

На правах рукописи



ХУСАИНОВ Ермек Кенжебулатович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УСТРОЙСТВ
ЗАЩИТЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА
В ВЫНУЖДЕННЫХ РЕЖИМАХ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОМСК 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ))».

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, доцент
КОНДРАТЬЕВ Юрий Владимирович.

Официальные оппоненты:

КРЮКОВ Андрей Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС)», г. Иркутск.

ИГНАТЕНКО Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)», г. Хабаровск.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)».

Защита диссертации состоится 21 декабря 2021 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета 44.2.003.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ))» по адресу: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОмГУПС.

Автореферат разослан 20 октября 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета 44.2.003.01.

Тел./факс: (3812) 31-13-44; e-mail: nauka@omgups.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



А. А. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Приоритетными задачами ОАО «РЖД» в соответствии с «Энергетической стратегией ОАО «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года» являются полное и надежное энергетическое обеспечение технологий перевозочного процесса и минимизация рисков сбоев в энергообеспечении подразделений функциональных филиалов. Существенные проблемы системы тягового электроснабжения постоянного тока (СТЭ) возникают при обеспечении пропуски поездов в вынужденных режимах схем питания и секционирования контактной сети (СПСКС) и при несанкционированных (аварийных) отключениях быстродействующих выключателей (БВ) тяговых подстанций (ТПС) и постов секционирования (ПСК).

Проблема обеспечения пропуски поездов в вынужденных режимах возникает из-за необходимости изменения параметров настройки защит по причине увеличения зон защиты фидеров контактной сети СТЭ. Изменения параметров осуществляются для ликвидации зон нечувствительности («мертвых зон») защит и оказывают ограничивающее влияние на пропускную способность участков в вынужденных режимах. Существует несколько наиболее распространенных видов вынужденных режимов: отключение ТПС и ПСК для проведения ремонтных работ; изменение схем питания и секционирования при проведении летних путевых работ; изменение схем питания и секционирования при проведении работ на устройствах контактной сети и др.

Повышение числа несанкционированных отключений БВ является следствием увеличения массы грузовых поездов, обновления парка электровозов и организации движения составов с кратной тягой. При отключениях БВ снижается уровень напряжения в контактной сети ниже допустимого, что часто приводит к остановке и задержке поездов. Так, на Западно-Сибирской железной дороге за 2020 г. зафиксировано свыше 16 тысяч несанкционированных отключений БВ. Для снижения числа отключений необходимо совершенствование защит контактной сети для отстройки от максимальных рабочих токов электроподвижного состава.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения (тема НИР № АААА-А18-118112690011-1 (ГБ-216)).

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в совершенствование защит контактной сети постоянного тока внесли известные ученые – А. Н. Анисов, М. П. Бадёр, М. И. Векслер, В. А. Голев, В. А. Гречишников, Ю. И. Жарков, А. Ф. Колин, А. Д. Кондаков, А. Б. Косарев, Н. А. Костин, К. Г. Кучма, И. С. Крюков, К. Г. Марквардт, П. Е. Михаличенко, В. Н. Пупынин, В. Д. Радченко, В. А. Савченко, Ю.Г. Санников, С. М. Сердинов, А. В. Фарафонов, Е. П. Фигурнов, В. Ф. Хариков, П. М. Шилкини, М. Г. Шалимов, A. Griffin, H. Puntis, P. Sturbin и др.

Несмотря на накопленный опыт в области разработки защит контактной сети постоянного тока, при организации вынужденных режимов возникают существенные ограничения пропускной способности электрифицированных участков железных до-

рог. Известные способы организации защиты контактной сети в вынужденных режимах не снимают этих ограничений. Для снижения влияния вынужденных режимов на пропускную способность необходимо совершенствовать защиты контактной сети постоянного тока.

Цель диссертационной работы – улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования устройств защиты контактной сети постоянного тока в вынужденных режимах.

Для достижения указанной цели поставлены и выполнены следующие **задачи**:

разработать математическую модель процесса срабатывания устройств защиты контактной сети в вынужденных режимах системы тягового электроснабжения;

усовершенствовать методику выбора параметров настройки устройств защиты контактной сети в вынужденных режимах с использованием короткозамыкателей;

усовершенствовать алгоритм действия дистанционной защиты контактной сети, позволяющий выявлять режим максимального рабочего тока электроподвижного состава и изменять параметры настройки устройств защиты;

разработать конструкцию устройства защиты контактной сети, используемого при организации защиты контактной сети в вынужденных режимах системы тягового электроснабжения, для исключения ограничений пропускной способности, вызванных изменениями параметров настройки защит, вводимых на период этих режимов.

Объект исследования – устройства электроснабжения.

Область исследования – совершенствование устройств защиты.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

разработана математическая модель процесса срабатывания устройств защиты контактной сети в вынужденных режимах системы тягового электроснабжения, учитывающая параметры места короткого замыкания в точке подключения;

усовершенствована методика выбора параметров настройки устройств защиты контактной сети в вынужденных режимах с использованием короткозамыкателей, позволяющая рассчитать уставку их срабатывания и оптимальное место установки с учетом параметров места повреждения;

усовершенствован алгоритм действия дистанционной защиты контактной сети, позволяющий выявлять режим максимального рабочего тока электроподвижного состава и изменять параметры настройки устройств защиты.

Теоретическая и практическая значимость работы:

разработанная математическая модель процесса срабатывания устройств защиты учитывает параметры места короткого замыкания и позволяет более точно оценить аварийные процессы, происходящие в контактной сети;

усовершенствованная методика выбора параметров настройки защиты в вынужденных режимах с использованием короткозамыкателей позволяет рассчитать уставку их срабатывания и оптимальное место установки с учетом параметров места повреждения;

усовершенствованный алгоритм действия дистанционной защиты контактной сети, выявляющий режим максимального рабочего тока электроподвижного состава и изменяющий параметры настройки устройств защиты, позволяет адаптировать её действие в нагрузочном режиме и уменьшать число отключений БВ;

разработанная конструкция устройства защиты контактной сети, используемого при организации защиты контактной сети в вынужденных режимах системы тягового электроснабжения, позволяет в процессе срабатывания исключить возникновение электрической дуги и расширить диапазон регулирования уставок срабатывания.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе законов и методов расчета электрических цепей, методов расчета системы тягового электроснабжения и математического моделирования с применением программных продуктов на ЭВМ. Экспериментальные исследования проведены на действующих объектах СТЭ с использованием интеллектуальных терминалов присоединения ИнТер-3,3 кВ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

математическая модель процесса срабатывания устройств защиты, учитывающая параметры места короткого замыкания, при организации защиты контактной сети в вынужденном режиме системы тягового электроснабжения;

методика выбора параметров настройки защиты в вынужденных режимах, учитывающая параметры места повреждения, с использованием короткозамыкателей;

алгоритм действия дистанционной защиты контактной сети, выявляющий режим максимального рабочего тока электроподвижного состава и изменяющий параметры настройки устройств защиты.

Реализация результатов работы. Методика выбора параметров настройки защит контактной сети в вынужденных режимах СТЭ внедрена в Омской дистанции электроснабжения – структурном подразделении Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД».

Степень достоверности научных положений и результатов диссертационной работы теоретически обоснована и подтверждена результатами экспериментальных исследований, выполненных на действующих объектах СТЭ Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД). Расхождение результатов теоретического исследования с экспериментальными данными не превышает 5 %.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной молодежной научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности» (Омск, 2018), научных конференциях, посвященных Дню российской науки «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2018, 2019, 2020, 2021), международной научно-технической конференции «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» (Новосибирск, 2021), научно-технической конференции «Молодые ученые России» (Пенза, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе три статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, один патент РФ на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка из 103 наименований и содержит 113 страниц основного текста, 44 рисунка и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и указана степень разработанности темы исследования, приведены цель и задачи, положения, выносимые на защиту, научная новизна, практическая значимость работы, методология и методы исследования, степень достоверности и апробация полученных результатов.

Первый раздел посвящен анализу вынужденных режимов СТЭ постоянного тока. Рассмотрены различные типы вынужденных режимов: при отключении линейных устройств СТЭ; изменения нормальной схемы питания и секционирования контактной сети при проведении работ работниками районов контактной сети; изменения нормальной схемы при проведении капитального ремонта в рамках летних путевых работ. Разработана классификация вынужденных режимов. Проведен анализ оперативных карт при выводе в ремонт оборудования объектов СТЭ и числа отключений БВ ТПС в границах обслуживания Западно-Сибирской железной дороги. С целью выявления особенностей процесса отключения БВ проведен анализ осциллограмм аварийных отключений. Доля отключений от действия максимального рабочего тока ЭПС составила около 15 %, или 2400 отключений.

На основе выполненного анализа вынужденных режимов, оперативных карт и числа отключений БВ сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе рассмотрен вариант организации защиты контактной сети в вынужденном режиме СТЭ при отключении ТПС на участке Омск – Называевская Западно-Сибирской железной дороги. Для обеспечения пропускной способности и защиты контактной сети на территории ряда подстанций устанавливались посты секционирования, которые вводились в работу только на период отключения РУ-3,3 кВ ТПС. Такое решение сопряжено со значительными капитальными затратами и с необходимостью эксплуатации оборудования, которое находится в работе не более двух-трех суток в течение года.

Выполнена оценка эффективности применения ПСК 2658 км, находящегося на территории ТПС Любинская (рис. 1), расчет пропускной способности выполнялся в программном комплексе «КОРТЭС» для двух вариантов схем питания тяговой сети: с включенным ПСК 2658 км и отключенными секционными разъединителями ст. Любинская и отключенным ПСК 2658 км и включенными секционными разъединителями ст. Любинская по пакетному графику движения с заданными межпоездными интервалами и массами. Результаты расчетов показали, что применение ПСК не снимает

ограничения на пропуск грузовых поездов, а уровни напряжений в контактной сети изменяются незначительно в обоих вариантах организации вынужденного режима.

Для оценки надежности защиты контактной сети проведены расчет минимальных токов короткого замыкания и выбор уставок. Для обоих вариантов организации вынужденного режима не обеспечивается одновременное выполнение условий отстройки от максимальных рабочих токов и чувствительности к минимальному току короткого замыкания в конце зоны защиты БВ.

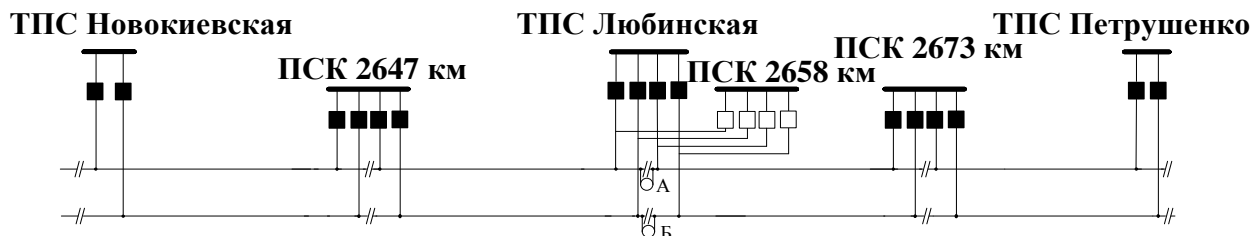


Рис. 1. Нормальный режим схемы питания и секционирования участка Новокиевская – Петрушенко

С целью повышения надежности электроснабжения рассмотрена потенциальная защита с короткозамыкателями для организации вынужденного режима. Составлены схемы замещения (рис. 2) для участка тяговой сети Новокиевская – Любинская – Петрушенко с установленным короткозамыкателем на ТПС Любинская.

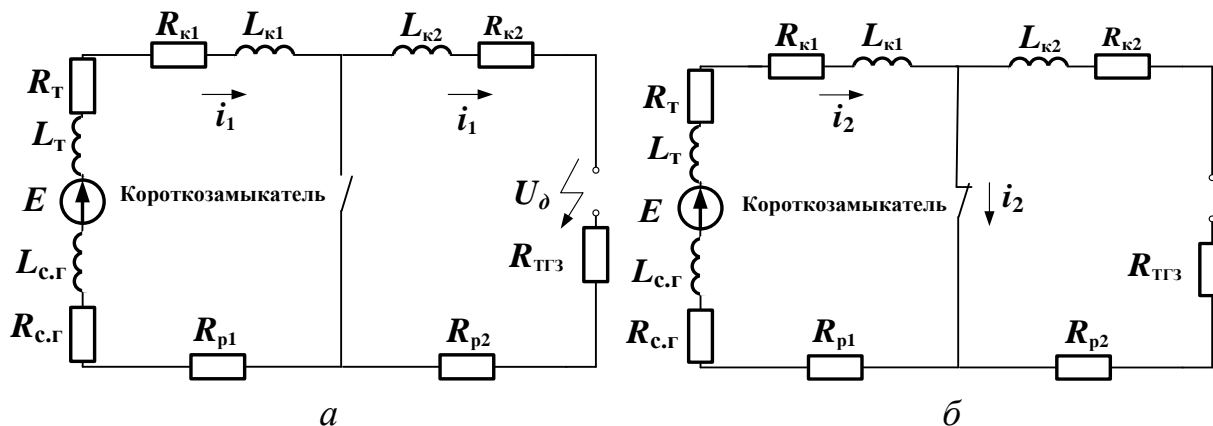


Рис. 2. Схемы замещения участка тяговой сети Новокиевская – Любинская – Петрушенко при удаленном коротком замыкании у ПСК 2647 км (а) и при срабатывании короткозамыкателя, установленного у ТПС Любинская (б)

где E – ЭДС источника (ТПС Петрушенко); U_d – падение напряжения в дуге; R_T, L_T – внутреннее активное и индуктивное сопротивление тяговой подстанции; $R_{с.г}, L_{с.г}$ – характеристики реактора сглаживающего устройства тяговой подстанции; $R_{к1}$ и $L_{к1}, R_{к2}$ и $L_{к2}$ – активные и индуктивные сопротивления соответствующих участков контактной сети; $R_{р1}, R_{р2}$ – активные сопротивления соответствующих участков рельсовой цепи; $R_{ТГЗ}$ – сопротивление троса группового заземления (ТГЗ); i_1, i_2 – токи при удаленном коротком замыкании у ПСК 2647 км и при срабатывании короткозамыкателя, установленного у ТПС Любинская.

Для оценки переходных аварийных процессов разработана математическая модель «тяговая подстанция – короткозамыкатель – тяговая сеть» с учетом параметров места повреждения. Модель составлена для двух интервалов времени:

- удаленное короткое замыкание у ПСК 2647 км;
- срабатывание короткозамыкателя, установленного у ТПС Любинская.

Модель учитывает наличие падения напряжения в дуге и сопротивления троса группового заземления в месте короткого замыкания в первом интервале времени и их отсутствие во втором.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{при } 0 \leq t \leq t_1 \\ i_1(t) = \frac{E - U_{\text{д}}}{R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{К2}} + R_{\text{ПЗ}} + R_{\text{П2}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}}} \left(1 - e^{-\frac{t(R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{К2}} + R_{\text{ПЗ}} + R_{\text{П2}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}})}{L_{\text{T}} + L_{\text{К1}} + L_{\text{К2}} + L_{\text{СГ}}} \right); \\ \text{при } t_1 \leq t \leq t_2 \\ i_2(t) = \frac{E_{\text{д}}}{R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}}} + \left(\frac{E - U_{\text{д}}}{R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{К2}} + R_{\text{ПЗ}} + R_{\text{П2}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}}} \times \right. \\ \left. \times \left(1 - e^{-\frac{-(R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{К2}} + R_{\text{ПЗ}} + R_{\text{П2}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}}) t_1}{L_{\text{T}} + L_{\text{К1}} + L_{\text{К2}} + L_{\text{СГ}}} \right) - \frac{E_{\text{д}}}{R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}}} \right) e^{-\frac{-(R_{\text{T}} + R_{\text{К1}} + R_{\text{П1}} + R_{\text{СГ}}) t}{L_{\text{T}} + L_{\text{К1}} + L_{\text{СГ}}}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

По результатам моделирования получен график тока фидера контактной сети, показанный на рис. 3. Выдержка времени срабатывания измерительного органа короткозамыкателя – 120 мс. Кривая изменения тока имеет ожидаемый характер.

Ярко выражены три этапа.

Первый этап – это короткое замыкание в «мертвой» зоне защиты, вблизи ПСК 2647 км. Ток короткого замыкания возрастает до установившегося значения около 2300 А. Продолжительность этапа равна 120 мс. Второй этап отражает процесс срабатывания короткозамыкателя и увеличения тока короткого замыкания до 3000 А, перенося

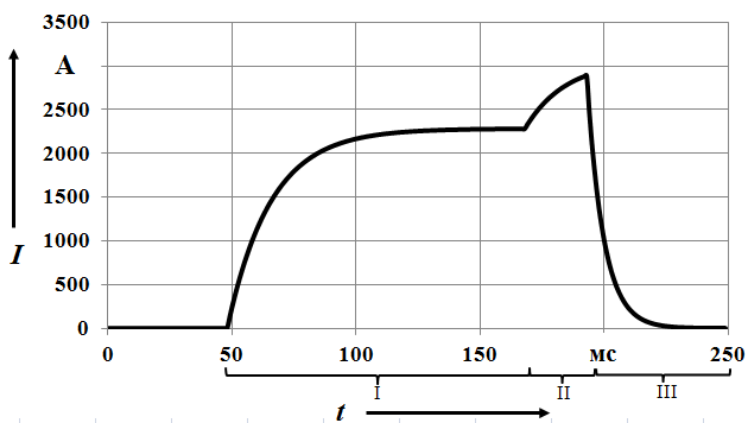


Рис. 3. График изменения тока присоединения ТПС при математическом моделировании участка контактной сети

точку короткого замыкания в зону чувствительности защиты. Третий этап сопровождается отключением БВ от защит и снижением тока до нулевого значения.

С целью определения уставки срабатывания и оптимального места установки короткозамыкателя усовершенствована методика выбора параметров настройки защит контактной сети в вынужденных режимах СТЭ (рис. 4).

Конечным результатом расчета по усовершенствованной методике является потенциальная диаграмма. Потенциальная диаграмма при коротких замыканиях по

уставок устройств защит по существующей методике. Уставка срабатывания короткозамыкателя, определенная по усовершенствованной методике и с учетом параметров места повреждения, обеспечивает необходимую чувствительность защит при удаленном коротком замыкании и позволяет рассчитать уставку срабатывания и оптимальное место установки короткозамыкателя.

Третий раздел посвящен обоснованию применения дистанционной защиты с адаптацией (ДЗА) к тяговому режиму и разработке алгоритма ее действия.

Для оценки динамики изменения нагрузки присоединений контактной сети проведены измерения и анализ максимальных рабочих токов с дискретностью одна секунда. Данные получены из программы отображения информации *Prognose* системы диагностики оборудования тяговых подстанций Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению. Результаты измерений имеют резко переменный характер изменения. После их анализа можно сделать следующие выводы:

динамика изменения тока присоединения контактной сети в течение суток имеет резко переменный характер;

пиковые изменения тока присоединения в течение суток имеют ряд повторяющихся признаков;

приращения тока присоединений контактной сети в режиме максимальной нагрузки существенно отличаются от приращений токов при аварийных процессах;

обеспечивая контроль приращения тока с определенной дискретностью и учитывая значение уставки основной защиты, можно выявить режим максимального рабочего тока присоединения.

Результаты исследования позволили обосновать возможность применения адаптации дистанционной защиты контактной сети к тяговому режиму и дополнительный ресурс регулирования уставки на 18 %. Регулирование уставки R_y на 18 % в результате адаптации к тяговому режиму является в большинстве случаев достаточным для снижения числа излишних отключений БВ. На основании проведенных исследований разработан алгоритм реализации дистанционной защиты с адаптацией к тяговому режиму (рис. 6).

В общем понимании реализация функции адаптации дистанционной защиты к тяговому режиму заключается в снижении уставки защиты при увеличении тока нагрузки присоединения контактной сети на основании величины коэффициента адаптации дистанционной защиты k_a .

При плавном увеличении тока нагрузки расчет корректировки уставки дистанционной защиты предлагается осуществлять по формуле, Ом:

$$R_y = R_{\min} \left(1 - \left(\frac{k_a - 1}{k_a - k_{\min}} \right) \left(\frac{I_{\text{пред}} - k_{\min} \frac{U}{R_{\min}}}{\frac{U}{R_{\min}}} \right) \right), \quad (2)$$

где R_y – уставка ДЗА, адаптированная к тяговому режиму, Ом; R_{\min} – первоначальная уставка ДЗА, Ом; k_{\min} – коэффициент, определяющий начало процесса адаптации, т. е.

отношение тока начала адаптации к максимальному току нагрузки; $I_{пред}$ – значение тока предыдущего измерения, А.

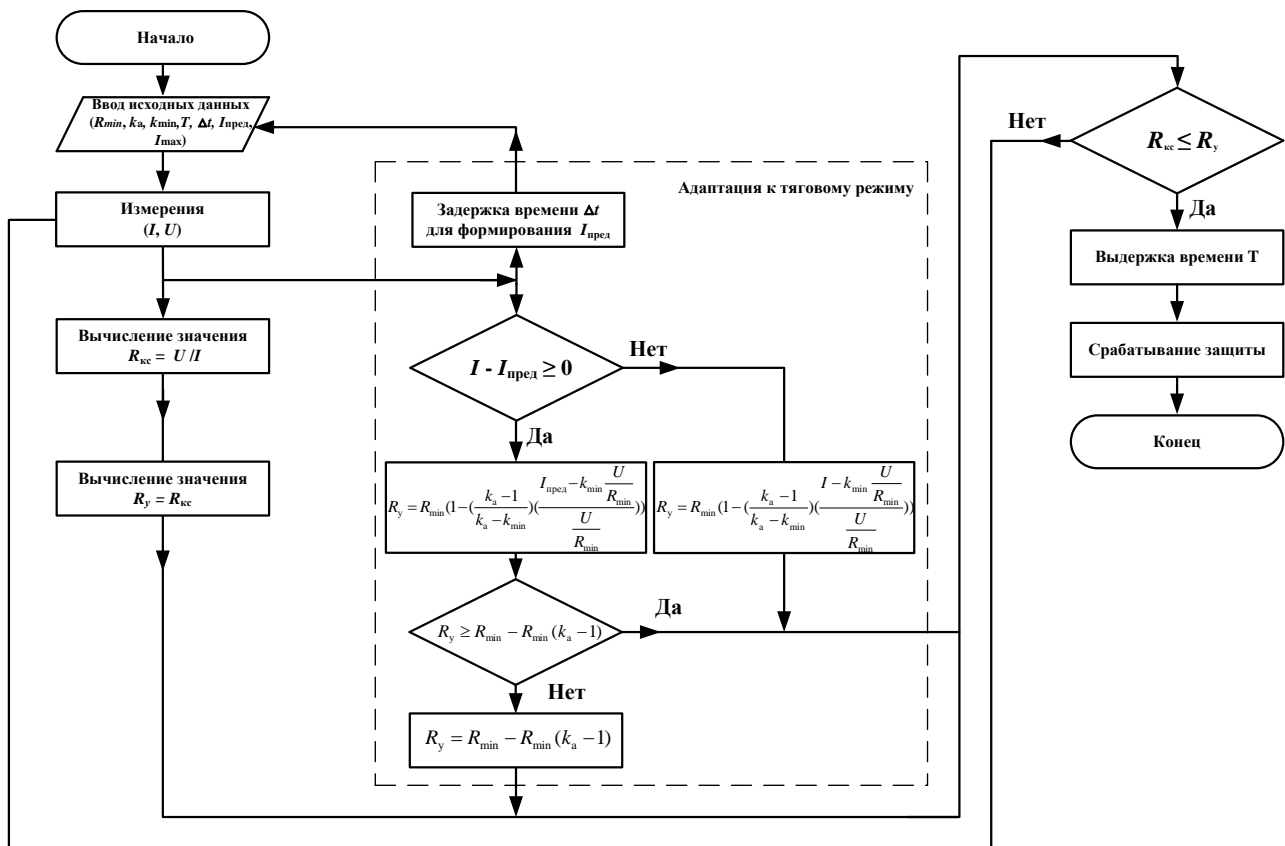


Рис. 6. Алгоритм реализации дистанционной защиты контактной сети с адаптацией к тяговому режиму

При снижении тока нагрузки расчет корректировки уставки дистанционной защиты предлагается осуществлять по формуле, Ом:

$$R_y = R_{\min} \left(1 - \left(\frac{k_a - 1}{k_a - k_{\min}} \right) \left(\frac{I - k_{\min} \frac{U}{R_{\min}}}{\frac{U}{R_{\min}}} \right) \right), \quad (3)$$

где I – значение тока при текущем измерении, А.

Закладываемый принцип адаптации изображен на рис. 7. Кривая I условно показывает характер изменения тока нагрузки, протекающего по присоединению контактной сети. Линии $I_{к.з \min}$ и $R_{к.з \min}$ проведены на уровне минимального расчетного тока и сопротивления короткого замыкания в конце защищаемой зоны. Кривая $I_{пред}$ служит для фиксирования значения тока нагрузки на определенный интервал времени Δt и корректировки на основании этого значения уставки. Кривая R_y показывает адаптацию уставки защиты при увеличении тока. Корректировка R_y также выполняется дискретно. Фиксированное значение тока на определенном интервале времени необходимо для исключения случаев адаптации защиты при коротком замыкании во вре-

мя увеличения тока нагрузки. Пример короткого замыкания при предшествующем режиме нагрузки и адаптации защиты приведен на рис. 8. После введения интервала времени Δt адаптация к режиму происходит с небольшой задержкой, равной этому же интервалу.

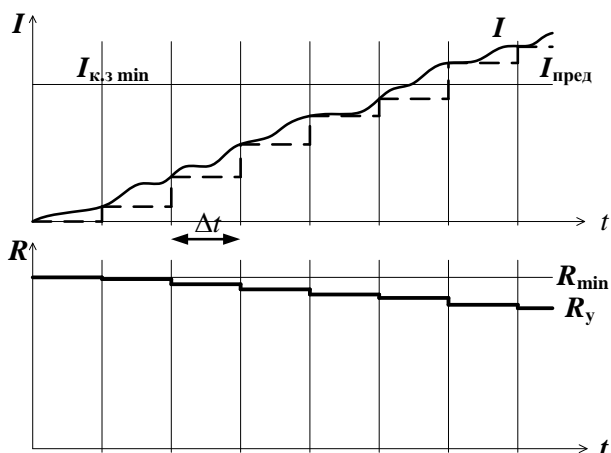


Рис. 7. Принцип реализации адаптации дистанционной защиты к тяговому режиму

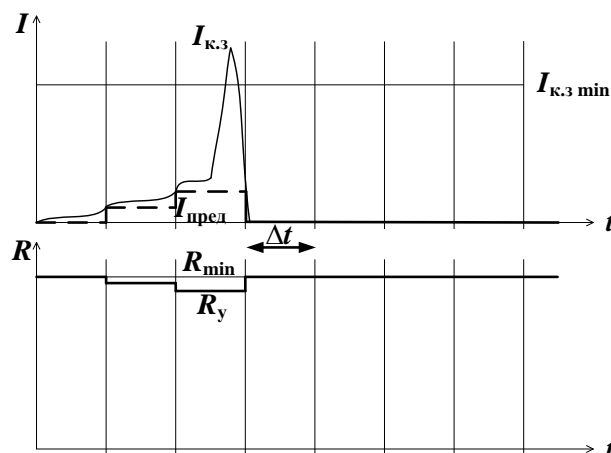


Рис. 8. Процесс короткого замыкания в процессе адаптации дистанционной защиты к тяговому режиму

Одной из основных задач при совершенствовании алгоритма действия ДЗА является правильность выбора интервала времени Δt . В ходе исследований для обеспечения корректной работы алгоритма выявлены следующие условия для интервала времени Δt .

1. Значение Δt должно быть больше времени выдержки дистанционной защиты для исключения случаев изменения уставки при уже выполненном условии срабатывания дистанционной защиты.

2. Значение Δt должно быть больше суммарного времени с начала возникновения и до ликвидации аварийного тока отключением быстродействующего выключателя при коротком замыкании в контактной сети.

3. При выборе значения Δt необходимо максимально эффективно отстроить его как от скорости изменения тока потребления электроподвижного состава при смене позиций контроллера, так и от скорости нарастания тока при коротком замыкании.

Определено, что интервал времени Δt для одновременной отстройки как от скорости изменения тока потребления ЭПС в нормальном режиме перехода с одной позиции на другую, так и от скорости нарастания тока при коротком замыкании должен удовлетворять условию, мс:

$$600 \leq \Delta t \leq 1000. \quad (4)$$

По результатам исследований обоснована возможность применения и разработан алгоритм действия защиты контактной сети, позволяющий выявлять режим максимального рабочего тока электроподвижного состава и изменять параметры настройки защиты с целью ее адаптации.

В четвертом разделе представлены результаты разработки конструкции короткозамыкателя, экспериментальные исследования его срабатывания и оценка эффективности применения дистанционной защиты с адаптацией.

В результате проведения работ по разработке конструкции короткозамыкателя был разработан и собран опытный образец. Получен патент на полезную модель № 195747 РФ. Короткозамыкатель, конструктивное исполнение которого представлено на рис. 9, а схема управления – на рис. 10, состоит из коммутационной части (1) на базе однофазного вакуумного выключателя ВВ/TEL-24-12,5/1000-У2, модуля контроля напряжения (2), блока питания и блока управления выключателем, которые находятся в отдельном отсеке – в шкафу управления (3). Гальваническая развязка цепей измерения и управления выполнена посредством оптоволоконного кабеля. Относительно небольшой вес – 42 кг – позволяет применять короткозамыкатель в качестве мобильного средства защиты контактной сети.

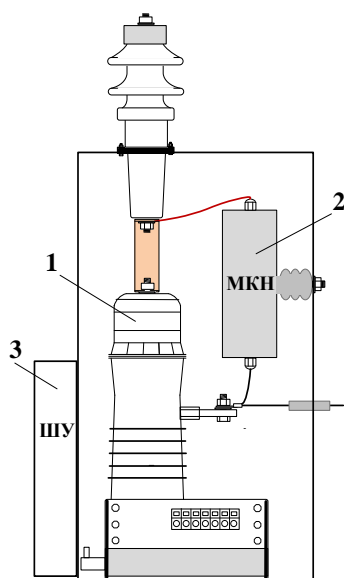


Рис. 9. Конструкция короткозамыкателя

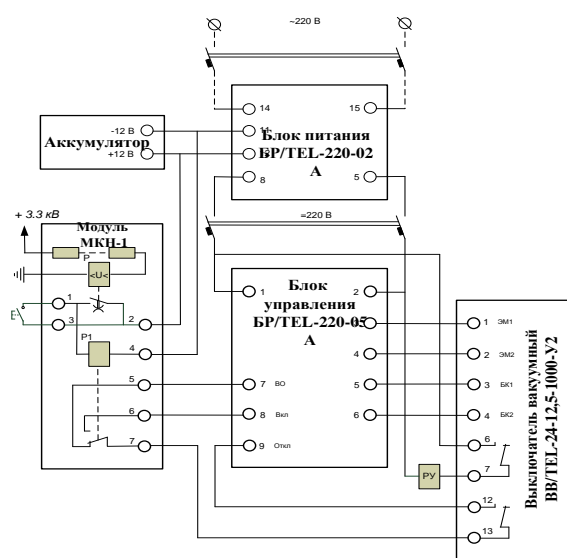


Рис. 10. Схема управления короткозамыкателем

Интеллектуальное управление вакуумным выключателем осуществляется модулем контроля напряжения. Модуль формирует команду на включение при условии, если напряжение в контактной сети понизится и будет находиться в пределах диапазона, заданного уставками, в течение не менее 120 мс:

$$U_{\min} \leq U_{\text{к.с}} \leq U_{\max} , \quad (5)$$

где U_{\min} – уставка минимального напряжения в контактной сети, В; $U_{\text{к.с}}$ – напряжение в контактной сети измеряемое модулем контроля напряжения, В; U_{\max} – уставка максимального напряжения в контактной сети, В.

После включения короткозамыкателя проверяется выполнение следующего условия, в течение более 500 мс.

$$U_{\text{к.с}} \leq U_{\min} \quad (6)$$

Если условие (6) выполняется, то микроконтроллер формирует команду на отключение короткозамыкателя. Этого времени достаточно для отключения БВ от действия токовых защит.

Экспериментальные исследования короткозамыкателя контактной сети постоянного тока были проведены на участке Драгунская – Любинская Омской дистанции электроснабжения. Место установки короткозамыкателя – ТПС Новокиевская. При коротком замыкании в «мертвой» зоне у ПСК 2647 км ток протекал по тяговой сети второго пути через ТПС Новокиевская (рис. 11).

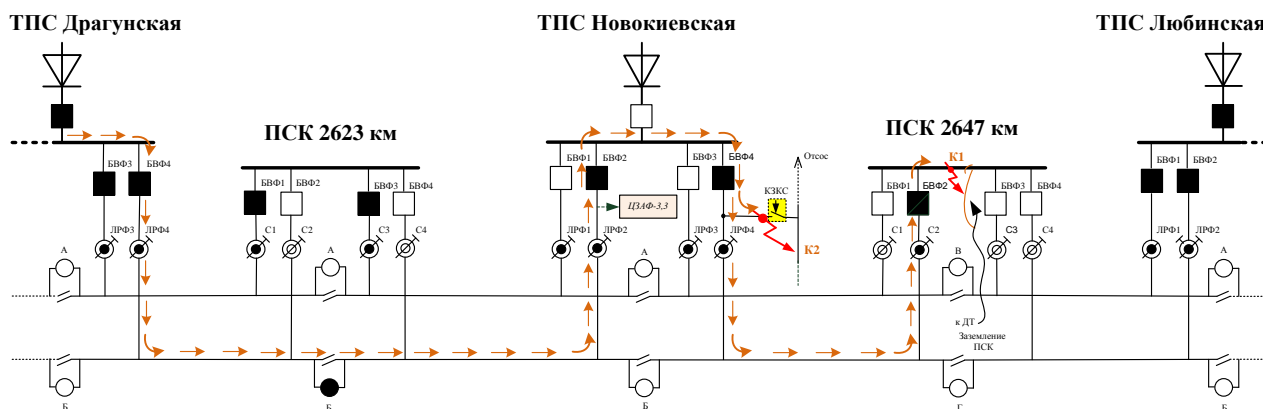


Рис. 11. Схема питания и секционирования контактной сети на участке Драгунская – Любинская

В результате испытания получена осциллограмма процесса срабатывания короткозамыкателя, представленная на рис. 12. Осциллограмма имеет три этапа.

Первый этап характеризуется включением контактной сети на короткое замыкание в «мертвой» зоне, $U \approx 1600$ В, $I \approx 2300$ А. Второй этап – это срабатывание короткозамыкателя через 120 мс после короткого замыкания, $U \approx 0$ В, $I \approx 3000$ А. Третий этап сопровождается отключением БВ от защит и снижением тока до нулевого значения. Для проведения оценки достоверности математической модели

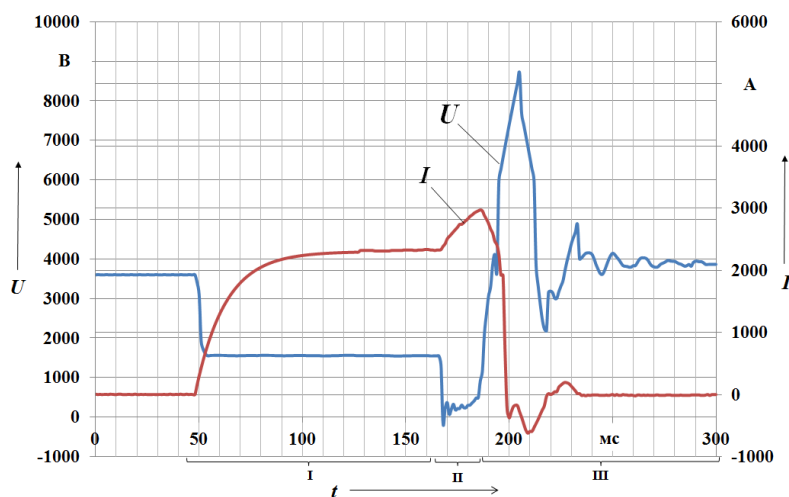


Рис. 12. Осциллограмма процесса срабатывания короткозамыкателя

срабатывания короткозамыкателя, описанной во втором разделе, сравнивались значения токов в процессе развития короткого замыкания как полученные в ходе моделирования, так и по результатам экспериментальных исследований. Проведена проверка адекватности математической модели по критерию Фишера для 5 %-ного уровня статистической значимости, согласно этой проверке модель следует признать адекват-

ной. Расхождение результатов теоретического исследования с экспериментальными данными не превышает 5 %.

Для оценки работы дистанционной защиты с адаптацией к тяговому режиму было изменено программное обеспечение устройства контроля тока и напряжения постоянного тока УКТН-3,3 кВ производства ООО ПКЦ «БИТ СОФТ». Программное обеспечение изменено таким образом, что полностью реализован алгоритм ДЗА, приведенный на рис. 6. Измерительные цепи тока и напряжения устройства были подключены параллельно действующим защитам контактной сети. Устройство выполняло только измерительные функции без формирования команд управления БВ. Информацией, получаемой на выходе УКТН-3,3 кВ, являлись ток, напряжение, сопротивление, измеряемое защитой, и уставка ДЗА. Дискретность измерений – одна секунда. Для удобства анализа выходной информации рассмотрен только процесс непосредственного нарастания тока до максимального значения во временном интервале с 800 до 1250 с. Уставка дистанционной защиты – 1,15 Ом. Коэффициент адаптации принят 1,2. Максимальное значение тока нагрузки для данного присоединения контактной сети принято 3500 А. Процесс нарастания тока и адаптация уставки ДЗА приведены на рис. 13. Проведен сравнительный анализа точности предлагаемого усовершенствованного алгоритма ДЗА и принципа, заложенного в предыдущих разработках дистанционной защиты с адаптацией, на примере защиты ЗДА-3,3 кВ. На основании уже полученного процесса нарастания тока построена кривая адаптации уставки дистанционной защиты ЗДА-3,3 кВ. Процесс нарастания тока, изображенный на рис. 13, а, на интервале времени от 800 до 1100 с не вызывает каких-либо изменений уставки ДЗА. Ее значение устойчиво. В отличие от уставки ЗДА-3,3 кВ, которая при появлении какого-либо тока нагрузки адаптируется к этому значению, что является крайне нежелательным режимом, так как для снижения негативного влияния на надежность защит процесс адаптации должен иметь как можно меньшую продолжительность. Существенным преимуществом усовершенствованного алгоритма ДЗА является то, что только при достижении тока нагрузки 90 % от максимального для этого присоединения при принятом значении коэффициента $k_{\min} = 0,9$, значение уставки начинает снижаться, адаптируясь тем самым к току нагрузки. Укрупненный фрагмент процесса адаптации уставки ДЗА к току нагрузки приведен на рис. 13, б.

Проведен сравнительный анализ точности предложенного усовершенствованного алгоритма ДЗА и защиты ЗДА-3,3 кВ (таблица). Анализ проведен на основании таких критериев: средняя квадратичная погрешность RMSE, средняя относительная погрешность MAPE и коэффициент вариации CV.

Сравнительный анализ усовершенствованного алгоритма ДЗА и ЗДА-3,3 кВ

Вариант адаптации	MAPE, %	RMSE, Ом	CV
Усовер. алгоритм ДЗА	3,4	0,04	0,04
Защита ЗДА-3,3 кВ	11,9	0,14	0,13

По результатам анализа выявлено, что усовершенствованный алгоритм ДЗА точнее адаптирует значение уставки по отношению к сопротивлению, измеряемого защитой.

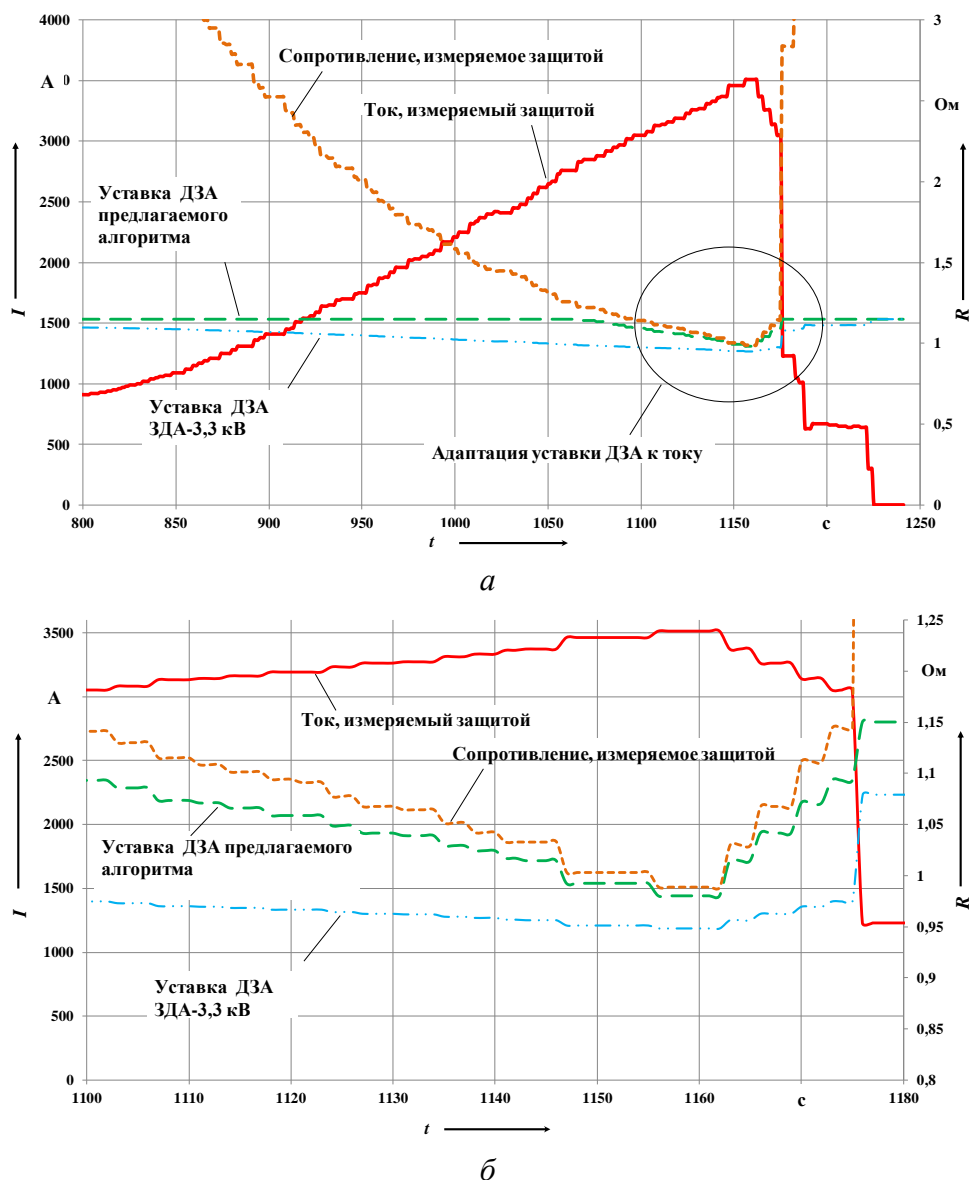


Рис. 13 – Процесс нарастания тока, измеряемого защитой (а), и увеличенный фрагмент адаптации (б)

Определено, что для оценки эффективности применения дистанционной защиты с адаптацией к тяговой нагрузке ЭПС необходимо учитывать внешнюю характеристику выпрямителей. Пиковые значения максимальных рабочих токов, не вызывающих срабатывания дистанционной защиты с адаптацией к тяговой нагрузке ЭПС $I'_{d \max}$ и без нее $I_{d \max}$ будут различны. Для отражения доли увеличения пикового тока срабатывания при применении адаптации к тяговой нагрузке ЭПС был выведен коэффициент $k_{\text{ДЗА}I}$, относящийся к показателям эффективности применения ДЗА:

$$k_{\text{ДЗА}I} = \frac{I'_{d \max}}{I_{d \max}} = \frac{R_y + R_3}{\frac{R_y}{k_a} + R_3}, \quad (7)$$

где R_y – значение уставки срабатывания ДЗА, Ом; R_3 – эквивалентное сопротивление, определяющее наклон внешней характеристики, Ом; k_a – коэффициент адаптации ДЗА.

Помимо этого введены коэффициенты.

$$k_{\text{ДЗА } U} = \frac{U'_{d \max}}{U_{d \max}} = \frac{R_y + R_3}{R_y + k_a R_3}; \quad k_{\text{ДЗА } P} = \frac{P'_{d \max}}{P_{d \max}} = \frac{(R_y + R_3)^2}{\left(\frac{R_y}{\sqrt{k_a}} + \sqrt{k_a} R_3\right)^2}, \quad (8)$$

где $U'_{d \min}$, $U_{d \min}$ – минимальные напряжения на шинах ТПС при выполнении условий для срабатывания ДЗ с адаптацией и без нее, кВ; $P'_{d \max}$, $P_{d \max}$ – максимальная пиковая мощность, реализуемая со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ при выполнении условий для срабатывания ДЗ с адаптацией и без нее, кВт.

Коэффициент $k_{\text{ДЗА } U}$ отражает долю снижения минимального напряжения на шинах ТПС при выполнении условий для срабатывания ДЗА. Коэффициент $k_{\text{ДЗА } P}$ отражает долю увеличения максимальной пиковой мощности, реализуемой со стороны постоянного тока напряжением 3,3 кВ, присоединения контактной сети.

На основании введенных коэффициентов показателей эффективности ДЗА выявлено, что при увеличении числа пульсаций применяемой системы выпрямления преобразовательного агрегата тяговой подстанции повышается эффективность применения ДЗА и применение ДЗА тем эффективнее, чем выше расчетное значение уставки ДЗ R_y .

Расчетный срок окупаемости затрат на изготовление двух комплектов короткозамыкателя, необходимых для обеспечения чувствительности защит контактной сети при вынужденном режиме двухпутного участка, составляет около семи лет, расчетный срок окупаемости ДЗА – четыре года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, направленные на улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования устройств защиты контактной сети постоянного тока в вынужденных режимах.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. Разработана математическая модель процесса срабатывания устройств защиты, учитывающая особенности параметров места короткого замыкания в точке подключения короткозамыкателя при организации защиты контактной сети в вынужденном режиме.

2. Усовершенствована методика выбора параметров настройки защиты в вынужденных режимах с использованием короткозамыкателей, позволяющая рассчитать уставку срабатывания и оптимальное место установки короткозамыкателей.

3. Усовершенствован алгоритм работы дистанционной защиты контактной сети, выявляющий режим максимального рабочего тока электроподвижного состава и изменяющий параметры настройки защиты и позволяющий адаптировать ее действие в нагрузочном режиме и уменьшать число отключений БВ. По результатам исследований установлено, что возникает дополнительный ресурс регулирования уставки по сопротивлению на 18 %, позволяющий уменьшить число излишних отключений БВ в среднем на 15 %, или на 2400 отключений в год.

4. Разработана конструкция устройства защиты контактной сети, используемого при организации защиты контактной сети в вынужденных режимах, отличающаяся тем, что в процессе срабатывания исключено возникновение электрической дуги и расширен диапазон регулирования уставок срабатывания короткозамыкателя на 800 В. Проведены экспериментальные исследования. Осуществлена проверка адекватности имитационной модели результатам экспериментальных исследований, согласно этой проверке модель следует признать адекватной. Расхождение результатов теоретического исследования с экспериментальными данными не превышает 5 %.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается исследование возможности применения короткозамыкателя при организации защиты контактной сети с опорами, не соединенными с рельсами, и проведения исследования переходных процессов в контактной сети при коротком замыкании и наличии ЭПС на зоне с целью совершенствования дистанционной защиты с адаптацией к тяговому режиму.

Список научных работ, опубликованных по теме диссертации

а) научные статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России:

1. Кондратьев, Ю. В. Обеспечение защиты контактной сети при вынужденном режиме / Ю. В. Кондратьев, В. А. Кващук, Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2018. – № 4 (36). – С. 87–95.

2. Хусаинов, Е. К. Методика определения уставок защиты контактной сети постоянного тока в вынужденном режиме с использованием короткозамыкателя КЗКС-3,3 / Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 3 (39). – С. 68–78.

3. Хусаинов, Е. К. Эффективность дистанционной защиты контактной сети постоянного тока с функцией адаптации к тяговому режиму / Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2020. – № 1 (64). – С. 100–103.

б) интеллектуальная собственность:

4. Патент на полезную модель № 195747 Российская Федерация, МПК H02H 3/00 (2006.01). Устройство защиты контактной сети постоянного тока от коротких замыканий : № 2019133361 ; заявлено 21.10.2019 : опубликовано 05.02.2020 / Кондратьев Ю. В., Хусаинов Е. К. – Бюл. № 4. – Текст : непосредственный.

в) научные работы, опубликованные в прочих изданиях:

5. Квашук, В. А. Короткозамыкатель контактной сети КЗКС-3,3 / В. А. Квашук, С. А. Молокоедов, Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности : материалы всероссийской молодежной конференции с международным участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 264–272.

6. Хусаинов, Е. К. Об изменении чувствительности защит контактной сети постоянного тока при адаптации к току тяговой нагрузки / Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 295–302.

7. Хусаинов, Е. К. О протяженности тросов группового заземления системы тягового электроснабжения постоянного тока / Е. К. Хусаинов, Ю. В. Кондратьев. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 288–295.

8. Хусаинов, Е. К. Алгоритм реализации дистанционной защиты с адаптацией к тяговой нагрузке / Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 342–351.

9. Хусаинов, Е. К. Анализ осциллограмм аварийных отключений быстродействующих выключателей тяговых подстанций постоянного тока / Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 337–342.

10. Хусаинов, Е. К. Математическое и имитационное моделирование срабатывания короткозамыкателя контактной сети постоянного тока / Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2021. – С. 246–251.

11. Хусаинов, Е. К. Сравнительный анализ алгоритмов дистанционной защиты с адаптацией к тяговому режиму контактной сети системы тягового электроснабжения постоянного тока / Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : материалы научной конференции. – Новосибирск : Сибирская академическая книга, 2021. – № 5(59). – С. 44–49.

12. Хусаинов, Е. К. Обоснование возможности применения адаптации защит контактной сети к тяговому режиму / Е. К. Хусаинов. – Текст : непосредственный // Молодые ученые России : материалы научной конференции. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2021. – С. 60–63.