

На правах рукописи



**Баева Ирина Анатольевна**

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

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор  
Аржанников Борис Алексеевич

**Официальные оппоненты:**

Черемисин Василий Титович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог».

Гаранин Максим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС), проректор по научной работе и инновациям.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Защита состоится «18 » декабря 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, ауд. Б2-15, зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «19» октября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Одной из задач энергетической стратегии компании ОАО «Российские железные дороги» на перспективу до 2030 года является энергетическое обеспечение перевозочного процесса. Стратегия развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2030 года, Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации, а также решение научно-технического совета ОАО «Российские железные дороги» по вопросам организации движения тяжеловесных грузовых поездов предусматривают повышение весовых норм, позволяющих обеспечить возрастающие объемы грузовых перевозок. Распоряжением ОАО «РЖД» № 1799р от 1 сентября 2016 г. 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 моделирования. 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, М. П. Бадёр, А. Т. Бурков, К. Г. Марквардт, А. Н. Маринкин, И. О. Набойченко, В. Н. Пупынин, В. Т. Черемисин, Careglio Giuseppe, Mauger Lucio, Миура Адзуки;

– моделирование системы тягового электроснабжения: А. С. Вильгельм, М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Г. Г. Марквардт, В. Е. Марский, Р. И. Мирошниченко, А. Н. Митрофанов, Э. В. Тер-Оганов, Т. П. Третьяк, В. Т. Черемисин, Yulong Che, Shaobing Yang, Gang Zhang, P. Arboleya, Pablo Martínez Fernandez.

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 транс-

порта» (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.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТранПромЭк-2019») (г. Ростов-на-Дону, 2019 г.), расширенном заседании кафедры «Электроснабжения 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационного исследования, дано описание степени ее разработанности, поставлены цель и задачи, определены объект и область исследования. Сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость научно-исследовательской работы, описана методология и методы исследования, применяемые в диссертации,

приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения о степени достоверности и апробации результатов диссертационного исследования.

**В первой главе** произведен обзор существующих способов усиления СТЭ на постоянном токе, а также методов исследования работы и пропускной способности участков по устройствам электроснабжения. Рассмотрены основные положения теории расчета системы тягового регулируемого электроснабжения.

Разработаны критерии оценки технико-энергетической эффективности двух вариантов движения поездов (одного СП и двух ОП), в т. ч. при сравнении работы тяговых подстанций по естественным внешним характеристикам (нерегулируемая СТЭ) и стабилизированным внешним характеристикам (СТРЭ) состоящие из:

1) минимизация удельного расхода ЭЭ  $a_{\text{тп}}$  и потерь ЭЭ в тяговой сети  $A_{\text{тс}}$  и трансформаторах ТП  $\Delta A_{\text{тр}}$  (выражения 1.1, 1.3 и 1.4);

2) напряжение на токоприемнике электровоза  $U_{\text{э}}$  должно быть в пределах от минимального  $U_{\text{эmin}}$  и до максимального  $U_{\text{эmax}}$  допустимого уровня (выражение 1.2);

3) определение энергетической эффективности системы БАРН  $\Delta_{\text{барн}}$  (выражение 1.5).

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{\text{тп}} = \sum_{i=1}^k a_{\text{тпи}} \rightarrow \min; \quad (1.1) \\ U_{\text{эmin}} \leq U_{\text{э}} \leq U_{\text{эmax}}; \quad (1.2) \\ \Delta A_{\text{тс}} = \sum_{i=1}^k \Delta A_{\text{тси}} \rightarrow \min; \quad (1.3) \\ \Delta A_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^k \Delta A_{\text{три}} \rightarrow \min; \quad (1.4) \\ \Delta_{\text{барн}} = \frac{a_{\text{тп(сущ)}} - a_{\text{тп(барн)}}}{a_{\text{тп(сущ)}}} * 100\%. \quad (1.5) \end{array} \right.$$

где  $k$  – количество вариантов электрического расчета;  $a_{\text{тп(сущ)}}$  – удельный расход ЭЭ существующей СТЭ;  $a_{\text{тп(барн)}}$  – удельный расход ЭЭ с применением системы БАРН.

**Вторая глава** посвящена совершенствованию методики электрического расчета СТЭ и СТРЭ при движении ОП и СП. Рассмотрены особенности выполнения электрического расчета в ПК КОРТЭС. При выполнении электрических расчетов СТЭ (без использования дополнительных методик) при пропуске с одинаковой тонно-километровой работой одного СП и двух ОП расход ЭЭ ЭПС, полученный в результате электрического расчета при пропуске СП, оказался ниже, чем при пропуске двух ОП. Это связано с тем, что суммарный ток двух электровозов соединенного поезда вызывает снижение напряжения на токопри-

емнике электровозов и, соответственно, скорости движения и расхода ЭЭ. Следовательно, в разрабатываемой дополнительной методике 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.

При выполнении электрического расчета в ПК КОРТЭС, с введением устройств регулирования напряжения системой БАРН на заданном уровне стабилизации 3500 В, 3600 В и 3700 В токи электровозов остаются неизменными (полученные по результатам тягового расчета). В результате увеличиваются: расход ЭЭ на тягу, потери ЭЭ в тяговой сети и в трансформаторах тяговых подстанций. Основа разработки дополнения к методике расчета СТРЭ состоит в сохранении неизменными технической скорости движения  $V$  и расхода ЭЭ за счет снижения среднего тока электровоза  $I_3$  при повышении напряжения  $U_3$ . В результате снижаются потери ЭЭ: в тяговой сети  $\Delta A_{\text{тс}}$ , в трансформаторах  $\Delta A_{\text{тр}}$  и регулирующем устройстве БАРН  $\Delta A_{\text{ру}}$  (формула 2)

$$A_{\text{тп}} = A_{\text{т}} + \Delta A_{\text{тр}} + \Delta A_{\text{ру}} = A_{\text{эпс}} + \Delta A_{\text{тс}} + \Delta A_{\text{тр}} + \Delta A_{\text{ру}}. \quad (2)$$

Разработанное дополнение к методике проведения электрических расчетов СТЭ (рисунок 1) основано на обеспечении равенства расхода ЭЭ электровозом при пропуске двух ОП  $A_{\text{эпс, б}}$  и при пропуске одного СП  $A_{\text{эпс}}$ , т.е. при одинаковой механической работе при одинаковых технических скоростях и массе поезда.

Второй режим работы преобразователей ТП по стабилизированным внешним характеристикам на уровне напряжений от 3500 В до 3700 В – продолжение развития метода электрического расчета СТРЭ участка с повышенным стабилизированным напряжением на шинах ТП. За базовый расход ЭЭ электровозов  $A_{\text{эпс, б}}$  полученный с использованием ПК КОРТЭС принимается расход ЭЭ ЭПС при работе ТП по естественным внешним характеристикам.

Разработанное дополнение к методике заключается в изменении величины токов электровоза, полученных по результатам тягового расчета путем введения поправочных токовых коэффициентов  $K_{I_{\text{хх}}} > 1$  (при пропуске СП) и  $K_{I_{\text{ст}}} < 1$  (при введении устройств регулирования напряжения).

Алгоритм электрического расчета (рисунок 1) дополнен оценкой уровня напряжения на токоприемнике электровоза  $U_{\text{э min}} \leq U_3 \leq U_{\text{э max}}$ .

Определение поправочных токовых коэффициентов  $K_{I_{\text{хх}}} > 1$  и  $K_{I_{\text{ст}}} < 1$  производится с использованием «метода итерации» (последовательного приближения расчетной величины  $A_{\text{эпс}}$  к базовой величине  $A_{\text{эпс, б}}$ , полученной ранее с заданной

погрешностью, например не более 1 %). При возможном (более 1 %) различии в расходе ЭЭ  $A_{\text{эпс}}$  выполняется уточнение (формула 3) расчетного поправочного токового коэффициента  $K_{I(\text{расч})}$  с учетом погрешности (формула 4)

$$K_{I(\text{уточн})} = K_{I(\text{расч})} \left( \frac{1 \pm \delta \%}{100 \%} \right), \quad (3)$$

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

$$\delta \% = 100 - \frac{A_{\text{эпс}}}{A_{\text{эпс, б}}} 100 \%. \quad (4)$$

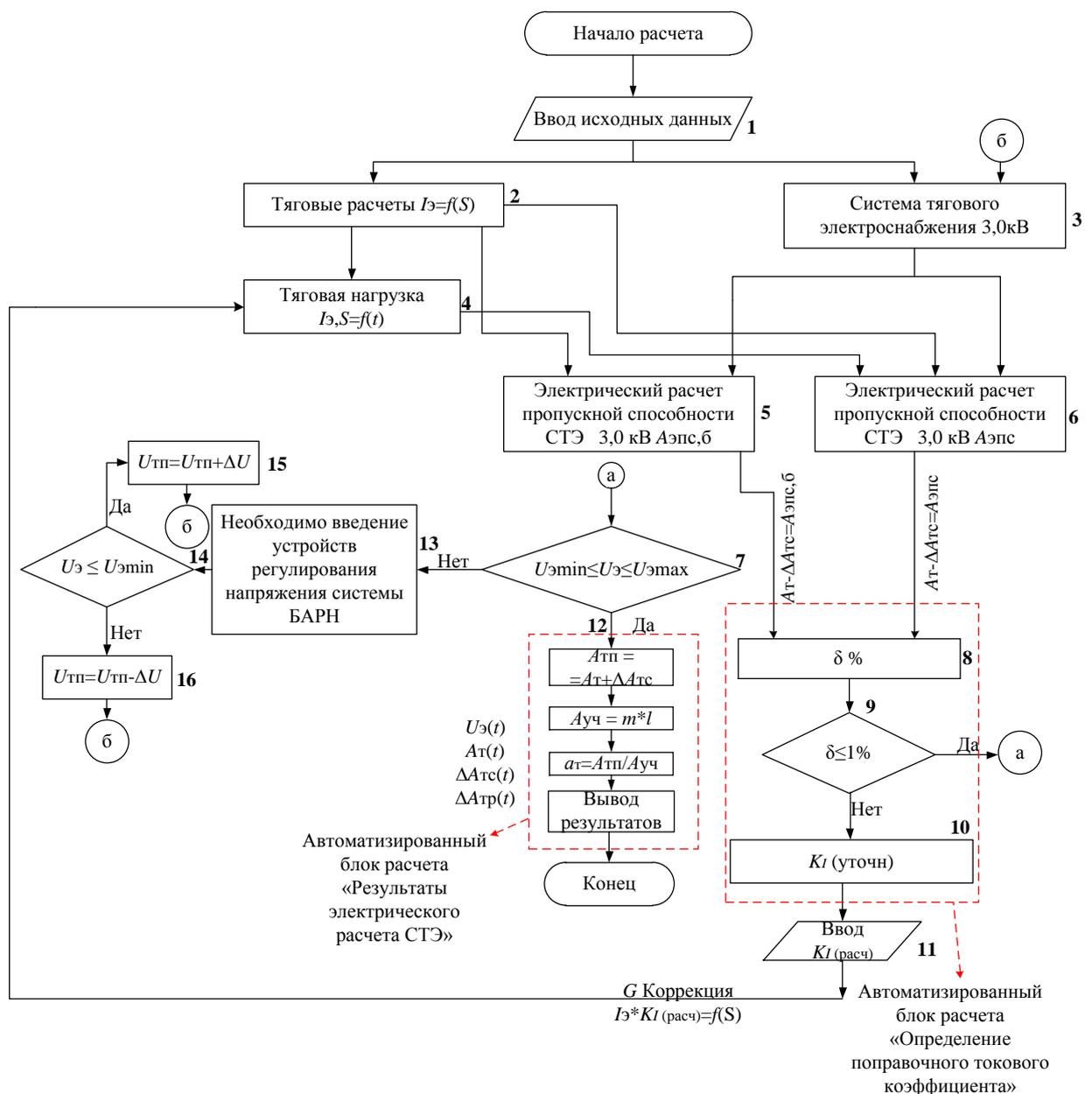


Рисунок 1 – Алгоритм электрического расчета энергетической эффективности СТЭ и СТРЭ при движении одиночных и соединенных поездов

Далее при необходимости производится следующий итерационный расчет СТЭ с учетом полученного уточненного поправочного коэффициента.

При выполнении проверки изменения технико-энергетических показателей нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТРЭ с использованием поправочных токовых коэффициентов на примере реального участка с отсутствием движения в четном направлении и с движением в нечетном направлении одного СП массой [6000 т + 6000 т] или двух ОП с временем межпоездного интервала 10 минут, массой каждого по 6000 т при увеличении скорости движения поездов от 50 км/ч до 100 км/ч с шагом 10 км/ч определено:

1) при  $K_{Ixx} = 1$  произошло снижение  $A_T$  после введения СП от 0,41 % до 1,68 % по сравнению с двумя ОП, что подтверждает снижение скорости движения и пропускной способности. Потери ЭЭ в тяговой сети  $\Delta A_{Tc}$  оказались выше при СП по сравнению с пропуском ОП;

2) при  $K_{Ixx} > 1$ . Полученный при пропуске одного СП и двух ОП расход ЭЭ ЭПС совпадает (с погрешностью расчета менее 1 %), расход ЭЭ на тягу возрастает от 2,43 % до 7,84 % при пропуске одного СП по сравнению с пропуском двух ОП.

При режиме работы регулируемой СТРЭ со стабилизацией напряжения на шинах тяговых подстанциях  $U_{ct} = 3700$  В без повышения скорости движения (с введением поправочного токового коэффициента  $K_{Ict} < 1$ ) и с  $U_{xx} = 3500$  В равной скорости движения в режиме СТЭ ( $K_{Ict} = 1$ ) происходит снижение потерь ЭЭ в тяговой сети на 15–20 %, а также снижение расхода ЭЭ на тяговых подстанциях на 0,6–1,8 %. Расход электрической энергии по счетчикам электровозов остается практически постоянным (погрешность менее 1 %).

**Третья глава** посвящена моделированию двух режимов работы системы тягового электроснабжения при движении одиночных или соединенных поездов, а также оценки технико-энергетической эффективности СТЭ.

Рассмотрено влияние СП на потери ЭЭ в тяговой сети системы с устройствами регулирования напряжения. Потери ЭЭ на участках тяговой сети  $l_A$  и  $l_B$  межподстанционной зоны (МПЗ) протяженностью  $l = l_A + l_B$  однопутного участка с двусторонним питанием, со стабилизированным на одном уровне напряжении тяговых подстанций при пропуске одного одиночного поезда определяются по формуле

$$\Delta A_{Tc\_1оп} = rt_T I_A^2 l_A + rt_T I_B^2 (l - l_A) = rt_T I_A^2 l \left( 1 - \frac{l_A}{l} \right). \quad (5)$$

Когда на межподстанционной зоне находятся два ОП с разделенным по времени межпоездным интервалом (рисунок 2), потери ЭЭ в тяговой сети при движении двух одиночных поездов будут иметь вид формулы (6)

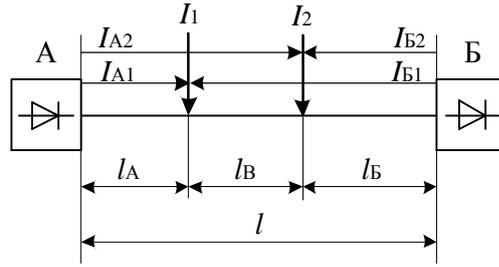


Рисунок 2 – Расчетная схема для двух одиночных поездов

$$\frac{1}{rt_T} \Delta A_{\text{тс\_2оп}} = \left[ I_1 \left( \frac{l-l_A}{l} \right) \right]^2 l_A + \left[ I_1 \frac{l_A}{l} \right]^2 (l-l_A) + \left[ I_2 \frac{l-(l_A+l_B)}{l} \right]^2 (l_A+l_B) + \left[ I_2 \left( \frac{l_A+l_B}{l} \right) \right]^2 (l-l_A-l_B) = I_1^2 l_A \left[ 1 - \frac{l_A}{l} \right] + I_2^2 (l_A+l_B) \left[ 1 - \left( \frac{l_A+l_B}{l} \right) \right] \quad (6)$$

При пропуске соединенного поезда  $l_B = 0$ , тогда рисунок 2 будет соответствовать расчетной схеме для одного ОП, но с суммарным током двух поездов  $I_{\Sigma} = I_1 + I_2$ . Следовательно, с учетом формулы (5) потери ЭЭ в тяговой сети для СП будут определяться по формуле:

$$\frac{1}{rt_T} \Delta A_{\text{тс\_сп}} = (I_1 + I_2)^2 l_A \left( 1 - \frac{l_A}{l} \right). \quad (7)$$

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 (5) и (6) следует, что потери ЭЭ в тяговой сети при движении двух ОП меньше, чем при движении одного СП.

Проведено моделирование работы двух режимов работы СТЭ (нерегулируемая СТЭ и регулируемая СТЭ) при движении одиночных или соединенных поездов участков с относительной сложностью профиля пути, с различными локомотивами и регулированием скорости движения от 50 до 100 км/ч. На рисунке 3 представлены результаты одного участка Курган – Колчедан, где показан расход электрической энергии: электровозов  $A_{\text{эпс}}$  (1); с учетом потерь электрической энергии 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) при движении только в нечетном направлении на участке одного СП (сплошная линия) [6000 т + 6000 т] и двух ОП (пунктирная линия) по 6000 т с временем межпоездного интервала 10 мин при напряжении на шинах тяговых подстанциях участка:  $a$  – естественные с  $U_{\text{хх}} = 3500$  В;  $b$  – стабилизированные  $U_{\text{ст}} = 3700$  В. В диссертации также представлены результаты моделирования участков Войновка-Богданович и Вогулка-Подволошная.

Определены критерии оценки технико-энергетической эффективности движения СП и применения устройств регулирования напряжения. При организации движения СП увеличивается количество МПЗ с напряжением на токоприемнике менее 2700 В, по сравнению с двумя ОП. При введении на участках устройств регулирования напряжения количество зон равно нулю, что подтверждает ее энергетическую эффективность.

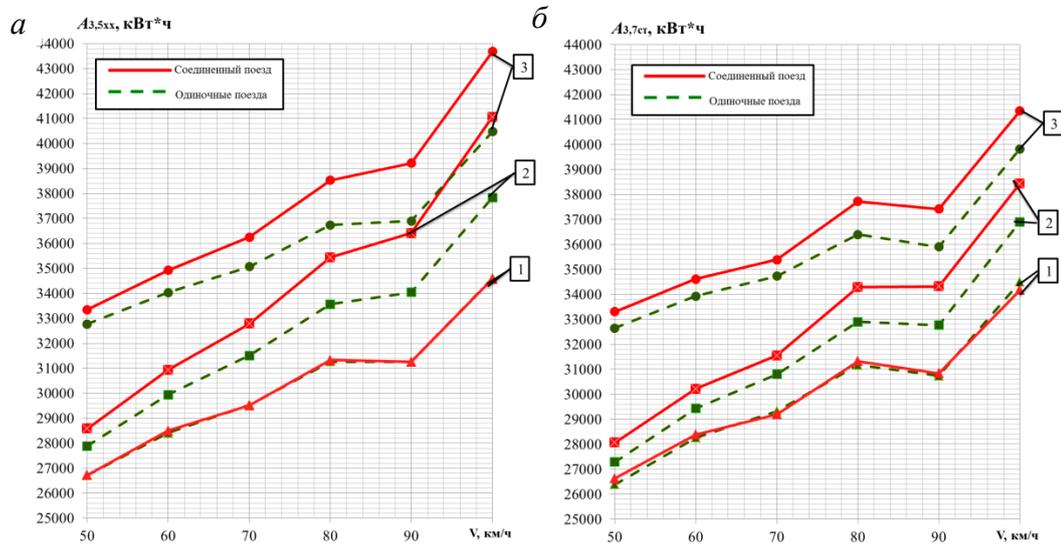


Рисунок 3 – Результаты моделирования работы СТЭ

Потери ЭЭ в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций при движении СП выше, чем при пропуске ОП на всех участках. Эффективность применения системы БАРН в среднем для всех скоростей движения на участке Курган – Колчедан при пропуске двух ОП по сравнению с существующей системой составила 1,19 %, при пропуске одного СП – 2,74 %. 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 двумя ОП является лучшим вариантом.

На рисунке 4 представлено увеличение расхода ЭЭ на тяговой подстанции при пропуске СП на участках на тяговых подстанциях естественные характеристики, с напряжением холостого хода 3500 В (3,5хх) и стабилизированные характеристики 3700 В

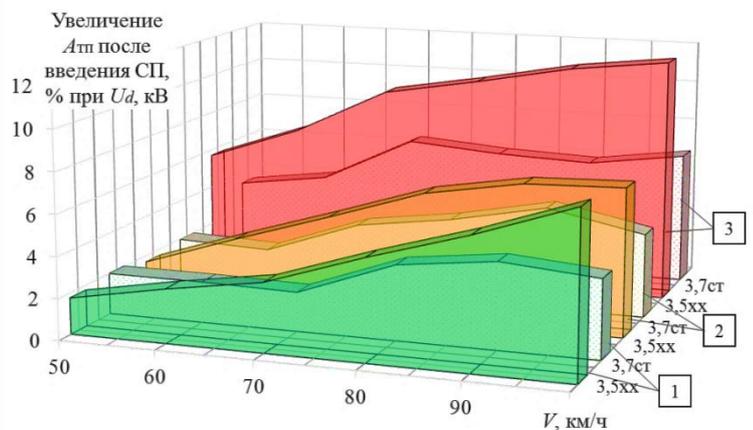


Рисунок 4 – Увеличение расхода ЭЭ  $A_{тп}$  при движении одного СП по сравнению с двумя ОП

(3,7ст). Участки: Курган – Колчедан (1); Войновка – Богданович (2); Подволошная – Вогулка (3).

Достоверность предлагаемой методики электрического расчета регулируемой СТРЭ подтверждается сходимостью результатов расчета с реальными показаниями приборов на тяговых подстанциях с погрешностью не более 5%. Определены расходы на движение одного соединенного грузового поезда в сравнении с движением двух ОП. В среднем по всем участкам расходы увеличиваются на 8,7 %.

**В четвертой главе** определяется энергетическая эффективность существующей СТЭ и СТРЭ с применением устройств регулирования напряжения при выполнении следующих условий:

1) Увеличение скорости движения. За критерий оценки выбрано увеличение в процентном отношении расхода ЭЭ на тягу  $A_T$  при увеличении скорости движения от  $V_{нач}$  до  $V_{кон}$ , по формуле

$$\Delta A_{T,\%} = \frac{A_{T_{нач}} - A_{T_{кон}}}{A_{T_{нач}}} 100\% . \quad (8)$$

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

2) Снижение времени межпоездного интервала (МПИ). Энергетическая эффективность определяется по наименьшему времени МПИ рассматриваемых режимов, с учетом следующих критериев: уровень напряжения ЭПС должен быть не ниже 2700 В (9.1); наименьший удельный расход ЭЭ на тяговых подстанциях (9.2).

$$U_s \geq 2700 \text{ В}; \quad (9.1)$$

$$t_{рац} (a_T) = \min [t_i(a_T)]. \quad (9.2)$$

3) Работы регулируемых ТП и нерегулируемой одноагрегатной ТП (ОТП). Критерии оценки: обеспечение при пропуске пакета грузовых поездов ПМД допустимого уровня напряжения на токоприемнике электровоза и минимума потерь электрической энергии в тяговой сети и трансформаторах тяговых подстанций.

Для первого условия проводятся электрические расчеты следующих режимов работы СТЭ: 1) нерегулируемой СТЭ с напряжением холостого хода 3500 В; 2) регулируемой СТРЭ с введением стабилизации напряжения на уровнях 3500 В, 3600 В и 3700 В. В данном разделе разработана методика проведения оценки влияния повышения скорости движения на расход ЭЭ на тягу. В диссертации по результатам расчета построены гистограммы зависимости увеличения расхода ЭЭ

от увеличения скорости движения относительно рассматриваемой начальной скорости движения.

Электрические расчеты для второго условия выполняются для тех же режимов работы СТЭ. В данном разделе разработана методика по оценке влияния снижения времени МПИ на напряжение на токоприемниках электровозов и на удельный расход ЭЭ в виде алгоритма. По результатам оценки определяется рациональный режим работы системы тягового электроснабжения по наименьшему полученному времени МПИ.

При выполнении третьего условия выполняется проверка пропуска пакета грузовых поездов повышенной массы 8х7100 тонн участка Шаля – Кунгур с применением системы БАРН. Моделирование работы СТЭ выполняется для следующих режимов работы: нерегулируемая СТЭ; регулируемая СТРЭ; система с регулируемыми основными ТП и нерегулируемой ОТП (соответствует схеме работы буферной системы тягового электроснабжения (БСТЭ)).

По результатам исследования повышения энергетической эффективности СТЭ за счет применения устройств регулирования напряжения определено:

1) Повышение расхода ЭЭ 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.

2) Рациональное время межпоездного интервала по уровню напряжения на токоприемнике ЭПС и удельному расходу ЭЭ без введения устройств регулирования напряжения составило 15 минут, а с введением устройств регулирования напряжения – 7 минут. Рациональный режим работы – регулируемая СТРЭ с введением стабилизации напряжения на уровне 3700 В.

3) Вариантом обеспечения пропускной способности (пропуск грузовых поездов 8х7100 т) является схема БСТЭ, когда регулирование напряжения осуществляется только на основных ТП. Она обеспечивает допустимый уровень напряжения в контактной сети, не допускает превышение тока нагрузки преобразовательного агрегата выше допустимой величины с учетом коэффициентов перегрузки. Рекомендуемый уровень напряжения для ТП является  $U_{d_{ст}} = 3700$  В и для ОТП  $U_{d_{xx}} = 3500$  В.

## 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 электровоза. 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 вари-

антом 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.

### **Работы, опубликованные по теме диссертации:**

#### **а) научные работы, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Баева, И. 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. – 2017. – № 4 (55). – С. 71-75.

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

3. Баева, И. А. Методика расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ при введении устройств регулирования напряжения / И. А. Баева // Известия ПГУПС. – 2019. – №1. – С. 51-58.

4. Баева, И. А. Экономическая эффективность организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов / Б. А. Аржанников, Н. А. Афанасьева, И. А. Баева // Транспорт Урала. – 2019. – № 3 (62). – С.14-19.

#### **б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных *Scopus* и *Web of Science*:**

5. *Baeva, I. A. Energy efficiency electrified section with automatic voltage regulation / B. A. Arzhannikov, I. A. Baeva, T. S. Tarasovskiy // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020 – pp. 87-97 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2\\_10/](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37916-2_10/).*

#### **в) научные работы, опубликованные в других изданиях**

6. Баева, И. А. Учет потерь электрической мощности в трансформаторах тяговых подстанций постоянного тока / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – 2016. – № 3 (21). – С. 60-64.

7. Баева, И. А. Обзор методов электрического расчета системы тягового электроснабжения постоянного тока / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – 2017. – № 4 (26). – С. 58-62.

8. 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.

9. Баева, И. А. Дополнение к методике электрического расчета программы КОРТЭС / И. А. Баева // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : м-лы Международ. науч.-практ. конф. Отв. за выпуск С. В. Бушуев. – 2017. – № 8 (227). – С. 27-32.

10. 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.

11. 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. – 2018. – № 4 (30). – С. 49-51.

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

13. Баева, И. А. Техничко-энергетические показатели, «Повышение пропускной и провозной способности участков и направлений» при организации движения соединенных грузовых поездов / Б. А. Аржанников, И. А. Баева // Материалы IX Междунар. симп. «Элтранс-2017», 18-20 октября. 2017 г. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2017. – С. 18–24.

14. 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.

15. Баева, И. А. Влияние снижения времени межпоездного интервала на технико-энергетические показатели системы тягового нерегулируемого и регулируемого

электроснабжения / И. А. Баева // Инновационный транспорт. – 2020. – № 1 (35). – С. 51-55.

**г) Свидетельство о государственной регистрации программного продукта:**

16. Баева И. А. Автоматизированная обработка результатов электрических расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ / И. А. Баева // Свидетельство о государственной регистрации программного продукта № 2019614664, Российская Федерация, 10.04.2019 г.

17. Баева И. А. Определение токоограничивающего коэффициента при выполнении электрических расчетов системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ / И. А. Баева, Б. А. Аржанников // Свидетельство о государственной регистрации программного продукта № 2019614816, Российская Федерация, 15.04.2019 г.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [3, 6, 7, 9, 11, 12, 15, 16] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – проведено моделирование работы нерегулируемой СТЭ и регулируемой СТЭ; [2] – проведен расчет и сравнение СТЭ и СТРЭ при пропуске одиночных или соединенных поездов; [4] – выполнены расчеты экономической эффективности организации движения одиночных и соединенных грузовых поездов регулируемой СТРЭ; [5] – выполнены электрические расчеты СТЭ с различными типами регуляторов, произведена оценка технико-энергетических показателей; [8] – выполнена технико-энергетическая оценка при пропуске СП; [10] – проанализированы методы усиления СТЭ и доказана энергетическая эффективность пропуска одиночных поездов; [13] – проанализирован процесс формирования и расформирования СП, а также энергетическая эффективность СТЭ и СТРЭ; [14] – выполнена проверка изменения технико-энергетических показателей СТЭ и СТРЭ при использовании поправочных токовых коэффициентов; [17] – разработана блок-схема алгоритма программного продукта.

**Баева Ирина Анатольевна**

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

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

Подписано в печать «13» октября 2020

Формат 60 x 84 1/16.  
Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,2.  
Заказ 31.