

На правах рукописи



СУБХАНВЕРДИЕВ Камиль Субханвердиевич

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
СЕЛЕКТИВНОЙ И НЕСЕЛЕКТИВНОЙ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ  
СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
ГЕРМАН Леонид Абрамович

Официальные оппоненты:

**БЫКАДОРОВ Александр Леонович** – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения», кафедра «Автоматизированные системы электроснабжения», профессор.

**ВУКОЛОВ Владимир Юрьевич** – кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «12» декабря 2018 г., в 15.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), [www.miit.ru](http://www.miit.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

  
Гречишников  
Виктор Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации в направлении обеспечения надежного электроснабжения тяги поездов, предусмотренная на ближайшие годы и на перспективу, ставит перед железнодорожным транспортом новые задачи. Вопросы надежного электроснабжения в условиях обновления оборудования и устройств электроснабжения, являющихся приоритетными мероприятиями при реализации указанного направления, приобретают особый вес и требуют нахождения наивыгоднейших решений. Очевидно, что такие решения будут возможны только при соответствующей полноте и рациональности положений нормативной документации, которые в настоящее время требуют внесения весьма существенных корректив.

Поэтому для обеспечения надежного электроснабжения тяги поездов необходимо совершенствование методов расчета токов короткого замыкания (КЗ) с целью получения большей точности расчета и рационализация технических решений по организации защиты от токов КЗ, в полной мере соответствующих требованиям быстродействия, и алгоритмов средств автоматики, управляющих объектами тягового электроснабжения.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме обеспечения надежного электроснабжения тяги поездов, а именно разработке и совершенствованию релейной защиты и средств автоматики тяговых сетей переменного тока, включая методы расчета системы тягового электроснабжения (СТЭ), посвящены работы ученых Г.И. Атабекова, М.П. Бадера, В.В. Белова, Б.М. Бородулина, А.Л. Быкадорова, В.А. Быкова, Л.А. Германа, Б.Е. Дынькина, Ю.И. Жаркова, В.П. Закарюкина, Б.И. Косарева, А.Б. Косарева, А.В. Крюкова, Р.Р. Мамошина,

Г.Г. Марквардта, К.Г. Марквардта, В.Е. Марского, В.Я. Овласюка, В.Н. Пупынина, Е.П. Фигурнова, Ю.А. Чернова и др. Однако еще ряд вопросов по расчету и устройствам релейной защиты и автоматики тяговых сетей требует своего решения.

**Целью исследования** является разработка технических решений по совершенствованию организации защиты от токов КЗ и алгоритмов средств автоматики в тяговой сети переменного тока, обеспечивающих требуемую надежность электроснабжения.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. Анализ методов расчета токов КЗ при различных схемах соединения обмоток понижающего трансформатора и заданных параметрах системы внешнего электроснабжения (СВЭ).
2. Установление мощности КЗ на вводах в тяговую подстанцию (ТП), при которой погрешность расчета токов КЗ по нормативной документации минимальна.
3. Разработка мероприятий по методам расчета токов КЗ в тяговой сети для снижения методической погрешности в вычислении.
4. Оценка организации селективных и неселективных систем защиты от токов КЗ в тяговой сети переменного тока.
5. Анализ частично-неселективной системы защиты, обеспечивающей минимальную повреждаемость контактной сети.
6. Получение аналитического решения для определения истинных зон неселективного действия защит частично-неселективной системы.
7. Анализ работы системы защиты с поперечными связями, как альтернативы частично-неселективной системы защиты.
8. Разработка предложений по повышению надежного электроснабжения межподстанционной зоны в случае применения селективной и неселективной систем защиты от токов КЗ.

9. Расчет ампер-секунд тока, действующего на контактный провод при различных способах организации защиты тяговой сети, и оценка вероятности его пережога.

10. Разработка мероприятий, обеспечивающих снижение времени восстановления напряжения в контактной сети и устойчивую работу электроподвижного состава (ЭПС) при неселективных отключениях выключателей и проходящих КЗ.

11. Совершенствование алгоритма автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока при селективной и неселективной защитах.

**Методы исследования.** Решение задач, поставленных в работе, стало результатом теоретических и экспериментальных исследований. Использованы методы теории электрических цепей, методы решения систем линейных алгебраических уравнений и методы численного анализа с использованием пакета программы MathCAD.

**Научная новизна** результатов, полученных в диссертационном исследовании:

1. Установлено, что методическая погрешность в расчетах токов КЗ в тяговой сети по нормативным документам определяется тем, что между линиями 110(220) кВ, питающими ТП, как правило, существует взаимное сопротивление, которое не учитывается при представлении СВЭ в схеме замещения сопротивлениями, полученными по заданной мощности КЗ на вводах в ТП и, тем самым, изменяется токораспределение в тяговой сети.

2. Предложена схема замещения межподстанционной зоны тяговой сети для расчета токов КЗ, отличающаяся тем, что учитывает связь двух смежных ТП по ВЛ-110(220) кВ и, тем самым, повышает точность расчетов.

3. Предложена частично-неселективная система релейной защиты от токов КЗ в тяговой сети переменного тока, при которой зона действия первой ступени дистанционных защит ТП с нулевой выдержкой времени увеличивается до поста секционирования (ПС) включительно, а защит ПС – до шин ТП включительно. В результате при КЗ исключается опасность

пережога контактных проводов и до минимума уменьшаются зоны неселективной работы защит.

4. Разработан новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети, отличающийся тем, что после отключения КЗ вводится быстродействующее автоматическое повторное включение (БАПВ) питающей линии контактной сети ПС на выключателях с контролем наличия КЗ в отключенной контактной сети, а затем выполняется автоматическое повторное включение (АПВ) питающих линий контактной сети на ТП, зависимое от успешной работы БАПВ поста, что позволяет уменьшить время отсутствия напряжения в аварийно отключенной тяговой сети.

5. Предложен комплекс устройств защиты и автоматики на участках с ПС на разъединителях, повышающий надежное электроснабжение тяговой сети переменного тока в аварийных ситуациях путем исключения отключений разъединителей ПС при ложных и проходящих КЗ, для этого:

- запатентовано устройство неселективной защиты, позволяющее при КЗ на станции или линии ДПР блокировать отключения разъединителей;

- разработано устройство, отличающееся тем, что к трансформатору напряжения шин ПС подключен блок определения проходящего (устойчивого) КЗ в отключенной контактной сети;

- добавлен выключатель в шину ПС с устройством определения проходящего КЗ.

**Теоретическая и практическая ценность** результатов исследования:

1. Обоснована возможность проводить расчеты двухфазных токов КЗ в тяговой сети переменного тока при любой схеме СВЭ по эквивалентной однофазной схеме замещения трехфазной системы, что позволяет упростить и повысить точность расчета, используя известные методы расчета сложных электрических цепей.

2. Разработана программа для ЭВМ расчета параметров КЗ в тяговых сетях переменного тока 25 кВ, на которую получено Свидетельство о государственной регистрации в ФИПС (№ 2017613520). Программа

построена на основе метода совместного расчета СВЭ и СТЭ и позволяет получить относительно точные значения токов, напряжений и сопротивлений при КЗ в любой точке межподстанционной зоны.

3. Получено аналитическое решение задачи исследования работы дистанционных защит частично-неселективной системы при КЗ вблизи ТП или ПС, когда зона действия их первых ступеней без выдержки времени увеличивается в пределах, охватывающих всю защищаемую зону.

4. Исследование работы частично-неселективной системы защиты и системы защиты с поперечными связями от токов КЗ в сравнении с существующими системами показало преимущества их по обеспечению надежного электроснабжения тяги поездов и целесообразность применения в качестве типовых вариантов.

5. Разработаны и запатентованы способ и устройство, снижающие время восстановления напряжения в контактной сети, за счет выполнения БАПВ присоединений питающих линий ПС контактной сети на выключателях и позволяющие исключить перерывы в движении поездов при ложных срабатываниях защит и проходящих КЗ (патент № 2647108 РФ и патент № 172099 РФ).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов исследования теоретически обоснована и экспериментально проверена.

Отдельные положения работы докладывались и обсуждались:

– на Международной научно-практической конференции «Конструкция, динамика и прочность подвижного состава», посвященной 75-летию со дня рождения В.Д. Хусидова, Москва, МГУПС (МИИТ), 20-21 марта 2014 г.;

– на Международной научно-технической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи», Ростов-на-Дону, РГУПС, 28-30 мая 2015 г.;

– на IX Международном симпозиуме Элтранс-2017 (Eltrans-2017) «Прорывные технологии электрического транспорта», посвященного 130-летию основания Г.К. Мерчингом электротехнической школы в России, Санкт-Петербург, ПГУПС, 18-20 октября 2017 г.;

– на заседании секции «Электрификация и электроснабжение» Научно-технического совета ОАО «РЖД», Москва, 15 марта 2018 г.

**Внедрение.** Предложения по повышению надежного электроснабжения межподстанционной зоны при неселективной защите выключателей тяговых подстанций используются на участке контактной сети Арзамасской дистанции электроснабжения Горьковской железной дороги.

Алгоритм и программа расчета основных параметров КЗ для ЭВМ «Программа расчета параметров короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока 25 кВ РАПКЗ» используется в проектной практике отдела тяговых подстанций и телемеханики института «Трансэлектропроект» – филиала АО «Росжелдорпроект» и в учебном процессе при подготовке студентов кафедры «Электроэнергетика транспорта» РУТ (МИИТ).

**Публикации.** Результаты диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе в 6 статьях рецензируемых изданий, входящих в Перечень ВАК при Минобрнауки России. Получены 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель, а также 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 132 наименований и двух приложений и содержит 173 страницы машинописного текста, включая 50 рисунков, 15 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность исследования, излагаемого в диссертации, сформулированы его задачи.

**Первая глава** посвящена анализу методов расчета токов КЗ.

В нормативных документах по релейной защите СТЭ предлагается следующая формула для расчета сопротивления ТП по однофазной схеме замещения:

$$Z_{\Pi} \approx X_{\Pi} = 2 \cdot U_{\text{H}}^2 \cdot \left[ \frac{1}{S_{\text{C}}} + \frac{u_{\text{K}}}{100 \cdot S_{\text{H}} \cdot n} \right]; \quad (1)$$

где  $u_{\text{K}}$  – сопротивление КЗ трансформатора, %;  $S_{\text{H}}$  – номинальная мощность трансформатора, МВ·А;  $n$  – количество включенных трансформаторов;  $S_{\text{C}}$  – мощность КЗ на вводе в подстанцию, МВ·А;  $Z_{\Pi}$  – полное сопротивление подстанции, Ом;  $X_{\Pi}$  – индуктивное сопротивление подстанции, Ом;  $U_{\text{H}}$  – напряжение на выводах тяговой обмотки трансформатора, кВ.

В диссертации обосновывается правильность применения однофазной схемы замещения при расчете по выражению (1). Показано (рисунок 1), что при двухфазном КЗ в схеме замещения тягового трансформатора со схемой Y/Δ обмотка одной фазы А оказывается соединенной параллельно с двумя соединенными последовательно обмотками фаз В и С.

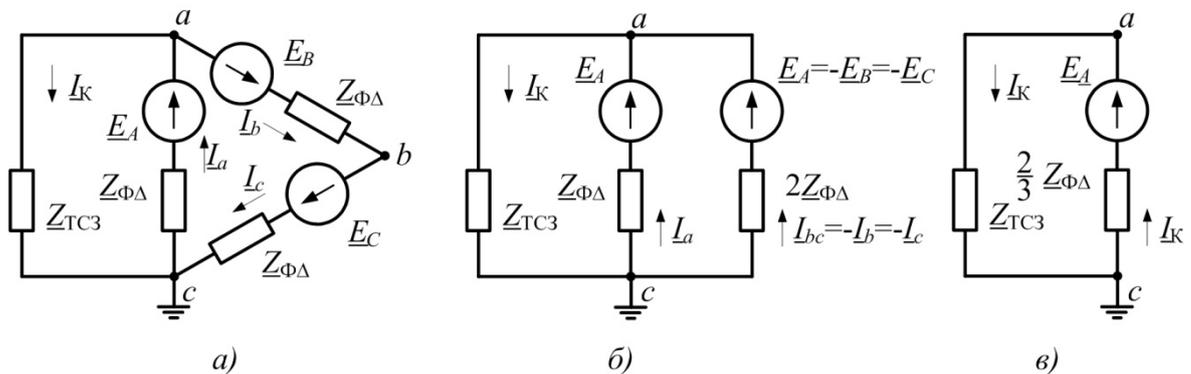


Рисунок 1 – Схема замещения тягового трансформатора при двухфазном КЗ (а); промежуточная (б) и окончательная (в) расчетные схемы

Здесь  $Z_{\text{Ф}\Delta} = Z_{\text{ФТ}} + Z_{\text{ФС}}$  – приведенное суммарное сопротивление КЗ на фазу ТП со схемой трансформатора Y/Δ, где  $Z_{\text{ФТ}}$  – приведенное сопротивление КЗ фазы тягового трансформатора;  $Z_{\text{ФС}}$  – приведенное сопротивление КЗ фазы СВЭ,  $Z_{\text{TC3}}$  – приведенное сопротивление тяговой сети и переходное сопротивление в месте КЗ, а  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  – одинаковые по модулю источники ЭДС. В результате сопротивление ТП при двухфазном КЗ равно:

$$\underline{Z}_{\Pi} = \frac{\underline{Z}_{\Phi\Delta} \cdot 2 \cdot \underline{Z}_{\Phi\Delta}}{\underline{Z}_{\Phi\Delta} + 2 \cdot \underline{Z}_{\Phi\Delta}} = \frac{2}{3} \cdot \underline{Z}_{\Phi\Delta}. \quad (2)$$

Известно, что сопротивление фазы обмотки трансформатора со схемой Y/Δ в три раза больше, чем сопротивление фазы обмотки эквивалентного трансформатора со схемой Y/Y. Поэтому сопротивление ТП при двухфазном КЗ с трансформатором со схемой Y/Y из (2) равно

$$\underline{Z}_{\Pi} = 2 \cdot \underline{Z}_{\Phi Y}, \quad (3)$$

что соответствует (1). Здесь  $\underline{Z}_{\Phi Y}$  – приведенное суммарное сопротивление КЗ на фазу ТП со схемой трансформатора Y/Y, Ом. Отметим, что по ГОСТ Р 52735-2007 расчет сопротивления фазы подстанции при двухфазном КЗ выполняется для сопротивления  $\underline{Z}_{\Phi Y}$ . Справедливость замены трехфазного трансформатора и трехфазной сети СВЭ на однофазную сеть в схеме замещения для расчета двухфазного КЗ в тяговой сети по нормативным документам также доказана с помощью теории эквивалентного генератора.

На основании анализа методов расчета токов КЗ при заданных параметрах энергосистемы установлено, что представление СВЭ в расчете токов КЗ питающих линии контактной сети эквивалентным сопротивлением, полученным по заданной мощности КЗ на вводах в подстанцию, приводит к погрешности результатов исследования. При указанном варианте представления СВЭ игнорируется электрическая связь между двумя смежными ТП, к которым подключена тяговая сеть, то есть не учитывается взаимное сопротивление их по линиям 110(220) кВ. В результате изменяется токораспределение в тяговой сети, подключенной к этим подстанциям, что приводит к существенной методической погрешности в расчетах токов КЗ.

Рисунок 2 подтверждает различие схемы замещения по нормативным документам с использованием заданной мощности КЗ на вводах ТП (рисунок 2,б) от действительной схемы замещения (рисунок 2,а). Здесь собственными сопротивлениями узлов 2 и 3 (без учета тяговой сети) будут сопротивления  $\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_2$  и  $\underline{Z}_{33} = \underline{Z}_{32} + \underline{Z}_3$ , а взаимное сопротивление –  $\underline{Z}_{23}(\underline{Z}_{32})$ . Сопротивление тяговой сети  $\underline{Z}_{TC}$ . Как видно, в схеме на рисунке 2,б

отсутствует взаимное сопротивление, что и определяет методическую погрешность расчета.

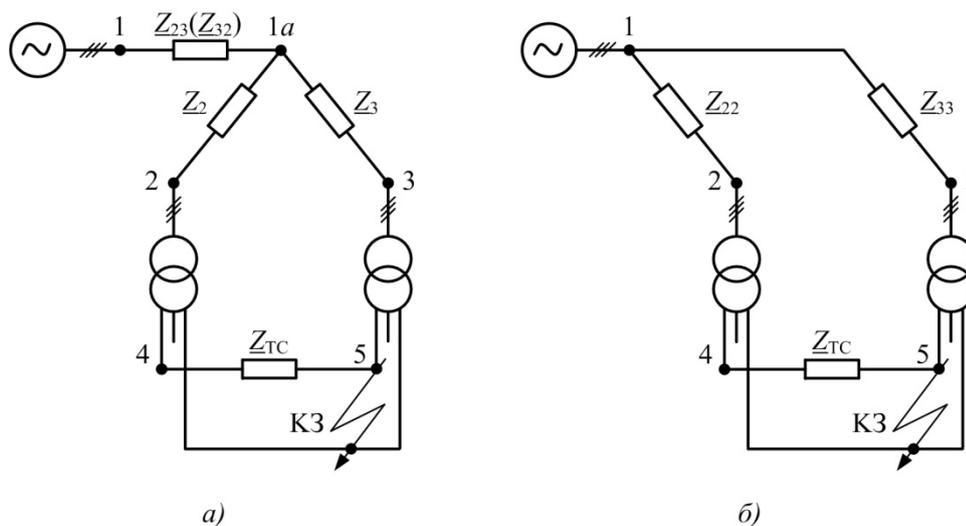


Рисунок 2 – Схема замещения с СВЭ

Исследование показывает, что погрешность в расчетах токов КЗ составляет в пределах  $5 \div 30\%$  в зависимости от величины мощности КЗ на шинах ТП 110(220) кВ и с ростом мощности КЗ погрешность снижается. Экспериментальные исследования на действующем участке тяговой сети подтвердили наличие указанной погрешности.

Подробный анализ погрешности при различных схемах питания позволяет в первом приближении указать диапазон мощности КЗ на шинах ТП, при котором погрешность расчета токов КЗ не превосходит  $10\%$ , составляющий для сети 110(220) кВ –  $750 \div 900 \text{ МВ}\cdot\text{А}$  и выше.

Аналогичная задача решена в работах профессоров Косарева А.Б. и Косарева Б.И. методом симметричных составляющих, где показано, что токи КЗ зависят от нагрузки рассматриваемой и смежных зон питания исследуемого электрифицированного участка.

**Во второй главе** рассматриваются особенности схемы замещения межподстанционной зоны для расчета токов КЗ в тяговой сети.

Сформирована новая результирующая схема замещения (рисунок 3) для расчета токов КЗ, позволяющая снизить погрешность в вычислении. Для этого в рассматриваемую схему добавлена эквивалентная схема замещения

СВЭ из трехлучевой звезды с эквивалентными сопротивлениями линий 110(220) кВ. В результате взаимное сопротивление двух смежных ТП в схеме, определяет электрическую связь между ними по сети СВЭ.

На рисунке 3 обозначены:  $U_{AB,рас}$  – расчетное напряжение ТП;  $Z_{sA}$ ,  $Z_{sB}$  и  $Z_{sAB}$  – сопротивления СВЭ;  $Z_{трA}$  и  $Z_{трB}$  – сопротивления трансформаторов ТП;  $Z_{тсA}$ ,  $Z_{тсB}$  – эквивалентные сопротивления тяговой сети на первом и втором участках межподстанционной зоны;  $Z_{AB}$  – эквивалентное сопротивление в месте КЗ. Взаимное сопротивление  $Z_{sAB}$  определяет электрическую связь между ТП по сети внешнего электроснабжения.

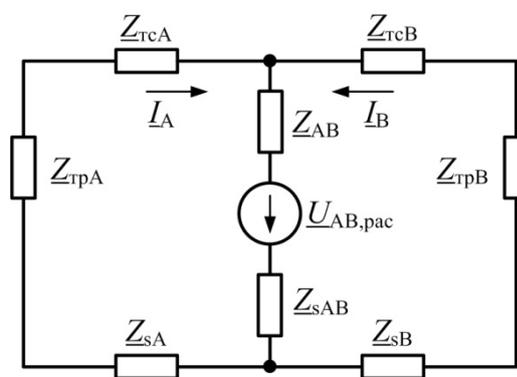


Рисунок 3 – Новая схема замещения с эквивалентной схемой СВЭ

К сожалению, на момент проектирования по объективным причинам, как правило, нет полных данных по параметрам сети СВЭ. Поэтому в этом случае приходится вести расчет по существующим нормативным документам с известными методическими погрешностями. Однако при вводе электрифицированного участка в работу следует провести соответствующие корректирующие расчеты токов КЗ.

Разработан способ получения сопротивлений эквивалентной схемы СВЭ в новой результирующей схеме замещения при недостаточной информации по сети энергосистемы. Предложено сопротивления, соединяющие вводы смежных ТП эквивалентной схемы СВЭ определить аналитически. Для этого следует известным способом экспериментально определить взаимное сопротивление  $Z_{sAB}$  и затем рассчитать

$$\underline{Z}_{sA(B)} = \underline{Z}_{22(33)} - \underline{Z}_{sAB} = \frac{U_{AB,рас}^2}{\underline{S}_{CA(B)}} - \underline{Z}_{sAB}, \quad (4)$$

где  $\underline{Z}_{22(33)}$  – значение собственного сопротивления соответствующей смежной ТП, Ом;  $\underline{S}_{CA(B)}$  – значение мощности КЗ на шинах питающего напряжения 110(220) кВ соответствующей смежной ТП А или В, МВ·А;  $U_{AB,рас}$  – расчетное напряжение источника питания, кВ.

Выполнен вывод основных формул применительно к расчетным схемам с введенными параметрами эквивалентной схемы СВЭ. Для схемы, описывающей случай, когда ни один из выключателей питающих линий не отключился, система уравнений равновесия примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} & \underline{I}_A^I \left[ \frac{2}{3} (\underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_{sA} + \underline{Z}_{трА}) + \underline{z}_{22}L_1 + \underline{z}_{21}(L_2 - l_k) + 2\underline{z}_{-1,2}l_k + \underline{Z}_Э \right] + \\ & + \underline{I}_A^{II} \left[ \frac{2}{3} (\underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_{sA} + \underline{Z}_{трА}) + \underline{z}_{22}L_1 + (\underline{z}_{21} - \underline{z}_{-1,2})(L_2 - l_k) + \underline{Z}_Э \right] + \\ & \quad + \underline{I}_B \left[ \frac{2}{3} \underline{Z}_{sAB} + \underline{z}_{-1,2}l_k + \underline{Z}_Э \right] = \underline{U}_{AB,рас}, \\ & \underline{I}_A^I \left[ \frac{2}{3} (\underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_{sA} + \underline{Z}_{трА}) + \underline{z}_{22}L_1 + (\underline{z}_{21} - \underline{z}_{-1,2})(L_2 - l_k) + \underline{Z}_Э \right] + \\ & \quad + \underline{I}_A^{II} \left[ \frac{2}{3} (\underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_{sA} + \underline{Z}_{трА}) + \underline{z}_{22}L_1 + \underline{z}_{21}(L_2 - l_k) + \underline{Z}_Э \right] + \\ & \quad \quad + \underline{I}_B \left[ \frac{2}{3} \underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_Э \right] = \underline{U}_{AB,рас}, \\ & \quad \quad \underline{I}_A^I \left[ \frac{2}{3} \underline{Z}_{sAB} + \underline{z}_{-1,2}l_k + \underline{Z}_Э \right] + \underline{I}_A^{II} \left[ \frac{2}{3} \underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_Э \right] + \\ & \quad \quad + \underline{I}_B \left[ \frac{2}{3} (\underline{Z}_{sAB} + \underline{Z}_{sB} + \underline{Z}_{трВ}) + \underline{z}_{21}l_k + \underline{Z}_Э \right] = \underline{U}_{AB,рас}, \end{aligned} \right\} (5)$$

где  $\underline{I}_A^I, \underline{I}_A^{II}, \underline{I}_B$  – токи КЗ в ветвях схемы, А;  $L_1, L_2$  – расстояния от ТП А и В до ПС, км;  $\underline{z}_{22}$  – удельное сопротивление тяговой сети двухпутного участка при включенной в работу контактной сети обоих путей и равных токах в их подвесках по величине и направлению, Ом/км;  $\underline{z}_{21}$  – удельное сопротивление тяговой сети одного пути двухпутного участка при отключенной контактной сети другого пути, Ом/км;  $\underline{z}_{-1,2}$  – удельное сопротивление тяговой сети одного пути двухпутного участка при включенной в работу контактной сети обоих путей и равных по величине, но противоположных по направлению токах в

их подвесках, Ом/км;  $Z_{\Sigma}$  – эквивалентное сопротивление в месте КЗ, Ом. Решение системы (5) позволит получить токи по всем питающим линиям контактной сети. Получены также формулы для расчета напряжений в узлах рассматриваемых расчетных схем и сопротивлений, замеряемых защитами питающих линии контактной сети. Для автоматизации вычислений при анализе поведения защиты разработана программа для ЭВМ «Программа расчета параметров короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока 25 кВ РАПКЗ» (выполнена в программе «MathCAD»), на которую получено свидетельство о государственной регистрации № 2017613520.

**Третья глава** посвящена особенностям организации релейной защиты тяговой сети переменного тока, так как она определяет эффективность работы устройств тягового электроснабжения и обеспечивает минимальную повреждаемость контактной сети.

Выполнен анализ двух наиболее часто используемых систем защиты – селективной (ССЗ) и неселективной (НСЗ). Большое время срабатывания защит ССЗ при КЗ вблизи ТП и ПС и выполнение защит НСЗ с нулевой выдержкой времени во всех ступенях не отвечает условиям работы СТЭ, так как в первом случае с большой вероятностью приводит к перегосу контактных проводов, а во втором – к неселективному отключению выключателей, в результате чего обесточивается межподстанционная зона.

Уменьшить вероятность перегоса контактного провода и одновременно многократно сократить зоны и число неселективных отключений выключателей можно выбором уставок защит с возможным неселективным отключением некоторых участков сети. В результате предложена новая организация защиты – частично-неселективная система защиты (ЧНСЗ), отличающаяся от селективной системы увеличенной зоной действия I первой ступени дистанционных защит выключателей межподстанционной зоны (выключателей  $Q1...Q8$  на рисунке 4), составляющей 1,15 расстояния подстанция – пост.

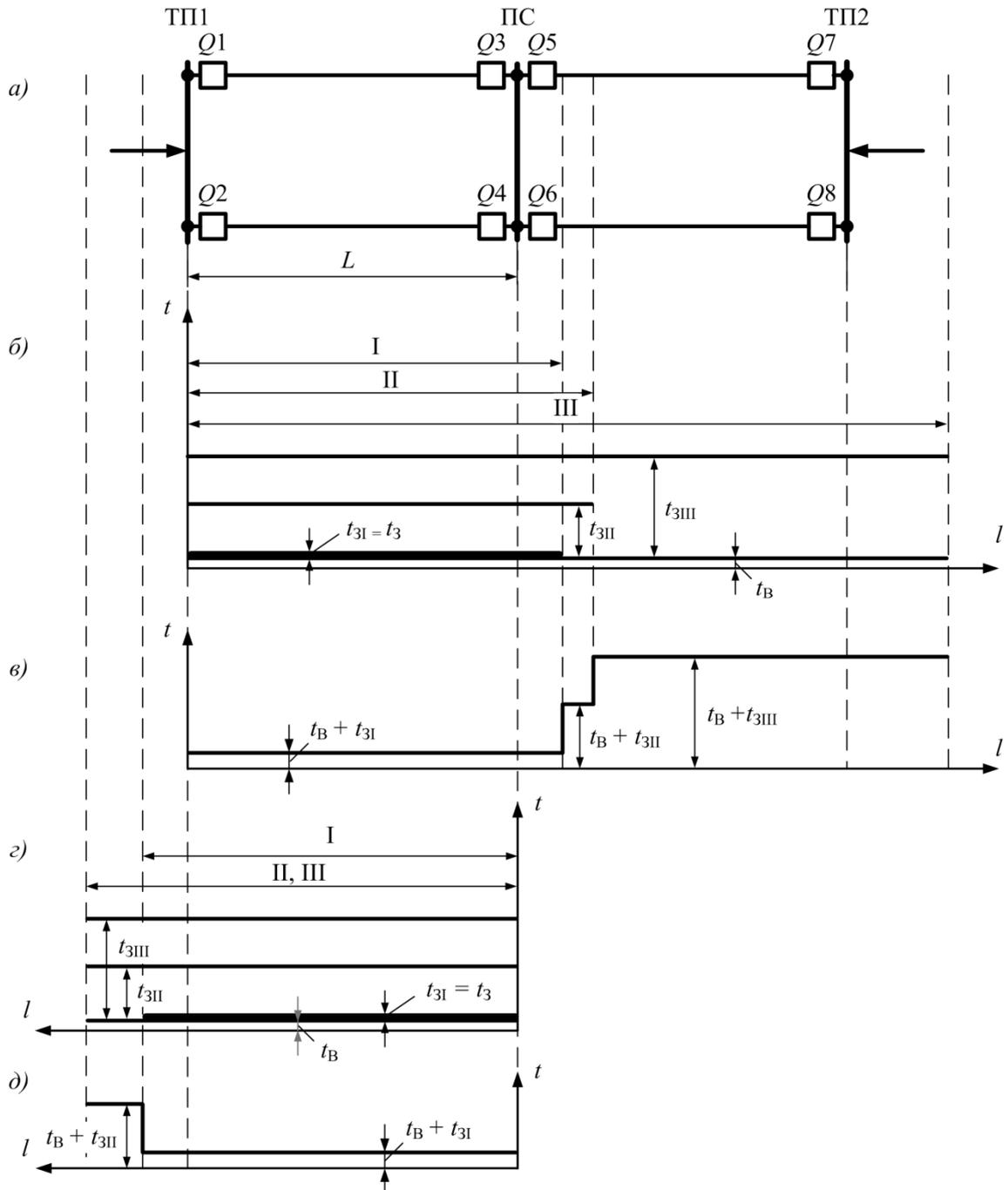


Рисунок 4 – Схема межподстанционной зоны с ПС (а); графики селективности защит выключателей  $Q2$  и  $Q4$  (б и в) и их временные характеристики (г, д) при ЧНСЗ

Такое выполнение защиты приводит к отключению КЗ в любой точке защищаемой зоны (участок подстанция – пост) без выдержки времени с неселективным отключением выключателей отдельных неповрежденных зон в случае КЗ вблизи (в зонах  $0,15$  расстояния подстанция – пост) ТП и ПС. Исследован характер неселективных отключений выключателей при ЧНСЗ.

Получено аналитическое решение для определения реальной длины участка настраиваемой зоны защит исследуемой системы, выходящего за пределы защищаемой зоны и именуемой истинной зоной неселективности (ИЗН). Установлено, что вследствие взаимодействия токов КЗ в контактной сети параллельных путей ИЗН получается менее половины длины настраиваемой зоны неселективности (порядка  $0,03 \div 0,05$  расстояния подстанция – пост).

Рассмотрены особенности реализации и работа системы защиты с поперечными связями (СЗПС) как альтернативы ЧНСЗ. Увеличение зоны действия ступени защит СЗПС без выдержки времени, гарантирует отключение КЗ с минимальным временем в любой точке защищаемой зоны. Вероятность неселективного отключения выключателей при этом предотвращается за счет применения логической связи между защитами параллельных линий. В результате отключение повреждения в зонах вблизи ТП и ПС происходит каскадно. Показано, что зона каскадного действия защит СЗПС аналогично ИЗН пропорциональна длине участка настраиваемой зоны защиты за пределами защищаемой зоны. Поэтому, она составляет также менее половины длины данного участка настраиваемой зоны защиты и получается  $0,03 \div 0,05$  расстояния подстанция – пост.

Исследован вопрос целесообразности сохранения зоны неселективной работы защит СЗПС в результате вывода из работы логической связи при отключении второго пути за ПС. Установлено, что длина ИЗН в рассматриваемом случае получается в два раза больше длины настраиваемой зоны неселективности и составляет  $0,3$  расстояния подстанция – пост. Значительно меньшей длины получается ИЗН в случае, когда КЗ на присоединении питающей линии станции или ДПР.

Рассмотрены вероятные условия пережога контактных проводов при различных способах организации защиты тяговой сети. Получено число ампер-секунд воздействия тока КЗ на провод при работе исследуемых систем защиты и построены графики, устанавливающие граничные условия вероятного пережога контактных проводов. Установлено, что применение

систем ЧНСЗ, НСЗ и СЗПС практически полностью предотвращает вероятность пережога контактных проводов на участках с выключателями с временем действия не более 0,04 с. В то же время при ССЗ опасность пережога в зонах вблизи ТП и ПС достаточно велика.

В конце главы выполнена оценка экономической эффективности от переоборудования ССЗ в ЧНСЗ. Для этого определен экономический эффект от переоборудования, заключающийся в чистой приведенной стоимости предотвращенного ущерба от последствий пережога контактных проводов при работе ССЗ, который составил 1 млн. руб. в год и установлен срок возврата затрат на переоборудование, получившийся равным 14 дням.

**Четвертая глава** посвящена совершенствованию алгоритма автоматики электроснабжения тяговой сети переменного тока.

В настоящее время по нормативной документации время однократного АПВ питающих линий контактной сети ТП составляет 5 - 7 с. За это время успевает «разобраться» схема тягового режима отечественных ЭПС, что может привести к остановке тяжеловесного поезда. Особенно актуальна эта проблема с повышенным временем АПВ для участков с неселективной и частично-неселективной системами защит. Предлагается ввести в тяговой сети БАПВ с временем 0,3 - 0,9 сек, что дает возможность «удержать» схему тягового режима ЭПС. Такое решение известно по опыту Горьковской железной дороги, где специально для этой цели устанавливают трансформаторы напряжения на питающих линиях контактной сети ТП.

В диссертации предложены следующие технические решения по снижению времени отсутствия напряжения в контактной сети в аварийных ситуациях при использовании трансформаторов напряжения ПС, где они устанавливаются по проекту:

1. Предложен способ и устройство автоматизации ПС контактной сети переменного тока, выполненных на выключателях (рисунок 5) с переносом функций определения проходящего КЗ с ТП на ПС. Целесообразность такого решения заключается в проверке наличия

проходящего КЗ в аварийно отключенной контактной сети на ПС, основные защиты которого выполнены с нулевой выдержкой времени и включения аварийно отключенной питающей линии при отсутствии КЗ с минимальной выдержкой времени БАПВ (0,3 – 0,9 сек).

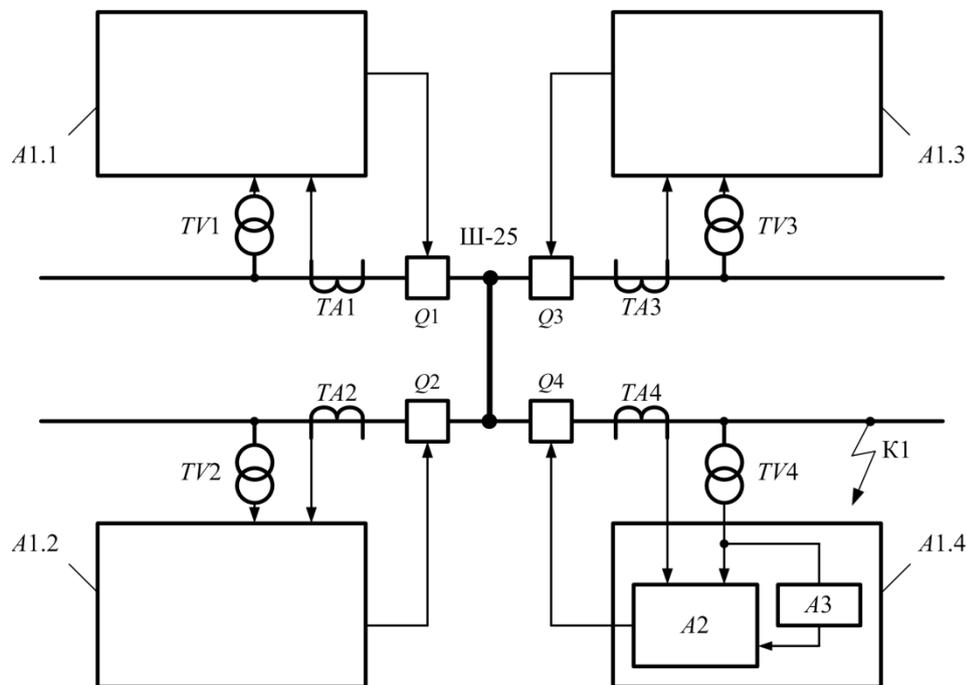


Рисунок 5 – ПС контактной сети на выключателях

На схеме устройства автоматизации ПС (рисунок 5) приняты следующие обозначения: Ш-25 – шина ПС;  $Q1...Q4$  – выключатели;  $TA1...TA4$  – трансформаторы тока;  $TV1...TV4$  – трансформаторы напряжения;  $A2$  – блок защиты;  $A3$  – блок устройства определения проходящего КЗ;  $A1.1... A1.4$  – устройство автоматизации ПС (УАПС) к выключателям  $Q1...Q4$  соответственно.

2. Разработан способ автоматизации, позволяющий исключить возможность подачи напряжения на устойчивое КЗ путем выполнения АПВ питающих линий ТП зависимым от успешной работы БАПВ ПС с использованием телемеханики. При этом для включения выключателя питающей линии ТП при успешном БАПВ на ПС используется устройство телеблокировки, предназначенное для блокировки смежных выключателей питающей линии. На ПС используются устройства УАПС по рисунку 5.

3. Для участков с ПС на разъединителях разработаны следующие технические мероприятия.

Повысить эксплуатационную надежность электроснабжения можно, если при проходящих КЗ не отключать ПС. Для реализации этого разработано устройство автоматизации ПС на разъединителях (рисунок 6), отличающееся введением функций контроля проходящего КЗ в тяговой сети.

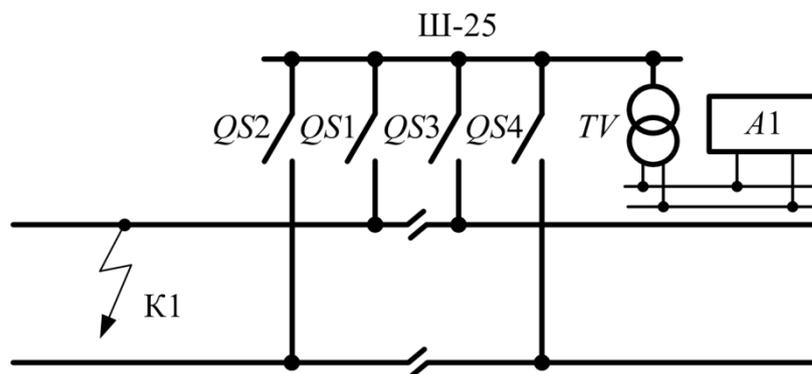


Рисунок 6 – Пост секционирования на разъединителях

Это позволит при аварийных ситуациях предотвратить отключение разъединителей ПС в бестоковую паузу и пройти аварийный режим без негативных последствий. На рисунке 6 показана схема устройства, где Ш-25 – шина ПС;  $QS1...QS4$  – разъединители управляемые,  $TV$  – трансформатор напряжения, а  $A1$  – устройство контроля проходящего КЗ (УККЗ).

Разработано устройство, отличающееся от предыдущего введением в шину ПС выключателя с трансформаторами тока, оборудованного блоком защиты (БЗ) и второго трансформатора напряжения для контроля напряжения двух направлений участка контактной сети. В результате при проходящем КЗ будет выполняться АПВ ранее отключенного от БЗ выключателя на ПС. Малое время перерыва питания (0,3 - 0,9 сек) не даст ПС «разобраться» и провал напряжения в тяговой сети будет быстро ликвидирован. Кроме того, включение выключателя в шину ПС сделает возможным применение в тяговой сети системы защиты ЧНСЗ.

Запатентовано устройство неселективной защиты, позволяющее при КЗ на станции или линии ДПР блокировать отключения разъединителей ПС

путем рационального выбора выдержек времени ступеней дистанционных защит (патент №172397 РФ). Показано, что введение выдержки времени 0,2 сек в третью ступень обеспечивает селективную работу с защитами присоединений питающей линии станции и линии ДПР и исключает опасность пережога контактного провода.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Показано, что определение входного сопротивления на шинах 110(220) кВ по мощности КЗ, заданного энергосистемой в соответствии с нормативными документами, и, как следствие, игнорирование электрической связи по линиям 110(220) кВ (то есть взаимным сопротивлением) между двумя смежными ТП, к которым подключена тяговая сеть, приводит к методической погрешности в расчете токов КЗ. При этом установлено, что для мощности КЗ на шинах 110(220) кВ ТП более 750 - 900 МВ·А расчет будет давать методическую погрешность не более 10%.

2. На основании анализа методов расчета схемы замещения трехфазного трансформатора, а также используя теорию эквивалентного генератора доказана справедливость замены трехфазных сетей энергосистемы и трехфазного трансформатора на эквивалентную однофазную сеть для расчета двухфазных токов КЗ в тяговой сети. Указанное подтверждается многолетней практикой применения эквивалентных однофазных схем в нормативных документах по расчету тяговых сетей.

3. Сформирована новая схема замещения для расчета двухфазных токов КЗ, позволяющая снизить методическую погрешность в вычислении. Для этого в схему замещения по нормативным документам добавлена схема замещения СВЭ из трехлучевой звезды с эквивалентными сопротивлениями линий 110(220) кВ, для которой предложен метод расчета узлового взаимного и собственного сопротивлений линий.

4. Выведены основные формулы для расчета параметров КЗ с учетом новой схемы замещения, учитывающей взаимную связь двух

смежных ТП, питающих тяговую сеть, исходя из различных случаев КЗ и применительно к расчетным схемам селективных и неселективных защит (свидетельство № 2017613520 РФ на программу для ЭВМ).

5. Разработана система защиты ЧНСЗ, исключая опасность пережога контактных проводов и отличающаяся увеличением зоны первых ступеней защит включительно до шин ПС и ТП, при этом число ложных отключений выключателей снижается в два раза. Получено аналитическое решение для определения величины ИЗН защит ЧНСЗ при КЗ вблизи ТП или ПС. В результате установлено, что ИЗН составляет менее половины длины настраиваемой зоны неселективности ( $0,03 \div 0,05$  зоны между ТП и ПС), то есть вероятность неселективного отключения выключателей крайне мала.

Переоборудование ССЗ в ЧНСЗ является экономически оправданным, годовой экономический эффект от переоборудования одной межподстанционной зоны составляет 1 млн. руб.

6. Применение СЗПС в тяговой сети, как альтернативы ЧНСЗ, позволит уменьшить время отключения повреждения и не допустить ложных отключений выключателей питающих линий. Установлено, что вероятность каскадного отключения выключателей при этом будет незначительна.

Рассмотрение условий пережога контактных проводов показало, что применение систем защит НСЗ, ЧНСЗ, а также и СЗПС практически полностью предотвращает опасность пережога.

7. Разработаны новый способ и устройство автоматизации ПС на выключателях, при которых в случае проходящего КЗ включается по БАПВ аварийно отключенная питающая линия ПС. Указанное позволяет восстановить напряжение за время  $0,6 - 0,9$  с, что дает возможность «сохранить» схему тягового режима ЭПС (патенты № 2647108 РФ и № 172099 РФ).

8. Для участков с ПС на разъединителях разработаны следующие технические решения, позволяющие восстановить напряжения в контактной сети при аварийных ситуациях за минимальное время, обеспечив тем самым устойчивую работу ЭПС:

– введена функция контроля проходящего КЗ, позволяющая сохранить включенное состояние разъединителей ПС при проходящих КЗ;

– в шину ПС введен выключатель с функцией определения проходящего КЗ, что позволяет перевести работу тяговой сети от неселективного к частично-неселективному режиму;

– запатентовано устройство неселективной защиты, позволяющее при КЗ на станции или линии ДПР блокировать отключения разъединителей ПС путем рационального выбора выдержек времени третьих ступеней дистанционных защит (патент № 172397 РФ).

9. Перспективами дальнейшей разработки темы диссертации являются исследования в области повышения быстродействия релейной защиты и автоматики тяговых сетей переменного тока.

## **ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Работы в изданиях, рекомендуемых ВАК:**

1. Субханвердиев, К.С. Частично-неселективная система защит контактной сети [Текст] / К.С. Субханвердиев // Мир транспорта. – 2014. – № 5. – С. 90-96.

2. Герман, Л.А. Оценка погрешности расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока [Текст] / Л.А. Герман, К.В. Кишкурно, К.С. Субханвердиев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – №1. – С. 11–15.

3. Герман, Л.А. Расчеты токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока при учете внешнего электроснабжения [Текст] / Л.А. Герман, К.С. Субханвердиев // Электроника и электрооборудование транспорта.– 2017. – № 3. – С. 17–23.

4. Пупынин, В.Н. Быстродействующие системы защиты тяговой сети переменного тока [Текст] / В.Н. Пупынин, К.С. Субханвердиев // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2017. – №3. – С. 33–35.

5. Серебряков, А.С. Анализ методов расчета токов короткого замыкания трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Δ-11 [Текст] / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, В.Л. Осокин, К.С. Субханвердиев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 5. – С. 19–25.

6. Герман, Л.А. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях [Текст] / Л.А. Герман, А.Ю. Попов, А.В. Саморуков, Д.В. Ишкин, Д.В. Якунин, К.С. Субханвердиев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – № 5. – С. 266–272.

#### **Патенты:**

1. Программа расчета параметров короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока 25 кВ РАПКЗ [Текст]: свид. 2017613520 Рос. Федерация / Субханвердиев К.С., Герман Л.А.; заявитель и правообладатель Субханвердиев К.С., Герман Л.А. – № 2017611229; заявл. 31.01.17; опубл. 21.03.17.

2. Устройство неселективной защиты выключателя тяговой подстанции переменного тока [Текст]: пат. 172397 Рос. Федерация: МПК Н 02 Н 3/00, G 01 R 31/42 / Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Якунин Д.В.; заявитель и патентообладатель Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Якунин Д.В. – № 2017104581; заявл. 13.02.17; опубл. 06.07.17, Бюл. № 19.

3. Способ частично неселективной защиты тяговой сети переменного тока [Текст]: пат. 2647108 Рос. Федерация: МПК В 60 М 3/00, G 01 R 31/02, G 01 R 31/08 / Герман Л.А., Пупынин В.Н., Субханвердиев К.С., Сотов А.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» МГУПС (МИИТ). – № 2016137663; заявл. 21.09.16; опубл. 13.03.18, Бюл. № 8.

4. Пост секционирования контактной сети переменного тока: пат. на полезную модель [Текст]: пат. 172099 Рос. Федерация: МПК G 01 R 31/42 / Герман Л.А., Субханвердиев К.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ

ВО «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» МГУПС (МИИТ). – № 2017105746; заявл. 21.02.2017; опубл. 28.06.2017, Бюл. № 19.

**Работы в реферируемых журналах:**

1. Пупынин, В.Н. Частично-неселективная защита контактной сети [Текст] / В.Н. Пупынин, К.С. Субханвердиев, М.В. Николаев // Локомотив. – 2015. – №9. – С. 40-41.
2. Герман, Л.А. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог [Текст]. Монография / Л.А. Герман, А.С. Серебряков, Д.Е. Дулепов. – Княгинино: НГИЭУ, 2017. – 402 с. (раздел 7.4 написан совместно Германом Л.А. и Субханвердиевым К.С.).
3. Герман, Л.А. Схема замещения для расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока [Текст] / Л.А. Герман, А.С. Серебряков, К.С. Субханвердиев // Тезисы докладов IX Международного симпозиума Элтранс-2017 (Eltrans-2017) / ФГБОУ ВО ПГУПС. – СПб., 2017. – С. 21.
4. Логинов, С.В. Автоматизация межподстанционной зоны тяговой сети переменного тока с постами секционирования [Текст] / С.В. Логинов, И.О. Шатнев, К.С. Субханвердиев // Тезисы докладов IX Международного симпозиума Элтранс-2017 (Eltrans-2017), – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017, С.53.

СУБХАНВЕРДИЕВ Камиль Субханвердиевич

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
СЕЛЕКТИВНОЙ И НЕСЕЛЕКТИВНОЙ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ  
СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

---

Подписано в печать \_\_. \_\_.2018 Заказ № \_\_\_\_\_ Формат 60x90/16  
Усл. печ.л. – 1,5 Тираж 80 экз.

---

УПЦ ГИ РУТ (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, дом 9, стр. 9.