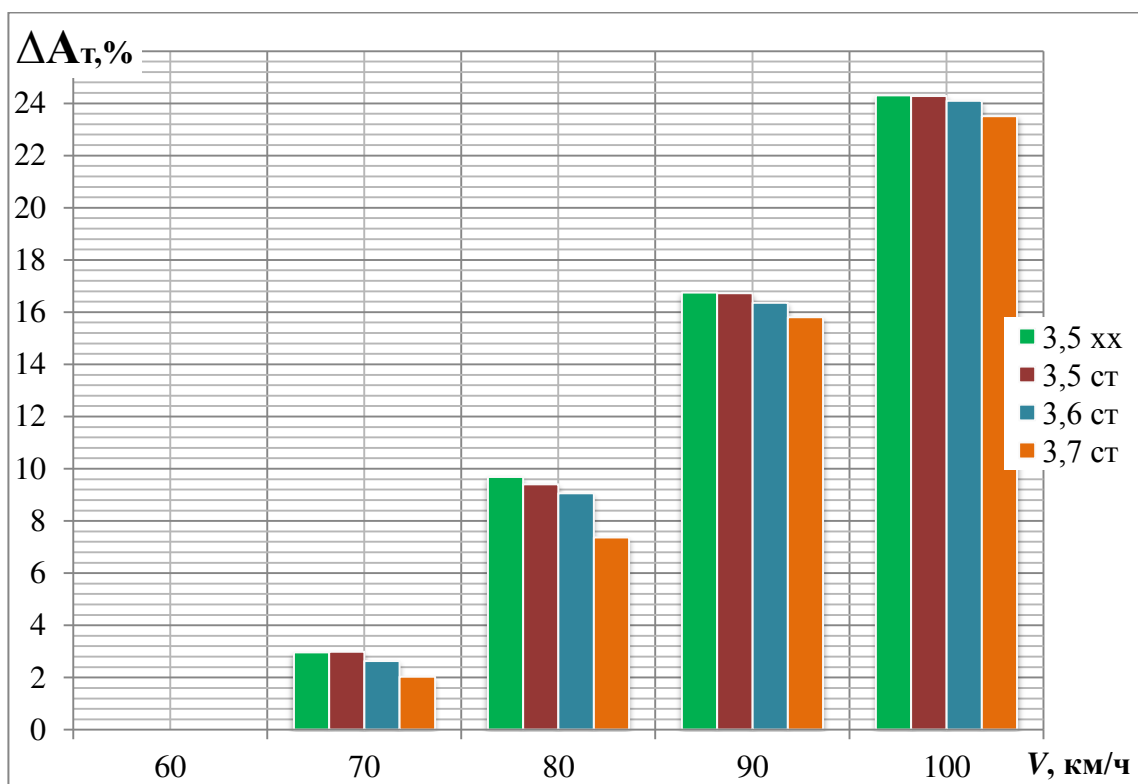


Рисунок 4.3 – Увеличение расхода ЭЭ на тягу при увеличении скорости движения от 60 км/ч до 100 км/ч

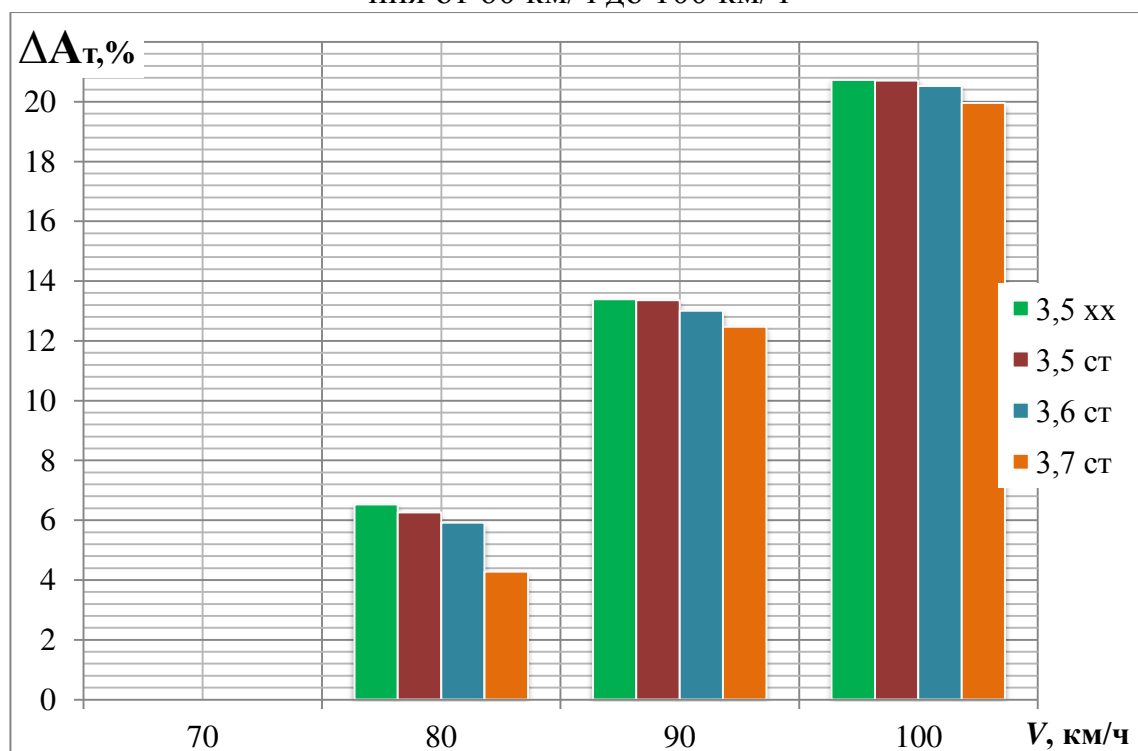


Рисунок 4.4 – Увеличение расхода ЭЭ на тягу при увеличении скорости движения от 70 км/ч до 100 км/ч

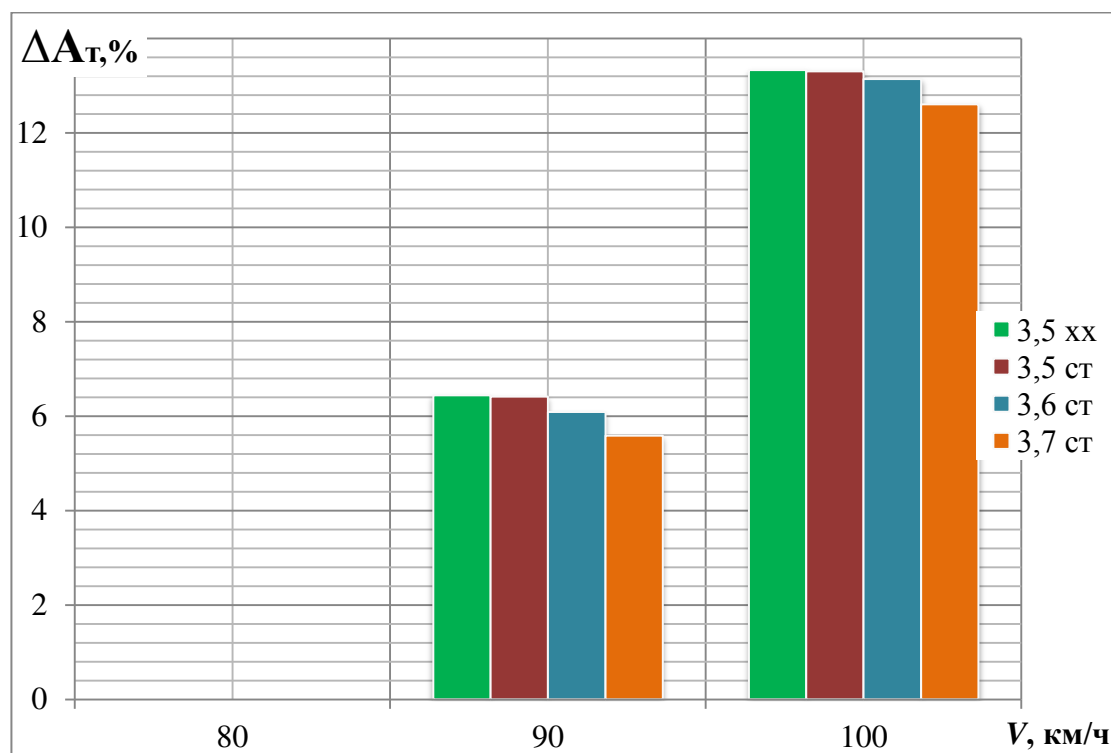


Рисунок 4.5 – Увеличение расхода ЭЭ на тягу при увеличении скорости движения от 80 км/ч до 100 км/ч

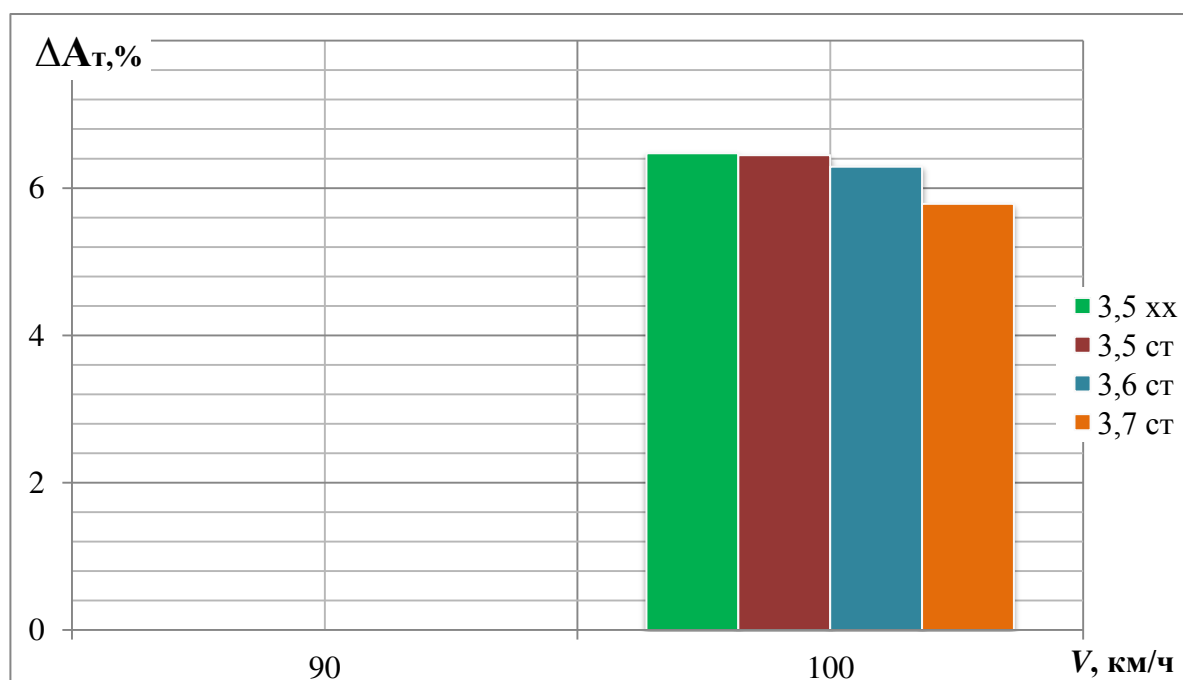


Рисунок 4.6 – Увеличение расхода ЭЭ на тягу при увеличении скорости движения от 90 км/ч до 100 км/ч

При повышении скорости движения поездов для конкретного участка как с нерегулируемой СТЭ так и с регулируемой СТРЭ происходит увеличение расхода электрической энергии на тягу (с учетом расхода электрической энергии по счетчикам ЭПС и потерь электрической энергии в тяговой сети).

Однако повышение расхода электрической энергии на тягу при регулируемой СТРЭ происходит в меньшей степени, чем при нерегулируемой СТЭ. Наилучший технико-энергетический эффект достигается при регулируемой СТРЭ со стабилизацией напряжения на уровне 3700 В.

Данные выводы справедливы для участков железных дорог с различным по степени сложности профилем пути.

4.2 Исследование энергетической эффективности СТЭ в условиях снижения времени межпоездного интервала

При снижении времени межпоездного интервала МПИ возрастает токовая нагрузка на СТЭ, снижается напряжение на токоприемнике электровоза.

Для исследования изменения энергетической эффективности СТЭ на основе устройств регулирования напряжения в условиях изменения времени МПИ проведены электрические расчеты при движении двух одиночных поездов массой по 6000 т.

Электрические расчеты выполняются для режимов нерегулируемой СТЭ (режим I) и регулируемой СТРЭ (режим II). Энергетическая эффективность определяется по наименьшему времени межпоездного интервала рассматриваемых режимов, с учетом следующих критериев:

1. Напряжение на токоприемнике электровоза должно быть не ниже 2700 В [107].

2. Удельный расход ЭЭ на тягу тяговых подстанций, с учетом расхода ЭЭ ЭПС, потерь ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций, должен быть наименьший.

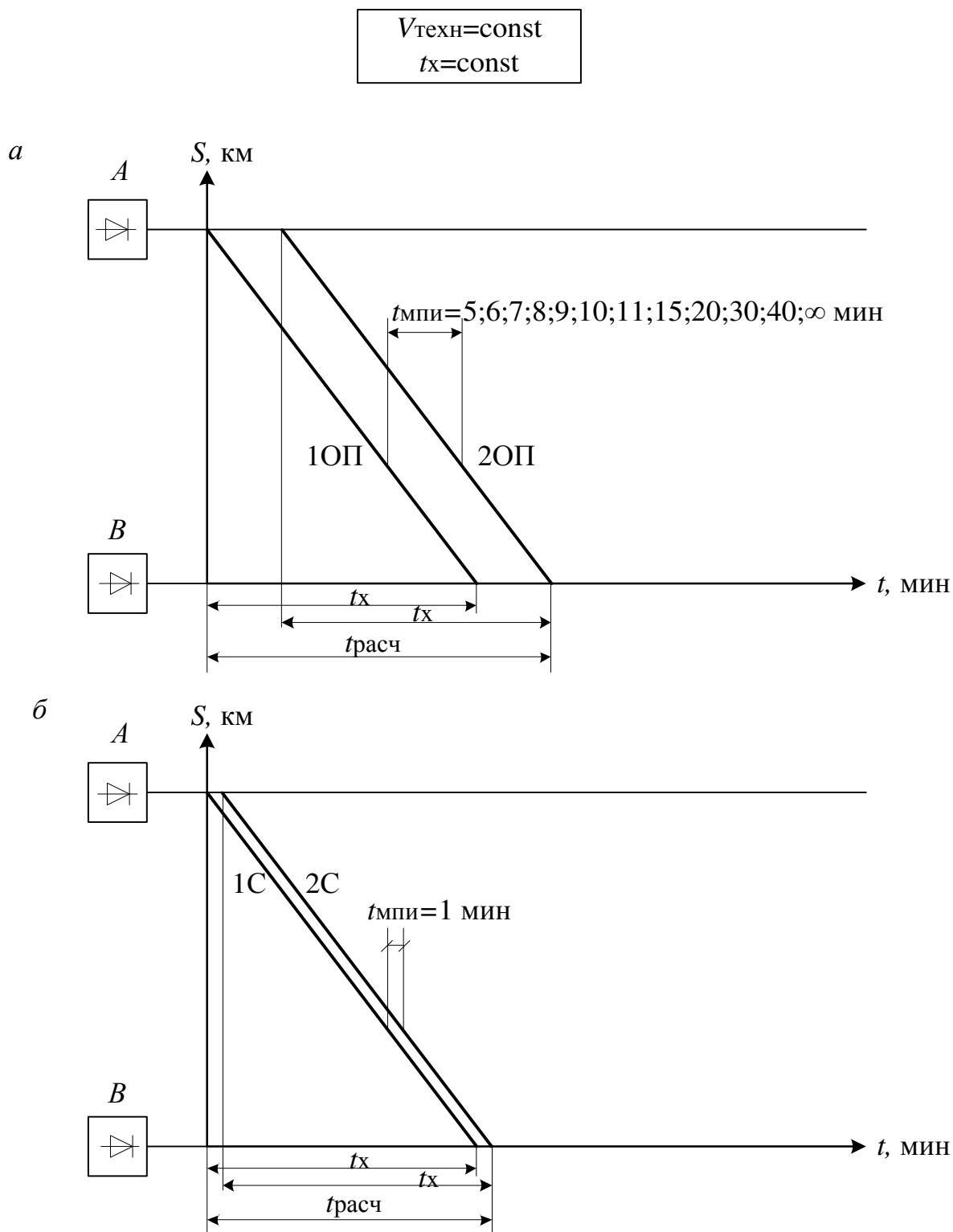
Рациональное время МПИ по определяется по наименьшему полученному времени МПИ с учетом выполнения принятых критериев.

Условия расчета [123]:

1. Участок Войновка – Богданович Свердловской ж.д.
2. С отсутствием движения в четном направлении и с движением в нечетном направлении двух грузовых поездов массой по 6000 т с межпоездным интервалом 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 15; 20; 30; 40 и ∞ минут.
3. Продолжительность расчета – от момента отправки первого поезда со станции отправления до момента прихода последнего вагона второго поезда на станцию прибытия.
4. Локомотив 2ЭС6.
5. Изменение скорости движения поездов от 50 км/ч до 100 км/ч с интервалом 10 км/ч.
6. Естественная внешняя характеристика тяговых подстанций с напряжением холостого хода 3500 В.
7. Стабилизированная внешняя характеристика тяговых подстанций с системой БАРН на уровне 3700 В.

На рисунке 4.7, *а* приведен расчетный график движения двух одиночных поездов ОП (1ОП и 2ОП) с принятым временем МПИ, а на рисунке 4.7, *б* – движения одного СП (пропуск двух одиночных поездов 1С и 2С со временем МПИ равным 1 минуте), с указанием времени хода t_x . Техническая скорость движения $V_{\text{техн}}$ участку, получена из тягового расчета, принимается одинаковой для поездов ОП (1ОП, 2ОП) и СП (1С, 2С). Расстояние от подстанции А до подстанции В при движении ОП и СП также одинаковое. Расчетное время $t_{\text{расч}}$ проведения электрических расчетов двух поездов массой по 6000 т различно для вариантов времени МПИ, так как продолжительность расчета начинается от

момента отправки первого поезда со станции отправления и заканчивается моментом прихода последнего вагона второго поезда на станцию прибытия.



a – движение двух ОП с различным временем межпоездного интервала;
б – движение СП

Рисунок 4.7 – Расчетный график движения двух ОП и одного СП

Схема алгоритма методики проведения электрических расчетов представлена на рисунке 4.8.

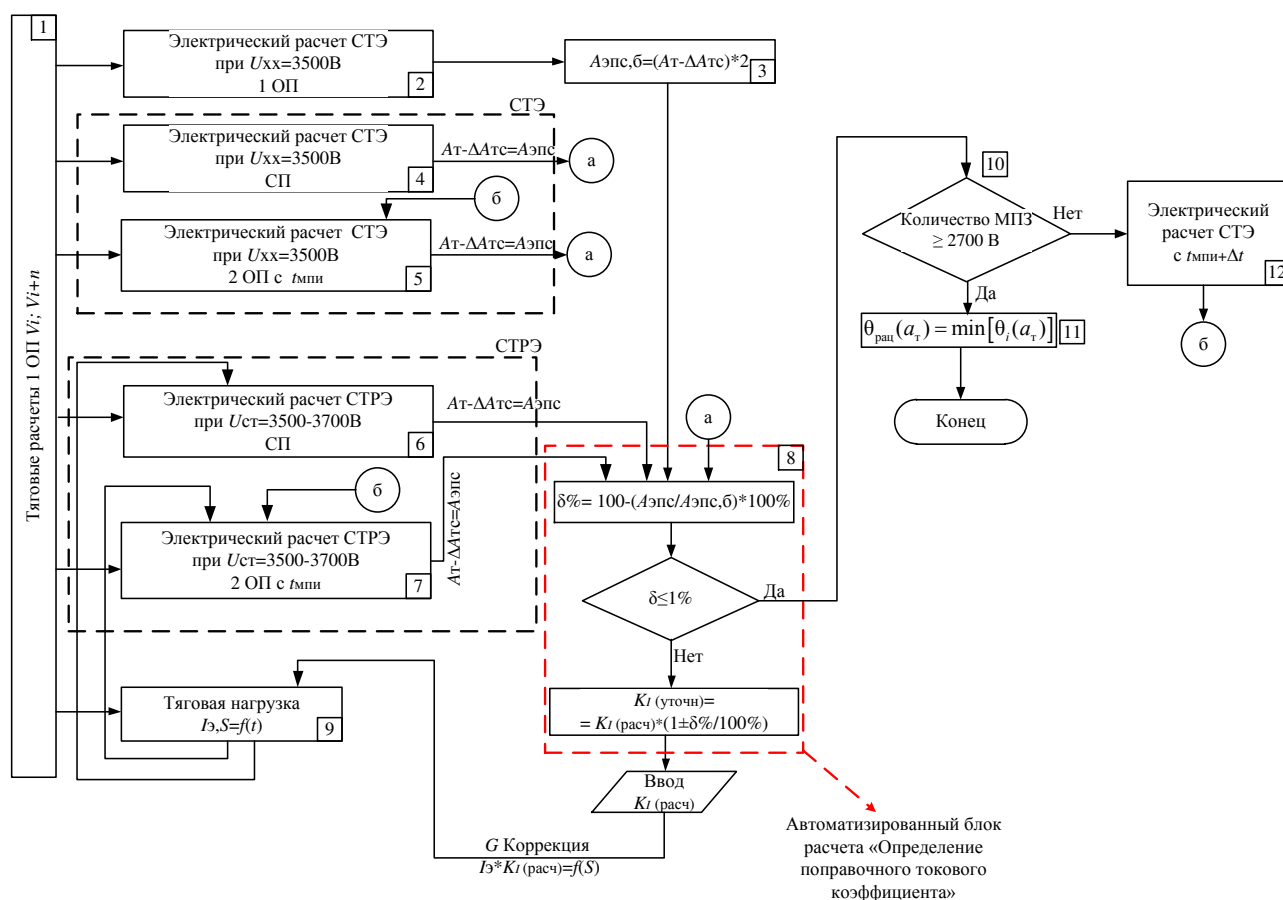


Рисунок 4.8 – Схема алгоритма методики проведения оценки энергетической эффективности СТЭ при изменении времени межпоездного интервала

На рисунке 4.8 показаны блоки этапов проведения методики расчета:

1 – Проведение тяговых расчетов с одним одиночным поездом ОП массой 6000 т.

2 – Для каждой скорости движения проводятся электрические расчеты для одного ОП 6 (напряжение на тяговых подстанциях 3500 В).

3 – Полученный расход ЭЭ $A_{\text{эпс оп}}$ ОП 6 удваивается и принимается за базовый расход ЭЭ $A_{\text{эпс, б}} = 2 A_{\text{эпс оп}}$.

4 – Далее проводятся для одного СП для каждой скорости движения электрические расчеты нерегулируемой СТЭ (напряжение на тяговых подстанциях 3500 В).

5 – Проведение электрических расчетов для двух ОП также для каждой скорости движения, но с различным временем межпоездного интервала 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 20, 30, 40 минут.

6, 7 – Аналогично пунктам 4, 5 проводятся электрические расчеты, но для регулируемой СТЭ с напряжением $U_{дст} = 3700$ В.

8, 9 – Уточнение тока электровоза, путем введения поправочного токового коэффициента.

10, 11 – По результатам расчета для конкретного участка с различными временами МПИ определяется количество межподстанционных зон с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В. Если уровень напряжения выше минимально допустимого, то определяется рациональное время МПИ по наименьшему удельному расходу ЭЭ. Если нет, то переход в блок 12.

12 – Выполнение электрического расчета СТЭ с увеличением времени МПИ на шаг Δt .

По результатам расчета для наглядности строятся графики зависимости расхода $A_{эпс}$, количества МПЗ с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В, а также удельного расхода электрической энергии от изменения времени МПИ двух режимов работы системы тягового электроснабжения (рисунки 4.9, рисунок 4.10).

Результаты расчетов представлены в приложении А – в таблице А.4 для нерегулируемой СТЭ и в таблице А.5 для регулируемой СТЭ.

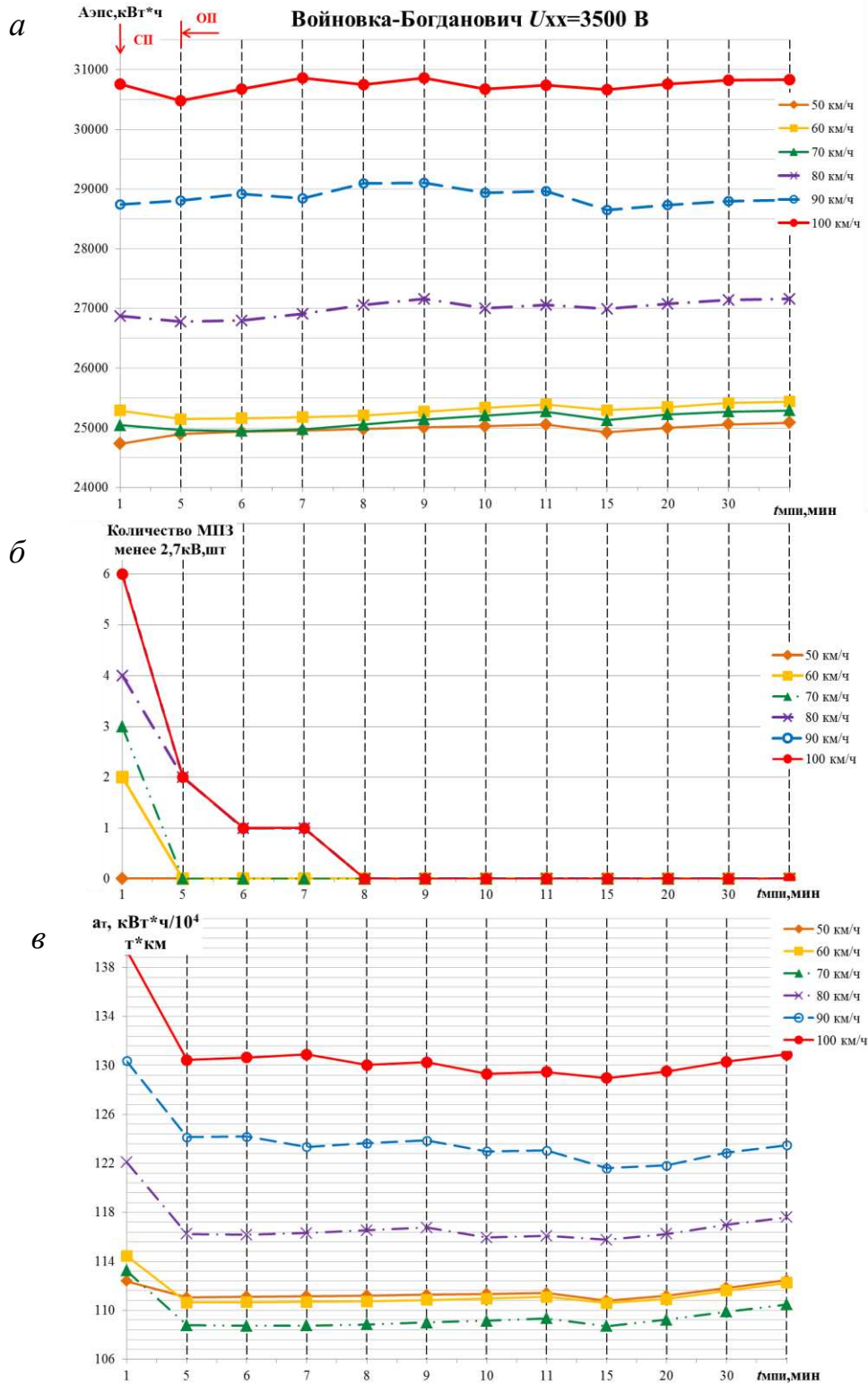


Рисунок 4.9 – Графики зависимости от времени межпоездного интервала: *а* – расхода ЭЭ по счетчикам ЭПС $A_{эпс}$; *б* – количества МПЗ с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В; *в* – удельного расхода электрической энергии a_t от времени МПИ с естественными внешними характеристиками ТП $U_{дхх} = 3500$ В

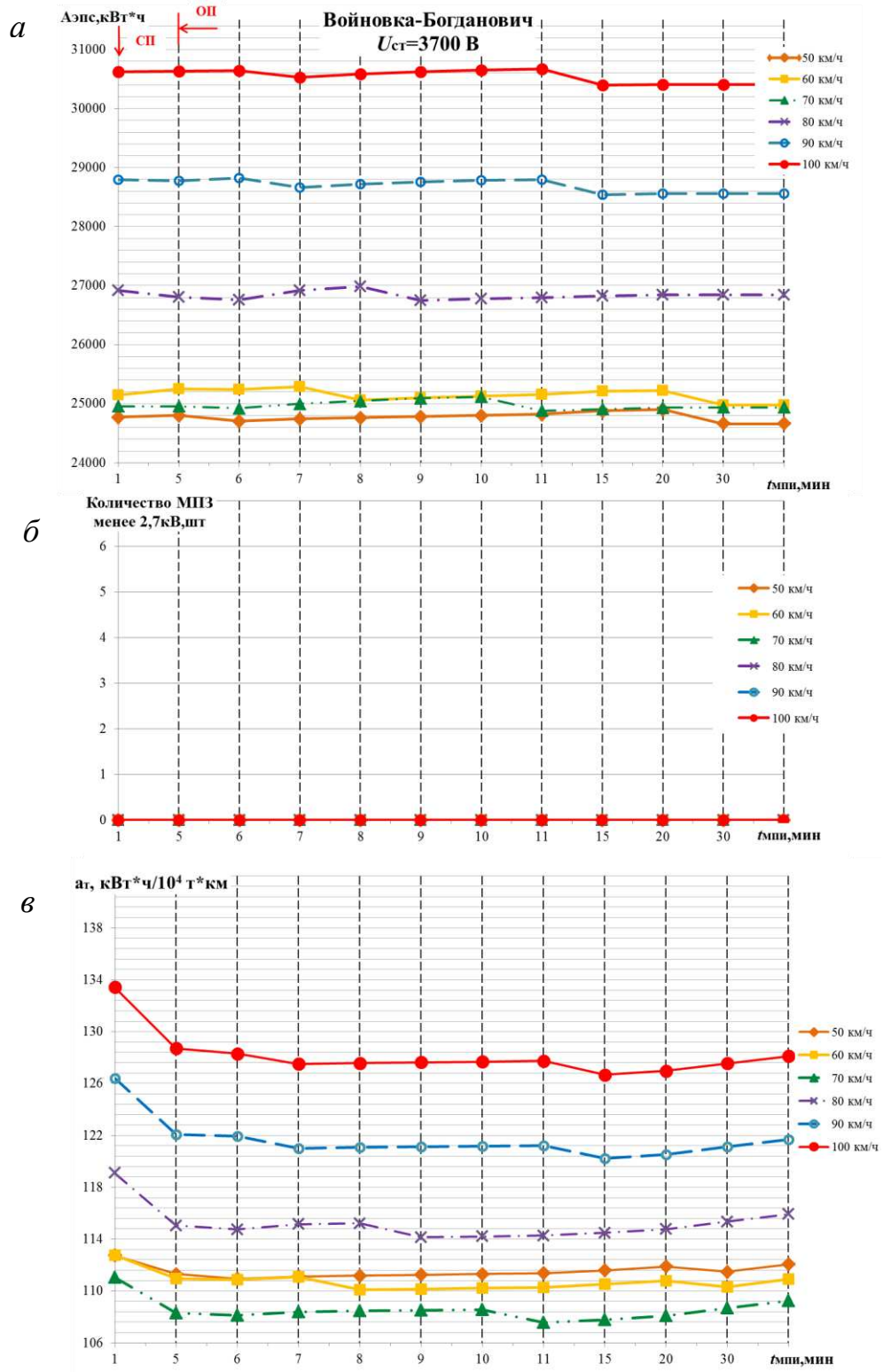


Рисунок 4.10 – Графики зависимости от времени межпоездного интервала: *а* – расхода ЭЭ по счетчикам ЭПС $A_{эпс}$; *б* – количества МПЗ с напряжением на токоприемнике электровоза менее 2700 В; *в* – удельного расхода электрической энергии a_t от времени МПИ с естественными внешними характеристиками ТП

$$U_{дст} = 3700 В$$

Скорости движения от 50 км/ч до 100 км/ч на графиках *а*, *б*, *в* (рисунки 4.9 и 4.10) отмечены одинаковыми цветами. На рисунке 4.9, *а* видно, что с увеличением времени межпоездного интервала расход $A_{\text{эпс}}$ остается практически постоянным. При скоростях движения более 50 км/ч и малом времени МПИ появляются межподстанционные зоны с напряжением в контактной сети менее 2700 В. Так, например, при скорости 70 км/ч (рисунок 4.9, *б*) с временем МПИ равном одной минуте имеется три межподстанционные зоны с напряжением в контактной сети менее 2700 В [107]. С увеличением времени МПИ от 5 минут и более (рисунок 4.9, *б*) снижается ток нагрузки и повышается напряжение в контактной сети. Наименьшие величины $A_{\text{эпс}}$ и $a_{\text{т}}$ определяются в промежутке времени МПИ от 5 минут до 40 минут и равны, например, при МПИ равном 15 минутам ($A_{\text{эпс}} = 25129$ кВт*ч и $a_{\text{т}} = 108,72$ кВт*ч/10⁴т*км).

Аналогично определяется время МПИ для остальных скоростей движения нерегулируемой СТЭ.

Из результатов анализа электрических расчетов нерегулируемой СТЭ, рациональное время МПИ составило 15 минут.

После этого рассматриваются полученные результаты электрических расчетов СТЭ (рисунок 4.10) и также определяется рациональное время МПИ.

Из рисунка 4.10, *а* следует, что с увеличением времени МПИ расход $A_{\text{эпс}}$ также остается постоянным. Напряжение в контактной сети (рисунок 4.10, *б*) при времени МПИ от 1 минуты до 40 минут выше 2700 В [107] при всех рассматриваемых скоростях движения поездов. Полученный удельный расход ЭЭ $a_{\text{т}}$ регулируемой СТЭ ниже, чем $a_{\text{т}}$ нерегулируемой СТЭ за счет снижения потерь ЭЭ в тяговой сети и в трансформаторах ТП. Из результатов анализа электрических расчетов СТЭ, среднее рациональное время межпоездного интервала составило 7 минут.

Полученное рациональное время МПИ при нерегулируемой СТЭ составляет 15 минут, а при СТЭ 7 минут, что подтверждает энергетическую эффек-

тивность применения системы бесконтактного автоматического регулирования напряжения БАРН.

4.3 Исследование энергетической эффективности СТЭ в условиях работы регулируемых ТП и нерегулируемой одноагрегатной тяговой подстанции ОТП

Повышение энергетической эффективности СТЭ в условиях повышения пропускной и провозной способностей участков (направлений) является актуальной задачей и требует принятия мер по снятию количества лимитирующих зон. Так на заседании ОАО «РЖД» от 27.08.2018 г. поставлена задача разработать мероприятия по усилению устройств электроснабжения для пропуска пакета грузовых поездов повышенной массы 8х7100 тонн с интервалами попутного следования поездов в пакете не более 8 минут [124].

На Свердловской железной дороге для этой цели определены МПЗ, ограничивающие пропуск данной категории поездов [124]. Общее количество лимитирующих зон составило 31 шт. Для выполнения мероприятий по организации тяжеловесного движения необходимо привлечь инвестиции с ориентировочной стоимостью 8500 млн. руб. Среди вариантов усиления рассматривается внедрение устройств бесконтактного регулирования напряжения системой БАРН – 18 шт.

В настоящее время на Свердловской железной дороге эксплуатируется система БАРН, которая показала свою энергетическую эффективность. Всего установлено 109 комплектов (41 тяговая подстанция).

Для проверки пропуска грузовых поездов повышенной массы с интервалами попутного следования не более 8 минут выполнено моделирование работы системы тягового электроснабжения участка Шаля – Кунгур. На данном

участке в 2016 г. установлена одноагрегатная нерегулируемая тяговая подстанция ОТП Шумково.

Моделирование работы СТЭ выполняется для следующих режимов работы:

1. Система с нерегулируемыми основными тяговыми подстанциями. В месте предполагаемой установки ОТП Шумково установлен пост секционирования.

2. Система с регулируемыми основными тяговыми подстанциями. В месте предполагаемой установки ОТП Шумково установлен пост секционирования.

3. Система с регулируемыми основными тяговыми подстанциями и нерегулируемой одноагрегатной тяговой подстанцией Шумково.

Режим работ 3 соответствует схеме работы буферной системы тягового электроснабжения БСТЭ (описана в главе 1). В задачу ОТП входит «оказание помощи» тяговым подстанциям с системой БАРН при организации движения грузовых поездов ПМД и СП.

Моделирование графика движения поездов выполняется в четном направлении с грузовыми поездами массой 2700 т с временем межпоездного интервала 8 минут, в нечетном направлении осуществляется для следующих вариантов:

1. Пропуск пакета поездов 6300-9000-6300 с временем межпоездного интервала в пакете 8 минут. Данный вариант эксплуатируется в настоящее время на участке.

2. Пропуск пакета поездов 8x7100 с временем межпоездного интервала в пакете 8 минут.

Продолжительность расчета – 720 минут.

На рисунке 4.11 представлена схема участка Шаля – Кунгур, с указанием основного силового оборудования, типа контактной подвески.

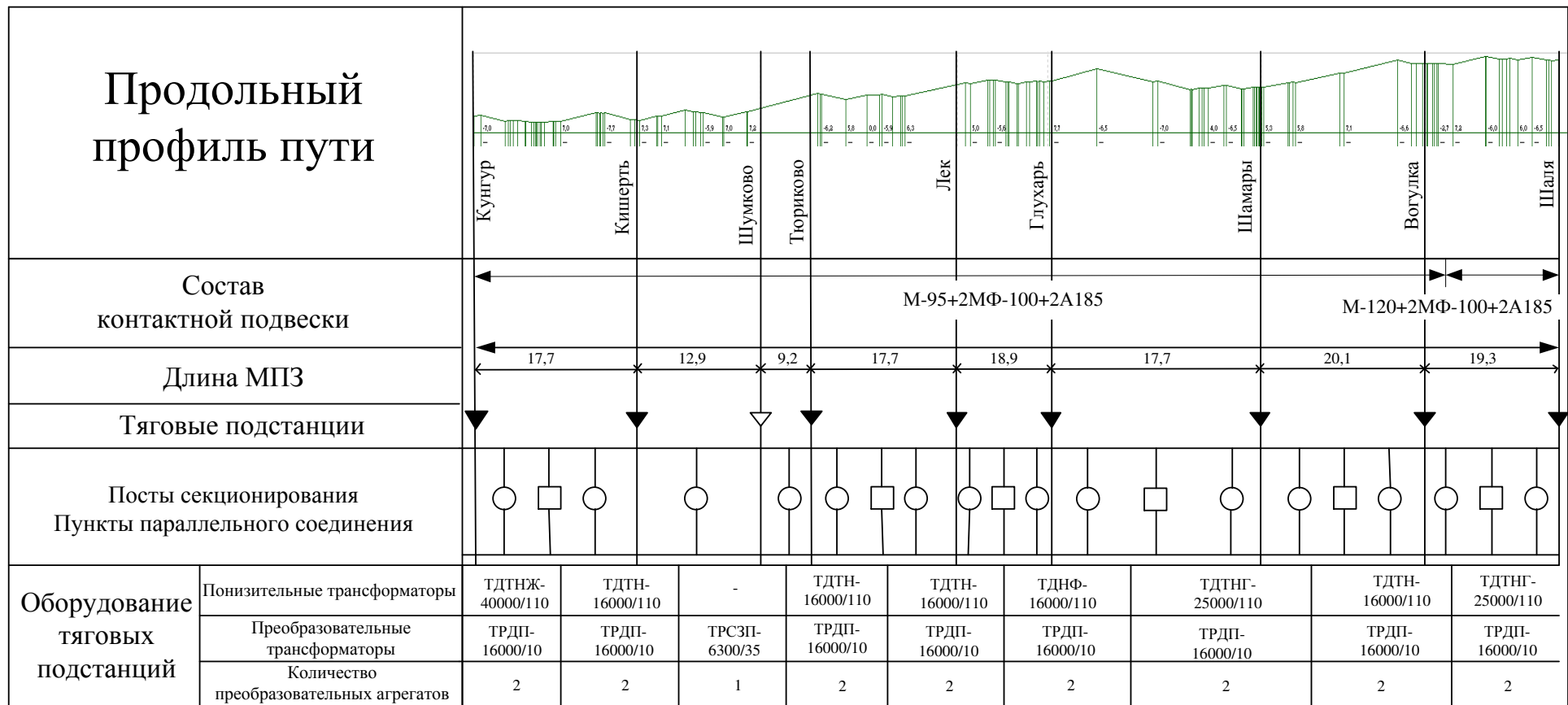


Рисунок 4.11 – Схема участка с устройствами БАРН на тяговых подстанциях и с буферной системой тягового электроснабжения на межподстанционной зоне Кишерт – Тюриково

В таблице 4.3 представлены результаты электрического расчета системы тягового электроснабжения без ОТП с тяговыми подстанциями: нерегулируемыми $U_{dxx} = 3500$ В; регулируемые $U_{dct} = 3600$ В, $U_{dct} = 3700$ В.

Таблица 4.3 – Результаты электрического расчета без применения ОТП

Пакет поездов	Режим работы ТП		A_T , кВт*ч	ΔA_{TC} , кВт*ч	$A_{эпс}$, кВт*ч	$\Delta A_{тр}$, кВт*ч		$A_{ТП}$, кВт*ч	Кол-во МПЗ менее 2700 В, шт
	ТП U_d , В	ОТП U_d , В				нагр	хх		
6300-9000-6300	хх 3500	ПС	1034080	103183	930897	9800	6660	1050540	7
	ст 3600	ПС	1005551	77399	928152	10568	7236	1023355	1
	ст 3700	ПС	996421	72537	923884	9903	7236	1013560	1
8x7100	хх 3500	ПС	1186320	131399	1054921	13016	6660	1205996	7
	ст 3600	ПС	1139833	94420	1045413	13396	7236	1160465	1
	ст 3700	ПС	1134771	88890	1045881	12610	7236	1154617	1

Результаты расчета (таблица 4.3) показывают, что без введения на участке одноагрегатной тяговой подстанции Шумково напряжение в контактной сети составляет менее 2700 В, т. е. имеются непроходимые по напряжению меж-подстанционные зоны.

Рассмотрим варианты режимов работы с введением ОТП Шумково. Алгоритм электрического расчета работы ОТП в системе БСТЭ предусматривает расчет напряжения холостого хода при обеспечении напряжения в контактной сети не ниже уровня 2700 В и с ограничением величины тока нагрузки преобразовательного агрегата не более допустимой величины с учетом коэффициентов перегрузки.

Напряжение холостого хода преобразовательного агрегата ОТП, полученное из ранее проведенных расчетов и используемое в электрическом расчете БСТЭ участка, принято равным напряжению 3500 В.

Ограничение величины тока ОТП достигается перераспределением тока нагрузки электровозов грузового поезда ПМД между питающими «непроходимую» зону тяговыми подстанциями с повышенным стабилизированным напряжением $U_{дст} = 3600 - 3700$ В и ОТП со снижающимся напряжением по естественной внешней характеристике преобразовательного агрегата $U_{dxx} = 3500$ В.

Далее выполняются электрические расчеты для третьего режима работы СТЭ с БСТЭ на одной межподстанционной зоне с регулируемыми основными двумя тяговыми подстанциями и нерегулируемой ОТП. Результаты расчета представлены в таблице 4.4, которые показывают, что и с введением на участке одноагрегатной тяговой подстанции Шумково с $U_{dxx} = 3500$ В напряжение в контактной сети при пропуске первого варианта пакета поездов 6300 т – 9000 т – 6300 т при $U_{дст} = 3600$ В основных ТП составляет практически 2700 В (2694 В).

При повышении напряжения на основных ТП $U_{дст} = 3700$ В и том же напряжении холостого хода $U_{dxx} = 3500$ В на ОТП напряжение на токоприемнике электровозов повысилось более 2700 В. Для наиболее тяжелого нечетного пути максимальное напряжение в контактной сети (на электровозе) на участках Тюриково – Шумково и Шумково – Кишертъ составило соответственно 3272 В и 2765 В. При этом 30-ти минутный ток ОТП составил 563 А (при $I_{дн} = 1500$ А).

При пропуске второго варианта пакета поездов 8х7100 тонн и при установке на ТП напряжения стабилизации $U_{дст} = 3600$ В или $U_{дст} = 3700$ В напряжения в контактной сети в нечетном направлении на указанных выше участках Тюриково – Шумково и Шумково – Кишертъ составило более 2700 В.

Таблица 4.4 – Результаты электрического расчета для режима работы №3 БСТЭ

Пакет поездов	Режим работы СТЭ		$I_{тп}(30), A$			U_3 , нечетный путь/ четный путь, В		$A_{т},$ кВт*ч	$\Delta A_{тс},$ кВт*ч	$A_{эпс},$ кВт*ч	$\Delta A_{тр},$ кВт*ч		$A_{тп},$ кВт*ч
	ТП	ОТП	ТП	ОТП	ТП	Кишерть- Шумково	Шумково- Гюриково				нагр	хх	
	$U_{дст}, B$	U_d, B	Кишерть	Шумково	Гюриково								
6300- 9000- 6300	3600ст	3500хх	4171	837	4340	2694*/ 2994	3233/ 3096	1004754	73837	930917	10302	7368	1022424
	3700ст	3500хх	4077	563	4313	2765/ 3069	3272/ 3164	996068	70208	925860	9769	7368	1013205
8x7100	3600ст	3500хх	4742	962	4708	2809/ 3038	3245/ 3116	1147780	90310	1057470	13207	7368	1168355
	3700ст	3500хх	4614	723	4642	2865/ 3102	3276/ 3152	1134639	85353	1049286	12398	7368	1154405

Оценка достоинств и недостатков схем БСТЭ должна производиться в условиях увеличения грузовых перевозок и пропуска поездов ПМД и СП, с обеспечением допустимого уровня напряжения в контактной и минимума потерь электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах ТП.

Вариантом обеспечения пропускной способности (пропуск грузовых поездов в пакетах 6300 т – 9000 т – 6300 т и 8x7100 т) является схема с применением БСТЭ на непроходимых МПЗ, когда регулирование напряжения осуществляется только на основных двухагрегатных тяговых подстанциях. Схема обеспечивает допустимый уровень напряжения в контактной сети, не допускает превышение тока нагрузки ОТП выше номинального. Рекомендуемый уровень напряжения является $U_{d_{ст}} = 3700$ В и для ОТП $U_{d_{хх}} = 3500$ В.

Выводы по четвертой главе

По результатам расчетов п. 4.1 и п. 4.2 следует, что:

1. С увеличением скорости движения поездов увеличивается расход электрической энергии на тягу A_T , но с применением регулируемой СТРЭ, за счет снижения потерь электрической энергии в тяговой сети, снижается расход ЭЭ на тягу. По указанному алгоритму возможно проведение электрических расчетов для других типов профилей пути нерегулируемой СТЭ и СТРЭ и определения в %-ном отношении изменения расхода ЭЭ на тягу.

2. С уменьшением времени межпоездного интервала от 40 минут до 1 минуты снижается напряжение в контактной сети, а, следовательно, и скорость движения (снижается пропускная способность участка), увеличиваются потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций, следовательно, повышается удельный расход электрической энергии. Рациональным с точки зрения энергетической эффективности режимом работы системы является регулируемая система тягового электроснабжения. По указанной методике возможно проведение электрических расчетов для остальных типов профилей пути нерегулируемой СТЭ и

регулируемой СТРЭ и определения рационального времени межпоездного интервала.

3. По результатам исследования энергетической эффективности СТЭ в условиях работы регулируемых ТП и нерегулируемой ОТП следует, что буферная система тягового электроснабжения обеспечивает пропуск грузовых поездов ПМД. При этом повышается уровень напряжения в контактной сети, снижаются потери электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах ТП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно-технической задачи, имеющей значение для совершенствования метода электрического расчета системы тягового электроснабжения на основе устройств регулирования напряжения при пропуске соединенных грузовых поездов. Изложены научно обоснованные решения, которые позволяют повысить технико-энергетическую эффективность системы тягового электроснабжения постоянного тока. В соответствии с поставленными целью и задачами исследования в диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты.

1. Предложены основные критерии определения технико-энергетической эффективности применения устройств регулирования напряжения, позволяющие проводить анализ СТЭ до и после введения соединенных грузовых поездов.

2. Произведено усовершенствование существующей методики электрического расчета СТЭ, заключающееся во введении поправочных токовых коэффициентов и в дополнение проверкой уровня напряжения на токоприемнике электроваза. Предлагаемая методика позволяет достоверно оценить технико-энергетическую эффективность применения устройств регулирования напряжения системой БАРН, в том числе при организации движения соединенных грузовых поездов.

3. Электрические расчеты по предложенной методике показали, что при организации движения соединенных поездов без введения устройств регулирования напряжения увеличивается количество МПЗ с напряжением менее 2700 В, возрастают потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах ТП, увеличивается удельный расход ЭЭ в среднем на рассматриваемых участках в зависимости от скорости движения при напряжении на тяговых подстанциях $U_{dxx} = 3,5$ кВ на 3,1–9,0 %. При введении устройств регулирования напряжения системой БАРН количество МПЗ с напряжением менее 2700 В снижается до нуля, снижаются потери ЭЭ, удельный

расход ЭЭ снижается в среднем на рассматриваемых участках в зависимости от скорости движения при стабилизации напряжения на уровне 3700 В на 2,5 – 4,8 %. Достоверность предлагаемой методики подтверждается сходимостью результатов расчетов с реальными показаниями приборов в пределах 5 %. Экономическая эффективность применения системы БАРН при организации одиночных поездов на 8,6 % выше, чем при пропуске соединенных поездов.

4. Разработана методика оценки рационального режима работы СТЭ в условиях снижения времени межпоездного интервала, скорости движения и пропуска грузовых поездов ПМД и СП, учитывающая изменение расхода и потерь ЭЭ, а также уровня напряжения на токоприемнике электровоза. В результате оценки рационального режима работы СТЭ выявлено, что наиболее эффективным вариантом является применение буферной системы тягового электроснабжения, т. е. применение регулируемых основных тяговых подстанций с системой БАРН и нерегулируемой одноагрегатной тяговой подстанции в непроходимой по уровню минимального напряжения 2700 В межподстанционной зоне.

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшей разработки темы диссертационного исследования предусматривается разработка программного комплекса по расчету СТЭ, с разработанным дополнением, с одновременным технико-энергетическим анализом в условиях пропуска поездов ПМД и СП.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» 15.12.11 г. № 2718р.

2. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://doc.rzd.ru/doc/public/ru?STRUCTURE_ID=704&layer_id=5104&id=6396.

3. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 17 июня 2008 года № 877р [Электронный ресурс] // Собр. Законодательства РФ. – 2008. – № 29. – ст. 3537. – Режим доступа : <http://www.szrf.ru/szrf/doc.phtml?nb=100&issid=1002008029000&docid=129>.

4. Пресс-релиз. ОАО «РЖД» развивает движение тяжеловесных грузовых поездов [Электронный ресурс]. – URL: http://press.rzd.ru/news/public/ru?STRUCTURE_ID=654&id=84155&layer_id=4069 (дата обращения 2018 г.).

5. Инструкция по организации обращения грузовых поездов повышенной массы и длины на железнодорожных путях общего пользования ОАО «РЖД». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 1799р от 1 сентября 2016 г. – 43 с.

6. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 176 с.

7. Аржанников, Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов : монография / Б.А. Аржанников . – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.

8. Аржанников, Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых

подстанций : дис. на соис. уч. ст. д-ра техн. наук / Б. А. Аржанников. – Свердловск, 1991.

9. Аржанников, Б. А. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 258 с.

10. Аржанников, Б. А. Усиление системы электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, Л. Н. Немытых // Транспорт Урала . – 2006. – №1. – С. 2–8.

11. Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 12, 24 кВ для скоростной магистрали Москва – Екатеринбург / Б. А. Аржанников, А. Г. Галкин, А. Т. Бурков [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. Федеральный деловой журнал ТСР. – Изд-во «Реал-Медиа», 2012. – № 7(66). – С. 48–50.

12. Аржанников, Б. А. Реальность и перспектива: тягового электроснабжения для пропуска тяжеловесных поездов; электроснабжения устройств СЦБ для повышения безопасности движения / Б. А. Аржанников // Евразия Вести. – 2007. – IV. – 29 с.

13. Аржанников, Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций / Б. А. Аржанников, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та путей сообщения, 2006. – С. 118.

14. Совершенствование основных требований к системе и устройствам тягового электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, М. П. Бадёр, А. Т. Бурков [и др.] // Электротехника. Ежемесячный научно-технический журнал – коллективный член академии электротехнических наук РФ. – Москва: Изд-во «Знак», 2016. – № 3. – С. 51 – 57.

15. Аржанников, Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой : учеб. пособие / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – 101 с.

16. Влияние бесконтактного автоматического регулирования на качество напряжения в контактной сети / Р. Н. Урманов, Б. А. Аржанников, В. М. Арутюнов [и др.] // Труды УЭМИИТ. – 1976. – № 49. – С. 27–33.

17. Пат. РФ № 2339992 на изобретение, МПК G05FD 1/14 . Устройство для регулирования переменного напряжения / Аржанников Б. А. – № 2007141901/09 ; заявл. 12.11.2007 ; опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33. – 6 с. : ил.

18. Аржанников, Б. А Energy efficiency electrified section with automatic voltage regulation // Б. А. Аржанников, И. А. Баева, Т. С. Тарасовский // VIII International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia – Volume 1.– 2019.

19. Бадёр, М. П. Адаптация системы тягового электроснабжения постоянного тока для высокоскоростного движения / М. П. Бадёр, Е. В. Сачкова // Электротехника. – 2017. – № 9.

20. Бурков, А. Т. Уровень напряжения электрических сетей как фактор повышения производительности и конкурентоспособности железнодорожного транспорта / А. Т. Бурков // Материалы 3-го Междунар. симп. «Элтранс-2005», 15–17 нояб. 2005 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2007.

21. А.С. 248743 СССР, МПК В 60, Кл.20 к.4; 20 к.20. Система энергоснабжения электрифицированных линий постоянного тока / К. Г. Марквардт, С. Н. Засорин, В. А. Кисляков, Г. А. Минин, В. М. Бабаева // Открытия. Изобретения. – 1969. – №26.

22. Марквардт, К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог / К. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1982. – 528 с.

23. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1 / под ред. К. Г. Марквардта. – Москва : Транспорт, 1980. – 256 с.

24. Марикин, А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока : дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук / А. Н. Марикин. – Санкт-Петербург, 2008.

25. Марикин, А. Н. Способы усиления тягового электроснабжения постоянного тока при интенсивном движении поездов / А. Н. Марикин, А. П. Самонин, В. Г. Жемчугов // Известия ПГУПС. – 2012. – № 3 – С. 123–127.

26. Пупынин, В. Н. Усиление системы тягового электроснабжения участков железных дорог, электрифицированных на постоянном токе 3,3 кВ, путем перевода на переменный ток 25 кВ с реализацией схемы распределенного питания / В. Н. Пупынин, Н. Ю. Юдина, О. Ю. Брусенцова // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. – №2. – С. 42–45.

27. Черемисин, В. Т. Влияние тяговой нагрузки на электропотребление в системе тягового электроснабжения на участках с горным профилем пути / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, С. С. Саркенов // Вестник РГУПС. – 2019. – № 1. – С. 112–118.

28. Черемисин, В. Т. Характеристики профилей пути на электрифицированных участках железных дорог в аспекте классификации типов / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. Е. Перестенко // Вестник РГУПС. – 2017. – № 2. – С. 118–128.

29. Пат. РФ № 2572797 на изобретение, МПК В60М 3/00, В60L 3/12, G01R 21/133. Способ определения технологических потерь электроэнергии в тяговой сети железнодорожного транспорта / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Никифоров М. М., Ушаков С. Ю., Черемисин В. Т.

30. Черемисин, В. Т. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на полигоне постоянного тока: Научная монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. Л. Каштанов, А. С. Вильгельм; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2016. – 176 с.

31. Черемисин, В. Т. Повышение использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного и переменного тока: Научная монография / В. Т. Черемисин, М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. – 216 с.

32. Careglio Giuseppe, Cavagnaro Maurizio, Lanzavecchia Lorenzo. Indagine analitica su modelli dielettrificazione ferroviaria a 3 kV cc confeder a-3, –6e-12kVcc // Ing.Ferrov. – 1983. – 38, №10. – P. 664–672.

33. Mayer Lucio. Ottimizzazione clec sottosistema alimentazione ferroviaria // Ing.ferrov. – 1985. – 40, № 9. –С. 583–591.

34. Адзуки Миура. Вольтодобавочное устройство для железной дороги постоянного тока. Заявка 59-186744 Япония, МКИ В60М 3/02. / Миура Адзуки. – 1981.

35. Вильгельм, А. С. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. – Т. 16, № 3. – С. 32–40.

36. Вильгельм, А. С. Учет фактора изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава постоянного тока при проведении тяговых расчетов / А. С. Вильгельм, В.Л. Незевак // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. Научный журнал. – 2015. – № 2 (4). – С. 21–25.

37. Вильгельм, А. С. Совершенствование способа определения энергетических показателей движения поезда и системы тягового электроснабжения / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – № 3. С. 32–40.

38. Вильгельм, А. С. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока/ А. С. Вильгельм, А. А. Комяков, В. Л. Незевак // Известия Транссиба. – 2014. – № 3(19). С. 54–65.

39. Гаранин, М. А. Расчет энергообеспеченности перевозочного процесса и усиление системы тягового электроснабжения / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Транспорт Урала. – 2014. – № 3(42). – С. 109.

40. Гаранин, М. А. Оценка рисков при переводе системы электроснабжения с постоянного на переменный ток / М. А. Гаранин, С. А. Блинкова // Вестник транспорта Поволжья. – 2019. – №1(73).

41. Загородский, В. А. Оценка расчетных моделей системы тягового электроснабжения / В. А. Загородский, М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин // Вестник транспорта Поволжья. – 2016. – № 3(57). – С. 34–36.

42. Гаранин, М. А. Учет электрической связи между тяговыми подстанциями при расчете пропускной способности электрифицированных железных дорог // М. А. Гаранин, А. Н. Митрофанов, Е. В. Добрынин // Электротехника. – 2017. – №3.

43. Закарюкин, В. П. Прогнозирование электропотребления на тяговых подстанциях с помощью имитационного моделирования / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // МИИТ. Наука и техника транспорта. – 2005. – № 4.

44. Крюков, А. В. Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин // Наука и трансп. модернизация ж. д. трансп. – 2010. – № 3. – С. 61.

45. Марквардт, Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения / Г. Г. Марквардт. – Москва : Транспорт, 1972. – 224 с.

46. Марквардт, Г. Г. Алгоритм тягового расчета при заданном времени хода по участку постоянного тока с учетом изменяющегося напряжения на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации / Г. Г. Марквардт // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – Москва : ВНИИЖТ, 1974. – Вып. 520.

47. Марский, В. Е. Методика и программа расчета параметров многопроводных тяговых сетей переменного тока на ЭВМ серии ЕС / В. Е. Марский // Трансэлектропроект: Инструктивно методические указания. – 1985. – № 2. – С. 4–42.

48. Марский, В. Е. Определение пропускной способности железнодорожных участков по устройствам тягового электроснабжения / В. Е. Марский // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2014. – №1.

49. Решение задач электроснабжения на электронных машинах / Р. И. Мирошниченко, М. С. Гочуа, Д. А. Палей [и др.]. – Москва : Транспорт, 1971. – 168 с.

50. Совершенствование режимов работы устройств электрифицированных железных дорог с применением счетно-решающей техники. Р. 1: Создание системы автоматического регулирования напряжения на участках постоянного тока : отчет о НИР (заключит.) / ВНИИЖТ ; рук. темы Р. И. Мирошниченко. – 101–ЭЛ–74, р. 1а ; № г.р. 74041077. – М., 1974. – 202 с.

51. Палей Д. А. Методика определения на ЭВМ оптимального уровня напряжения / Д. А. Палей ; ВНИИЖТ ; под ред. Р. И. Мирошниченко // Совершенствование режимов работы устройств энергоснабжения с применением ЭЦВМ : сб. ст. – 1972. – Вып. 476. – С. 38–51.

52. Тер-Оганов, Э. В. Применение имитационного моделирования для расчета и анализа СТЭ : учеб. пособие / Э. В. Тер-Оганов. – Екатеринбург, 1993.

53. Тер-Оганов, Э. В. Электроснабжение железных дорог : учеб. для студентов университета / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.

54. Тер-Оганов, Э. В. Моделирование работы системы электроснабжения электрифицированных железных дорог : метод. указания / Э. В. Тер-Оганов, К. П. Луковкин, Н. С. Емельянов. – 2-е изд. доп. и перераб. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. – 51 с.

55. Тер-Оганов, Э. В. Моделирование работы системы электроснабжения электрифицированной железной дороги : конспект лекций. – Екатеринбург: УрГУПС, 2007. – 83 с.

56. Третьяк, Т. П. Расчет системы электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения / Т. П. Третьяк // Вестник ВНИИЖТ. – 1968. – № 8. – С. 14–17.

57. Черемисин, В. Т. Имитационное моделирование мультиагентного управления напряжением в распределительных электрических сетях железных

дорог / В. Т. Черемисин, Е. А. Третьяков // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2019. – № 1 (49).

58. Черемисин, В. Т. Математическое моделирование процесса электропотребления на тягу поездов с применением метода опорных векторов / В. Т. Черемисин, А. А. Комяков, В. И. Иванченко // Омский научный вестник. – 2016. – № 6 (150).

59. 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 // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 3(55).

60. Yulong Che, Xiaoru Wang, Xiaoqin Lv, Yi Hu, Yufei Teng. Study on probability distribution of electrified railway traction loads based on kernel density estimator via diffusion // Volume 106. – 2019. – P. 383–391.

61. Shaobing Yang, Xue Li, Kejian Song, Mingli Wu. A novel modeling approach of negative-sequence current for electrified railway tracti // Volume 10. – 2019. – P. 462–471.

62. Gang Zhang, Zhongbei Tian, Pietro Tricoli, Stuart Hillmansen, Zhigang Liu. A new hybrid simulation integrating transient-state and steady-state models for the analysis of reversible DC traction power systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems – Volume 109. – 2019. – P. 9–19.

63. Arboleya P, Mohamed B, El-Sayed I. Моделирование железной дороги постоянного тока, включая управляемую силовую электронику и устройства накопления энергии // In IEEE Transactions on Power Systems. – 2017. – P. 1.

64. Pablo Martínez Fernandez, Ignacio Villalba Sanchís, Víctor Yepes, Ricardo Insa Franco. Обзор методов моделирования и оптимизации применительно к энергопотреблению железных дорог // Journal of Cleaner Production 222 (2019). – P. 153–162.

65. Besedin, I. S. Technical and Economic challenges and Decision for Heavy Haul Operation in Russia under Condition of Combined Traffic of Freight and Passanger Trains / I. S. Besedin, L. A. – 24 p.

66. Мугинштейн, Л. А. Развитие тяжеловесного движения грузовых поездов / Л. А. Мугинштейн, К. П. Шенфельд. Москва : Интекст, 2011. – 76 с.

67. Лapidус, Б. М. Развитие тяжеловесного движения на российских железных дорогах. Опыт, проблемы, решения / Б. М. Лapidус // Бюллетень ОСЖД. – 2013, № 1/2. – С. 8–15.

68. Всё о тяжеловесном движении. Уральский профиль [Электронный ресурс] // Гудок. – URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1259654> (дата обращения май 2019 г.).

69. Региональное информационно-аналитическое независимое агентство «Урал-пресс-информ». ЮУЖД увеличивает пропуск тяжеловесных грузовых поездов [Электронный ресурс]. – URL: <http://uralpress.ru/news/ekonomika/yuuzhd-uvvelichivaet-propusk-tyazhelovesnyh-gruzovyh-poezdov> (дата обращения 2018 г.).

70. ЗабЖД в 2,2 раза увеличила пропуск соединенных поездов в I квартале 2019 года [Электронный ресурс] // Гудок. – URL: <https://www.gudok.ru/> (дата обращения 2018 г.).

71. Neruez I. Fortschritte des elektrischen Zugnetriebes bei der SNCB // Elek. Bahnen. – 1983. – Vо.81, № 12. – P. 236–365.

72. Roman Zofia. Tendencje rozwoju ukfadow zasilania trakcji elektrycznej // Trakcja I wagony. – 1989. – 8, № 9. – P. 177–181.

73. Кисляков, В. А. Повышение эффективности электроснабжения электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ посредством вольтодобавочных устройств: дис. на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук. – Москва, 1979. – 268 с.

74. Повышение надежности и эффективности системы тягового электроснабжения / под ред. С. Д. Соколова // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 618. – Москва : Транспорт, 1979.

75. Засорин, С. Н. Регулируемый преобразователь на тиристорах для повышения напряжения в контактной сети железных дорог постоянного тока / С. Н. Засорин, В. М. Бабаева // Труды МИИТа. – Москва : Транспорт. – Вып. – 302. – 1969.

76. А.С. 152894 СССР, МКИ В 61 М, Кл.20 к.5. Система энергоснабжения электрических железных дорог / Т. П. Третьяк // Открытия. Изобретения. – 1963. – № 3.

77. Аржанников, Б. А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : курс лекций / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2009. – 48 с.

78. Акт об использовании (внедрении НИР). Предмет внедрения – Бесконтактные устройства регулирования напряжения на тяговых подстанциях электрифицируемого участка. Место внедрения – Технический проект электрификации участка Богданович – Тюмень Свердловской ж.д. / Свердловск : Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта ; Проектно-изыскательский институт «Уралгипротранс». – 06.05.1978. – 2 с.

79. Эксплуатационные испытания систем автоматического управления напряжением в контактной сети (САУНК) / Р. И. Мирошниченко, Б. А. Аржанников, Н. А. Соколов [и др.] ; ВНИИЖТ // Повышение эффективности работы электрифицированных участков : сб. науч. тр. – Москва : Транспорт, 1985. – С. 25–38.

80. Бородулин, Б. М. Эксплуатационные испытания системы автоматического управления напряжением (САУНК) на Октябрьской дороге / Б. М. Бородулин, В. В. Коптелов, И. А. Большаков ; ВНИИЖТ // Повышение эффективности работы электрифицированных участков : сб. науч. тр. – Москва : Транспорт, 1985. – С. 39–45.

81. Пат. РФ № 2274945 на изобретение, МПК H02P 13/06, G05F 1/20. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора и устройство для его осуществления / Аржанников Б. А., Фролов Л. А., Штин А. Н. – № 2004127325/22 ; заяв. 13.09.04 ; опубл. 27.11.04. Бюл. № 33. – 6 с. : ил.

82. Расчетная записка «Трансформаторный регулируемый агрегат» ТРДН-ПА-16000/35(10)ЖУ1 / ПО «Уралэлектротяжмаш» ; ИБПД 674861.014РР. – 1990. – 44 с.

83. Расчетная записка «Трансформатор ТРСЗПА-6300/10Ж УХЛ2» ПО «Уралэлектротяжмаш», ИБПД 672331. – 1992. – 11 с.

84. А.С. 1444185 СССР. МКИ В60М 3/02. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Л. А. Фролов, Б. А. Аржанников, В. И. Сипкин ; УЭМИИТ (СССР). – № 4249107/27–II ; заявл. 26.05.87 ; опубл. 15.12.88. Бюл. № 46. – 6 с. : ил.

85. А.С. 1220955 СССР. МКИ В60М 3/02. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Б. А. Аржанников, В. С. Попов, В. И. Сипкин, Н. А. Соколов, Р. Н. Урманов ; УЭМИИТ (СССР). – № 3814509/27-11 ; заявл. 17.10.84 ; опубл. 30.03.86. Бюл. № 12. – 4 с : ил.

86. Пат. РФ № 32379203 на изобретение, МПК В60М 3/02, Н02М 5/257. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Аржанников Б. А., Фролов Л. А. – № 2008117238/11 ; заявл. 29.04.2008 ; опубл. 20.01.2010. Бюл. № 2. – 8 с. : ил.

87. Пат. РФ № 2613340 на изобретение Устройство регулирования напряжения и способ его регулирования / Аржанников Б. А., Низовцев К. А., Штин А. Н. – 2015135100 / 07 ; заявл. 19.08.2015 ; опубл. 27.02.2017. Бюл. № 6.

88. Основные результаты промышленных испытаний тягового трансформатора ТДРУ-20 000/35 / Р. Н. Урманов, М. И. Клейнерман, Я. Л. Фишлер [и др.] // Труды УЭМИИТ. – 1969. – № 24. – С. 3–12.

89. Эксплуатационные исследования бесконтактной автоматики и исследование тягового трансформатора с бесконтактным регулированием напряжения на участке Шарташ – Каменск-Уральский : отчет о НИР / УЭМИИТ ; рук. темы Р. Н. Урманов. – М. –103/1, № г.р. 1045478 ; Инв. № Б426859. – Свердловск, 1975. – 188 с.

90. Рабочий проект упрощенной телеуправляемой тяговой подстанции на ст. Юг Свердловской ж.д. – Гос. проектно-изыскат. ин-т Уралгипротранс, № 4868. – 1990.
91. Аржанников, Б. А. Одноагрегатная регулируемая подстанция / Б. А. Аржанников, А. М. Левин // Железнодорожный транспорт. – 1991. – № 8 – С. 44–46.
92. Баева, И. А. Обзор методов электрического расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – Екатеринбург, 2017. – № 4 (26). – 58 с.
93. Блинкова, С. А. Совершенствование методики расчета энергообеспеченности скоростных пассажирских перевозок на железных дорогах постоянного тока : дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.22.07 / Блинкова Светлана Александровна. – Самара, 2015. – 120 с.
94. Сердинов, С. М. Развитие методов расчета устройств электроснабжения / С. М. Сердинов // Железнодорожный транспорт. – 1981. – № 9. – С. 44–50.
95. Баева, И. А. Дополнение к методике электрического расчета программы КОРТЭС / И. А. Баева ; [отв. за выпуск С. В. Бушуев, канд. техн. наук] // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : материалы Международ. науч.-практ. конф. – Екатеринбург : УрГУПС, 2017. – Вып. 8 (227). – С. 27–32.
96. Чернов, Ю. А. Электроснабжение электрических железных дорог : учеб. пособие / Ю. А. Чернов. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 406 с.
97. Баева, И. А. Особенности расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока при движении двух одиночных грузовых поездов с межпоездным интервалом и одного соединенного поезда / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – Екатеринбург, 2018. – № 4 (30). – С. 49–53.
98. ГОСТ Р 57670—2017 Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. С.52.

99. Палей, Д. А. Расчет пропускной способности двухпутных линий постоянного тока в нормальных и вынужденных условиях / Д. А. Палей, И. С. Берман // Автоматизированные системы управления устройствами электроснабжения, энергетики и локомотивным хозяйством : сб. тр. / Д. А. Палей ; под ред. Р. И. Мирошниченко / ВНИИЖТ. – 1977. – № 580. – С. 108–113.

100. Кисляков, В. А. Об алгоритмах тяговых расчетов при проектировании системы электроснабжения электрифицированных железных дорог / В. А. Кисляков ; ВЗИИТ // Применение ЭВМ и микропроцессорной техники в системе тягового электроснабжения : межвуз. сб. науч. тр. – 1984. – Вып. 121. – С. 49–55.

101. Кисляков, В. А. Тяговые расчеты на ЭВМ для магистральных электрифицированных железных дорог / В. А. Кисляков ; ВЗИИТ // Сб. науч. тр. – 1983. – Вып. 117. – С. 4–16.

102. Mierzejewski, L. Производство тяговых расчетов на ЭВМ при условии изменения напряжения на токоприемнике / L. Mierzejewski, A. Izelag, M. Lewandowski // Trakcja I wagony. – 1983. – 6, № 10. – С. 284–289.

103. Баева, И. А. Учет потерь электрической мощности в трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока // Инновационный транспорт. – Екатеринбург, 2016. – № 3 (21) – 74 с.

104. Комплекс программ для расчетов систем тягового электроснабжения. Руководство пользователя. – Москва, 2011.

105. Федотов, А. А. Вес поезда: ориентиры, проблемы, опыт. Оптимизация системы тягового электроснабжения тяжеловесного движения на основных направлениях [Электронный ресурс] / А. А. Федотов. – URL: <http://www.zeldortrans-journal.narod.ru/publik/explotacion/train/november-05-10.htm> (дата обращения 2018 г.).

106. Отчет ТЭЛ №076-72363-2018 о тягово-энергетических испытаниях с локомотивами серии 2ЭС6, грузовыми соединенными поездами весом 14200 тонн, на полигоне Инская – Барабинск – Московка – Петропавловск – Курган – Челябинск Главный, Курган – Седельниково. – Екатеринбург, 2018. – 64 с.

107. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. – Екатеринбург : ИД «Урал Юр Издат», 2013. – 240 с.

108. Распоряжение ОАО «РЖД» от 25.11.2010г. №2412 «Инфраструктура железнодорожного транспорта на участках обращения грузовых поездов повышенного веса и длины. Технические требования».

109. Аржанников, Б. А. Влияние регулирования напряжения на пропускную способность электрифицированных участков постоянного тока и на расход электрической энергии на тягу поездов / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Транспорт Урала. – Екатеринбург, 2017. – № 4.

110. Виленкин, Н. Я. Метод последовательных приближений / Н. Я. Виленкин. – Москва, 1968. – 108 с. с ил. – (Серия «Популярные лекции по математике»).

111. Аржанников, Б. А., Баева И. А. Влияние организации движения соединенных грузовых поездов на повышение пропускной способности участков, электрифицированных на постоянном токе / Б. А. Аржанникова, И. А. Баева // Известия Транссиба. – 2018. – № 2 (34). – С. 50–64.

112. Баева, И. А. Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения / И. А. Баева // Известия ПГУПС. – Санкт-Петербург, 2019. – № 1.

113. Баева, И. А. Совершенствование методики электрического расчета СТРЕ в программном комплексе КОРТЭС / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Тезисы докладов Десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0», посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России – Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, 9-11 октября 2019 г., Санкт-Петербург. Честь первая. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. – С. 13.

114. Баева, И. А. Алгоритм расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения / И. А. Баева // Материалы третьей Междунар. науч.-практ. конф. с международным уча-

ствием «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» – Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2018. – С. 139-142.

115. Аржанников, Б. А. Разработка системы и устройств тягового электроснабжения с повышенными технико-энергетическими показателями / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Материалы IX Междунар. симп. «Элтранс-2017», 1820 октября. 2017 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2017. – С. 18–24.

116. Баева, И. А. Разработка системы и устройств тягового электроснабжения с повышенными технико-энергетическими показателями / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Тезисы докладов IX международного симпозиума «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта» (Элтранс-2017). – СПб, 2017. – С. 97.

117. Баева, И. А. Разработка системы и устройств тягового электроснабжения с повышенными технико-энергетическими показателями / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Интеграция образовательной, научной и воспитательной деятельности в организациях общего и профессионального образования : м-лы IX Международ. науч.-практ. конф. Отв. за выпуск Н.Ф. Сирина. – 2017. – №. 9 (228). – С. 20-26.

118. Аржанников, Б. А. Экономическая эффективность от организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов / Б. А. Аржанников, Н. А. Афанасьева, И. А. Баева // Транспорт Урала. – 2019. – № 3.

119. Комплексная методика оценки технологической и экономической эффективности тяжеловесного движения и вождения соединенных поездов на железнодорожных линиях, учитывающая их влияние на стоимость жизненного цикла объектов инфраструктуры и тягового подвижного состава. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2016 г. № 2628р.

120. Порядок определения эффективности формирования и вождения соединенных поездов во всех видах движения на основе критериев экономической

целесообразности, состоянии и загрузки инфраструктуры и безопасности движения, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» от 28 декабря 2015 г. №3 109р.

121. Методические рекомендации по расчету единичных и укрупненных расходных ставок для использования в экономических задачах ОАО «РЖД» по перевозочным видам деятельности. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2016 г. № 2628р.

122. Технология вождения соединенных грузовых поездов с использованием системы ИСАВП-РТ локомотивными бригадами ТЧЭ-15 на участке Курган – Каменск-Уральский – Седельниково. Утв. 25.05.2015 г. ОАО «РЖД»; филиал Дирекция тяги; Свердловская дирекция тяги. – Екатеринбург, 2015. – 13 с.

123. Баева, И. А. Влияние снижения времени межпоездного интервала на технико-энергетические показатели системы тягового нерегулируемого и регулируемого электроснабжения / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – Екатеринбург, 2020. – № 1 (35). – С. 51–55.

124. Халуев, О. В. Снятие лимитирующих ограничений по условиям электроснабжения для обеспечения пропуска возрастающего вагонопотока полигона Кузбасс – Северо-Запад / О. В. Халуев, И. А. Пятецкий // Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта: сб. науч. трудов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – Вып. 2 (239). – С. 99-106.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ СТЭ И РЕГУЛИРУЕМОЙ СТРЭ**

Таблица А.1 – Результаты электрического расчета нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТЭ на участке Курган – Колчедан

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Поправочные токовые коэффициенты		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	$\Delta A_{тс} / A_T * 100\%$	Потери ЭЭ в трансфор- маторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{тп} = A_T + \Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение Апп после введения СП, % при U_d кВ	
			К1	К2								кВт*ч	кВт*ч
50	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		27888	1172	26716	4,2	59/4822	32769	-	1,76	2,01
		3,5ст		0,97	27514	1020	26494	3,7	84/5281	32879	-		
		3,7ст		0,91	27282	898	26384	3,3	79/5281	32642	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,03		28582	1855	26727	6,5	74/4689	33345	-		
		3,5ст		0,97	28302	1629	26673	5,8	111/5136	33549	-		
		3,7ст		0,91	28059	1433	26626	5,1	104/5136	33299	-		
60	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		29939	1529	28410	5,1	81/4013	34033	-	2,61	2,00
		3,5ст		0,97	29677	1331	28346	4,5	117/4395	34189	-		
		3,7ст		0,91	29426	1172	28254	4,0	108/4395	33929	-		
	СП [6+6]	3,5 ХХ	1,04		30936	2436	28500	7,9	104/3881	34921	-		
		3,5ст		0,96	30500	2083	28417	6,8	155/4250	34905	-		
		3,7ст		0,90	30216	1833	28383	6,1	142/4250	34608	-		
70	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		31511	1976	29535	6,3	106/3455	35072	-	3,34	1,91
		3,5ст		0,96	31074	1685	29389	5,4	152/3784	35010	-		
		3,7ст		0,90	30799	1482	29317	4,8	140/3784	34723	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,05		32780	3272	29508	10,0	143/3322	36245	-		
		3,5ст		0,95	32206	2739	29467	8,5	211/3639	36056	-		
		3,7ст		0,88	31550	2356	29194	7,5	189/3639	35387	-		
80	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		33566	2297	31269	6,8	125/3043	36734	-	4,89	3,64
		3,5ст		0,96	33197	1967	31230	5,9	176/3333	36706	-		
		3,7ст		0,90	32898	1731	31167	5,3	162/3333	36393	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,07		35437	4112	31325	11,6	184/2911	38532	4		
		3,5ст		0,95	34693	3379	31314	9,7	268/3188	38149	-		
		3,7ст		0,88	34287	2963	31324	8,6	242/3188	37717	-		

Окончание таблицы А.1

V	Название поезда, масса	Напряжение ТПП U_d	Поправочные токовые коэффициенты KI		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	$\Delta A_{тс}/A_T$ *100%	Потери ЭЭ в трансфор- маторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТПП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение АТП после введения СП, % при U_d кВ	
			хх	ст								кВт*ч	кВт*ч
90	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		34046	2790	31256	8,2	144/2705	36895	-	6,29	4,20
		3,5ст		0,95	33453	2356	31097	7	198/2962	36607	-		
		3,7ст		0,88	32762	2023	30739	6,2	178/2962	35902	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,09		36412	5157	31255	14,2	229/2573	39214	6		
		3,5ст		0,92	35133	4052	31081	11,5	324/2818	38275	2		
		3,7ст		0,85	34310	3473	30837	10,1	283/2818	37411	-		
100	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		37839	3242	34597	8,6	170/2470	40479	-	7,92	3,81
		3,5ст		0,95	37254	2745	34509	7,4	231/2705	40190	-		
		3,7ст		0,89	36901	2412	34489	6,5	213/2705	39819	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,11		41060	6483	34577	15,8	287/2337	43684	10		
		3,5ст		0,91	39393	4987	34406	12,7	399/2560	42352	1		
		3,7ст		0,84	38432	4267	34165	11,1	346/2560	41338	-		

Таблица А.2 – Результаты электрического расчета нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ на участке Войновка – Богданович

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Поправочные токовые коэффициенты KI		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	$\Delta A_{тс} / A_T * 100\%$	Потери ЭЭ в трансфор- маторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{тп} = A_T + \Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение Аtp после введения СП, % при U_d , кВ	
			хх	ст								кВт*ч	кВт*ч
50	ОП 6 – 6	3,5хх	1		25704	1119	24585	4,4	48/4754	30506	-	1,68	1,98
		3,5ст		0,97	25357	972	24385	3,8	72/5211	30640	-		
		3,7ст		0,91	25142	855	24287	3,4	67/5211	30420	-		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,03		26334	1821	24513	6,9	62/4623	31019	-		
		3,5ст		0,97	26087	1597	24490	6,1	97/5067	31251	-		
		3,7ст		0,91	25866	1406	24460	5,4	90/5067	31023	-		
60	ОП 6 – 6	3,5хх	1		26495	1582	24913	6,0	68/3835	30398	-	3,24	1,81
		3,5ст		0,97	26299	1376	24923	5,2	103/4204	30606	-		
		3,7ст		0,91	26083	1211	24872	4,6	96/4204	30383	-		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,05		27584	2670	24914	9,7	94/3704	31382	2		
		3,5ст		0,96	27009	2243	24766	8,3	143/4060	31212	-		
		3,7ст		0,89	26743	1969	24774	7,4	131/4060	30934	-		
70	ОП 6 – 6	3,5хх	1		26520	1712	24808	6,5	75/3325	29920	-	4,71	3,47
		3,5ст		0,96	26109	1461	24648	5,6	111/3644	29864	-		
		3,7ст		0,90	25888	1284	24604	5,0	102/3644	29634	-		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,07		28021	3114	24907	11,1	114/3194	31329	3		
		3,5ст		0,94	27301	2556	24745	9,4	171/3500	30972	-		
		3,7ст		0,88	27008	2245	24763	8,3	154/3500	30662	-		
80	ОП 6 – 6	3,5хх	1		29061	2209	26852	7,6	91/2931	32083	-	6,24	4,12
		3,5ст		0,96	28686	1897	26789	6,6	133/3213	32032	-		
		3,7ст		0,90	28446	1667	26779	5,9	123/3213	31782	-		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,09		31135	4172	26963	13,4	150/2800	34085	4		
		3,5ст		0,93	30213	3359	26854	11,1	222/3069	33504	2		
		3,7ст		0,87	29827	2952	26875	9,9	195/3069	33091	-		

Окончание таблицы А.2

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Поправочные токовые коэффициенты K_I		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{\text{элс}} + \Delta A_{\text{ТС}}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{ТС}}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{элс}}$	$\Delta A_{\text{ТС}}/A_T$ *100%	Потери ЭЭ в трансфор- маторах $\Delta A_{\text{тр}}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{ТП}} = A_T + \Delta A_{\text{тр}}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение АТП после введения СП, % при U_d кВ	
			хх	ст								кВт*ч	кВт*ч
90	ОП 6 – 6	3,5хх	1		30933	2457	28476	7,9	104/2640	33677	-	7,04	5,06
		3,5ст		0,95	30290	2070	28220	6,8	148/2893	33331	-		
		3,7ст		0,89	30011	1817	28194	6,1	136/2893	33040	-		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,1		33362	4780	28582	14,3	177/2508	36047	6		
		3,5ст		0,92	32161	3760	28401	11,7	257/2749	35167	1		
		3,7ст		0,86	31737	3299	28438	10,4	226/2749	34712	-		
100	ОП 6 – 6	3,5хх	1		32935	2675	30260	8,1	116/2421	35472	-	7,18	4,10
		3,5ст		0,95	32299	2261	30038	7,0	161/2653	35113	-		
		3,7ст		0,89	32007	1985	30022	6,2	148/2653	34808	-		
	СП [6 + 6]	3,5хх	1,1		35538	5279	30259	14,9	192/2290	38020	6		
		3,5ст		0,92	34299	4152	30147	12,1	279/2509	37087	1		
		3,7ст		0,85	33484	3552	29932	10,6	242/2509	36235	-		

Таблица А.3 – Результаты электрического расчета нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ на участке Подволошная – Вогулка

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Поправочные токовые коэффициенты KI		Расход ЭЭ на тягу $A_{т=А_{элс}+ΔA_{тс}}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $ΔA_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	$ΔA_{тс}/A_{т} * 100\%$	Потери ЭЭ в трансфор- маторах $ΔA_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_{т} + ΔA_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение АТП после введения СП, % при U_d кВ	
			хх	ст								кВт*ч	кВт*ч
50	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		17401	1430	15971	8,2	66/1375	18842	-	5,70	3,43
		3,5ст		0,96	17251	1215	16036	7,0	98/1492	18841	-		
		3,7ст		0,90	17082	1069	16013	6,3	91/1492	18665	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,08		18517	2487	16030	13,4	98/1301	19916	3		
		3,5ст		0,93	18010	2002	16008	11,1	143/1411	19564	1		
		3,7ст		0,87	17767	1758	16009	9,9	127/1411	19305	-		
60	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		18481	1711	16770	9,3	79/1153	19713	1	7,34	4,08
		3,5ст		0,95	18216	1425	16791	7,8	117/1251	19584	-		
		3,7ст		0,89	18021	1254	16767	7,0	106/1251	19375	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,1		19948	3166	16782	15,9	125/1087	21160	3		
		3,5ст		0,91	19126	2442	16684	12,8	176/1179	20481	1		
		3,7ст		0,85	18833	2145	16688	11,4	153/1179	20165	-		
70	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		18995	1946	17049	10,2	91/1021	20107	1	9,64	6,37
		3,5ст		0,94	18600	1596	17004	8,6	129/1108	19837	-		
		3,7ст		0,88	18395	1402	16993	7,6	118/1108	19621	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,13		20953	3867	17086	18,5	154/939	22046	5		
		3,5ст		0,89	19821	2859	16962	14,4	207/1018	21046	2		
		3,7ст		0,84	19673	2568	17105	13,1	180/1018	20871	-		
80	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		20007	2065	17942	10,3	99/922	21028	1	10,45	6,01
		3,5ст		0,94	19613	1697	17916	8,7	139/1001	20753	-		
		3,7ст		0,88	19405	1489	17916	7,7	127/1001	20533	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,14		22213	4235	17978	19,1	172/840	23225	5		
		3,5ст		0,90	21295	3199	18096	15,0	236/911	22442	2		
		3,7ст		0,83	20661	2745	17916	13,3	196/911	21768	-		

Окончание таблицы А.3

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Поправочные токовые коэффициенты KI		Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{элс} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	$\Delta A_{тс} / A_T * 100\%$	Потери ЭЭ в трансфор- маторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В	Увеличение АТП после введения СП, % при U_d , кВ	
			хх	ст								кВт*ч	кВт*ч
90	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		20343	2145	18198	10,5	103/840	21286	1	11,35	5,84
		3,5ст		0,94	19956	1772	18184	8,9	142/911	21009	-		
		3,7ст		0,88	19754	1554	18200	7,9	130/911	20795	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,15		22745	4508	18237	19,8	183/774	23702	5		
		3,5ст		0,88	21384	3264	18120	15,3	239/840	22463	2		
		3,7ст		0,82	20966	2856	18110	13,6	204/840	22010	-		
100	ОП 6 – 6	3,5 хх	1		19701	2109	17592	10,7	97/790	20588	-	11,90	6,51
		3,5ст		0,94	19311	1746	17565	9,0	134/849	20294	-		
		3,7ст		0,88	19121	1531	17590	8,0	124/849	20094	-		
	СП [6+6]	3,5 хх	1,16		22148	4515	17633	20,4	183/708	23039	4		
		3,5ст		0,88	20857	3266	17591	15,7	240/768	21865	2		
		3,7ст		0,82	20433	2863	17570	14,0	202/768	21403	-		

Таблица А.4 – Результаты электрического расчета нерегулируемой СТЭ с временем межпоездного интервала от 1 минуты до 40 минут

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Количество поездов	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{э\text{лс}} + \Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{э\text{лс}}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП} = A_T + \Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В
км/ч	тыс. т	кВ	шт	мин	хх	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт
50	СП [6+6]	3,5 хх	2	1	1,04	26590	1856	24734	63/4623	31276	-
	ОП 6-6	3,5 хх	2	5	1,02	26185	1291	24894	51/4667	30903	-
			2	6	1,02	26187	1256	24931	50/4681	30918	-
			2	7	1,02	26184	1233	24951	50/4696	30930	-
			2	8	1,02	26188	1210	24978	50/4710	30948	-
			2	9	1,02	26190	1185	25005	50/4725	30965	-
			2	10	1,02	26190	1164	25026	50/4740	30980	-
			2	11	1,02	26195	1142	25053	50/4754	30999	-
			2	15	1,01	25975	1053	24922	45/4813	30833	-
			2	20	1,01	26014	1016	24998	41/4885	30940	-
			2	30	1,01	26051	994	25057	38/5031	31120	-
2	40	1,01	26079	992	25087	35/5177	31291	-			
60	СП [6+6]	3,5 хх	2	1	1,07	28061	2772	25289	97/3690	31848	2
	ОП 6-6	3,5 хх	2	5	1,02	26969	1821	25148	72/3748	30789	-
			2	6	1,02	26958	1798	25160	73/3763	30794	-
			2	7	1,02	26950	1773	25177	74/3777	30801	-
			2	8	1,02	26947	1739	25208	75/3792	30814	-
			2	9	1,02	26963	1691	25272	73/3806	30842	-
			2	10	1,02	26984	1645	25339	71/3821	30876	-
			2	11	1,02	27007	1615	25392	69/3835	30911	-
			2	15	1,01	26819	1523	25296	60/3894	30773	-
			2	20	1,01	26838	1491	25347	59/3967	30864	-
			2	30	1,01	26894	1480	25414	53/4113	31060	-
2	40	1,01	26925	1484	25441	50/4258	31233	-			

Продолжение таблицы А.4

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Количество поездов	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент	Расход ЭЭ на тягу $A_T = A_{\text{элс}} + \Delta A_{\text{тс}}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{элс}}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{тр}}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{тп}} = A_T + \Delta A_{\text{тр}}$	Количество МПЗ менее 2700 В
км/ч	тыс. т	кВ	шт	мин	хх	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт
70	СП [6+6]	3,5 хх	2	1	1,08	28216	3172	25044	116/3179	31511	3
	ОП 6-6	3,5 хх	2	5	1,02	26954	1992	24962	81/3238	30273	-
			2	6	1,02	26924	1975	24949	84/3252	30260	-
			2	7	1,02	26908	1933	24975	86/3267	30261	-
			2	8	1,02	26923	1871	25052	84/3281	30288	-
			2	9	1,02	26955	1815	25140	81/3296	30332	-
			2	10	1,02	26986	1781	25205	78/3310	30374	-
			2	11	1,02	27027	1754	25273	74/3325	30426	-
			2	15	1,01	26801	1672	25129	70/3383	30254	-
			2	20	1,01	26875	1651	25224	63/3456	30394	-
			2	30	1,01	26918	1647	25271	59/3602	30579	-
			2	40	1,01	26940	1651	25289	56/3748	30744	-
80	СП [6+6]	3,5 хх	2	1	1,09	31041	4169	26872	150/2785	33976	4
	ОП 6-6	3,5 хх	2	5	1,02	29391	2614	26777	108/2844	32343	2
			2	6	1,02	29359	2562	26797	111/2858	32328	1
			2	7	1,02	29380	2467	26913	109/2873	32362	1
			2	8	1,02	29438	2380	27058	104/2888	32430	-
			2	9	1,02	29492	2331	27161	99/2902	32493	-
			2	10	1,01	29254	2250	27004	93/2917	32264	-
			2	11	1,01	29282	2225	27057	90/2931	32303	-
			2	15	1,0	29121	2131	26990	85/3004	32210	-
			2	20	1,0	29192	2113	27079	79/3077	32348	-
			2	30	1,0	29256	2117	27139	73/3223	32552	-
			2	40	1,0	29286	2126	27160	70/3369	32725	-

Окончание таблицы А.4

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Количество поездов	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент	Расход ЭЭ на тягу $A_{т}=A_{элс}+\Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП}=A_{т}+\Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В
км/ч	тыс. т	кВ	шт	мин	хх	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт
90	СП [6+6]	3,5 хх	2	1	1,11	33605	4867	28738	180/2494	36279	6
	ОП 6-6	3,5 хх	2	5	1,04	31857	3051	28806	134/2552	34543	2
			2	6	1,04	31859	2940	28919	134/2567	34560	1
			2	7	1,03	31616	2771	28845	126/2581	34323	1
			2	8	1,03	31689	2591	29098	120/2596	34405	-
			2	9	1,03	31746	2641	29105	114/2610	34470	-
			2	10	1,02	31488	2555	28933	109/2625	34222	-
			2	11	1,02	31495	2530	28965	108/2640	34243	-
			2	15	1,0	31030	2382	28648	95/2713	33838	-
			2	20	1,0	31098	2366	28732	89/2785	33900	-
			2	30	1,0	31180	2380	28800	81/2931	34192	-
2	40	1,0	31204	2390	28814	79/3077	34360	-			
100	СП [6+6]	3,5 хх	2	1	1,13	36324	5564	30760	202/2275	38801	6
	ОП 6-6	3,5 хх	2	5	1,05	33819	3336	30483	150/2333	36302	2
			2	6	1,04	33861	3182	30679	146/2348	36355	1
			2	7	1,04	33924	3064	30860	140/2363	36427	1
			2	8	1,03	33677	2927	30750	131/2377	36185	-
			2	9	1,03	33733	2875	30858	126/2392	36251	-
			2	10	1,02	33455	2779	30676	120/2406	35981	-
			2	11	1,02	33488	2747	30741	117/2421	36026	-
			2	15	1,01	33306	2641	30665	102/2479	35887	-
			2	20	1,01	33392	2637	30755	94/2552	36038	-
			2	30	1,01	33474	2654	30820	87/2698	36259	-
2	40	1,01	33497	2665	30832	85/2844	36426	-			

Таблица А.5 – Результаты электрического расчета регулируемой СТЭ с временем межпоездного интервала от 1 минуты до 40 минут

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Количество поездов	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент	Расход ЭЭ на тягу $A_T=A_{элс}+\Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{ТП}=A_T+\Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В
км/ч	тыс. т	кВ	шт	мин	ст	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт
50	СП [6+6]	3,7 ст	2	1	0,95	26219	1444	24775	92/5067	31378	-
	ОП 6-6	3,7 ст	2	5	0,93	25693	893	24800	70/5211	30974	-
			2	6	0,93	25671	965	24706	71/5131	30873	-
			2	7	0,93	25691	946	24745	71/5163	30925	-
			2	8	0,93	25692	928	24764	71/5179	30942	-
			2	9	0,93	25692	909	24783	70/5195	30957	-
			2	10	0,93	25693	893	24800	70/5211	30974	-
			2	11	0,93	25696	877	24819	69/5227	30992	-
			2	15	0,93	25702	829	24873	63/5290	31055	-
			2	20	0,93	25707	806	24901	57/5370	31134	-
			2	30	0,92	25445	781	24664	50/5530	31025	-
2	40	0,92	25446	780	24666	47/5690	31183	-			
60	СП [6+6]	3,7 ст	2	1	0,95	27183	2035	25148	135/4060	31378	-
	ОП 6-6	3,7 ст	2	5	0,93	26652	1398	25254	105/4124	30881	-
			2	6	0,92	26365	1306	25059	104/4172	30641	-
			2	7	0,93	26649	1360	25289	106/4156	30911	-
			2	8	0,92	26365	1306	25059	104/4172	30641	-
			2	9	0,92	26367	1271	25096	101/4188	30656	-
			2	10	0,92	26371	1238	25133	98/4204	30673	-
			2	11	0,92	26377	1217	25160	94/4220	30691	-
			2	15	0,92	26389	1180	25209	83/4284	30756	-
			2	20	0,92	26391	1165	25226	78/4363	30825	-
			2	30	0,91	26110	1136	24974	70/4523	30703	-
2	40	0,91	26112	1137	24975	69/4683	30864	-			

Продолжение таблицы А.5

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Количество поездов	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент	Расход ЭЭ на тягу $A_{т}=A_{элс}+\Delta A_{тс}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{тс}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{элс}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{тр}$ нагр/хх	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{тп}=A_{т}+\Delta A_{тр}$	Количество МПЗ менее 2700 В
км/ч	тыс. т	кВ	шт	мин	ст	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт.
70	СП [6+6]	3,7 ст	2	1	0,95	27244	2285	24959	156/3500	30900	-
	ОП 6-6	3,7 ст	2	5	0,92	26457	1499	24958	114/3564	30135	-
			2	6	0,92	26404	1482	24922	117/3564	30085	-
			2	7	0,92	26449	1450	24999	119/3596	30164	-
			2	8	0,92	26451	1404	25047	116/3612	30179	-
			2	9	0,92	26457	1364	25093	112/3628	30197	-
			2	10	0,92	26461	1342	25119	107/3644	30212	-
			2	11	0,91	26177	1297	24880	99/3660	29936	-
			2	15	0,91	26183	1271	24912	92/3724	29999	-
			2	20	0,91	26194	1262	24932	83/3804	30081	-
			2	30	0,91	26199	1261	24938	79/3964	30242	-
2	40	0,91	26198	1261	24937	78/4124	30400	-			
80	СП [6+6]	3,7 ст	2	1	0,95	29880	2963	26917	196/3069	33145	-
	ОП 6-6	3,7 ст	2	5	0,91	28734	1928	26806	148/3133	32015	-
			2	6	0,91	28645	1885	26760	152/3133	31930	-
			2	7	0,91	28733	1817	26916	148/3165	32046	-
			2	8	0,91	28740	1758	26982	140/3181	32061	-
			2	9	0,90	28438	1688	26750	129/3197	31764	-
			2	10	0,90	28446	1667	26779	123/3213	31782	-
			2	11	0,90	28449	1652	26797	119/3229	31797	-
			2	15	0,90	28455	1628	26827	111/3293	31859	-
			2	20	0,90	28465	1621	26844	102/3372	31939	-
			2	30	0,90	28469	1621	26848	97/3532	32098	-
2	40	0,90	28470	1623	26847	96/3692	32258	-			

Окончание таблицы А.5

V	Название поезда, масса	Напряжение ТП U_d	Количество поездов	Время МПИ	Поправочный токовый коэффициент	Расход ЭЭ на тягу $A_{т}=A_{\text{элс}}+\Delta A_{\text{тс}}$	Потери ЭЭ в тяговой сети $\Delta A_{\text{тс}}$	Расход ЭЭ в ЭПС $A_{\text{элс}}$	Потери ЭЭ в трансформаторах $\Delta A_{\text{тр}} \text{ нагр/хх}$	Расход ЭЭ на тягу ТП $A_{\text{тп}}=A_{\text{т}}+\Delta A_{\text{тп}}$	Количество МПЗ менее 2700 В
км/ч	тыс. т	кВ	шт	мин	ст	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	кВт*ч	шт.
90	СП [6+6]	3,7 ст	2	1	0,96	32192	3398	28794	232/2749	35173	-
	ОП 6-6	3,7 ст	2	5	0,92	30982	2205	28777	180/2813	33975	-
			2	6	0,92	30946	2124	28822	178/2813	33937	-
			2	7	0,91	30659	2000	28659	167/2845	33671	-
			2	8	0,91	30671	1949	28722	157/2861	33689	-
			2	9	0,91	30678	1919	28759	148/2877	33703	-
			2	10	0,91	30683	1899	28784	142/2893	33718	-
			2	11	0,91	30685	1886	28799	140/2909	33734	-
			2	15	0,90	30366	1824	28542	123/2973	33462	-
			2	20	0,90	30374	1819	28555	115/3053	33542	-
			2	30	0,90	30378	1819	28559	110/3213	33701	-
2	40	0,90	30379	1820	28559	110/3372	33861	-			
100	СП [6+6]	3,7 ст	2	1	0,96	34365	3746	30619	255/2509	37129	-
	ОП 6-6	3,7 ст	2	5	0,92	33040	2408	30632	202/2573	35815	-
			2	6	0,92	32938	2295	30643	195/2573	35706	-
			2	7	0,91	32699	2173	30526	181/2605	35485	-
			2	8	0,91	32709	2125	30584	170/2621	35500	-
			2	9	0,91	32717	2096	30621	162/2637	35516	-
			2	10	0,91	32723	2075	30648	155/2653	35531	-
			2	11	0,91	32729	2060	30669	149/2669	35547	-
			2	15	0,90	32391	1994	30397	128/2733	35252	-
			2	20	0,90	32399	1992	30407	120/2813	35332	-
			2	30	0,90	32403	1993	30410	116/2973	35492	-
2	40	0,90	32401	1993	30408	116/3133	35650	-			

АКТЫ
О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
РАБОТЫ



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ТРАНСЭНЕРГО
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ**

ул. Челюскинцев, 116,
г. Екатеринбург, 620013,
Тел.: (343) 358-48-23, факс: (343) 358-57-27,
E-mail: Nees@svrw.ru

«11» 02 2019 г. №ИСХ-27 /СВЕРДНТЭ

На № _____ от _____

Акт

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Аржанников Борис Алексеевич, Баева Ирина Анатольевна.
2. Предмет внедрения: методика расчета системы тягового электроснабжения (СТЭ) постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения.
3. Место внедрения: Свердловская железная дорога, филиал ОАО «Российские железные дороги», филиал Трансэнерго, Свердловская дирекция по энергообеспечению, Свердловская дистанция электроснабжения.
4. Техничко-экономический эффект: предложенная методика направлена на получение достоверных результатов электрического расчета системы тягового электроснабжения при определении ряда эксплуатационно-технических задач (пропускная способность; межпоездные интервалы; усиление СТЭ; температурные режимы устройств СТЭ и др.). Экономия на оплате труда работников дистанций электроснабжения за счет сокращения времени проведения расчетов СТЭ при введении устройств регулирования напряжения.
5. Дата внедрения: 11.02.2019г.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применять указанную методику для расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении в работу устройств регулирования.

Начальник дирекции

Начальник электротехнической
лаборатории



О.В. Халуев

И.А. Пятецкий

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования

**«Уральский государственный
университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)**

Колмогорова ул., д. 66, г. Екатеринбург,
620034

Тел./факс: (343) 221-24-44

E-mail: rector@usurt.ru

<http://www.usurt.ru>

ОКПО 01116035, ОГРН 1026602950065

ИНН/КПП 6659014366/665901001

от 13.11.2019 № 184

на № _____ от _____ г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Баевой Ирины Анатольевны

г. Екатеринбург

12 ноября 2019 г.

Комиссия в составе:

председатель: директор Академии корпоративного образования (АКО) УрГУПС, к.т.н.,
доцент Васильев И.Л.; директор Института дополнительного профессионального
образования (ИДПО) АКО УрГУПС, к.т.н., доцент Штин А.Н.; начальник Учебно-
методического отдела ИДПО АКО УрГУПС, к.т.н., доцент Шумаков К.Г.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Совершенство-
вание режимов работы и расчета системы тягового нерегулируемого и регулируемого
электрооборудования постоянного тока 3,0 кВ», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – «Подвижной состав железных
дорог, тяга поездов и электрификация», использованы для углубленного изучения влияния
пропускной способности участков (увеличения скорости движения, а также снижение
времени межпоездного интервала) на расход электрической энергии на тягу, на величину
напряжения на токоприемнике электровоза и на удельный расход электрической энергии
на расход электрической энергии на тягу, в т. ч. потери электрической энергии в тяговой
сети при повышении квалификации и профессиональной переподготовке руководителей и
специалистов ОАО «РЖД» ФГБОУ ВО УрГУПС

Председатель комиссии

Члены комиссии



 /Васильев И.Л./

 /Штин А.Н./

 /Шумаков К.Г./

ФОРАТЕК ЭНЕРГОТРАНССТРОЙ

620017, Россия, г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 33, а/я 750. ИНН: 7716236962
 Тел.: +7 (343) 346-15-20, факс: +7 (343) 376-15-20
<https://fets.ru>, e-mail: 1520@fets.ru

Исх. № 68/01-01 от 17.01.2020г.
 на № _____ от _____

Акт

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Аржанников Борис Алексеевич, Баева Ирина Анатольевна.
2. Предмет внедрения: методика электрического расчета нерегулируемой системы тягового электроснабжения (СТЭ) и регулируемой системы тягового электроснабжения (СТРЭ) постоянного тока 3,0 кВ при организации движения соединенных грузовых поездов.
3. Место внедрения: АО «Форатек ЭнергоТрансСтрой».
4. Техничко-экономический эффект: предложенная методика совместно с разработанной программой для ЭВМ «Определение поправочного токового коэффициента» позволяет снижать трудозатраты и производить достоверные электрические расчеты по оценке технико-энергетической эффективности устройств электроснабжения, в т. ч. при расчете пропускной способности участков (направлений).
5. Дата внедрения: 15.01.2020 г.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применение результатов научно-исследовательской работы при проектировании, усилении и модернизации электрифицированных участков, а также повышении энергетической эффективности СТЭ и СТРЭ при пропуске соединенных грузовых поездов.

Генеральный Директор

Начальник проектного отдела



К.А. Грехов

Д.В. Глазов

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ
ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614664

Автоматизированная обработка результатов электрических расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (РУ)*

Автор: *Баева Ирина Анатольевна (РУ)*



Заявка № 2019613585

Дата поступления 04 апреля 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 10 апреля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614816

Определение токоограничивающего коэффициента при выполнении электрических расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (RU)*

Авторы: *Аржанников Борис Алексеевич (RU),
Баева Ирина Анатольевна (RU)*

Заявка № 2019613563

Дата поступления 04 апреля 2019 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 15 апреля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

