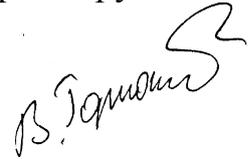


На правах рукописи



ГОРЮНОВ Вячеслав Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ
МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ
НА ЗЕМЛЮ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Целебровский Юрий Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Качесов Владимир Егорович

кандидат технических наук
Хромов Евгений Георгиевич

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
г. Томск

Защита состоится «17» февраля 2011 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан 14 января 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимофеев И.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Общая протяженность распределительных сетей среднего напряжения 6-35 кВ, доставляющих электроэнергию потребителям, превышает в России миллион километров, а число трансформаторных подстанций в них – около полумиллиона. Сети средних классов напряжения, в основном, эксплуатируются с изолированной и компенсированной нейтралью. Также начинает применяться заземление нейтрали через резистор.

От надежной эксплуатации сетей 6-35 кВ зависит бесперебойная работа промышленности, аграрного комплекса и нормальная организация быта населения. Одним из важнейших факторов, обеспечивающих высокую эффективность передачи и распределения электрической энергии, является оснащённость электроэнергетических объектов средствами релейной защиты и автоматики (РЗА). Влияние устройств защиты на эффективность, надёжность, качество и производительность электроэнергетических сетей и систем постоянно возрастает.

Наиболее частым видом повреждений в сетях 6-35 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые составляют порядка 70-80% от общего числа повреждений. В отличие от сети с эффективно заземлённой нейтралью, однофазные замыкания на землю в рассматриваемых сетях не сопровождаются появлением больших токов и не искажают треугольник междуфазных напряжений. При этом Правилами технической эксплуатации допускается работа сети с замкнувшейся на землю фазой до устранения повреждения. Персонал обязан отыскать место повреждения и устранить его в кратчайший срок. Такой режим является аварийным и нередко служит причиной развития повреждения с отключением оборудования. Длительные однофазные замыкания создают, кроме того, электроопасные ситуации, при которых возможно поражение обслуживающего персонала и населения напряжениями прикосновения и шага.

Для уменьшения аварийных последствий, вызванных однофазными замыканиями на землю, таких как переход однофазного в междуфазное короткое замыкание, появление двойных замыканий на землю, возникновение феррорезонанса, разрушение железобетонных опор, возникновение пожаров в кабельных помещениях, необходимо иметь надёжные и эффективные устройства защиты от однофазных замыканий на землю.

При этом в ряде случаев, например, при падении на землю оборвавшегося провода воздушной линии, защита от ОЗЗ является практически единственным средством, уменьшающим вероятность случайного попадания человека под напряжение прикосновения или шага.

Однако по литературным данным на 80% российских подстанций рассматриваемого класса напряжения вообще отсутствует селективная защита от ОЗЗ. Эффективность тех защит, которые эксплуатируются на оставшихся 20% подстанций, низка, и по данным исследований ОРГРЭС не превышает трёх баллов по пятибалльной шкале. Таким образом, в настоящее время задача совершенствования защит от однофазных замыканий на землю в рассматриваемых сетях является весьма актуальной.

При выполнении работы автор использовал известные результаты иссле-

дований в области режимов заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, выполненных Ф.А. Лихачевым, К.П. Кадомской, В.Е. Качесовым, Г.А. Евдокуниным, Р.А. Вайнштейном, И.М. Сиротой, В.А. Шуиным, В.М. Кискачи, А.И. Шалиным, С.Л. Кужековым и др.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является совершенствование централизованной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ за счет создания новых алгоритмов функционирования. Для достижения поставленной цели были выполнены:

- анализ существующих методов и средств защиты от однофазных замыканий на землю;
- разработка математической модели сети и определение на основе расчетов требований к защите от замыканий на землю;
- разработка на основе полученных требований эффективных алгоритмов действия защит от ОЗЗ;
- исследования возможности создания комбинированного алгоритма, действующего при всех видах ОЗЗ;
- экспериментальная проверка алгоритмов действия защиты в сетях 6-35 кВ;
- экспериментальное определение электромагнитных помех на подстанциях (ПС) 6-35 кВ и разработка технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) микропроцессорных защит с силовым оборудованием ПС.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: экспериментальные исследования в лабораторных и эксплуатационных условиях; математическое моделирование с использованием теории электрических цепей, численных методов и их реализаций в виде программ на ЭВМ.

Достоверность результатов. Полученные в диссертационной работе результаты, согласуются с известными теориями электрических процессов при дуговых замыканиях и экспериментальными данными, полученными непосредственно при замыканиях в существующих электрических сетях.

Научная новизна работы.

1. Определены границы применимости алгоритма относительного замера и требования к погрешностям фильтров нулевой последовательности.
2. Разработан логический алгоритм для централизованного устройства релейной защиты (УРЗ) от замыканий на землю, позволяющий организовать селективную защиту удаленных подстанций сетей с изолированной или резистивно-заземленной нейтралью.
3. Разработан фазный алгоритм для централизованного УРЗ от ОЗЗ, обеспечивающий функционирование защиты в том числе и при дуговых замыканиях на землю.
4. Предложены методики расчета уставок разработанных алгоритмов и определены области их применения.
5. Определены уровни электромагнитных помех на ПС и ТП 6-35 кВ и установлены требования к ЭМС УРЗ.

Практическая ценность работы.

1. Математическая модель электрических процессов при перемежающихся дуговых замыканиях, реализованная в виде программы, может быть использована при проведении разработок в области защиты от замыканий на землю и для исследования и оценки существующих и проектируемых устройств;

2. На основе полученных результатов созданы и используются в электрических сетях устройства защиты с автоматическим изменением уровня срабатывания и расширенной логикой функционирования;

3. Опыт технических решений, полученный при внедрении разработанных защит от ОЗЗ, можно использовать также и для повышения надёжности существующих защит.

4. Созданная программа расшифровки осциллограмм применяется на предприятиях, использующих разработанную защиту.

Реализация результатов работы. Разработанные и исследованные методы повышения устойчивости функционирования, а также способы и алгоритмы действия микропроцессорных защит используются при производстве защит на кафедре электрических станций НГТУ.

На подстанциях городских электрических сетей г. Ханты-Мансийска установлено и введено в действие семь комплектов микропроцессорной защиты, основанной на предложенных алгоритмах.

Ряд материалов диссертации используется в учебном процессе университета.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Для устойчивого функционирования централизованной защиты от замыканий на землю подстанций с суммарными токами замыканий существенно большими, чем токи отдельных присоединений, наиболее работоспособным является предложенный в работе логический алгоритм.

2. Сравнение между собой направлений токов присоединений, имеющих несинусоидальную форму, можно проводить по условному углу в предложенном фазном алгоритме, работоспособным и при перемежающихся дуговых замыканиях.

3. Каждый алгоритм имеет свою область применения, связанную, в том числе, и с наличием погрешности трансформаторов тока. Комбинированный алгоритм, сочетающий в себе два разработанных алгоритма, позволяет защите функционировать во всех режимах работы сети.

4. Дополнительных мер по обеспечению электромагнитной совместимости на подстанциях 6-35 кВ, как правило, не требуются.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на кафедральных научных семинарах Новосибирского государственного технического университета; на десятом всероссийском студенческом научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (г. Томск, 2008 г.); на Всероссийской научной конференции молодых учёных «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2009 г.); на 5-ой Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ» (г. Новосибирск,

2008 г.); на XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2009 г.); на Третьей Российской конференции по заземляющим устройствам (г. Новосибирск, 2008 г.); на международной научно-технической конференции «ЭНЕРГОСИСТЕМА: Исследование свойств, Управление, Автоматизация» (г. Новосибирск, 2009 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 научные статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 137 страницах машинописного текста, списка литературы из 86 наименований, приложений на 33 стр. и содержит 74 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика полученных результатов.

В **первой главе** проводится обзор существующих защит от замыканий на землю. Основное внимание уделено рассмотрению принципов функционирования централизованных защит.

Для индивидуальных устройств защиты условия несрабатывания при внешних ОЗЗ и устойчивости срабатывания при внутренних повреждениях обеспечиваются в основном на крупных подстанциях и электростанциях с большим числом присоединений. В целом, все индивидуальные защиты имеют общие недостатки, связанные либо с принципом действия, либо с непосредственной реализацией устройств защиты. Основное узкое место для всех защит от замыканий на землю – перемежающиеся замыкания.

Область применения централизованных токовых устройств относительно замера значительно шире и в основном ограничивается погрешностями кабельных ТТП. В централизованных защитах (ЦЗ) в основном используется сравнение амплитудных или действующих значений токов нулевой последовательности разных присоединений. Ток срабатывания таких защит не требуется отстраивать от ёмкостного тока каждого из защищаемых присоединений, что существенно повышает чувствительность защиты и тем самым выгодно отличает её от описанных ранее устройств ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности.

Основными недостатками ЦЗ от ОЗЗ, выполненных на принципе сравнения токов нулевой последовательности, являются неселективные срабатывания при ОЗЗ на шинах питающей подстанции и при ОЗЗ на присоединении, если ток НП внешней сети значительно больше, чем токи присоединений защищаемых подстанций.

Многолетний опыт эксплуатации позволяет выделить три основные причины отказов в работе устройств релейной защиты и автоматики (УРЗиА): неправильные действия персонала, неисправности и неселективные действия УР-

ЗиА и недостаточная электромагнитная совместимость (ЭМС). Неправильная работа УРЗиА по причине недостаточной ЭМС составляет до 10% от всех случаев ложной работы и касается в основном только УРЗиА на микроэлектронной (МЭ) и микропроцессорной (МП) элементной базе.

Однако, данные по обследованию электромагнитной обстановки на подстанциях и распределительных пунктах с высшим напряжением 6-35 кВ практически отсутствуют.

В связи с изложенным задачи настоящего исследования можно сформулировать следующим образом:

1. Создать математическую модель сети 10 кВ, включающую в себя основные элементы сети, с учетом всех параметров, влияющих на переходные процессы в данной сети. Математическая модель в совокупности с материалами натуральных экспериментальных исследований позволит охватить исследованиями максимальное число возможных вариантов развития процессов при однофазных замыканиях на землю.

2. Разработать алгоритмы функционирования защиты централизованного типа, позволяющие выявлять замыкания на землю в сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью при любых типах повреждений, особенно при дуговых замыканиях.

3. Провести расчётно-экспериментальную проверку алгоритмов, включающую три этапа:

- расчётная проверка с использованием математической модели сети;
- расчётно-экспериментальная проверка на основании реальных осциллограмм, снятых при ОЗЗ в действующих сетях 10 кВ;
- опытно-промышленная проверка образцов централизованных защит, использующих созданные алгоритмы.

4. Экспериментально исследовать уровень электромагнитных помех в РУ 10 кВ и определить технические меры по обеспечению электромагнитной совместимости.

Во **второй главе** описана методика моделирования сети 6-35 кВ. При моделировании особое внимание было уделено таким элементам сети, как трансформаторы тока и напряжения, кабельные и воздушные линии электропередачи.

Режим работы силовых трансформаторов при замыканиях на землю является нормальным режимом, поэтому модели этих элементов можно применять упрощенные, заменяя трансформатор Г-образной схемой замещения, с заданными активными и реактивными сопротивлениями и проводимостями трансформатора.

В основу модели кабельной линии положена модель Ведепола, учитывающая частотные зависимости параметров кабеля. Погонные параметры воздушных линий электропередачи также имеют зависимость от частоты.

В некоторых случаях зависимостью от частоты параметров линий электропередачи можно пренебречь и воспользоваться упрощенным расчетом параметров. Расчет по предложенным выражениям на промышленной частоте дает погрешность в значениях не более чем на 10%, по сравнению с расчетом ме-

тодом конечных элементов.

При замыканиях на землю напряжения на неповрежденных фазах могут достигать значений, значительно превышающих линейное напряжение. В таких режимах зачастую происходит насыщение электромагнитных трансформаторов напряжения (ТН). Для создания адекватной модели ТН требуется учитывать нелинейность характеристики намагничивания. Параметры и характеристики намагничивания для моделирования ТН взяты из известных научных работ.

Трансформатор тока является тем устройством, посредством которого в УРЗ поступает сигнал тока. В модели ТТ использована вольтамперная характеристика, особенно необходимая при моделировании трехтрансформаторных фильтров токов НП.

Моделирование сети 10 кВ проводилось в специализированном программном комплексе АТР-ЕМТР. Данная модель сети включает в себя кабельные и воздушные линии различного сечения и исполнения, которые могут подключаться и отключаться в процессе работы сети трехфазными выключателями с определенным током среза и установленным временем разрыва каждой из фаз. Точка замыкания может быть установлена на любом из присоединений. Само замыкание может моделироваться как фиксированным значением сопротивления, так и задаваемой зависимостью состояния промежутка от приложенного напряжения и тока.

В ходе регистрации замыканий на землю в городской кабельной сети 10 кВ города Ханты-Мансийска получен большой объем осциллограмм замыканий на землю. Можно выделить два основных вида замыканий на землю. Первый вид – это металлическое замыкание. В случае такого замыкания ток не прерывается, содержит основную гармонику промышленной частоты и нечетные гармоники, среди которых максимальными являются третья и пятая. Вторым видом замыканий являются дуговые замыкания на землю.

По собранным данным вероятность возникновения дуговых замыканий в кабельной сети составляет около 27%. Это говорит о том, что этим видом замыканий пренебречь нельзя.

Созданная математическая модель позволяет рассчитывать параметры процессов в том числе и при дуговых замыканиях на землю. Для этого была создана модель дуги, представляющая собой автоматический выключатель, срабатывающий при заданном напряжении пробоя и отключающийся при снижении тока ниже тока уставки и по прошествии времени больше времени горения дуги. Для оценки адекватности модели было проведено сравнение осциллограмм токов и напряжений НП моделируемых и записанных в сетях 10 кВ при реальных замыканиях (рис.1 и 2).

Как видно из рисунков, дуговое замыкание на землю значительно сложнее, при таком типе замыканий отсутствует понятие угла между токами и напряжением нулевой последовательности. Напряжение нулевой последовательности значительно меньше, нежели при металлическом замыкании. Если в напряжении НП первая гармоника промышленной частоты преобладает, то в токе она практически отсутствует.

В результате сравнения полученных осциллограмм с реальными данными

можно сделать вывод о том, что принятые допущения и особенности при моделировании каждого отдельного элемента верны. Расчетная модель сети является адекватной, по рассчитанным значениям токов и напряжений можно анализировать функционирование алгоритмов защиты от замыканий на землю. Моделирование позволяет получить сигналы, не всегда доступные для непосредственного измерения в электроустановке.

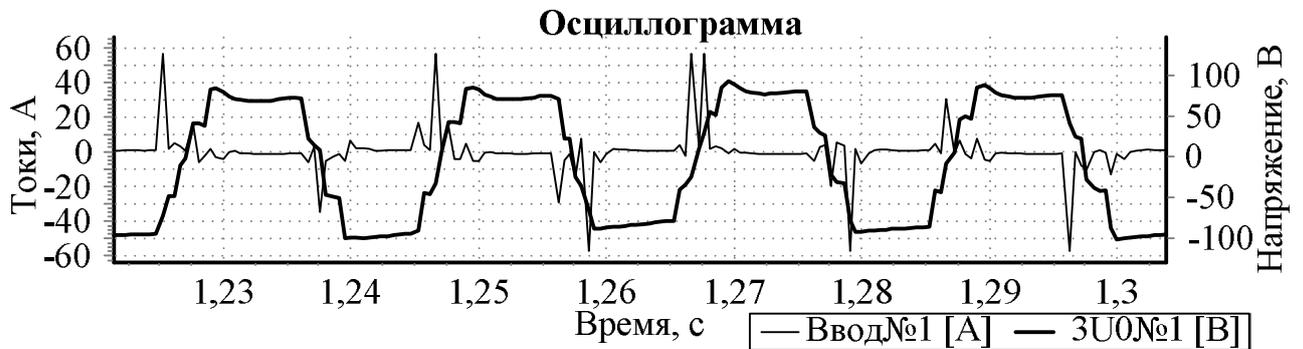


Рис. 1. Дуговое замыкание на землю (осциллограмма от 20.06.2008 20:29:50)

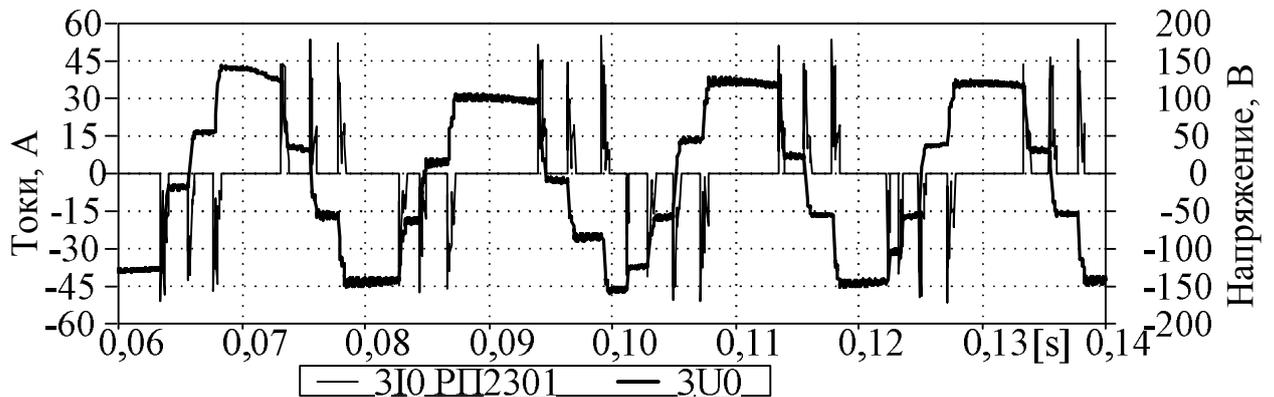


Рис. 2. Дуговое замыкание – расчетные осциллограммы

Основные требования к разрабатываемой защите: селективное действие при замыканиях через большие переходные сопротивления, металлических замыканиях с большим уровнем высших гармоник и при дуговых замыканиях всех видов.

В третьей главе приведены результаты исследований алгоритмов работы централизованной защиты от ОЗЗ. Основным алгоритмом для всех защит является принцип относительного замера. Преимущество относительного замера перед абсолютным в том, что не требуется отстраивать токи срабатывания защиты от собственных ёмкостных токов. Как было сказано выше, такой принцип имеет недостатки и требует дополнительных признаков для определения замыканий на шинах. Так требуется отстройка от токов небаланса при пусковых токах. Например, при пуске двигателя, питающегося через линию, отличие сопротивлений фаз которой составляет 1%, а полюса выключателя замыкаются с разницей в 5 мс, возникает напряжение НП с максимальным значением 70 В. Так как появившийся небаланс напряжения быстро затухает, уже через 0.05 секунды напряжение НП достигает всего 20 В, то можно от этих режимов отстраи-

ваться по времени. Такая отстройка требуется для всех типов защит.

Для того чтобы использовать принцип относительного замера, требовалось определить границы его применимости. Основным источником ограничения области применения – погрешности преобразований сигналов. От первичного тока в кабельной линии, до вторичного сигнала напряжения на входах микропроцессорной защиты сигнал проходит двойное преобразование – в ТТНП и устройстве сопряжения (УСО). Для анализа этих погрешностей были проведены измерения характеристик ТТНП и УСО. На рис. 3 и 4 представлены зависимости отклонений от идеальной линейной характеристики в процентах.

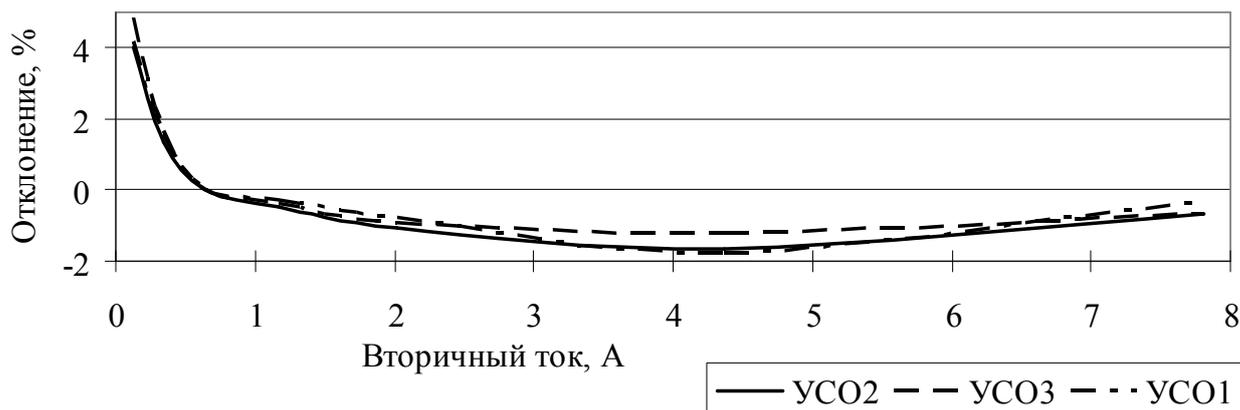


Рис. 3. Отклонения характеристик УСО

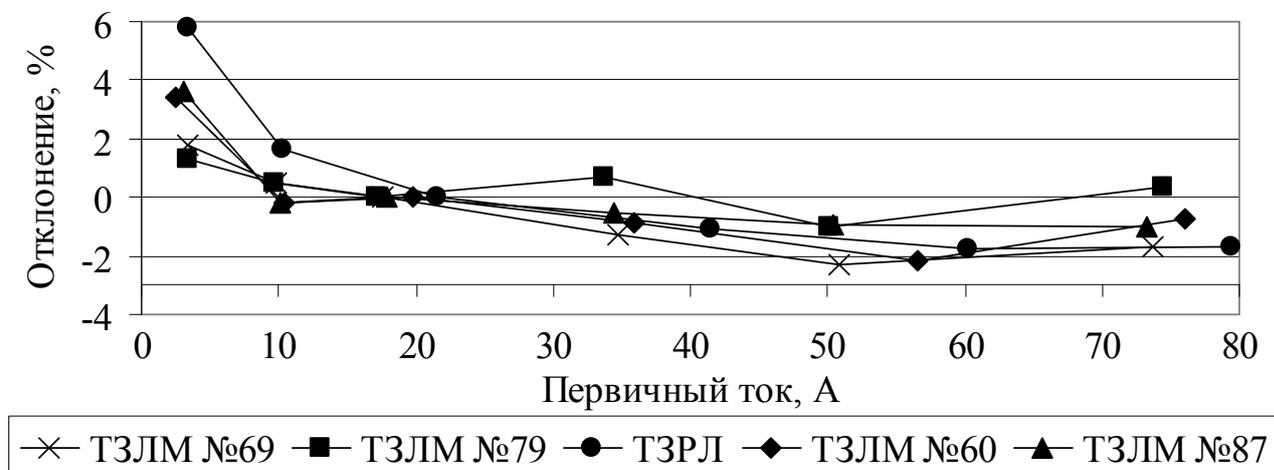


Рис. 4. Отклонения зависимостей вторичного тока от первичного тока от линейных зависимостей

Для снижения погрешностей линейного характера каждый канал был тарирован при значении первичного тока 20 А. В целом расхождение характеристик УСО между собой небольшое и не превышает 1% даже в области малых значений токов. Для ТТНП результаты несколько хуже, отклонения измеряемых значений составили до 4.5% в области малых токов и до 2% в области больших токов. Как показали практические измерения разностей токов по осциллограммам, снятым в 2008-2009 годах в городских сетях г. Ханты-Мансийска, максимальная разность токов в 5% является предельным значени-

ем. Увеличивая это значение в 1.5-2 раза, получаем надежное условие применимости принципа относительного замера:

$$I_{СЭПРИС.МІН} > K_{ОТС} \cdot 0,05 \cdot I_{СВН. СЕТИ.МАХ} \quad (1)$$

где $I_{СЭПРИС.МІН}$ – минимальный суммарный ёмкостной ток всех присоединений секции, $K_{ОТС}$ – коэффициент отстройки ($K_{ОТС} = 1.5$ для однотипных ТТНП, $K_{ОТС} = 2$ в остальных случаях), $I_{СВН. СЕТИ.МАХ}$ – максимальный суммарный ёмкостной ток внешней сети.

Самым простым методом устранения недостатков принципа относительного замера является добавление дополнительного признака, основанного на определении при ОЗЗ действующего значения суммы мгновенных значений токов всех присоединений:

$$\left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_1^n i_j \right)^2 dt} = I_{3\Sigma} \right) > I_{КМАХ}, \quad (2)$$

где T – период промышленной частоты, i_j – мгновенное значение тока НП j -присоединения, n – число присоединений, $I_{КМАХ}$ – максимальный из токов присоединений.

Как показали результаты анализа осциллограмм процессов при замыканиях на землю в сети 10 кВ, геометрическая сумма токов превышает арифметическую и максимальное значение отношения геометрической суммы токов к максимальному току равно 12%. С небольшим запасом можно принять следующее условие для случая замыкания на секции шин:

$$\left(K_{ОТС1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_1^n i_j \right)^2 dt} = K_{ОТС1} \cdot I_{3\Sigma} \right) > K_{ОТС2} \cdot I_{КМАХ} \quad (3)$$

где $I_{КМАХ}$ – максимальный из токов присоединений, $K_{ОТС1} = 0,8$ и $K_{ОТС2} = 1.15$, коэффициенты отстройки.

При замыкании на отходящем присоединении векторная сумма токов неповрежденных присоединений равна в идеальном случае току ТТНП поврежденного присоединения. Разность этой векторной суммы и тока поврежденного присоединения равна нулю. С учетом полученных погрешностей можно записать:

$$\left(\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\left(\sum_2^n i_j \right) - i_1 \right)^2 dt} \approx 0 \right) < \left(I_{КМАХ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_2^n i_j \right)^2 dt} \right) \quad (4)$$

где i_1 – ток, выделяемый ТТНП поврежденного присоединения, $I_{КМАХ}$ – максимальный из токов присоединений.

Это условие выполняется при любых замыканиях на присоединении, что нельзя сказать об условии (3), которое упрощенно можно определить как: сумма токов всех присоединений должна превышать максимальный ток присоединений в 1.437 раза.

При большом числе присоединений подстанции возникает необходимость установки двух комплектов защиты – по одному на секцию шин, каждый из которых запускается по напряжению НП своей секции. При отдельной ра-

боте секций алгоритм действия защит будет аналогичным изложенному выше.

В случае невыполнения условия (3) применение данного принципа невозможно, поэтому для некоторых подстанций в разветвленных кабельных сетях промышленных предприятий и городов селективность действия защиты может быть обеспечена использованием **логического алгоритма**, предполагающего применение пускового органа (ПО) по действующему значению тока каждого присоединения (рис. 5).

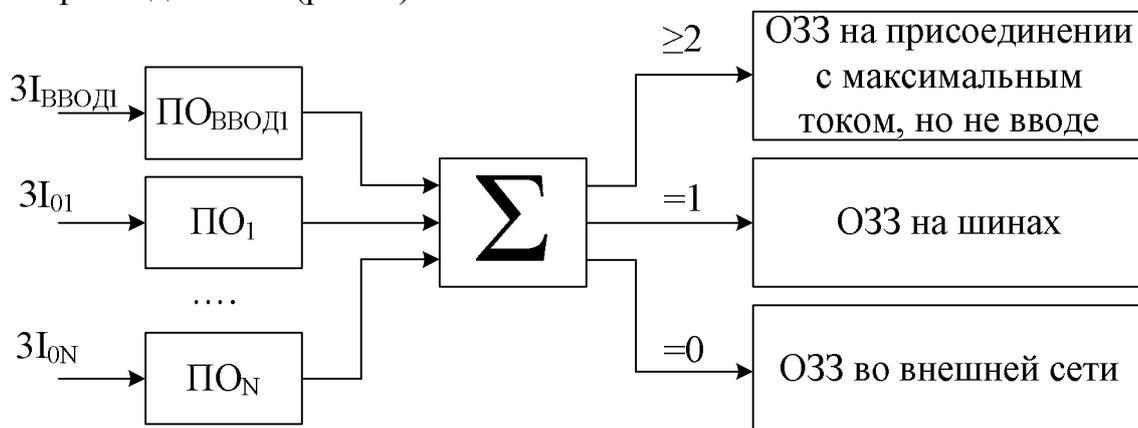


Рис. 5. Упрощенная схема логического алгоритма

Пуск защиты происходит по напряжению НП, а место повреждения по логическому алгоритму определяется по числу сработавших пусковых органов. При замыканиях через переходное сопротивление происходит снижение тока замыкания, что может привести к неселективным действиям защиты. Поскольку при ОЗЗ через переходное сопротивление ток уменьшается пропорционально напряжению $3U_0$, то рассчитывать ток срабатывания ПО необходимо в зависимости от напряжения НП:

$$I_{ПО.t} = I_{ПО} \cdot \frac{3U_0}{100},$$

где $I_{ПО}$ – ток срабатывания защиты.

Ток уставки должен лежать в пределах:

$$I_{СЭПРИС.МАХ} \cdot K_{ОТС1} < I_{ПО} < K_{ОТС2} \cdot I_{СЭВН. СЕТИ.МИН},$$

где $I_{СЭПРИС.МАХ}$ – максимальный суммарный ёмкостной ток всех присоединений секции, $K_{ОТС1} = 1,15$, коэффициент отстройки, $I_{УСТ}$ – ток уставки логического алгоритма, $K_{ОТС2} = 0,85$, коэффициент отстройки, $I_{СЭВН. СЕТИ.МИН}$ – минимальный суммарный ёмкостной ток внешней сети.

Применение плавающего тока срабатывания не исключает отказов в срабатывании защиты при больших переходных сопротивлениях в месте замыкания. Защита может функционировать при минимальном токе НП присоединения равном 0.2 А и напряжении НП 10 В. Как видно из рисунка 6 при снижении ёмкостного тока допустимое переходное сопротивление тоже снижается. При ёмкостном токе равном 0.25 А переходное сопротивление равно 17 кОм, однако при этом возможен отказ срабатывания защиты по причине отсутствия запуска по напряжению НП. На рисунке 7 показаны зависимости напряжения НП от ёмкостного тока при разных сопротивлениях в месте замыкания. Чем меньше

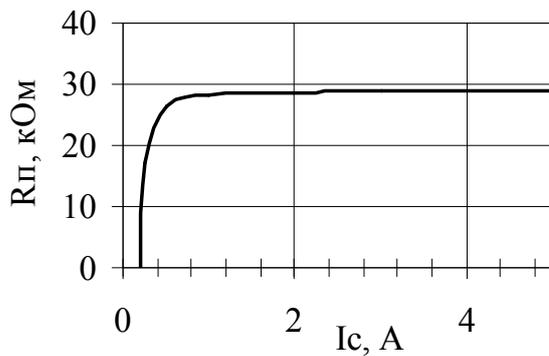


Рис. 6. Значение допустимого переходного сопротивления в месте замыкания

ёмкостные токи, тем больше допустимые переходные сопротивления в месте замыкания, при которых защита будет функционировать. Для каждого случая необходимо отдельно рассчитывать предельные переходные сопротивления.

В тех случаях, когда применение принципа относительного замера невозможно, и условие для выбора установки логического алгоритма не выполняется, возможно применение **фазного алгоритма**.

Фазный алгоритм предполагает измерение условного угла через сумму произведения мгновенных значений токов и через их действующие значения.

При этом косинус условного угла между токами определяется как:

$$\cos \alpha_{fk} = \frac{\sum_1^n \frac{i_f \cdot i_k}{N}}{\sqrt{\sum_1^n \frac{i_f^2}{N}} \cdot \sqrt{\sum_1^n \frac{i_k^2}{N}}},$$

где N – число точек на период, i_k и i_f – мгновенные значения токов.

Для оценки влияния высших гармоник и помех на расчет угла и определения области применимости данного алгоритма проведен расчет углов при различном уровне и фазе помех. Для случая, когда помехи имеют одну амплитуду, но имеют сдвиг по фазе, на рис. 8 приведены зависимости ошибок расчета угла. Чем больше амплитуда таких помех, тем больше и ошибка в определении угла между полезными сигналами.

Для правильного функционирования защиты необходимо, чтобы угол расчетный попадал в диапазон углов срабатывания. Т.е. при получении угла между кривыми в диапазоне от -90 до $+90$ они определяются защитой как сонаправленные, а если угол попадает в диапазон от 90 до 270 градусов, то эти сигналы разнонаправлены. Даже помеха в 50% от амплитуды полезного сигнала не приводит к сбою функционирования. Ошибка при этом может составить до 53 градусов при противофазных помехах в сравниваемых сигналах, но и этот угол попадет в диапазон -90 до 90 градусов, что является достаточным для опреде-

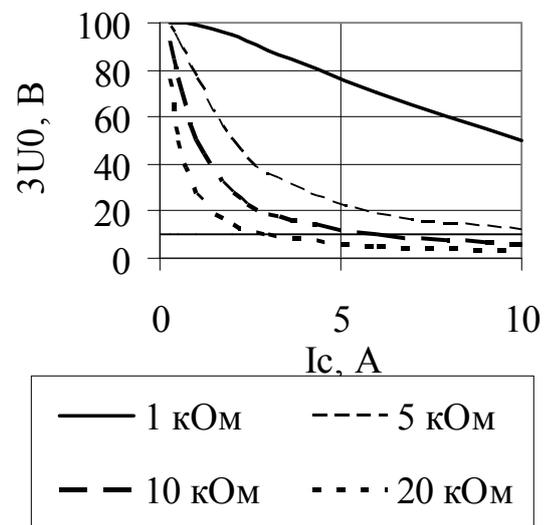


Рис. 7. Зависимости напряжения НП от ёмкостных токов сети для различных переходных сопротивлений в месте замыкания

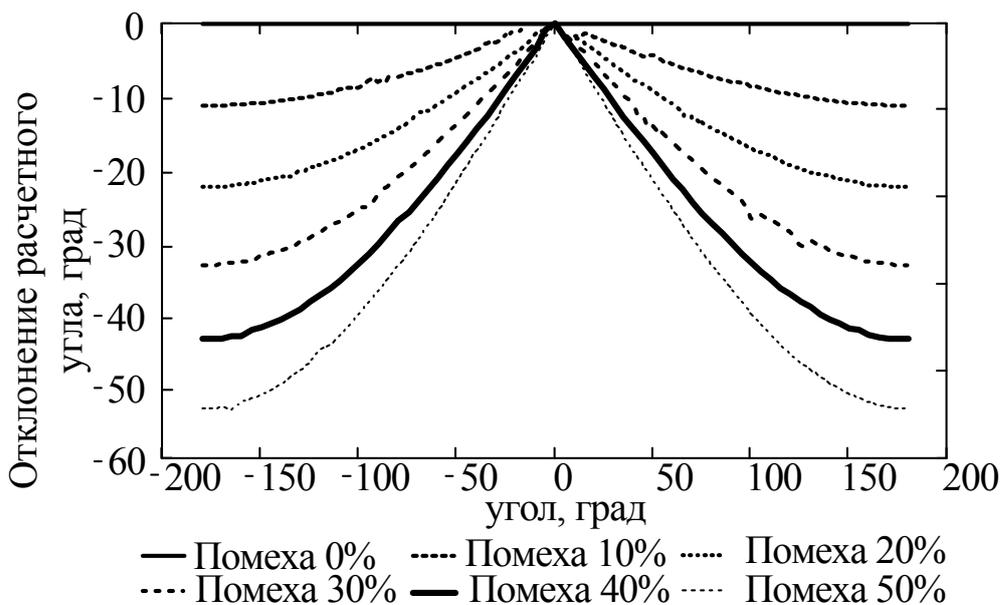


Рис. 8. Ошибка вычисления угла при помехах равной амплитуды и разной фазы

ления сонаправленных сигналов.

Основной недостаток применяющихся направленных токовых защит, определяющих угол между током и напряжением НП — отказ в срабатывании, либо неселективное действие при пере-
межающихся

замыканиях на землю. Токи НП имеют одинаковую физическую природу, поэтому использование в качестве информационного параметра условного угла между токами НП даже при дуговых замыканиях позволяет селективно определять поврежденное присоединение.

Для определения влияния амплитудных погрешностей трансформаторов тока и импульсных помех в токовых каналах связи были получены выражения, основанные на представлении импульсных токов дугового замыкания на землю в виде отдельных дискретных сигналов. Полученные зависимости (рис. 9) показывают, например, что если число точек дискретного сигнала в расчетном участке времени с одинаковым значением отношения амплитуд равно 20%, а амплитуды остальных сигналов равны нулю, то расчетный угол будет равен 65 градусам.

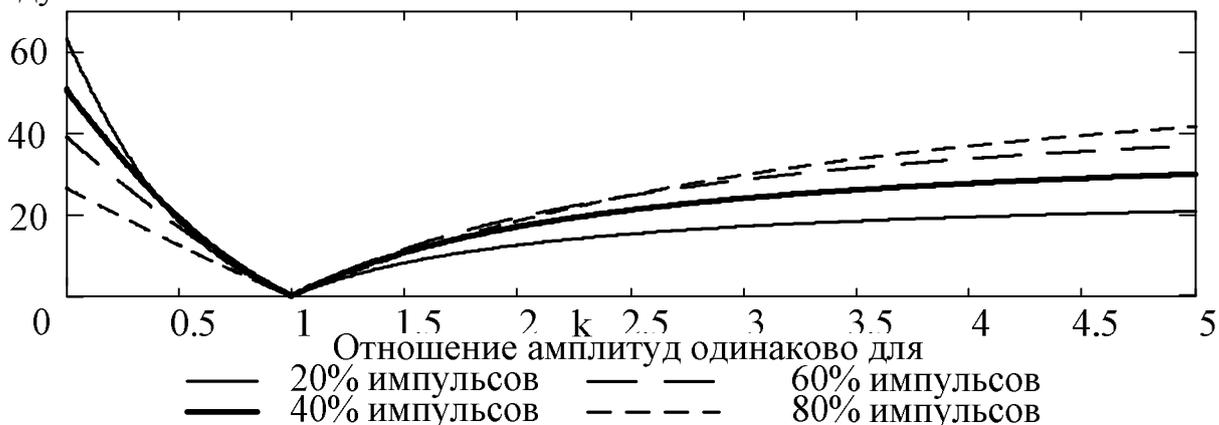


Рис. 9. Расчетный угол при различии в отношениях амплитуд сигналов

Наиболее распространенный на практике случай, определенный при анализе осциллограмм дуговых замыканий на землю, — это когда отношения половины импульсов тока отличаются не более чем на 50%, что по рисунку 9 соот-

ветствует 20 условным градусам. В любом из рассмотренных случаев угол будет попадать в диапазон -90 до 90 градусов, что позволяет судить о направлении тока.

Аналогичные расчеты для осциллограмм, полученных путем сбора данных защитами типа МКЗЗП, подтверждают работу данного алгоритма. При сонаправленных токах расчетный условный угол составляет 5 градусов, при противоположно направленных – 175 градусов (рис. 10).

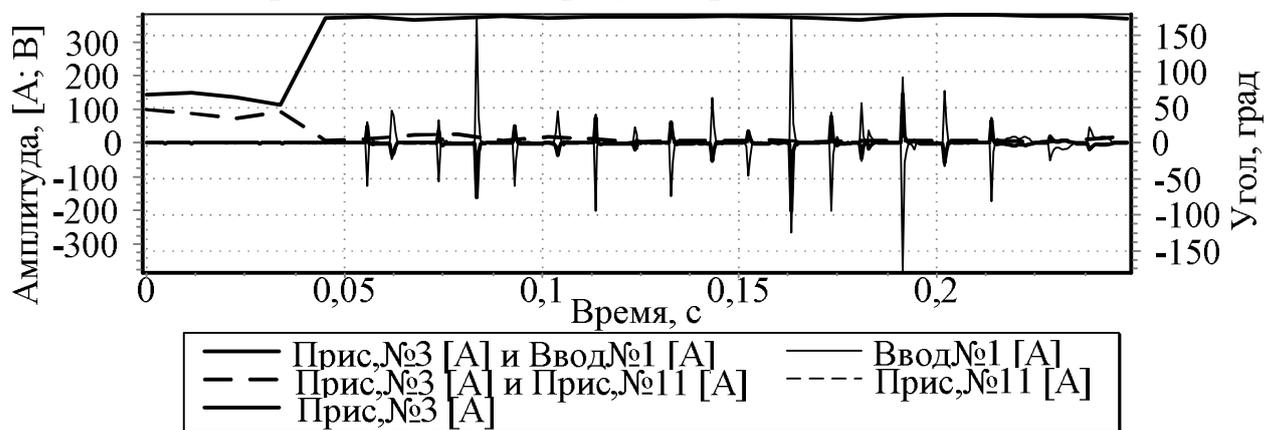


Рис. 10. Осциллограмма токов ТП 3020 (22.03.2009 18:44:10)

Используя данный алгоритм определения поврежденных присоединений, возможна также организация защиты разных секций отдельными блоками защиты, при этом защита будет работать селективно без использования информации о токе НП цепи секционного выключателя.

Используя комбинацию разработанных алгоритмов, в работе были предложены варианты **универсального алгоритма**, селективно работающего во всех режимах. Суть этого алгоритма состоит в следующем.

Основополагающим принципом для защиты является принцип относительного замера. Этот принцип хорошо работает на питающих трансформаторных подстанциях. На таких подстанциях токи НП присоединений имеют значения одного порядка, и число присоединений существенно превышает три. В таком случае принцип относительного замера можно дополнить суммирующим алгоритмом, либо заменить фазным алгоритмом. Конечное срабатывание защиты будет определяться по логике, представленной на рис. 11. При числе присоединений меньше трех алгоритмы определения места повреждения работать будут некорректно, в таком случае необходимо задействовать алгоритм определения фазы между током и напряжением нулевой последовательности. Такие режимы возможны на подстанциях с небольшим числом присоединений. Зачастую это либо трансформаторные подстанции городских сетей, либо подстанции 35 кВ, число отходящих ВЛ на таких подстанциях обычно невелико.

Число обтекаемых током присоединений определяется следующим алгоритмом:

- сравниваются два присоединения с максимальными токами – если разница в токах больше 10%, это значит, что число присоединений больше двух;
- если разница меньше 10%, то далее сравниваются токи второго и третьего (по убыванию величины тока) присоединений. Если ток третьего при-

соединения составляет более 10% от тока второго присоединения, то фиксируется число присоединений больше двух. Если же ток третьего присоединения составляет менее 10% от тока второго, то фиксируется наличие двух присоединений;

– если все токи меньше тока уставки $3I_{0MIN}$, определяемого минимально возможным ёмкостным током присоединения, то фиксируется число присоединений меньше двух, т.е. защита сигнализирует о наличии замыкания, не определяя поврежденное присоединение.

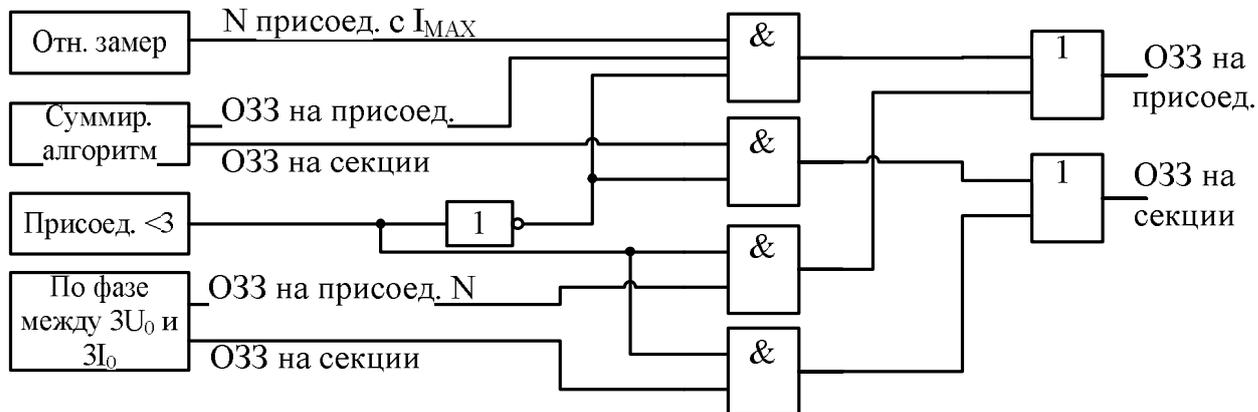


Рис. 11. Сочетание суммирующего алгоритма, принципа относительного замера и алгоритма с определением направления

Второй вариант алгоритма отличается от описанного применением в качестве основного – фазного алгоритма.

В **четвертой** главе проведено исследование функционирования защиты в условиях подстанций 6-35 кВ. Разного рода электромагнитные помехи могут ухудшить качество функционирования УРЗ. Для оценки электромагнитной обстановки (ЭМО) на подстанциях 6-35 кВ был проведен мониторинг помех. Длины контрольных кабелей, соединяющих устройство защиты и трансформаторы тока, составили от 10 до 20 метров. За время мониторинга на подстанции производились неоднократные операции по отключению и включению присоединений. За период регистрации было зафиксировано 16 возмущений во вторичных цепях с уровнем помехи выше 60 В. Максимальная зарегистрированная помеха составила 170 В по амплитуде.

Подавляющее большинство зарегистрированных помех представляет собой одиночный импульс или серию высокочастотных периодических затухающих импульсов. Частотный диапазон помех составляет 100 кГц – 1 МГц.

Ежедневно фиксировались импульсы помех длительностью 1.5-2 мкс и амплитудой 25-30 В на всех каналах одновременно. Длительность фронта импульса – 1 мкс. Зачастую такие импульсы приходят в пачке (рис. 12).

Ни одна из помех не превышает уровень, регламентируемый по стандарту ГОСТ Р 51317.6.5-2006.

Но в некотором случае помехи небольшой амплитуды могут вызвать не-селективное действие разрабатываемой защиты. В том случае, если значение

помехи станет соизмеримым с полезным сигналом, возможно некорректное функционирование в основном фазного алгоритма. Если помеха превышает полезный сигнал, то и остальные алгоритмы будут работать неселективно.

При монтаже защит на действующих подстанциях 6-10 кВ контрольные кабели прокладываются поверх существующих жгутов, а в некоторых случаях используются существующие контрольные кабели со свободными жилами, и путь прокладки прямого и обратного кабелей не всегда совпадает. Это вызывает наложение значительной помехи на полезный сигнал.

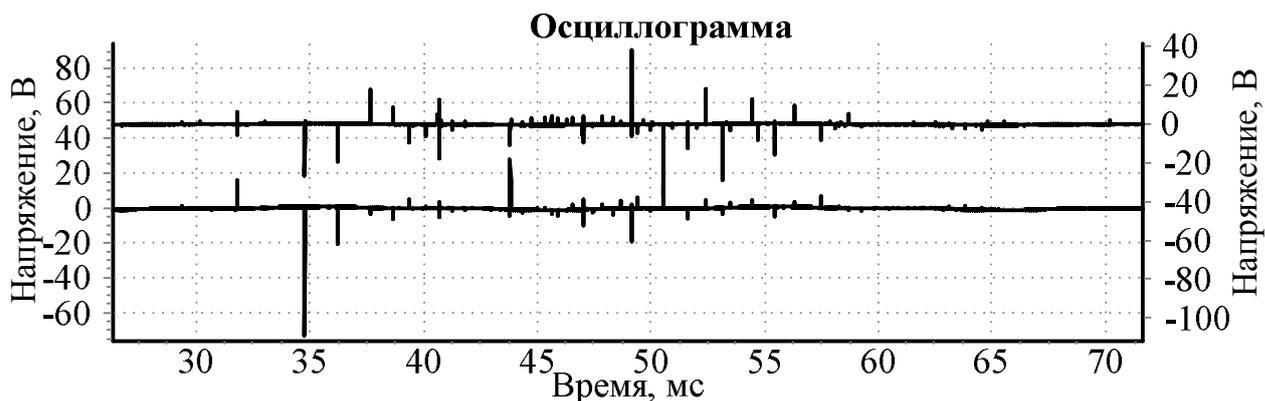


Рис. 12. Пачка импульсов на токовых входах защиты

Для определения действительного влияния способа организации связи между УСО и устройством релейной защиты был проведен эксперимент, в ходе которого измерялись значения помех при различных способах подключения УСО. По результатам эксперимента можно выделить два основных варианта организации канала связи – прямой разводкой кабеля с заземлением в одной точке и витой парой с заземлением в одной точке. Первый вариант исполнения применим при небольших длинах контрольного кабеля, например на подстанциях 6-10 кВ с небольшим числом присоединений и на подстанциях 35 кВ. Во всех остальных случаях необходимо применять витую пару либо уменьшать длину кабелей связи путем выноса УСО к устройству защиты.

В пятой главе рассмотрены технические аспекты внедрения защиты от замыкания на землю.

Несоблюдение правил монтажа ТТНП и вторичных цепей тока приводит к отказам и излишним срабатываниям релейной защиты (РЗ) любого типа, что часто ведет к устойчивому мнению о неработоспособности защит от замыканий на землю. За время внедрения защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ накопилась статистика по наиболее частым ошибкам монтажа ТТНП, которые приводят к сбоям в работе защит, что связано со спецификой растекания токов по земле и оболочкам кабельных линий. При замыкании на присоединении ток, обусловленный ёмкостью повреждённого элемента, частично вообще не попадает в ТТНП, частично протекает через окно ТТНП дважды в разных направлениях (по повреждённой и по неповреждённым фазам). В защиту неповреждённого присоединения, наоборот, попадает только ток нулевой последовательности, обусловленный собственной ёмкостью фаз относительно

земли. На сравнении токов в защите при внутреннем и внешнем замыкании и основана селективность защит от ЗНЗ.

К наиболее частым ошибкам при монтаже кабельных ТТ следует отнести и неправильное заземление металлической воронки концевой муфты либо заземляющего проводника концевой муфты. При заземлении такого проводника со стороны шин относительно ТТНП кабельной линии во вторичные цепи трансформируется ток, превышающий собственный ёмкостной ток присоединения при внешних замыканиях, или ток, меньший, чем ток внешней сети при повреждениях на линии. Это может привести к отказу в срабатывании защиты.

При внедрении защит в сетях с воздушными линиями сложным моментом является определение токов нулевой последовательности. Применение кабельных ТТНП для таких линий без применения кабельных вставок невозможно. Поэтому выделять ток НП необходимо электрическим сложением фазных токов. Для целей релейной защиты применяется обмотка 10Р, имеющая погрешность до 10%. Эта обмотка рассчитана для работы релейной защиты при токах, превышающих номинальные токи. При замыканиях на землю токи не превышают номинальные, что позволяет использовать вторичные обмотки для измерительных приборов и средств учета с классом точности 0.5. Таким образом, при токе 100А, небаланс может составить до 0.5 А, что может оказаться соизмеримым с ёмкостными токами линии электропередачи. Например, для трансформаторов тока типа ТФЗМ 600/5 согласно литературным данным при фазных токах 228 А, небаланс достигает 0,3 мА, что вполне приемлемо.

Для подтверждения такого достаточно небольшого небаланса был определен небаланс для трехтрансформаторного фильтра токов НП на основе ТТ с классом точности 0.5 (рис. 13). Небаланс оказывается меньше возможных емкостных токов, что говорит о возможности построения защиты на основе трехтрансформаторных фильтров токов нулевой последовательности.

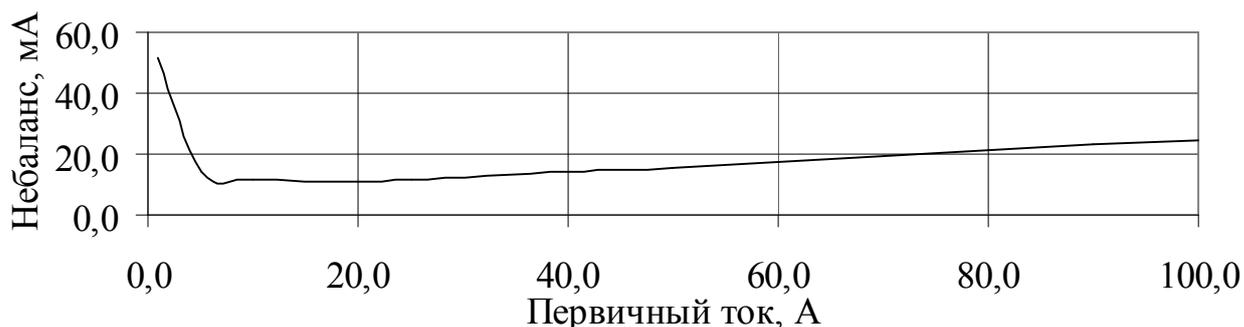


Рис. 13. Небаланс при суммировании трехфазного тока

После натурных испытаний разработанные алгоритмы были реализованы в устройстве защиты МКЗЗП, выпускаемой на кафедре электрических станций НГТУ. При участии автора данная защита устанавливалась на распределительных и трансформаторных подстанциях 10 кВ г. Ханты-Мансийска.

За период 2005-2008 гг., после того как практически все присоединения были оснащены селективными защитами, проводился регулярный анализ поведения релейной защиты, действующей на сигнал. Замыкания переходили в

двойные замыкания и устранялись защитой от КЗ до вмешательства дежурного персонала в 38% случаев. Диспетчерский персонал зарегистрировал только 3% самоликвидирующихся замыканий на землю, у которых время самоликвидации доходило до нескольких минут, а иногда и до десятков минут.

В настоящее время защиты от замыканий на землю установлены на всех подстанциях. С 2008 года с учётом подтверждения надёжности и селективности срабатывания защит начался перевод защит с сигнализации о наличии замыкания на отключение присоединений. Селективность при ОЗЗ в сети обеспечивается по ступенчатому принципу, таким образом, защиты резервируют одна другую. Степень селективности между защитами разных уровней составляет 0.5 секунды.

В ходе внедрения защиты были получены осциллограммы замыканий на землю в кабельной сети 10 кВ. Анализ полученных осциллограмм показал, что можно разделить ОЗЗ на следующие виды:

- металлическое замыкание (44%);
- дуговые замыкания (26,5%):

1 тип – преимущественно 2 зажигания дуги за период (по теории Петерсена) (20,5%);

2 тип – преимущественно 4 зажигания дуги (рис. 14) за период (4%);

3 тип – многократные зажигания дуги за период (2%).

- самоустранившееся замыкание (29,5%).

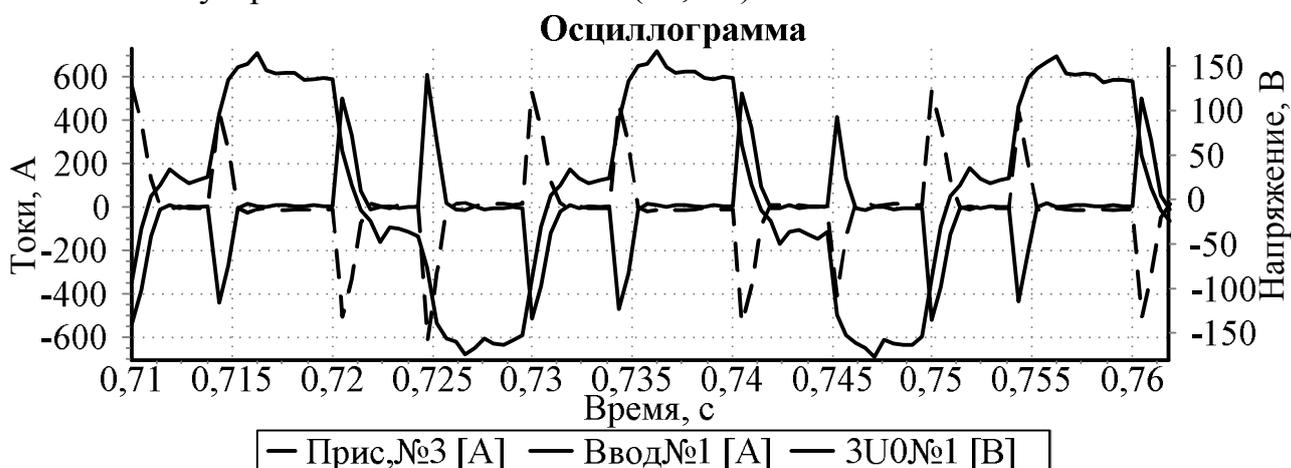


Рис. 14. Осциллограмма характерного дугового замыкания на землю 2 типа

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создана математическая модель сети 6-35 кВ, позволяющая получать динамические характеристики токов и напряжений нулевой последовательности при однофазных замыканиях в моделируемой сети. Достоверность получаемых результатов доказана сравнением расчётных характеристик с динамическими характеристиками процессов, полученных экспериментально. Результаты математического моделирования в виде полученных сигналов токов и напряжений нулевой последовательности использовались при создании алгоритмов централизованных микропроцессорных защит от ОДЗ. Модель может быть использована и для анализа работ других видов защит и режимов сети.

2. Показано, что разнообразие переходных процессов при дуговых замыканиях на землю и отличия в характеристиках токов и напряжений при различных местах замыкания в электрической сети не позволяют обеспечить надёжность работы защиты по одному алгоритму. В диссертации рассмотрены три алгоритма:

– Алгоритм относительного замера с геометрическим суммированием токов НП. Его суть состоит в одновременном сравнении значений всех токов НП присоединений; максимальный ток будет в поврежденном присоединении. Этот алгоритм применим на головных подстанциях 6-35 кВ, для которых отношение ёмкостного тока одного присоединения к току замыкания на землю превышает 0,1 и при этом действующее значение тока замыкания на землю должно превышать максимальный ток НП присоединений более чем на 44%.

– Предложенный логический алгоритм позволяет определить место повреждения по числу сработавших пусковых органов, установленных на каждом присоединении секции. Уставка пусковых органов отстраивается от максимального собственного тока НП присоединения и от минимального тока замыкания в сети при металлическом замыкании на землю. Автоматическое изменение тока срабатывания ПО обеспечивает стабильную работу защиты при замыканиях через переходные сопротивления.

– Предложенный фазный алгоритм основан на вычислении условного угла между токами. Анализ погрешностей преобразования сигналов тока по предложенному алгоритму показал, что предельная ошибка определения условного угла при дуговом замыкании на землю не превышает диапазон определения углов, что позволяет оценить направление токов и выявить поврежденное присоединение.

3. Алгоритмы прошли апробацию на трех этапах:

- расчётная проверка с использованием математической модели сети;
- расчётно-экспериментальная проверка на основании реальных осциллограмм, снятых при ОЗЗ в действующих сетях 10 кВ;
- опытно-промышленная проверка образцов централизованных защит, использующих созданные алгоритмы.

4. Для обеспечения надёжной работы защиты при любых местах и видах однофазных замыканий на землю разработаны варианты комбинированного алгоритма, обеспечивающие выбор соответствующего алгоритма в зависимости от режима работы и топологии сети в момент замыкания.

5. Проведен мониторинг помех на подстанциях 10 кВ, который показал, что помехи в основном не превышают испытательных уровней, определяемых требованиями к помехоустойчивости технических средств, применяемых на электростанциях и подстанциях среднего напряжения. Применительно к РУ 10 кВ экспериментально определена степень снижения уровня помех при использовании витой пары в качестве контрольного кабеля, заземлении токоведущей жилы в одной точке и переносе устройств сопряжения непосредственно к месту установки защиты.

6. Для обеспечения надёжной работы защиты ВЛ с применением трехтрансформаторных фильтров нулевой последовательности исследованы вольт-

амперные характеристики трансформаторов тока. Показано, что из-за разницы в характеристиках ТТ погрешность трёхтрансформаторного фильтра может быть сравнима со вторичными токами нулевой последовательности при ОЗЗ в электрической сети. Надёжная работа защиты с предложенными алгоритмами обеспечивается применением в трёхтрансформаторных фильтрах трансформаторов тока с классом точности не ниже 0.5.

7. Результаты диссертационной работы были использованы при разработке в НГТУ микропроцессорной защиты от замыканий на землю типа МКЗЗП. Эта защита после разработки и создания внедрена в городских сетях 10 кВ г. Ханты-Мансийска.

Годичный опыт эксплуатации показал надёжность функционирования защиты, что позволило перейти к селективному отключению однофазных замыканий, и в целом снизило число и последствия аварийных ситуаций в городской сети г. Ханты-Мансийска.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Научные статьи в лицензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Горюнов, В. А.** Опыт внедрения защиты от замыканий на землю в городских сетях 10 кВ г. Ханты-Мансийска / В. А. Горюнов, С.П. Кузнецов, А. И. Щеглов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2008.– Специальный выпуск №1.– С.111-113. (Личный вклад соискателя 50%)

2. **Горюнов, В. А.** Алгоритмы функционирования централизованной защиты от замыканий на землю в сетях с изолированной и резистивно-заземленной нейтралью / В. А. Горюнов, В. П. Ерушин, И. П. Тимофеев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. - Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2009.- Специальный выпуск №1.-С.151-155. (Личный вклад соискателя 80%)

Патенты на полезные модели:

1. Устройство централизованной защиты от однофазных замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью: пат. 88859 Рос. Федерация : МПК7 Н 02 Н 3/16 / **Горюнов В.А.**, Ерушин В.П., Тимофеев И.П.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Новосиб. гос. техн. ун-т. - № 2009113749/22; заявл. 13.04.09; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32. – 2 с. (Личный вклад соискателя 60%)

Научные публикации в других изданиях:

1. **Горюнов, В. А.** Заземление первичных и вторичных цепей при монтаже защит от замыканий на землю в сетях 6-10 кВ / В. А. Горюнов, А. И. Щеглов // Третья Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов / Под. ред. Ю.В. Целебровского - Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2008 - С.191-196 (Личный вклад соискателя 75%)

2. **Горюнов, В. А.** Защиты от замыканий на землю в сетях 6(10) кВ. Особенности монтажа трансформаторов тока нулевой последовательности / В. А. Горюнов, А. И. Щеглов // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 5 (53) - С.68-70 (Личный вклад соискателя 80%)

3. **Горюнов, В. А.** Централизованная защита от замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью / В. А. Горюнов // Энергетика:экология, на-

дежность, безопасность: Труды Десятого Всероссийского студенческого научно-технического семинара: в 2-х тома - Томск, 22-25 апреля 2008. - Томск: ТПУ, 2008 - т.1. Электроэнергетическое направление. – с. 40-45.

4. **Горюнов, В. А.** Учет фазы токов при построении алгоритмов централизованной защиты от замыканий на землю / В. А. Горюнов // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии" / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009.- С. 34-36.

Подписано в печать 12.01.2011

Формат 84x60x1/16

Бумага офсетная. Тираж 100 экз. 1.5 печ. л.

Заказ № 184

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20