

На правах рукописи



Демиденко Иван Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ
ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность: 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кузнецов Сергей Михайлович

Официальные оппоненты: **Сальников Василий Герасимович**
доктор технических наук, профессор,
Новосибирская академия водного транспорта, профессор кафедры электроэнергетические системы и электротехника

Лукутин Борис Владимирович
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, заведующий кафедрой электроснабжение промышленных предприятий

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск

Защита диссертации состоится « 5 » декабря 2013 г., в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « 30 » октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, доктор
технических наук, профессор



Нейман Владимир Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В настоящее время железнодорожный транспорт является стратегически важным объектом экономики государства, оказывающим значительное влияние на развитие страны в целом. Грузооборот на Российских железных дорогах, за последние десять лет, значительно увеличился, возросли и массы составов, обновился парк локомотивов, увеличилась участковая скорость, повысились требования к надёжности работы системы электроснабжения. Повышение массы поездов привело к увеличению токов нагрузки в контактной сети. Токи нагрузки стали соизмеримы с токами короткого замыкания (КЗ) в удаленной точке тяговой сети, что снизило надёжность работы системы тягового электроснабжения.

При функционировании системы тяговая подстанция – тяговая сеть – электроподвижной состав (ТП – ТС – ЭПС) часто возникают отказы её отдельных элементов, вызванные внешними воздействиями, ошибками персонала, износом её отдельных элементов, которые сопровождаются КЗ. Последние вызывают протекание токов, величина которых вблизи ТП железных дорог, электрифицированных на постоянном токе, может составить 20-50 кА, а в удаленной точке у шин соседней подстанции 2-6 кА. В этом случае минимальные токи КЗ могут быть соизмеримы с длительно допустимыми токами нагрузки. Аварийные режимы приводят к выходу из строя оборудования в месте повреждения изоляции, к повышенному износу коммутационной аппаратуры, а также могут приводить к перерыву движения поездов. Для предотвращения таких последствий в системе защита должна за сотые доли секунды отключать поврежденный элемент. Защита является широко распространенным видом автоматики, обеспечивающим надежное функционирование системы ТП – ТС – ЭПС. Она непрерывно находится в режиме дежурства или ожидания заявки на срабатывание. Срабатывание происходит при превышении контролируемых параметров заданной величины (уставки).

В настоящее время разработано и применяется большое количество типов защит, которые используют в качестве контролируемой величины, как параметры тяговой сети (ток, напряжение, сопротивление), так и вторичные факторы (токовременные, температуру провода, электромагнитные процессы и др.), связанные с рабочими параметрами, определёнными зависимостями. В последние 10 лет предложено много новых типов защит, реагирующих на два и более признака: дистанционные, многопараметрические по признакам переходного процесса, в которых контролируют не только ток фидера, но и его изменение во времени, напряжение в тяговой сети и его спектральные составляющие. В некоторых типах защит осуществляют прямой или косвенный контроль температуры контактного провода.

Достаточно широкий набор известных способов защиты и автоматического контроля, изначально предполагает возможность для создания надёжного устройства защиты (УЗ) от перегрузок и КЗ в широком диапазоне режимов работы тяговой сети: пуск поезда, проезд секционного изолятора, неисправность на ЭПС и другие. Однако в реальных условиях эксплуатации электрифицированных железных дорог постоянного тока нашей страны и за рубежом, защита во многих случаях не удовлетворяет требованиям селективности и надёжности. Об этом свидетельствует большое

количество ложных срабатываний, отражаемое в статистике энергетических служб и публикации с предложениями о совершенствовании защиты.

Главной причиной отсутствия надежной и селективной защиты является сложность определения режима работы, протекающего в ТС. Известны разработки, которые могут контролировать определенные переходные процессы в тяговой сети. Однако отсутствует метод для определения точных граничных значений параметров переходных процессов различия аварийных и нормальных режимов для конкретных участков ТС. Значительный вклад в исследование переходных процессов в ТС постоянного тока и в разработку устройств защиты на их основе, внесли российские ученые: Радченко В.Д., Сухопрудский Н.Д., Соколов С.Д., Марквардт Г.Г., Кучма К.Г., Пупынин В.Н., Фигурнов Е.П., Косарев Б.И., Кузнецов С.М., Векслер М.И., Голубев А.И., Сердинов С.М., Фарафонов А.В., Рыков И.И., Плешаков Ю.В., Савченко В.А., Гречишников В.А., Мизинцев В.А. и др.

В диссертационной работе разрабатывались новые методы исследования переходных процессов в тяговой сети с целью определения признаков и параметров для использования их при выборе типов защит и расчете уставок. В качестве инструмента исследований использовано имитационное моделирование переходных процессов в системе электроснабжения ТП – ТС – ЭПС, которое позволяет проанализировать все возможные режимы её функционирования. Математическое моделирование позволяет провести эксперименты многократно, изменяя внутренне значение выбранных параметров системы. Кроме того, результаты математического моделирования достаточно просто позволяют определять граничные значения различных режимов работы тяговой сети.

Результаты теоретических исследований подтверждены экспериментальными исследованиями на опытном участке тяговой сети Западно-Сибирской железной дороги. В качестве инструментария (измерительных систем) использованы цифровые терминалы защиты и автоматики фидеров тяговой сети типа ЦЗАФ-3,3 70 комплектов которых находятся в опытной эксплуатации. Экспериментальные исследования проведены для нормальных и аварийных режимов работы тяговой сети и реальных значений её параметров.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований, полученных в диссертационной работе, разработаны предложения по настройке и совершенствованию существующих и внедряемых электронных защит тяговой сети.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности защиты тяговой сети постоянного тока, путем совершенствования типов защит и адекватного выбора их уставок.

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

1. Проведение ретроспективного анализа существующих и наиболее применяемых видов защит тяговой сети постоянного тока в России и за рубежом.
2. Определение факторов вызывающих ложные срабатывания существующих защит на действующем участке тяговой сети и разработка мероприятий для их минимизации или полного устранения.
3. Исследование динамики изменения тока при переходных процессах в нормальных и аварийных режимах работы тяговой сети экспериментально и с

помощью математического моделирования с целью определения граничных значений параметров переходных процессов и выбора значений уставок на участке тяговой сети.

4. Разработка методики выбора типов защит и настройки уставок устройств и комплектов цифровых защит контактной сети постоянного тока на основе математического моделирования и мониторинга применительно к конкретному участку тяговой сети.

5. На основе теоретических и экспериментальных исследований, разработать рекомендации по совершенствованию комплектов цифровых защит для фидерных зон тяговой сети постоянного тока.

Методы исследования. Основные результаты диссертационной работы получены на основе системного подхода к организации защиты межподстанционной зоны (участка) ТС, и новых технических возможностей цифровых терминалов, объединяющих функции защиты, автоматики и диагностики при использовании фундаментальных законов электротехники; математического аппарата дифференциального и интегрального исчисления; основных теорем и методов теории вероятностей и математической статистики; имитационного моделирования. Экспериментальные исследования переходных процессов проводились в реальных условиях работы системы электроснабжения железнодорожного транспорта. Расчеты выполнены с помощью математического моделирования в средах «*MATLAB*» и *Statistica 6.0*. Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы обоснована теоретически и подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан способ определения зон действия полных комплектов защит постоянного тока с последующим выбором устройств защиты для каждой из зон.

2. Разработана методика расчета уставок защит постоянного тока, отличающаяся тем, что она основана на совмещении аналитического расчета установившихся режимов и математического моделирования переходных процессов в ней, с последующей корректировкой выбранных уставок на действующем участке с помощью мониторинга, что позволяет повысить надежность функционирования защиты тяговой сети.

Практическая значимость и реализация результатов работы.

1. Применение мониторинга тяговой сети как элемента в методике выбора величин уставок срабатывания защит позволяет выявить и предупредить возникновение нестандартных и предаварийных ситуаций.

2. Имитационное моделирование режимов работы участка тяговой сети позволяет проводить оценку параметров переходных процессов при определении уставок устройств и комплектов защит.

3. Внедрение методики выбора типов защиты и расчета их уставок в системе электроснабжения Западно-Сибирской железной дороги.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способ выбора типов защит и зон их действия для участков тяговой сети постоянного тока.

2. Методика расчета уставок защит устройств, комплектов цифровых защит и полных комплектов защит участков тяговой сети постоянного тока.

Личный вклад автора состоит в формировании задач, проведении экспериментальных исследований и реализации системы мониторинга на действующей тяговой подстанции, определении граничных значений параметров для различных режимов работы тяговой сети, разработке математических моделей тяговой сети постоянного тока, анализе и обобщении полученных данных, сопоставлении результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования, а так же создании системы удалённого доступа к цифровым терминалам для обеспечения системы непрерывного мониторинга и выявления не стандартных ситуаций.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были опубликованы и докладывались на шестнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Москва, 2010 г; Всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых «Наука Технологии Инновации», г. Новосибирск, 2009г, 2010г, 2013г.; Межвузовских научных студенческих конференциях «Интеллектуальный потенциал Сибири» г. Новосибирск в 2009, 2010, 2011 гг; Международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий», г. Сочи, 2012г; 51-ой Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск 2013г.; На научных семинарах кафедры «Электротехнические комплексы» НГТУ, г. Новосибирск, 2009-2013г.

Публикации. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований опубликованы в 14 печатных работах, из них 6 статей в реферируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 8 – в сборниках трудов Международных, Всероссийских, Межвузовских научно-технических и научно-практических конференций.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения. Основной текст работы изложен на 167 страницах и включает 66 рисунков, 21 таблицу, список использованных источников из 103 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены пути их решения.

В первой главе проведён анализ существующих видов защит: токовых, потенциальных и специальных, применяемых на российском и зарубежном железнодорожном и городском электрическом транспорте (ГЭТ). Рассмотрены наиболее широко применяемые токово-импульсные защиты (МИЗ), а так же защиты по скорости нарастания (di/dt) и приращения тока (dI/dt), реализованные в терминалах цифровых защит, которые в настоящее время внедряют на железных дорогах РЖД, ГЭТ и за рубежом. Потенциальные и специальные защиты, реагируют на косвенные признаки КЗ, сопровождающие аварийные режимы работы ТС: изменение напряжения, температуры, сопротивления.

Для оценки надёжности защит проведён статистический анализ их срабатывания на 18 ТП Инской дистанции электроснабжения Западно-Сибирской ж. д. За 2011 год

произошло 4240 срабатываний УЗ. Если каждое отключение аварийное, то за месяц должно произойти в среднем 350 КЗ по причине повреждений устройств контактной сети (КС), ЭПС или ТП. Однако, согласно системе учета отказов (КАСАНТ) устройств электроснабжения за год произошло всего 24 отказа КС, ТП и 10 отказов ЭПС. Общее количество отказов $N_{\text{ОТК}}$ устройств тягового электроснабжения, по дистанции, определяется как:

$$N_{\text{ОТК}} = N_{\text{О.ТП}} + N_{\text{О.КС}}. \quad (1)$$

Тогда общее количество срабатываний защиты $N_{\text{СЗ}}$

$$N_{\text{СЗ}} = k N_{\text{ОТК}} + k_{\text{Э}} N_{\text{О.ЭПС}} + k N_{\text{О.Н}} + N_{\text{ЛСЗ}}, \quad (2)$$

Количество ложных срабатываний устройств защиты по (2)

$$N_{\text{ЛСЗ}} = 4240 \cdot 3 \cdot 24 + 5 \cdot 10 + 3 \cdot 50 = 3968.$$

Таким образом, за время анализа произошло 3968 ложных срабатываний УЗ из общего количества 4240, за год имеем 232 правильных срабатывания защиты на 70 фидеров КС. При этом за месяц количество ложных срабатываний в среднем составляет 330, а отключений от КЗ – 19. В течение 2-х лет относительное количество правильных срабатываний защиты составило всего 10%, а ложных 90%, что подтверждает низкую селективность защит. Это приводит к повышенному износу быстродействующих выключателей (БВ) и увеличению эксплуатационных расходов на содержание устройств. В электронных терминалах можно реализовать сложные алгоритмы совместной работы различных видов защит, что должно улучшить селективность и повысить надёжность УЗ.

Во второй главе рассмотрены требования к защитам, основными из которых являются селективность, чувствительность, быстродействие и надёжность функционирования. Обязательным условием обеспечения защитой участка ТС является наличие не менее двух видов защит.

Для исследования эффективности защиты ТС был создан опытный полигон длиной 38 км с тремя ТП, тремя постами секционирования (ПС) и двумя параллельными постами секционирования (ППС) (рис. 1). На ТП_Г установлены цифровые терминалы ЦЗАФ-3,3 кВ, остальные ТП, ПС и ППС оснащены МИЗ с реле дифференциальным шунтом (РДШ). Расчеты уставок устройств защит и терминалов выполнены согласно «Инструкции по настройке защит». Зоны действия уставок и обеспеченность участка ТС установленными защитами предложено отражать в виде графиков селективности (рис. 1).

Анализ графика селективности позволяет выявить 10 «мёртвых» зон для нормальной схемы питания ТС. В схеме питания для вынужденного режима, когда отключены ПС и ППС выявлено 8 «мёртвых» зон. В нормальном режиме длина «мёртвой» зоны МИЗ на РДШ находится в пределах от 0,5 км до 2 км, в вынужденном режиме от 4 до 7 км. Увеличение зоны действия защиты, в вынужденном режиме обычно осуществляют уменьшением уставки МИЗ. Но в этом случае значение тока КЗ в удаленной точке становится меньше значения тока поезда вблизи ТП. Это приводит к не селективной работе защиты. Из анализа работы МИЗ следует, что использование только одного вида защиты создаёт большое количество «мёртвых» зон. Это может быть устранено установкой цифровых терминалов на всех фидерных зонах.

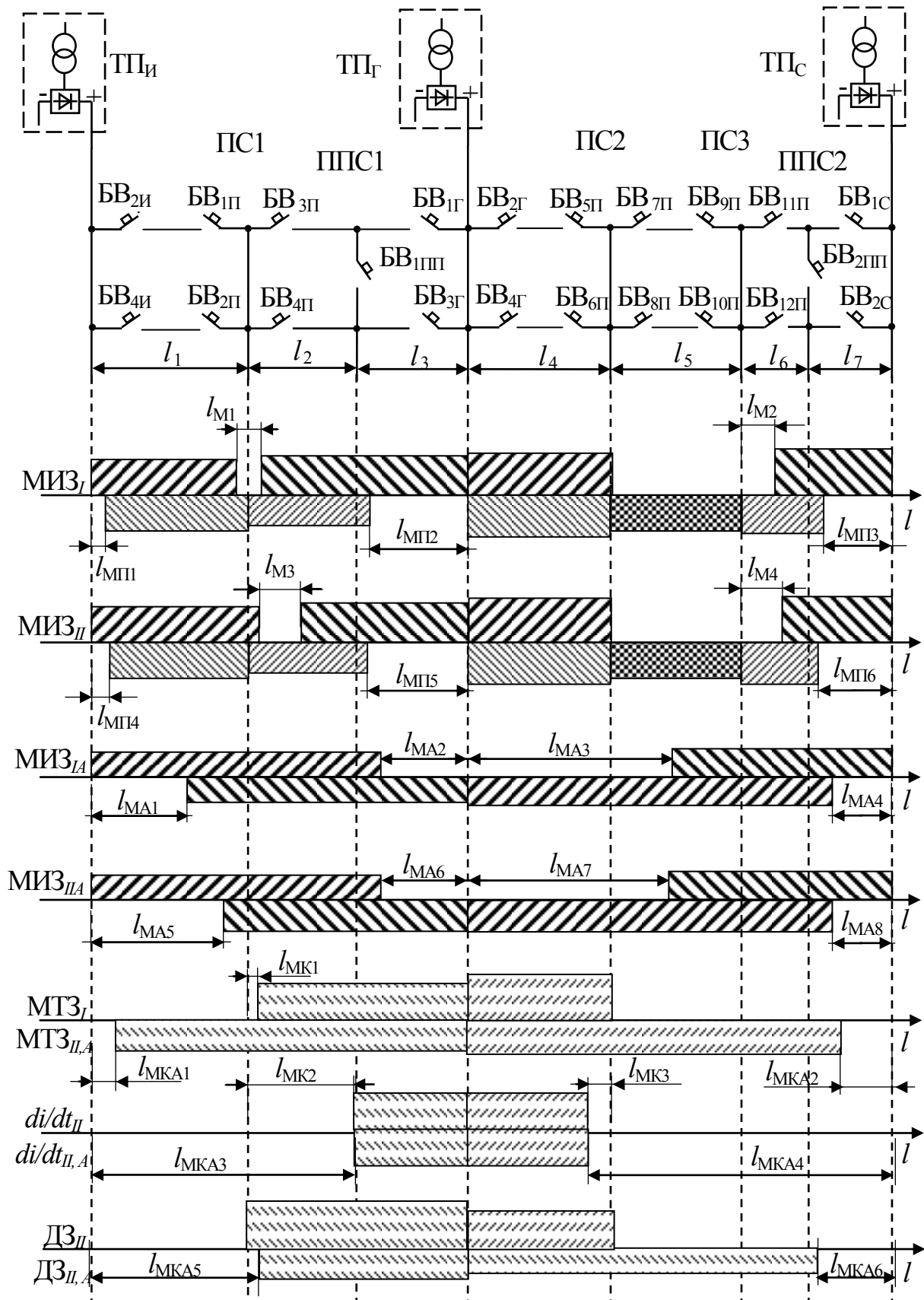


Рис. 1. Диаграмма зон действия защит на экспериментальном двухпутном участке ТС с существующими защитами и уставками: $МИЗ_I$, $МИЗ_{II}$ – зоны действия защиты МИЗ в нормальном режиме; $МИЗ_{IA}$, $МИЗ_{IIA}$ – зоны действия защиты МИЗ в вынужденном режиме; $l_{MI} \div l_{M4}$ – длины «мёртвых» зон защит МИЗ тяговых подстанций, в нормальном режиме; $l_{MPI} \div l_{MPI6}$ – длины «мёртвых» зон защит МИЗ

постов секционирования, в нормальном режиме, $l_{МА1} \div l_{МТ6}$ – длины «мёртвых» зон защит МИЗ тяговых подстанций, в вынужденном режиме; $l_{МК1} \div l_{МК3}$ – длины «мёртвых» зон комплектов защит, для нормальных режимов; $l_{МКА1} \div l_{МКА6}$ – длины «мёртвых» зон комплектов защит, для вынужденных режимов

В полном комплекте защит Ф2 и Ф4 ТП_Г использована не только МИЗ на РДШ, но и максимальная токовая защита (МТЗ), di/dt , дистанционная защита (ДЗ) терминала. Длины «мертвых» зон защит цифровых терминалов, в нормальном режиме работы ТС опытного участка, составляют: МТЗ - $l_{МК1} = 1,1$ км; di/dt $l_{МК2} = 5$ км; $l_{МК3} = 1,3$ км, в вынужденном режиме работы ТС: МТЗ - $l_{МКА1} = 5,6$ км; $l_{МКА2} = 4,6$ км; di/dt - $l_{МКА3} = 13$ км; $l_{МКА4} = 15,6$ км; ДЗ - $l_{МКА5} = 10,1$ км; $l_{МКА6} = 6,4$ км. Дистанционная защита перекрывает всю секцию КС в нормальном режиме. Другие защиты (в примере рис.1) чувствуют КЗ лишь в части зоны действия.

Таким образом, выбор уставок устройства и полного комплекта защит по существующим рекомендациям не обеспечивает защитой все межподстанционные зоны. Существующие рекомендации по настройке цифровых защит не могут полноценно реализовать возможности устройства из-за отсутствия методики выбора типов защит и их уставок.

В третьей главе были проведены экспериментальные исследования переходных процессов в ТС. Для проведения исследований на экспериментальном участке была разработана, апробирована и внедрена схема удаленного доступа к цифровым терминалам ЦЗАФ-3,3. В процессе экспериментальных исследований были определены признаки и параметры переходных процессов в ТС, при нормальных и аварийных режимах и проведен мониторинг их изменений в зависимости от режима работы и схемы питания участка ТС.

Подключение экспериментальных цифровых терминалов к компьютеру ТП по средствам системы удаленного доступа, позволяет наблюдать и оперировать устройством ЦЗАФ-3,3. Для этого необходимо зайти через локальную сеть в автоматическую систему управления (АСУ) ТП, открыть программу запуска любого выбранного терминала. После выбора терминала, исследователь может управлять устройством, изменять уставки отдельных фидеров в связи с возникшими изменениями схемы питания или пропуска сверхтяжёлых поездов.

В процессе экспериментальных исследований записывались мгновенные значения тока, напряжения, скачки тока, скорости изменения тока, временные параметры на опытном участке ТС. Для расширения полигона экспериментальных исследований использовано 1080 осциллограмм аварийных срабатываний защит с 12 мониторов других ТП. В качестве примера, на рис. 2 приведена осциллограмма аварийного режима в ТС, на расстоянии 3 км от ТП.

По осциллограмме можно определить численные значения всех исследуемых параметров переходного процесса. Кроме того, по осциллограммам можно выявить причину ложных срабатываний защиты. Так, например, рис. 3,а отображает процесс срабатывания от перегрузки, а рис. 3,б – неуспешное автоматическое повторное включение (АПВ), при котором значение скорости нарастания тока соизмеримо со значением в режиме КЗ. В момент превышения тока уставки МТЗ, равного 4000 А (рис. 3,а), произошло отключение выключателя. При включении от АПВ (рис. 3,б) скорость

нарастания тока составила 210 А/мс, что соизмеримо с режимом КЗ и защита выдала бы сигнал на отключение. При проведении эксперимента параметр защиты di/dt был выведён на сигнал и поэтому отключение БВ не произошло.

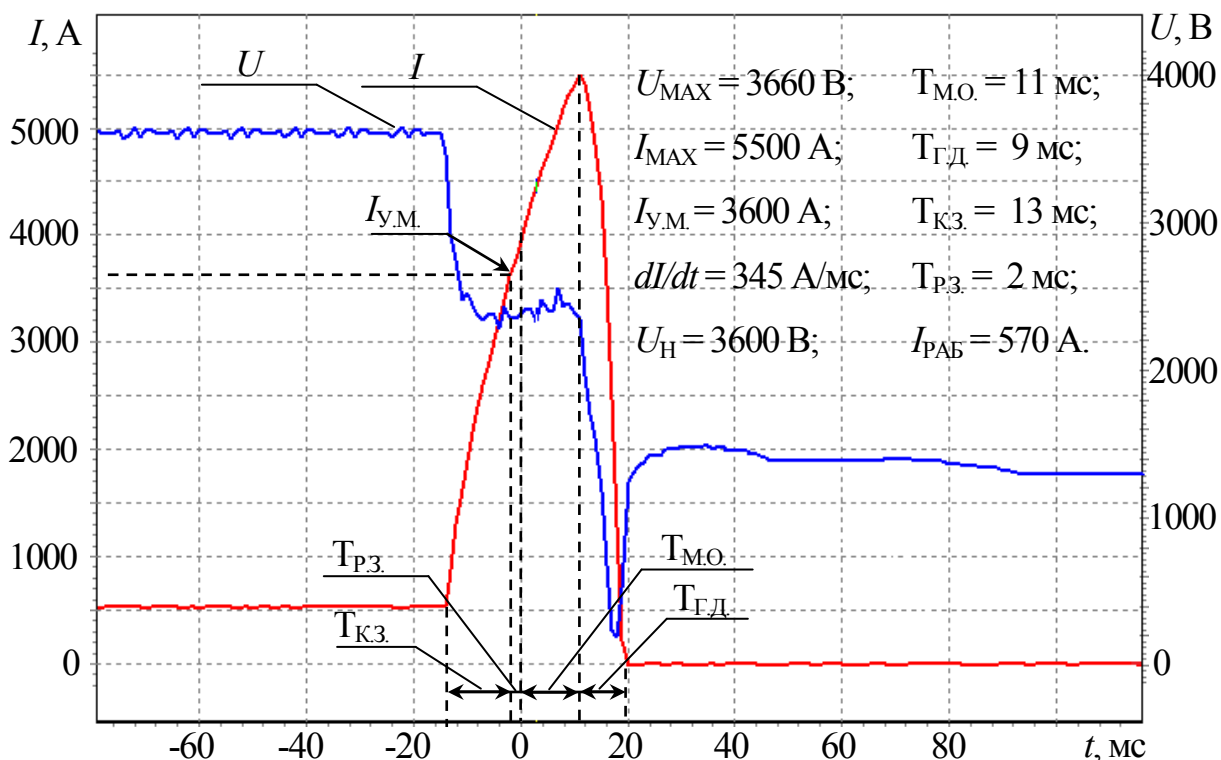


Рис. 2. Осциллограмма аварийного отключения выключателя при срабатывании защиты в случае короткого замыкания: $I_{У.М.}$ – уставка максимальной токовой защиты, А; $T_{КЗ}$ – время короткого замыкания в тяговой сети, мс; $T_{РЗ}$ – время работы защиты, мс; $T_{МО}$ – время механического отключения БВ, мс; $T_{ГД}$ – время гашения дуги в БВ, мс.

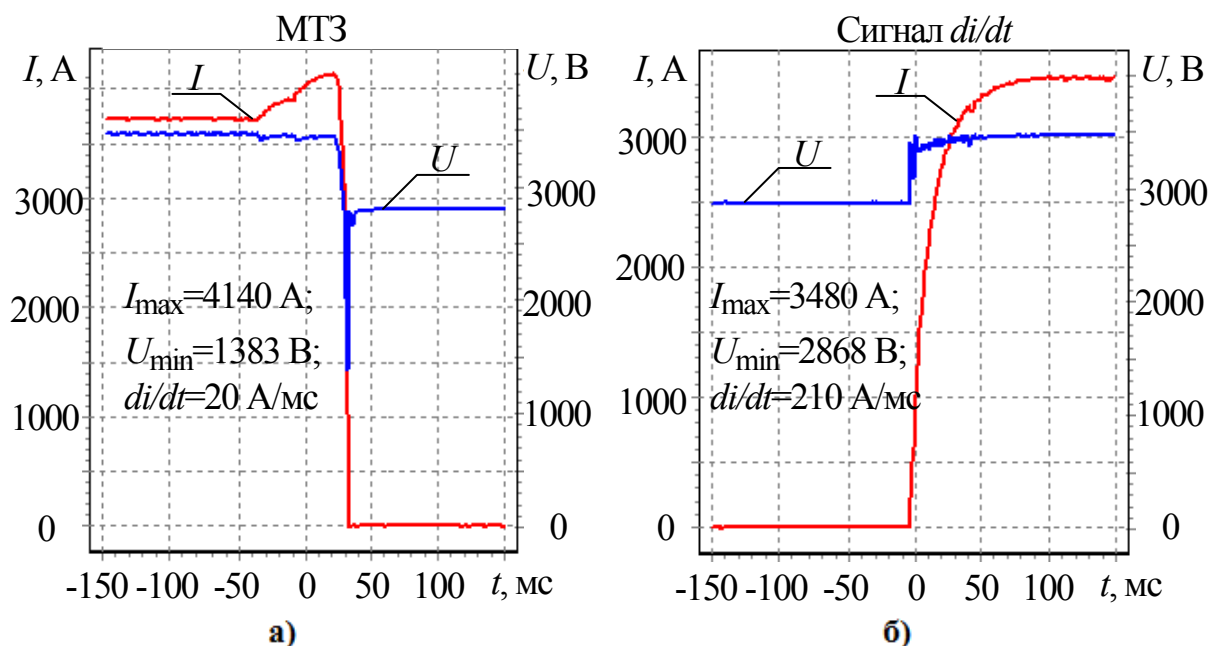


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения тяговой сети при мониторинге: а – отключение БВ от МТЗ; б – ложный сигнал на отключение БВ от защиты di/dt

В эксплуатации при анализе ложных отключений по параметру di/dt должны обязательно расшифровываться обе осциллограммы терминала (основное отключение и следующее отключение БВ).

В результате обработки осциллограмм проведен статистический анализ скорости нарастания тока в тяговой сети при КЗ и при повторных пусках ЭПС. При этом были определены средние значения и среднеквадратичные отклонения значений di/dt , построены гистограммы при КЗ и повторных пусках (рис. 4 и рис. 5).

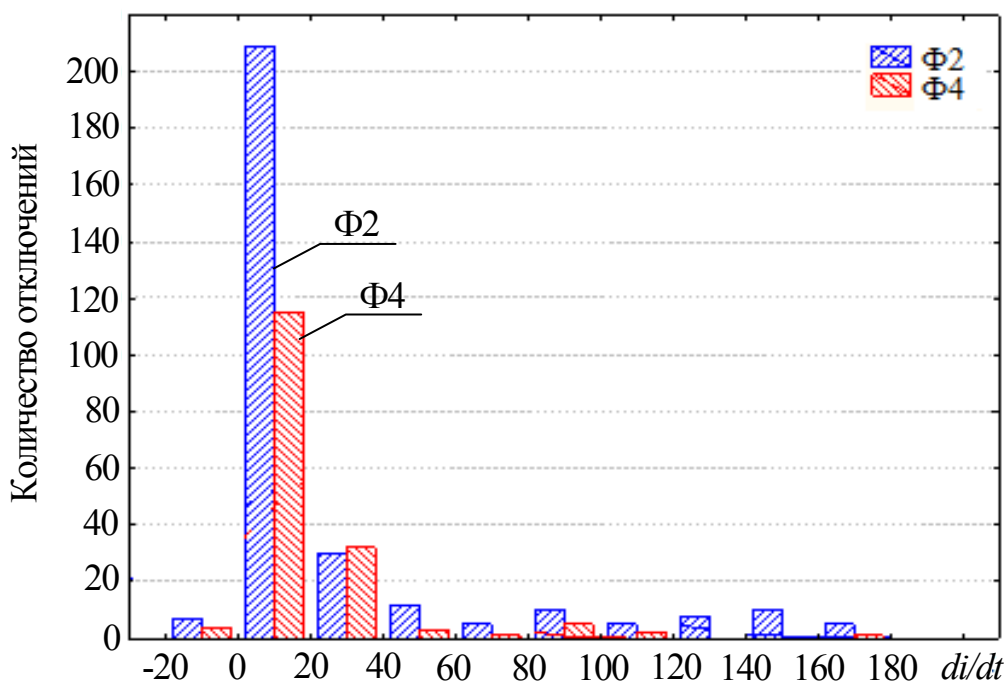


Рис. 4. Гистограмма распределений di/dt при повторных пусках ЭПС

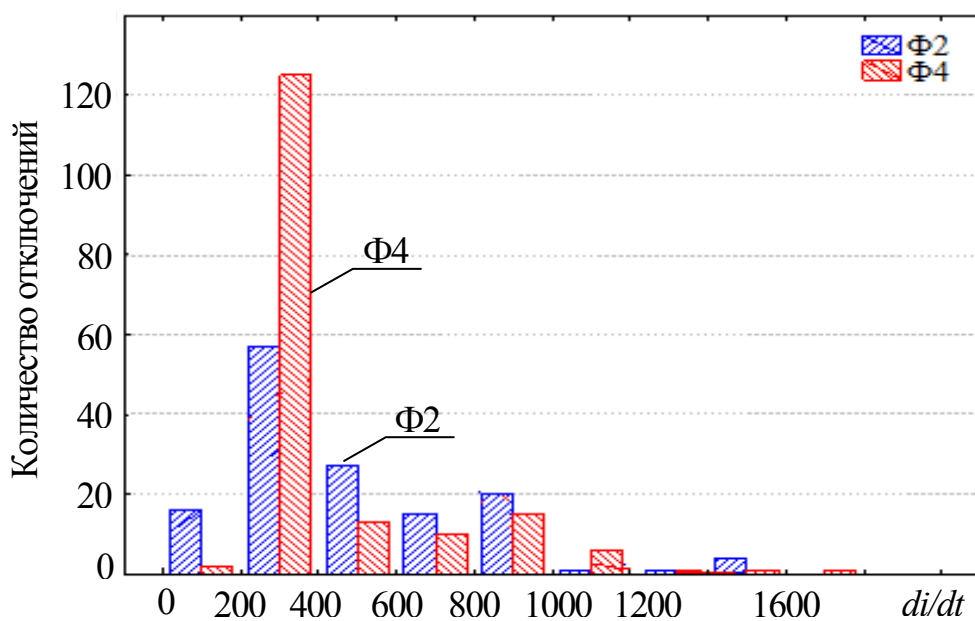


Рис. 5. Гистограмма распределений di/dt при коротких замыканиях

Экспериментально установлено, что скорость нарастания тока при КЗ в удаленной точке составляет 170-200 А/мс, при повторном пуске di/dt лежит в диапазоне от 20 до

110 А/мс, что согласуется с исследованиями других авторов. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют определить граничные скорости нарастания тока, которые могут быть использованы при выборе уставок защит.

В четвертой главе автором разработана модель, имитирующая нормальные, вынужденные и аварийные режимы работы ТС. Модель была создана в системе *Simulink* программного обеспечения *MATLAB*. Структура математической модели тяговой сети, составленной в *MATLAB*, приведена на рис. 6.

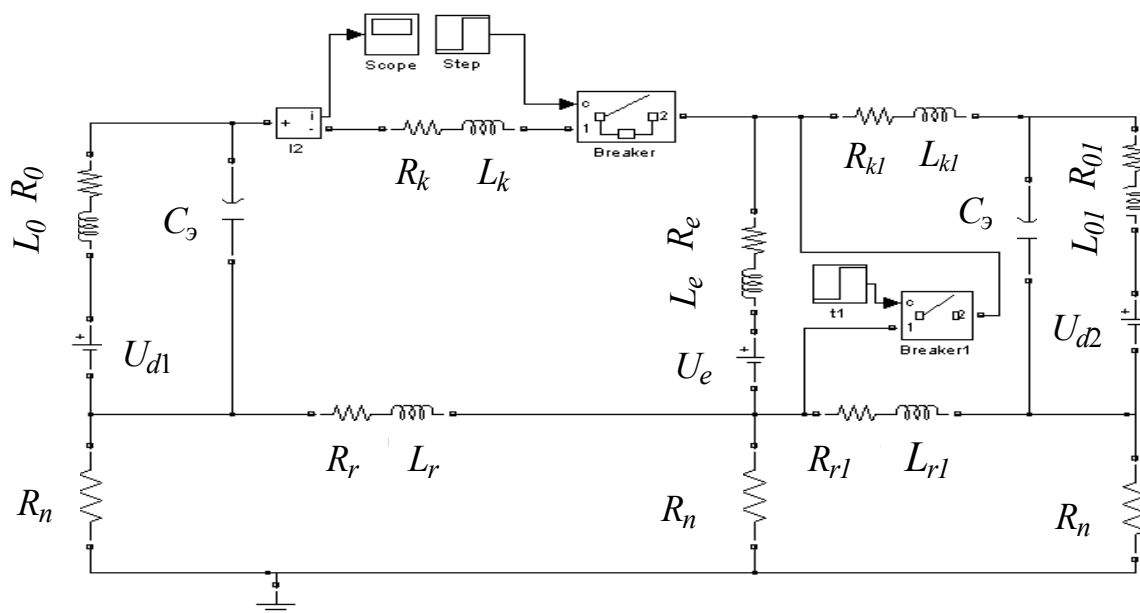


Рис. 6. Структурная модель тяговой сети, при коротком замыкании вблизи ЭПС

Для нормального режима работы ТС были промоделированы процессы пуска поезда вблизи ТП, у ПС и в удаленной точке. Аварийные режимы моделировались при различных схемах питания опытного участка ТС (рис. 7). Кривые тока и напряжения, полученные в процессе моделирования и в результате экспериментальных исследований, имеют хорошую степень сходимости.

Исследования на модели короткого замыкания на расстоянии 2 км от ТП позволили определить максимальную скорость нарастания тока на ТП1 равную 570 - 600 А/мс. При экспериментальных исследованиях получена скорость нарастания тока 580 А/мс, что подтверждает высокую сходимость предложенной модели исследуемому процессу.

В работе проведены исследования на модели зависимости скоростей нарастания и приращения тока для разных расстояний от ТП (рис. 8). Исследования нормальных и аварийных режимов работы ТС на имитационной модели позволяют определять значения тока и напряжения, параметры изменения тока в переходных процессах: ΔI , di/dt , влияния ЭПС в требуемом диапазоне изменения параметров.

В результате моделирования получены следующие значения параметров: при пуске поезда di/dt достигает 4 А/мс для электровоза ВЛ10 на расстоянии 5 км от ТП; при перегруппировке ТЭД на этом же расстоянии, di/dt достигает 30 – 40 А/мс; при КЗ этот параметр составляет 200 – 300 А/мс, процесс длится до 20 мс.

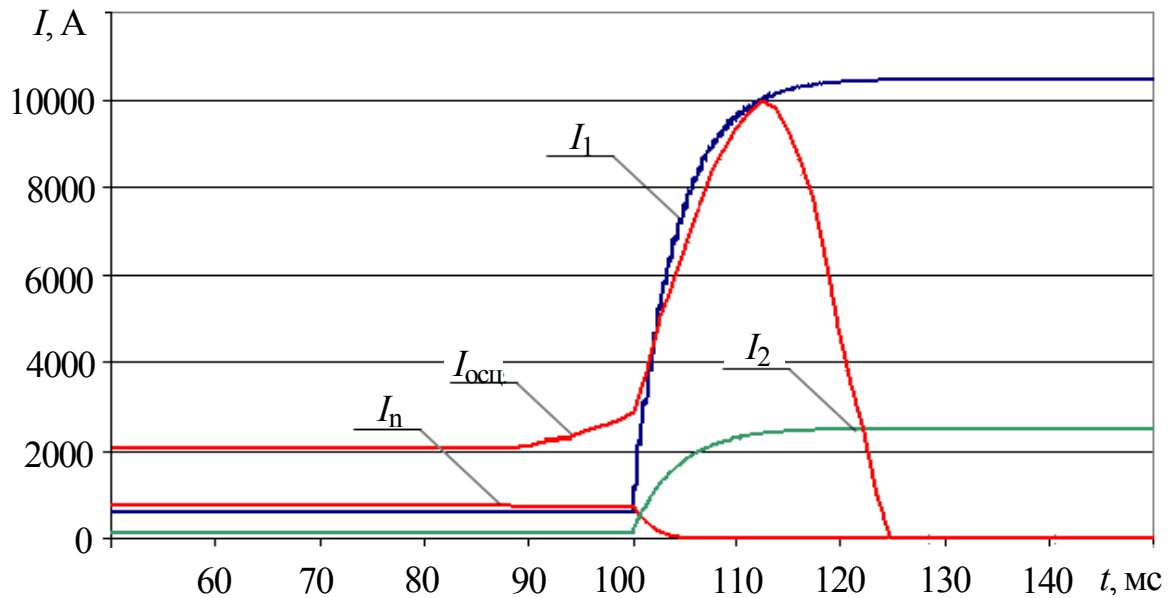


Рис. 7. Зависимости тока от времени при коротком замыкании, полученные при моделировании и экспериментально: I_1 – ток ТП1, I_2 – ток ТП 2, I_n – ток поезда, $I_{осц}$ – ток осциллограммы

В удаленной точке при переходном процессе пуска поезда di/dt снижается до 2 А/мс, при перегруппировке ТЭД до 15 А/мс, а при КЗ на этом же расстоянии, в зависимости от параметров сети, в неблагоприятных условиях может снижаться до 110 А/мс. Таким образом, скорость нарастания тока может быть признаком КЗ, индивидуальным для каждой межподстанционной зоны.

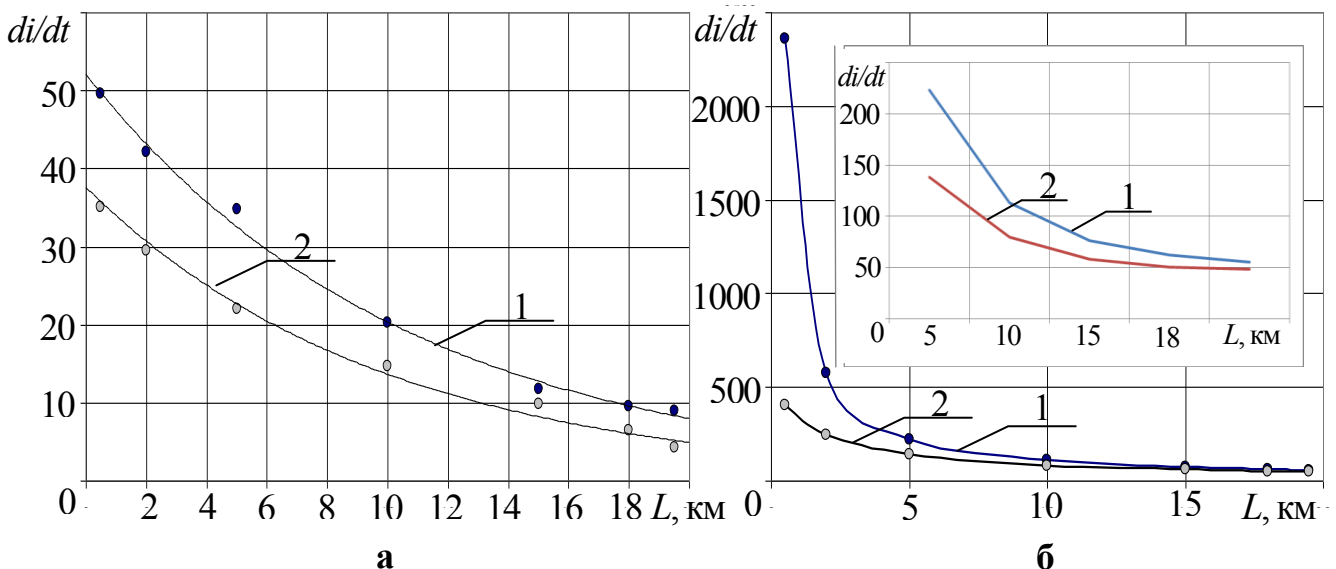


Рис. 8. Зависимости скорости нарастания (кривая 1) и приращения тока (кривая 2) от расстояния до ТП: а – при перегруппировках ТЭД; б – при коротком замыкании

Пятая глава посвящена разработке методики выбора защит и расчета их уставок. Более высокую точность настройки уставок можно получить совместным

использованием аналитического расчета установившихся процессов в ТС, исследования на математической модели переходных процессов в ней и анализа результатов мониторинга. Области использования этих компонентов методики исследованы в 2, 3, 4 разделах диссертационной работы. Таким образом, в целях повышения точности настройки уставок различных защит и выполнения необходимых проверок обеспеченности защитой, целесообразно использовать комплекс методов. Исходные данные, технические требования и параметры определяются в соответствии с методом аналитического расчета. При этом можно провести ряд исследований по величине абсолютного значения токов нагрузки и аварийных режимов на секции КС. Для участков, оборудованных только РДШ, далее следует проверить чувствительность к скачкам нагрузки по характеристикам реле и определить минимальную величину тока нагрузки и величины скачков, вызывающие ложные срабатывания защиты. Эти параметры заносят в карту уставок, для последующего оперативного использования.

При оборудовании БВ цифровыми терминалами вводят в его память значения (уставки) нескольких контролируемых параметров. Численные значения параметров согласно «Инструкции по настройке защит» рекомендовано выбирать по средним значениям на сети дорог, что приводит к ложным срабатываниям защит, устраняемых экспериментальным путем на основе изменения величин. Чтобы исключить этот недостаток, в работе проведены необходимые исследования переходных процессов на математической модели и разработана система удаленного доступа к мониторам цифровых защит, для обеспечения наблюдения и анализа изменения параметров в зависимости от оперативной схемы электроснабжения участка, типа ЭПС и веса поездов.

Применение математического моделирования позволяет исследовать переходные процессы при нормальных и аварийных режимах, проанализировать их параметры (ток, приращения и скорости его нарастания) в характерных точках ТС для различных схем питания. В результате первого и второго этапов можно выбрать расчетный режим и схему межподстанционной зоны, для которой рассчитываются уставки. Выбранные таким методом уставки можно выставить на соответствующем устройстве защиты.

При мониторинге уточняются параметры с учетом влияния режима ведения ЭПС, оцениваются пиковые нагрузки, определяются количество ЭПС и расстояния между ними на участке. Непрерывный мониторинг (2 – 5 суток) позволяет выявить характерные режимы для данной фидерной зоны, определить расчетные точки и, введя их в математическую модель, уточнить уставки. Далее в процессе эксплуатации с помощью мониторинга отслеживаются исследуемые параметры для коррекции уставок (карты уставок). Кроме того, мониторинг позволяет оперативно отслеживать режимы работы ТС. Это позволяет предотвращать аварийные последствия при повторных включениях на КЗ.

Совместное использование математического моделирования и мониторинга позволило автору разработать методику настройки уставок для устройства защиты, цифрового терминала и полного комплекта защит.

Методика расчета и выбора уставок защит заключается в следующем:

1. Проведение трассировки участка тяговой сети (как правило, в границах энергоучастка);
2. Выбор положения объектов электроснабжения на участке;

3. Определение действующих ограничений скорости движения на участке;
4. Определение марки и длины проводов контактной сети, питающих и отсасывающих проводов, рельсов, тросов группового заземления и т.п. для каждой фидерной зоны каждой тяговой подстанции;
5. Расчет электрических параметров проводов контактной подвески, питающих и отсасывающих фидеров;
6. Выбор параметров тяговых подстанций;
7. Создание базы данных (по данным п.1...6 в пакете КОРТЭС) и проведение расчётов аварийных режимов ТС;
8. Определение тяговой нагрузки;
9. Расчёт токов КЗ для нормальных и вынужденных схем питания;
10. Выбор уставок защит по аналитическим формулам, приведенным в «Инструкции по настройке защит» для всех защит и режимов;
11. Построение диаграммы закрытия зон каждой защитой, определение длин «мёртвых» зон и где работает только одна защита;
12. Определение селективности функционирования полного комплекта защит и отдельно стоящих устройств (обеспеченность защитой участка ТС);
13. Проверка режимов каждого фидера на математической модели и определение уставок с учетом возможных аварийных и нормальных режимов;
14. Проведение мониторинга тяговой сети (с учетом уставок полученных на математической модели);
15. Проведение корректировки уставок защит с учетом данных мониторинга (сравнение их с расчётными и полученными на модели) и проведение повторного мониторинга.
16. Построение диаграммы закрытия зон каждой защитой, с учетом математического моделирования и мониторинга. Определение длин «мёртвых» зон и проверка обеспеченности защитой выбранного участка ТС.
17. Проверка обеспеченности защиты, с учетом откорректированных уставок. Если защиты не перекрывают «мёртвые зоны», тогда необходимо возвращаться на пункт 5 (изменять параметры: уменьшить длину троса заземления, добавить ППС и проверить обеспеченность заново), либо проводить повторное математическое моделирование (пункт 13), с учетом выявленных нештатных ситуаций.
18. Составление диаграммы селективности выбранных типов защит и карты уставок.

Диаграммы селективности выбранных защит участка ТС и уставок, для экспериментального участка по разработанной методике, приведены на рис. 9.

Если после повторного математического моделирования обеспеченность остается не удовлетворительной, то выбирают дополнительные типы защит, с помощью которых можно перекрыть мёртвые зоны, таким образом, чтобы чувствовали КЗ не менее двух защит. При использовании цифровых терминалов на всех ТП набор его защит достаточен (около 5 типов) для реализации нормальной обеспеченности.

Если не удастся обеспечить нормальное функционирование защит в вынужденных режимах работы ТС предложено дополнить полные комплекты защиты телеблокировкой смежных БВ. Это справедливо для устройства типа МИЗ.

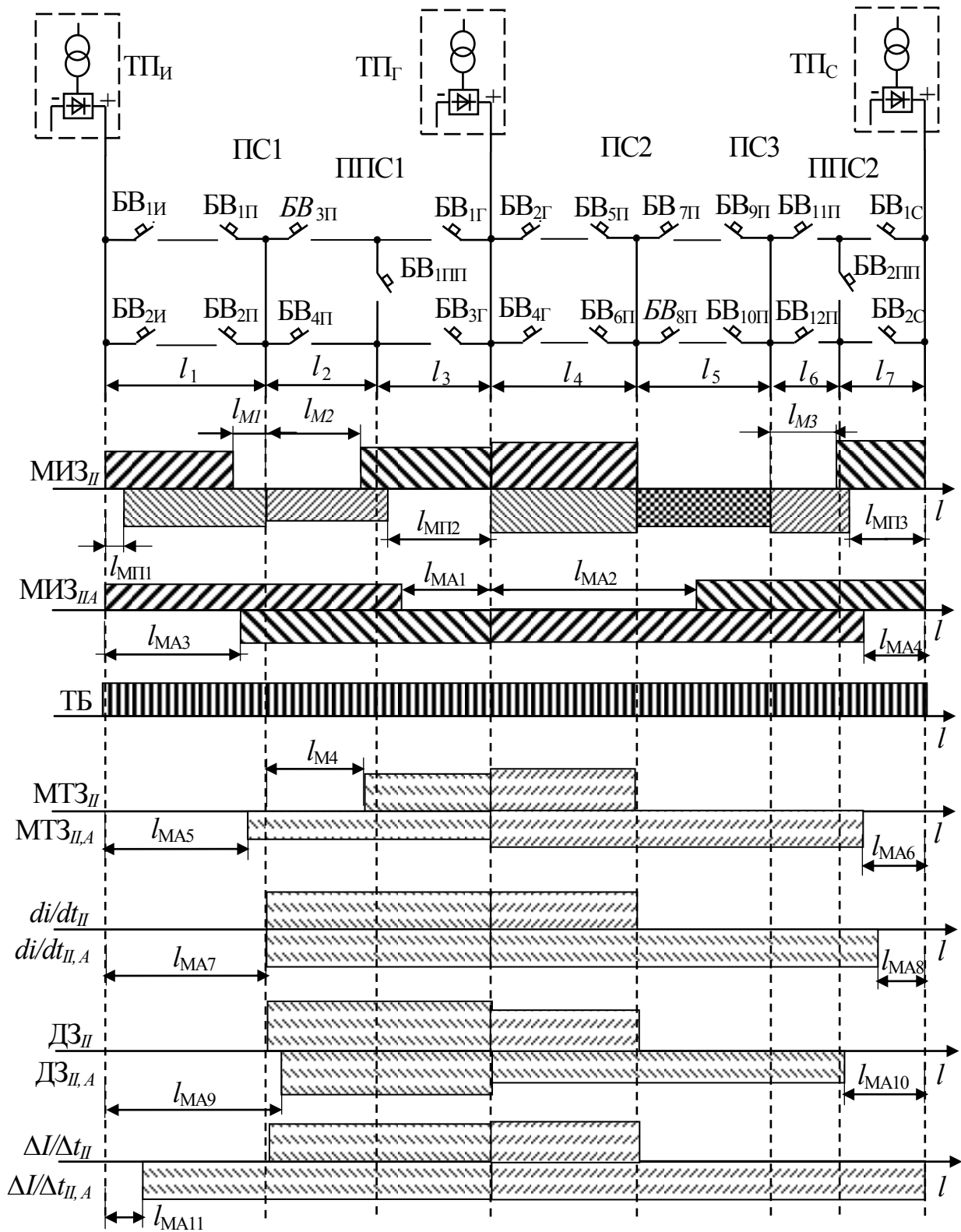


Рис. 9. Диаграмма селективности действия полного комплекта защит рассчитанного по разработанной методике

Согласно диаграммам рис. 9 основной защитой от КЗ вблизи подстанции является МИЗ и МТЗ терминала. При этом через контакты МИЗ формируется сигнал на отключение по телеблокировке БВ смежной ТП или ПС. Тем самым обеспечивается нормальное функционирование защит в пределах своего участка. Середину участка ТС, где возможные «мёртвые» зоны для обеих ТП (ТП - ПС) необходимо дополнить

комплексом цифровых защит. При этом основными защитами должны быть di/dt , $\Delta I/\Delta t$, а резервной ДЗ. Как установлено в результате математического моделирования в середине зоны питания участка ТС, такой набор защит может селективно обрабатывать аварийные режимы. Конец участка ТС будет обеспечивать МИЗ смежной ТП или ПС совместно с телеблокировкой.

Таким образом, надежная защита участка ТС в соответствии с предложенной методикой может быть обеспечена при формировании её согласно блок-схеме, представленной на рис. 10.

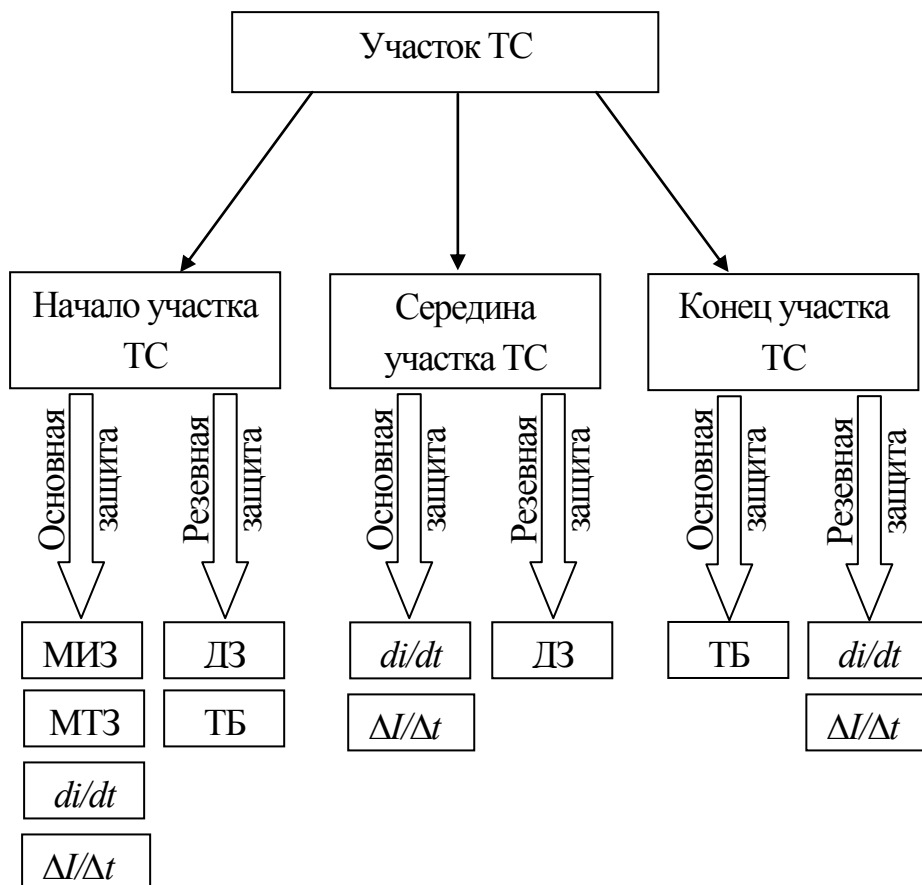


Рис. 10. Блок-схема организации защит на участке тяговой сети

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Существующая защита тяговых сетей не удовлетворяет современным требованиям селективности, количество ложных срабатываний достигает 90 %.

2. Статистические исследования осциллограмм срабатывания защиты цифровых терминалов позволили определить граничные средние значения скорости нарастания тока в тяговой сети, которые для режима КЗ лежат в пределах от 170...210 А/мс, а при пусках поездов – в пределах 20...80 А/мс.

3. Мониторинг тяговой сети позволяет выявлять не стандартные ситуации, которые приводят к ложным срабатываниям и при определении причин минимизировать их.

4. Параметры переходных процессов исследованы на математической модели, для различных режимов работы ТС. В результате моделирования определено, что при

перегруппировке ТЭД максимальная скорость нарастания тока ТС лежит в пределах 30...50 А/мс, приращение 30...35 А. При коротких замыканиях эти параметр составляют 500...2300А/мс и 250...400 А. В удаленной точке скорость нарастания и приращения тока при КЗ снижается до 70...90 А/мс и 50...60 А, что было использовано в дальнейшем при выборе уставок защит.

5. Разработана, апробирована и внедрена на опытном участке методика расчёта уставок для устройств и комплектов цифровых защит, основанная на совместном использовании математического моделирования и мониторинга. Предложенная методика позволила сократить на 40% количество ложных срабатываний защит и полностью ликвидировать «мёртвые» зоны на опытном участке.

6. Выработаны рекомендации по выбору типов защит и определению границ зон их действия. При наличии «мёртвых» зон на участке для их ликвидации необходимо дополнительно использовать телеблокировку МИЗ, а так же для снижения ложных срабатываний выполнять проверку изоляции тяговой сети перед АПВ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в реферируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ:

1. Кузнецов, С.М. Исследование на математической модели переходных процессов в тяговой сети железных дорог постоянного тока при пуске поезда / С.М Кузнецов, И.С. Демиденко, М.В. Ярославцев, А.О. Кривова [и др.]; Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока // Тр. НГАВТ.– 2009.–№2.– С. 324-327.

2. Кузнецов, С.М. Определение параметров признаков переходных процессов при коротком замыкании в тяговой сети / С.М Кузнецов, И.С. Демиденко, М.В. Ярославцев, А.В. Гашкова [и др.]; Транспорт: Наука, Техника, Управление // ВИНТИ.– 2010.– №8.– С. 32-34.

3. Кузнецов, С.М. Новые технические требования к оборудованию тяговых подстанций, как элемент инновационного развития системы электроснабжения электрического транспорта / С.М Кузнецов, И.С. Демиденко, А.В. Гашкова.; Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока // Тр. НГАВТ.– 2010.–№2.– С. 346-349.

4. Кузнецов, С.М. Выбор уставок электронных защит с коррекцией на имитационной модели/ С.М Кузнецов, И.С. Демиденко, А.В. Гашкова [и др.]; Транспорт: Наука, Техника, Управление // ВИНТИ.– 2011.–№12.– С. 22-24.

5. Кузнецов, С.М. Проблемы внедрения мониторинга состояния тяговой сети и повышения селективности и надежности ее защиты / С.М Кузнецов, И.С. Демиденко, А.В. Гашкова, А.М. Шелепов; Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока // Тр. НГАВТ.– 2011.–№2.– С. 97-102.

6. Кузнецов, С.М. Переход от токово-импульсной защиты к мониторингу тяговой сети / С.М Кузнецов, И.С.; Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока // Тр. НГАВТ.– 2012.–№2.– С. 111-114.

Научные публикации в других изданиях:

7. Демиденко, И.С. Математическое моделирование переходных процессов в тяговой сети/ И.С Демиденко, М.В. Ярославцев, А.О. Кривова //Радиоэлектроника,

электротехника и энергетика: Шестнадцатая Междунар. науч.-техн. конф.: Тез. докл. В 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 207 с.

8. Кузнецов, С.М. Мониторинг как средство повышения надёжности электроснабжения тяговой сети/ С.М. Кузнецов, И.С. Демиденко, И.Н. Матеров, А.М. Шелепов [и др.]; Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий (ИНФО-2012). Материалы международной научно-практической конференции МИЭМ НИУ ВШЭ, Сочи 1-10 октября 2012г. – М.: изд-во ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика», 2012. – С. 41-45.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 84x60x1/16, объем 1.25 п.л. тираж 105 экз.
заказ № 1371 подписано в печать 29.10.2013 г.