

На правах рукописи



Фролова Екатерина Игоревна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ВЫБОРА УСТАВОК И
ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

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

Научный руководитель: **Глазырин Владимир Евлампиевич**
кандидат технических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Никитин Константин Иванович
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск, кафедра «Теоретическая и общая электротехника», заведующий кафедрой;

Воронов Павел Ильич
кандидат технических наук, филиал Акционерного общества «РТСофт» - «РТСофт-Чебоксары», г. Чебоксары, отдел релейной защиты и автоматики, эксперт.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита состоится «30» апреля 2020 года в 10:00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации:
www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» февраля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. По мере развития электроэнергетических систем (ЭЭС) усложняется их конфигурация и повышаются уровни токов коротких замыканий (КЗ). В результате этого при экстремальных режимах КЗ могут возникать такие погрешности трансформаторов тока (ТТ), которые существенно искажают вторичную информацию и, как следствие, приводят к нарушению устойчивости функционирования устройств релейной защиты (РЗ).

Нормативно-техническая документация предъявляет жёсткие требования к точности работы ТТ, предназначенных для питания токовых цепей устройств РЗ, однако в ней учитывается работа ТТ только в установившихся режимах, что приводит к недооценке негативного влияния насыщения ТТ на работу релейной защиты.

Произошедшие системные аварии в Единой энергетической системе России (4.11.2014 г трехфазное КЗ на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС, 13.06.2018 г. устойчивое КЗ на системе шин 10 кВ ПС 500 кВ Тамань) вследствие неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики в связи с насыщением трансформаторов тока из-за появления значительной по величине апериодической составляющей в токе короткого замыкания подтвердили необходимость проверки работы ТТ в переходных режимах. Министерство энергетики Российской Федерации на основе рассмотрения причин этих аварий в письме от 02.04.2019 г № ЧА-3440/10 «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты» рекомендовало собственникам объектов электроэнергетики при строительстве или модернизации устройств РЗ уже на этапе подготовки проектной документации осуществлять расчет времени до насыщения ТТ (времени достоверного измерения значений вторичного тока), при котором обеспечивается правильная работа РЗ в переходных режимах, а на существующих объектах помимо расчета времени до насыщения производить анализ работы устройств РЗ на предмет их правильной работы при КЗ с апериодической составляющей тока. Также собственникам предлагается разработать мероприятия (при необходимости), исключающие риски неправильной работы устройств РЗ в режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

Учитывая повсеместное применение дистанционных органов (ДО) в устройствах релейной защиты и автоматики (дистанционная защита является одной из важнейших в системе защиты линий электропередачи сетей высокого и сверхвысокого напряжения, выполняет функции резервной защитой сосредоточенных объектов, является одним из измерительных органов в автоматике ликвидации асинхронного режима и т.д.) , к ним предъявляются повышенные требования по устойчивости функционирования, Таким образом, можно утверждать, что разработка методов и средств анализа устойчивости функционирования дистанционных органов устройств релейной защиты является актуальной и важной задачей, затрагивающей большинство объектов ЭЭС как в настоящее время, так и в обозримой перспективе.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в исследование и разработку измерительных дистанционных органов релейной защиты и автоматики внесли: Е.А. Аржанников, Ю.Я. Лямец, Д.Р. Любарский, В.Л. Фабрикант, Г. Циглер, Э.М. Шнеерсон, В.А. Шуин и другие.

Наряду с этим исследованиями переходных процессов в цепях трансформаторов тока и их влияния на устойчивость функционирования релейной защиты посвящены работы многих отечественных авторов, таких как: Л.В. Багинский, В.Е. Глазырин, А.М. Дмитриенко, Н.А. Дони, А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, С.Л. Кужеков, В.А. Наумов, Г.С. Нудельман и многие их коллеги.

Объект исследования – цифровой измерительный дистанционный орган устройств релейной защиты и автоматики.

Предмет исследования – статическая и динамическая устойчивость функционирования дистанционного органа.

Цель диссертационной работы – разработка методик выбора параметров срабатывания и средств анализа устойчивости функционирования дистанционных органов релейной защиты и автоматики.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание математической модели «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы защиты».
2. Исследование поведения ДО в переходных режимах и оценить их устойчивость функционирования.
3. Адаптация существующей методики расчета параметров срабатывания дистанционных защит к современным условиям работы объединенных энергосистем и требованиям современного первичного оборудования.
4. Разработка мер повышения быстродействия автоматики ограничения повышения частоты путем применения дистанционных органов.
5. Формирование способов проверки правильности функционирования дистанционного органа в асинхронном режиме.

Научная новизна работы:

1. Разработана математическая модель комплекса «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы дистанционной защиты», учитывающая особенности функционирования ТТ в переходных режимах при соединении их вторичных обмоток по схеме «звезда».
2. Предложен способ использования в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых ДО с характеристиками срабатывания заданной конфигурации.
3. Впервые предложена концепция дополнения автоматики ограничения повышения частоты (АОПЧ) (при наличии в нем ступеней по скорости изменения частоты) дистанционным блокирующим органом.

Практическая значимость и реализация работы:

1. Предложенные методики расчета параметров срабатывания дистанционной защиты от междуфазных КЗ на кабельно-воздушных линиях и блоках линия-трансформатор применены в рамках выполнения проектной и рабочей документации АО «КОТЭС» и ООО «НОВОСИБИРСКСТРОЙКОМПЛЕКС-ПРОЕКТ».

2. Предложен практический подход по применению на существующих микропроцессорных терминалах РЗ способа реализации в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов. Данный подход использован при проектировании релейной защиты электрооборудования электроэнергетических систем ООО УК «РусЭнергоМир».

3. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие возможность формирования входных сигналов устройств релейной защиты и автоматики в виде токов и напряжений, подаваемых непосредственно на входы испытуемого объекта. Подача сформированных сигналов на входы устройства даёт возможность проверять поведение ДО в асинхронных режимах работы контролируемого участка сети. На предложенные алгоритмы получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Методы исследования. Разработанные научные положения основываются на применении теоретических и экспериментальных методов в этой области. Решение поставленных в работе задач базируется на положениях фундаментальных и прикладных наук, таких как математический анализ, теория электромагнитных переходных процессов в электрических цепях, методы математического моделирования, экспериментальные исследования на цифровых и физических моделях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа функционирования дистанционного органа комплекта ступенчатых защит линии при близких КЗ.

2. Подход к выбору параметров срабатывания дистанционной защиты на блоках «линия-трансформатор».

3. Подход к использованию в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов с характеристиками срабатывания заданной конфигурации.

4. Использование дистанционного блокирующего органа в устройстве АОПЧ.

Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов, подтверждается корректным использованием математического аппарата, теоретических основ электротехники, соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, обсуждением результатов работы со специалистами на научных конференциях и других мероприятиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях:

- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 3-5 декабря 2010 г.;

- Международная молодежная научно-техническая конференция «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах», г. Новосибирск, 21-24 сентября 2011 г.;

- XXVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 9-13 апреля 2012 г.;
- 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2018). Harbin, China, May 30-June 1, 2018;
- XXII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 3-7 декабря 2018 г.;
- 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2019, Altai Republic, Erlagol, 29 June – 3 July, 2019.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 9 работ в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации (из них 3 научные статьи, переведенные на английский язык, опубликованы в журнале, входящем в наукометрическую базу Scopus), 1 работа индексирована в наукометрической базе Scopus, 5 работ в прочих изданиях. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В научных трудах, опубликованных в соавторстве, соискатель представил постановку задач, разработку математических моделей, анализ и обобщение полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, трёх приложений и списка литературы, включающего в себя 96 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 174 страницы, включая 5 таблиц и 53 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены характеристики измерительного дистанционного органа, который является основным элементом дистанционной защиты и устанавливает удаленность от места повреждения до места включения защиты. Граница между областями срабатывания и несрабатывания называется характеристикой срабатывания в комплексной плоскости ДО, виды которой подробно рассмотрены в главе. Следует отметить, что по сравнению с электромеханическими и микроэлектронными цифровые реле сопротивления имеют огромное преимущество, поскольку позволяют формировать характеристики срабатывания практически любой необходимой формы, адаптированные под конкретные условия сети и обеспечивающие необходимые чувствительность и селективность. При этом появляется возможность регулировать не только размеры, но и форму характеристики срабатывания ДО в комплексной плоскости сопротивлений.

Несмотря на то, что дистанционный принцип получил наибольшее распространение в защитах линий электропередачи, он также применяется в ряде других устройств защиты и автоматики, в которых необходим контроль сопротивления замера в нормальном и аварийном режимах. К ним следует отнести: отключающие и блокирующие ДО направленных высокочастотных

защит, резервные дистанционные защиты объектов станций и подстанций (шин, генераторов, трансформаторов, сборок собственных нужд), избирательные органы выявителей поврежденных фаз устройств однофазного автоматического повторного включения, выявительные органы устройств автоматической ликвидации асинхронного режима (АЛАР) в энергосистемах.

Помимо перечисленных устройств, в работе предлагается применять ДО и в автоматике ограничения повышения частоты, использующей быстродействующие ступени, реагирующие на скорость повышения частоты, что позволят отключать генерацию значительно раньше, чем это могут обеспечить ступени АОПЧ по отклонению частоты. Для исключения ложного действия при коротких замыканиях (КЗ) такие устройства АОПЧ дополняют пусковым органом (ПО), разрешающим работу автоматики при превышении уставки по частоте в течение заданной уставки по времени. Однако выдержка времени ПО имеет следующие отрицательные стороны для АОПЧ: сравнима с уставками по времени ступеней АОПЧ по повышению частоты, задерживает срабатывание ступеней АОПЧ по скорости повышения частоты, увеличивает общее время срабатывания автоматики. Для того чтобы исключить задержки в действии пусковых органов для АОПЧ и при этом обеспечить максимальное быстродействие ступеней, работающих по скорости повышения частоты, необходимо выполнять дополнительный контроль электрических величин объекта для распознавания режима короткого замыкания. С этой целью предлагается вводить в АОПЧ дистанционный орган, блокирующий работу ступеней при КЗ в прилегающей сети. Реализуемость такого подхода показана на примере устройства АОПЧ, установленного на Богучанской ГЭС. На рисунке 1 представлены векторы сопротивлений замера дистанционного органа АОПЧ в различных схемно-режимных условиях станции и прилегающей сети при металлических междуфазных КЗ в конце элементов, находящихся в пределах первого пояса. Вокруг концов векторов сопротивлений показаны окружности, радиусы которых рассчитываются исходя из требуемого коэффициента чувствительности к рассматриваемым повреждениям. Тогда характеристика срабатывания, огибающая необходимые векторы замера сопротивлений с учетом связанных с ними окружностями, обеспечивает надежное срабатывание ДО с требуемой чувствительностью к КЗ в области действия реле. Следует отметить, что обе характеристики срабатывания (А и Б, на рисунке 1), выбранные исходя из условия обеспечения чувствительности, позволяют надежно отстроиться от нагрузочного режима.

Как видно из рисунка 1, при использовании ДО можно четко отличить область коротких замыканий, при попадании в которую необходимо блокировать быстродействующие ступени АОПЧ.

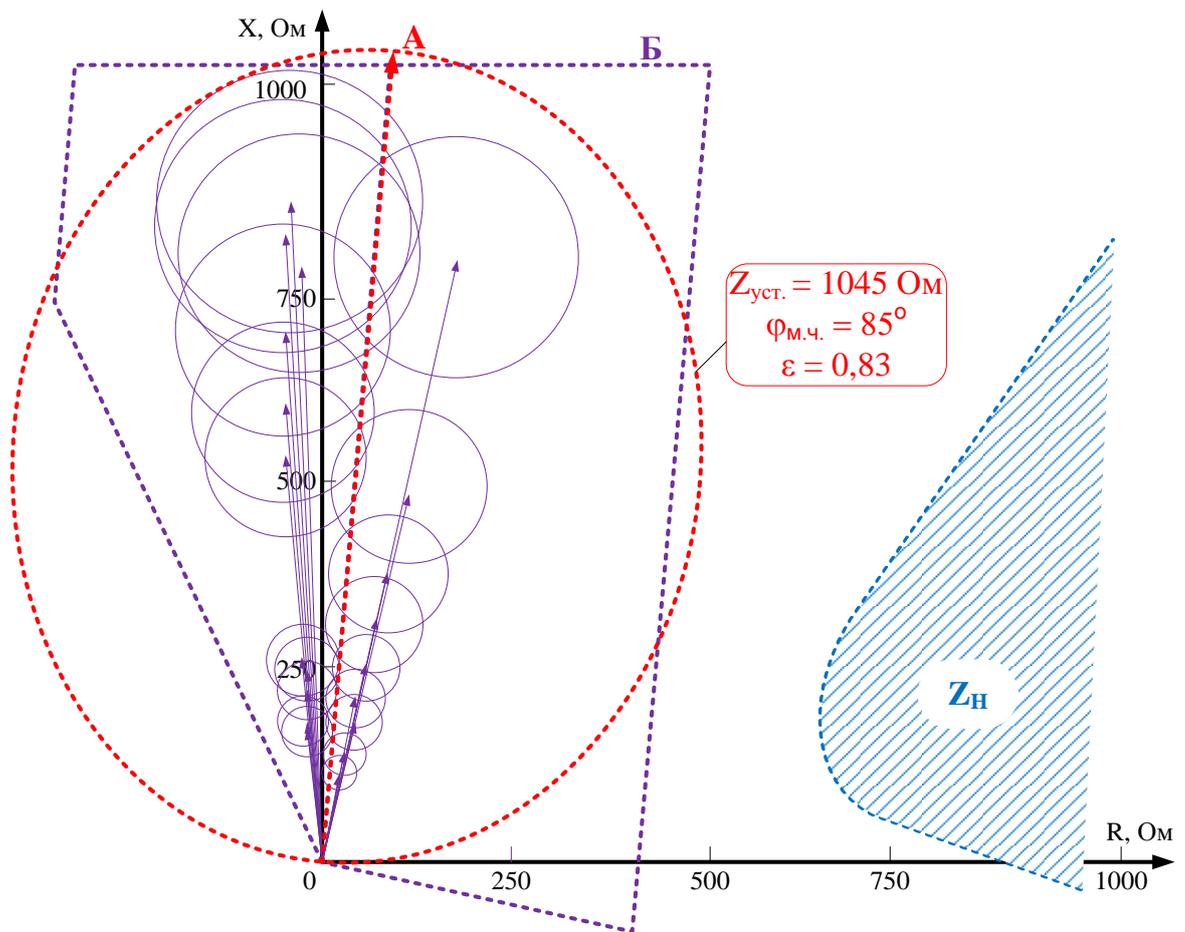


Рисунок 1 – Эллиптическая и полигональная характеристики срабатывания измерительного органа реле сопротивления, входящего в состав быстродействующей ступени АОПЧ

Во второй главе представлены результаты разработки программного комплекса «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы дистанционной защиты». Для выявляемых аварийных режимов (симметричные и несимметричные КЗ) определён перечень математических моделей, необходимый для имитации поступающих в защиту данных, а именно модели первичной сети, группы соединений ТТ, установленных по концам защищаемой линии, и самих ДО. Стоит отметить, что при анализе поведения ДО наиболее существенным является процесс, сопровождающийся насыщением ТТ, характер которого зависит от величины и времени существования свободной апериодической составляющей тока КЗ. Поэтому при моделировании первичной сети используются упрощенные уравнения расчета фазных токов и напряжений. Ток поврежденной фазы в общем виде описывается выражением $i(t) = I_{nm} \cdot \sin(\omega t + \alpha) + I_{a(0)} \cdot e^{-t/T_a}$, где I_{nm} – амплитуда периодической (вынужденной) слагающей тока КЗ; α – угол, определяющий значение тока в фазе «А» в начальный момент времени, или так называемая фаза включения; $I_{a(0)}$ – начальное значение апериодической слагающей тока КЗ; T_a – постоянная времени апериодической слагающей тока КЗ.

Взаимодействие ТТ, соединённых в группы, усложняет условия работы ДО и может приводить к его непредсказуемому поведению. Именно поэтому оно должно учитываться при моделировании защиты. Вторичные обмотки ТТ, используемые в схеме релейной защиты, содержащей ДО, как правило, соединяются в «звезду».

Модель группы ТТ «звезда», используемая при разработке программного комплекса имитационного моделирования, содержит ряд допущений (ТТ представляются Г-образными схемами замещения; ветвь намагничивания представляется усреднённой нелинейной характеристикой намагничивания сердечника, построенной по экспериментальным значениям; не учитывается влияние частных гистерезисных циклов и активных потерь на перемагничивание; на начальном участке характеристики намагничивания, до индукции 1.4 Тл, значение намагничивающего тока принимается равным нулю), а процессы в ней описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений (1).

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_j}{dt} = (L_{Tj} + L_{Hj}) \frac{di_{2j}}{dt} + (R_{Tj} + R_{Hj}) \cdot i_{2j} + L_{0i} \sum_j \frac{di_{2j}}{dt} + R_{0i} \sum_j i_{2j}; \\ i_{1j} = i_{\mu j} + i_{2j}; \\ L_{\mu j} = \frac{d\Psi_j}{di_{\mu j}}. \end{cases} \quad (1)$$

где i_{1j} , $i_{\mu j}$, i_{2j} – приведенные первичные, намагничивающие и вторичные токи ТТ, соответственно; R_{Tj} , L_{Tj} – активные сопротивления и индуктивности рассеяния вторичных обмоток ТТ; $L_{\mu j}$ – индуктивности вервей намагничивания ТТ; R_{Hj} , L_{Hj} – активные сопротивления и индуктивности рассеяния нагрузки, подключенной к ТТ; R_0 , L_0 – активное сопротивление и индуктивность рассеяния в нулевом проводе группы ТТ; $j=A, B, C$.

При формировании вторичных фазных напряжений, подводимых к измерительным органам дистанционной защиты в режимах моделирования переходных процессов при КЗ, достаточно выполнить масштабирование массивов первичных сигналов на заданный в начале моделирования коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Следующим этапом разработки программного комплекса является имитация функционирования цифровых ДО. При создании математических моделей ДО, обладающих различными характеристиками срабатывания (окружность, эллипс, параллелограмм, многоугольник), принято допущение: для выделения основной гармоники токов и напряжений, необходимых для расчета сопротивлений на зажимах реле, применяется единый метод цифровой фильтрации. Использование единого алгоритма цифровой фильтрации векторных значений тока и напряжения с последующим формированием единого сопротивления замера и его использование при различных характеристиках срабатывания позволяет

сопоставить эти характеристики в «чистом» виде, то есть без особенностей, вносимых производителями при их реализации.

Для наиболее эффективного исследования ДО в режимах КЗ разработан специальный интерактивный инструментальный разработанный программного комплекса, позволяющий пользователю с достаточной простотой и наглядностью вводить необходимые для эксперимента параметры, а также получать результаты вычислений в удобном для него виде.

Наиболее очевидной областью применения разработанного инструментария является выбор характеристик и параметров срабатывания ДО защиты на основании анализа их поведения в условиях экстремальных переходных процессов в цепях трансформаторов тока. С другой стороны, разработанные средства моделирования можно использовать при проверке допустимости возникающих погрешностей ТТ (>10%) при близких КЗ в переходном и установившемся режимах с точки зрения обеспечения надёжного срабатывания ДО. Рассмотрим реальный участок электрической сети, в котором в процессе реконструкции во вторичных цепях ТТ выполнена замена контрольных кабелей и установлены дополнительные устройства противоаварийной автоматики. Результаты аналитических расчётов показали, что рассмотренные ТТ после реконструкции их вторичных цепей не удовлетворяют требованию обеспечения надёжной работы измерительных ДО при максимальных токах КЗ, при которых возможны повышенные погрешности ТТ и, как следствие, существенные искажения вторичного тока. В таком случае, необходимо принимать решения для выполнения этого требования от наиболее простого (последовательное соединение вторичных обмоток ТТ одной фазы при наличии такой возможности) до непопулярного и наиболее дорогостоящего (замена ТТ). Однако результаты моделирования с использованием разработанных математических моделей показали, что погрешности проверяемых ТТ более 50% не привели к заметным задержкам срабатывания быстродействующих ступеней дистанционной защиты линии. На рисунке 2 для рассматриваемых ТТ до и после реконструкции устойчивый сигнал на отключение хотя бы в одной фазе появляется через время, не превышающее 37 мс.

В третьей главе рассматривается выбор параметров срабатывания дистанционных защит линейных и станционных объектов с учетом требований, предъявляемых к современному первичному оборудованию по ограничению длительности протекания через них токов повреждения, нетиповых участков сети и возможностей, которыми обладают современные цифровые защиты.

В работе описываются особенности выбора параметров срабатывания дистанционной защиты от междуфазных КЗ блоков линия-трансформатор. На рисунке 3 представлены главные электрические схемы распределительных устройств 110-220 кВ. В схемах (а) и (б) (Рисунок 3) питающие кабельные линии (КЛ) выполнены одножильными кабелями небольшой длины с изоляцией из сшитого полиэтилена.

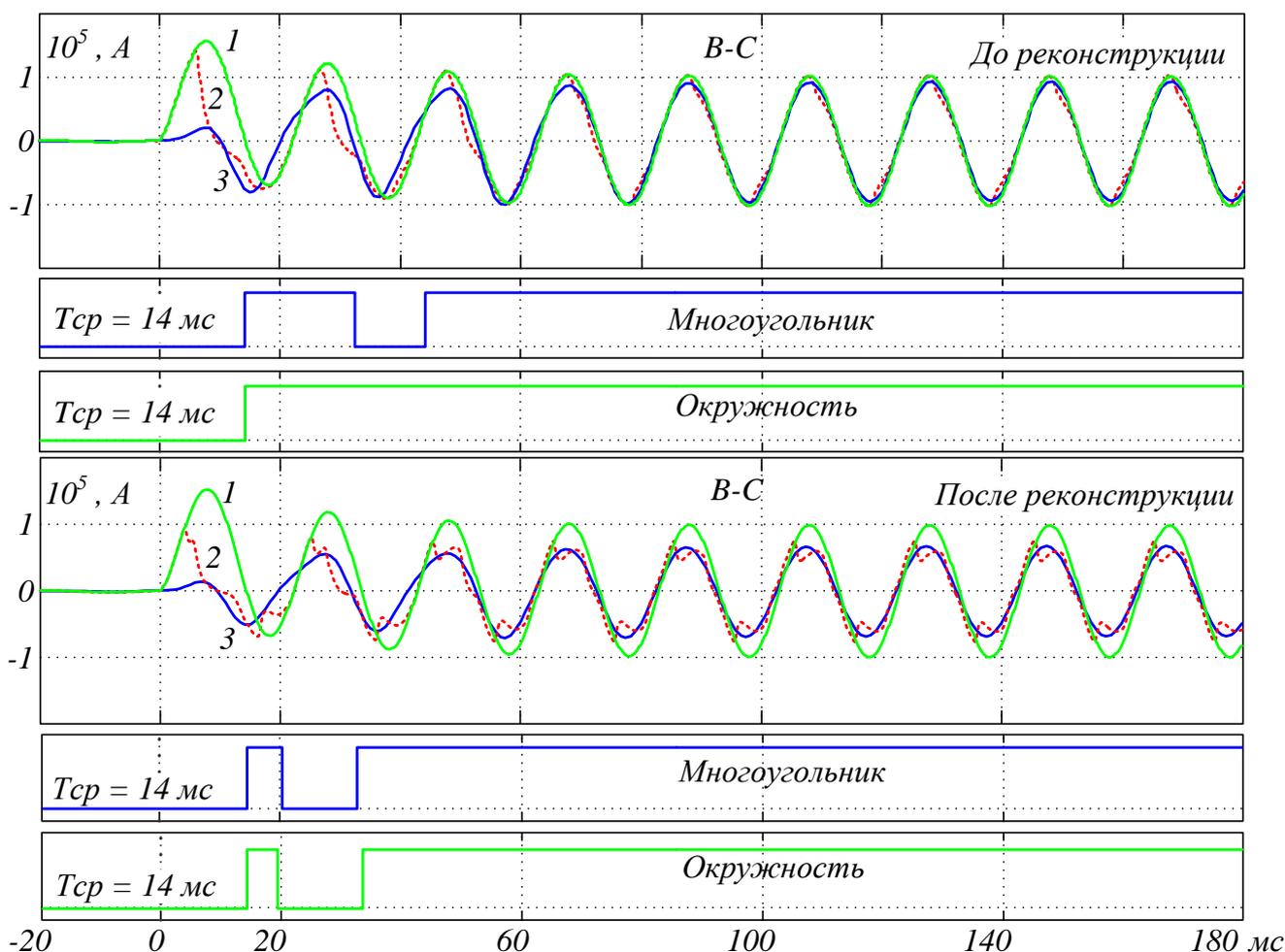


Рисунок 2 – Осциллограммы разностей токов фаз «В» и «С» и выходных сигналов ДО (при различных нагрузках ТТ до и после реконструкции)
 1 - разность первичных токов фаз, 2 - разность вторичных токов ТТ, приведенных к числу витков первичной обмотки ТТ, 3 - разность вторичных токов фаз после выделения основной гармоники, приведенных к числу витков первичной обмотки ТТ

Проблемой выбора параметров срабатывания для цифровых терминалов защит является невозможность выставления слишком маленького необходимого сопротивления срабатывания первой ступени для короткой КЛ.

В соответствии с нормативной литературой на концевых участках радиальной распределительной сети рекомендуется применять двухступенчатую защиту от междуфазных КЗ. При этом сопротивление срабатывания первой ступени в целях повышения чувствительности предлагается выбирать из условий отстройки от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС, примыкающей к противоположному концу линии. То есть выполнять неселективную защиту без выдержки времени. Неселективное действие первой ступени дистанционной защиты линии при КЗ в трансформаторе или ошиновке исправляется совместной работой автоматического повторного включения (АПВ) защищаемой линии, защиты трансформатора и средств телемеханики. Такой способ выполнения защиты характерен для схемы (в), приведенной на рисунке 3.

Реализовать защиту линий от междуфазных КЗ схемы (в), приведенной на рисунке 3 можно и следующим образом:

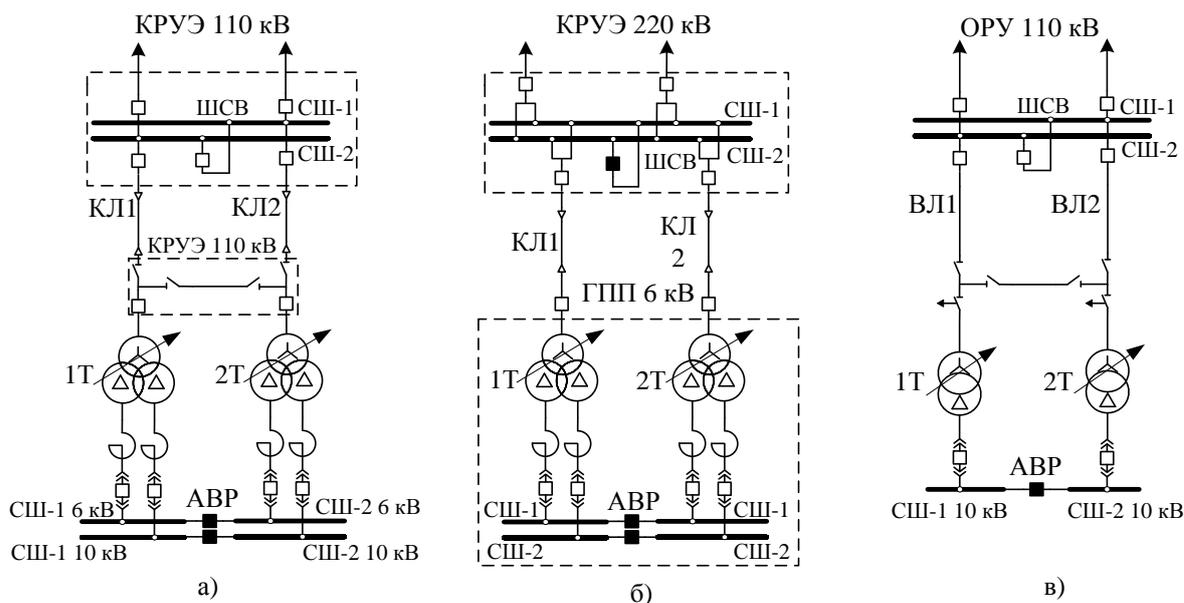


Рисунок **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.** – Главные электрические схемы

распределительных устройств 110 – 220 кВ

а) схема № 110-4Н «два блока линия – трансформатор с выключателями в цепях трансформаторов и неавтоматической перемычкой со стороны линии»; б) две рабочие системы сборных шин; в) схема № 110-4 «два блока с отделителями и неавтоматической перемычкой со стороны линии».

Первичное сопротивление срабатывания первой ступени дистанционной защиты следует выбирать из условия отстройки от КЗ на шинах противоположной ПС. Ступень должна выполняться с пуском АПВ и с нулевой выдержкой времени ($t_{ср} = 0$ с).

$$\underline{Z}_{с.з.}^I = 0,87 \cdot \underline{Z}_л, \quad (2)$$

где $\underline{Z}_л$ - сопротивление защищаемой линии.

Параметры срабатывания второй ступени следует выбирать из условия обеспечения необходимого минимального коэффициента чувствительности при металлическом КЗ в конце защищаемой линии:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{II} = k_ч \cdot \underline{Z}_л,$$

где $k_ч = 1,25$ - необходимый коэффициент чувствительности.

Вторая ступень также должна выполняться с пуском АПВ и $t_{ср} = 0,05 - 0,3$ с.

Третью ступень защиты следует отстраивать от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС, примыкающей к противоположному концу линии с запретом АПВ и $t_{ср} = 0,05 - 0,3$ с:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{III} = k_{отс} \cdot (\underline{Z}_л + \underline{Z}_{тр.мин}), \quad (3)$$

где $\underline{Z}_{тр.мин}$ - наименьшее сопротивление трансформатора, которое имеет место при крайнем положении средств регулирования, соответствующем минимальному сопротивлению трансформатора.

Параметры срабатывания четвертой ступени ДЗ следует определять по условию обеспечения коэффициента чувствительности к КЗ на шинах низшего напряжения противоположной ПС:

$$Z_{с.з.}^{IV} = k_{ч} \cdot (Z_{л} + Z_{тр.макс}), \quad (4)$$

где $k_{ч} = 1,2$ - необходимый коэффициент чувствительности;

$Z_{тр.макс}$ - наибольшее сопротивление трансформатора, которое имеет место при крайнем положении средств регулирования, соответствующем максимальному сопротивлению трансформатора.

Ступень, обеспечивающую дальнейшее резервирование (четвертую), следует выполнять с запретом АПВ, а выдержка времени должна выбираться по условию согласования с защитой ввода НН (СН).

Параметры срабатывания пятой ступени защиты, которая выполняет функцию пускового органа, должны определяться по условию обеспечения необходимого запаса чувствительности по отношению к измерительным ДО.

Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты для питающих линий схем (а) и (б), приведенных на рисунке 3, необходимо выполнять с учетом требований, предъявляемых к защите КЛ по условию предельно-допустимой температуры жилы кабеля при протекании по нему тока КЗ, который должен быть отключен с наименьшей возможной выдержкой времени, а также с обеспечением запрета действия АПВ в случае внутреннего повреждения КРУЭ.

На основе вышеизложенного и требований, предъявляемых к защите КЛ (согласно СТО 56947007-29.240.10.248-2017 на кабельных и кабельно-воздушных линиях должны устанавливаться две основные быстродействующие защиты), предлагается для защиты КЛ применять терминалы дифференциальной токовой продольной защиты линии (ДЗЛ) с использованием цифровых каналов связи, использование которых позволяет обеспечить быстродействующую селективную защиту рассматриваемых линий. При этом не требуется исправлять неселективное действие одной из ступеней ДЗ применением АПВ линии, поскольку КЗ в трансформаторе и КЗ в линии четко распознаются своими защитами с абсолютной селективностью.

Защиту оборудования схемы (б), приведенной на рисунке Рисунок **Ошибка!** **Текст указанного стиля в документе отсутствует.**, должна выполняться на базе терминалов защит, реализующих функцию ДЗЛ, и комплекта ступенчатых защит (КСЗ). В связи с этим параметры срабатывания ступеней дистанционной защиты необходимо выбирать следующим образом.

Первичное сопротивление срабатывание первой ступени следует определять по выражению (2) из условия отстройки от металлического КЗ на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу линии. Ступень необходимо выполнять с запретом АПВ и с нулевой выдержкой времени ($t_{ср} = 0$ с).

Сопротивление срабатывания второй ступени следует определять по условию отстройки от КЗ за понижающими трансформаторами согласно выражению (3). Вторую ступень необходимо выполнять с запретом АПВ, $t_{ср} = 0,3$ с.

Третья ступень выполняет функцию дальнего резервирования. Уставку реле сопротивления третьей ступени необходимо определять по выражению (4), исходя из требований достаточной чувствительности при КЗ в конце смежного участка. Ступень также должна выполняться с запретом АПВ, а выдержку времени следует выбирать по условию согласования с максимальной токовой защитой на высокой стороне (МТЗ ВН) трансформатора.

Защиту КЛ в схеме (а), приведенной на рисунке 3, можно реализовать на базе терминалов защит, выполняющих функции КСЗ. Предварительный расчет параметров срабатывания показал, что в терминалах при установке на коротких КЛ невозможно выставить уставки срабатывания первой ступени дистанционной защиты, выбранные по выражению **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Поэтому защита коротких КЛ должна выполняться в виде двухступенчатой дистанционной защиты с неселективной первой ступенью, охватывающей с заданным коэффициентом чувствительности всю защищаемую линию, рассчитанную по выражению (3). При этом неселективное действие должно исправляться АПВ линии с использованием передачи разрешающего сигнала, подтверждающего срабатывание защит трансформатора. Такое исполнение защиты коротких КЛ позволяет выполнять требование производителя КРУЭ о запрете АПВ при КЗ внутри распределительного устройства. Уставка реле сопротивления второй ступени должна определяться по выражению (4) для обеспечения достаточной чувствительности при КЗ в конце смежного участка. Выдержка времени второй ступени должна согласовываться с МТЗ стороны ВН трансформатора.

Проблемы выполнения требований, предъявляемых к релейной защите, возникают не только при защите сетевых объектов. На рисунке 4 представлена схема объекта, на котором возникла проблема обеспечения чувствительности при защите трансформатора блока 2ГТ от внешних симметричных КЗ.

В соответствии с нормативной литературой в качестве резервной защиты трехобмоточного трансформатора должна применяться максимальная токовая защита с комбинированным пуском напряжения. Однако вследствие изменения схемы выдачи мощности станции токовая защита перестала удовлетворять требованиям чувствительности, поэтому при реконструкции устройств релейной защиты на этом блоке применена защита, выполненная на дистанционном принципе.

Защита выполняется трёхрелейной на основе измерительных органов сопротивления, подключается к измерительным трансформаторам тока и напряжения со стороны среднего напряжения и включает в себя две ступени.

Первая ступень, предназначенная для резервирования основной защиты трансформатора блока, направлена в трансформатор. Вторая ступень, направленная в сеть 35 кВ, обеспечивает дальнейшее резервирование защит присоединений прилегающей сети.

Расчеты показали, что для обеспечения уверенного выполнения заданных функций в качестве первой ступени возможно использование измерительного органа, как с круговой характеристикой срабатывания, так и с полигональной, расположенной в III-IV квадрантах и проходящей через начало координат.

Здесь в качестве второй ступени дистанционной защиты, обеспечивающей дальнейшее резервирование, возможно использование одного измерительного органа с полигональной характеристикой и вырезом, обеспечивающим отстройку от нагрузочных режимов. Однако более целесообразным является использование нескольких ДО с полигональными характеристиками срабатывания (рисунок 5), выбор параметров срабатывания которых должен выполняться для каждой группы присоединений независимо. Дополнительным преимуществом использования нескольких ДО является возможность ускорения ступени при попадании сопротивления замера в область срабатывания, характерную только для конкретной группы присоединений, то есть при попадании в одну из рассматриваемых областей вторая ступень дистанционной защиты может отработать с выдержкой времени, согласованной с временами резервных защит только рассматриваемой группы.

В главе 3 также представлен подход к выбору параметров срабатывания дистанционной защиты для реактированной кабельно-воздушной линии (КВЛ) с двухсторонним питанием (рис. 6).

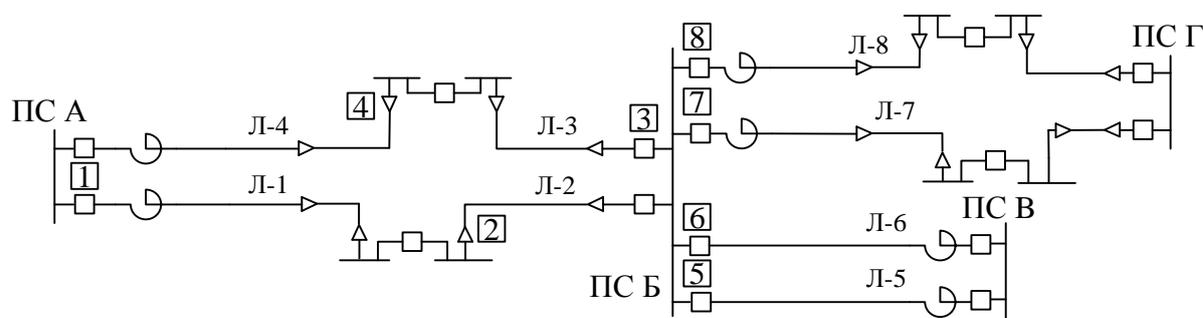


Рисунок 6 – Участок электрической сети с реактированными КВЛ

При определении уставок необходимо учитывать, что кабели, которыми выполнены участки КВЛ, по условию предельно-допустимой температуры их жил должны быть отключены отключаться резервной (второй) ступенью с наименьшей возможной выдержкой времени.

Первичные сопротивления срабатывания ступеней дистанционной защиты, обеспечивающих ближнее резервирование, определяются по условиям отстройки от КЗ в конце защищаемого участка или в конце первой зоны следующего участка, а резервных ступеней - по условию обеспечения требуемого коэффициента чувствительности в конце смежного участка для всех возможных режимов работы первичной сети.

Наиболее сложен выбор параметров срабатывания второй ступени.

Рассмотрим определение параметров срабатывания защиты 3 (рисунок 6). Сопротивление срабатывания второй ступени защиты линии Л-3 при данной конфигурации сети должно определяться по условию согласования с первой ступенью защиты 4 линии Л-4, а выдержка времени должна приниматься на ступень селективности большей, чем выдержка времени быстродействующей защиты следующего участка с учетом времени действия устройства резервирования при отказе выключателей (УРОВ). В рассматриваемом случае

выдержка времени второй ступени составляет две ступени селективности. Однако для выполнения требований по обеспечению термической стойкости кабеля желательно, чтобы все повреждения на рассматриваемой линии отключались без дополнительных задержек. Этого можно достичь путем использования телеускорения защиты передачей соответствующей команды по каналам связи. В таком случае, ступенчатая защита с относительной селективностью на линии Л-3 при использовании каналов связи для обмена логической информацией о действии измерительных органов, установленных по концам защищаемого элемента, превращается в быстродействующую защиту с абсолютной селективностью с косвенным сравнением сигналов по концам защищаемого объекта. Быстродействие ступенчатой защиты реализуется путём передачи разрешающего сигнала от ступени с неполным охватом защищаемой зоны для ускорения второй ступени дистанционной защиты противоположного конца.

Более того, сопротивление срабатывания вторых ступеней защит, которые без использования телеускорения должны быть согласованы с первыми (вторыми) ступенями защит линии Л-3, согласовывать не требуется. Данная мера позволяет не только выполнить требования по условию ограничения времени протекания токов повреждения через жилы кабеля, но и повысить чувствительность и быстродействие ступеней защит с относительной селективностью за счет исключения условия согласования с защитами смежного участка.

В четвертой главе предложены способы проверки правильности функционирования ДО в асинхронном режиме (АР). Большой интерес с точки зрения анализа и проверки ДО представляет АР, в котором годограф вектора сопротивления замера Z_p пересекает характеристику ДО или находится в непосредственной близости от неё. Важно отметить, что в зависимости от области использования ДО цели его проверки в АР могут существенно отличаться. Для ДО, используемого в защитах линий, в рассматриваемом режиме необходимо оценивать: надёжность несрабатывания защиты при прохождении годографа сопротивления замера через зону действия ДО; уставку блокировки защиты при качаниях и АР. Проверка ДО, используемого, например, в АЛАР, позволяет оценить: надежное несрабатывание автоматики при прохождении годографа вектора сопротивления замера в максимальной близости к любой из границ характеристики срабатывания ДО, не пересекающего его в течение всей длительности аварийного режима; надежное срабатывание автоматики в АР с заданным периодом при прохождении годографа сопротивления замера через зону действия используемого ДО.

В работе предлагается несколько способов моделирования АР. Один из них заключается в определении сопротивлений систем 1 и 2 (рисунок 7) через заданные координаты центра окружности и её радиус, которую должен описывать годограф вектора сопротивления замера реле (рисунок 8):

$$\left\{ \begin{array}{l} -\underline{Z}_0(q^2 - 1) = q^2 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2; \\ -R_0 |q^2 - 1| = q |\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|; \\ -\underline{Z}_0(q^2 - 1) = q^2 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2; \\ R_0 |q^2 - 1| = q |\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|; \\ \underline{q}(t) = \frac{\underline{E}_2(t)}{\underline{E}_1(t)}. \end{array} \right.$$

На основе полученных результатов расчёта формируются массивы токов и напряжений, соответствующие желаемой траектории. Следует отметить, что при использовании рассмотренного способа замеры комплексного сопротивления распределяются по годографу неравномерно – максимальная плотность замеров наблюдается при минимальной скорости изменения угла между векторами ЭДС систем С1 и С2, т.е. при угле равном 180° .

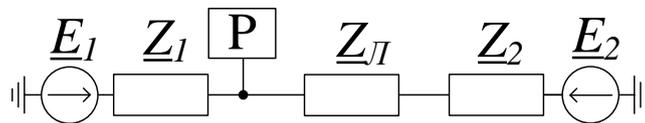


Рисунок 7 – Расчетная модель энергосистемы

$\underline{E}_1, \underline{E}_2$ – векторы ЭДС эквивалентных систем С1 и С2 соответственно;
 $\underline{Z}_1, \underline{Z}_L, \underline{Z}_2$ – векторы сопротивлений систем С1, С2 и линии соответственно;
 P – место установки РЗ (ПА).

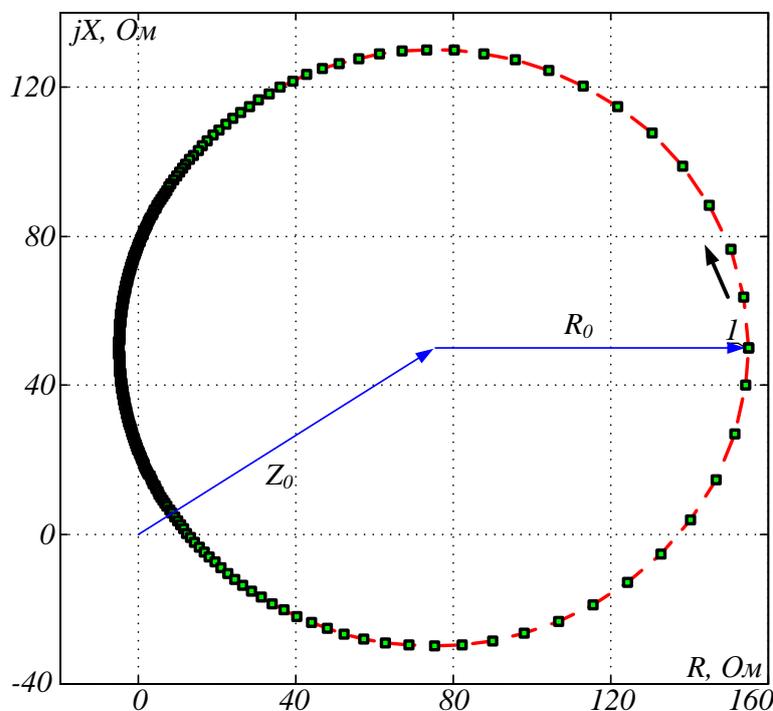


Рисунок 8 – Годограф сопротивления замера с заданными характеристиками

Для формирования тока и напряжения в АР с заданными характеристиками по второму способу используется выражение, описывающее окружность в комплексной плоскости:

$$\underline{Z} = \frac{U}{I} = \underline{Z}_0 + R \cdot e^{j(\omega_{ap}t + \varphi_0)}.$$

Особенностью этого способа является неизменность фазы и амплитуды одного из моделируемых электрических сигналов – тока или напряжения. Строго говоря, полученный режим не является АР, когда при котором одновременно происходят периодические колебания амплитуды, подведённых к дистанционному органу тока и напряжения. Однако преимуществом рассматриваемого способа формирования осциллограммы проверочного режима является возможность оценки, как правильности функционирования, так и параметров срабатывания устройства блокировки при качаниях в дистанционных защитах, контролирующей скорость изменения сопротивления, так как скорость перемещения вектора замера комплексного сопротивления по заранее обозначенной окружности в данном способе является постоянной, то есть выборки замера комплексного сопротивления распределяются по этой окружности равномерно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. Разработана достаточно полная математическая модель комплекса «объект защиты – измерительные трансформаторы – измерительные органы защиты», позволяющая исследовать поведение защит в наиболее сложных режимах для исследования их устойчивости функционирования. Разработанные средства моделирования позволяют оценивать поведение измерительных дистанционных органов в переходных процессах с учётом влияния погрешностей трансформаторов тока, используемых защитой, и их взаимодействием в группе. Эти средства, с одной стороны, могут быть использованы для выбора характеристик срабатывания измерительных органов устройств РЗ на основании получаемых осциллограмм токов, напряжений, годографов вектора замера реле сопротивления в комплексной плоскости и осциллограмм выходных сигналов измерительных органов, а с другой стороны, позволяют проверять ТТ на соответствие требованию надёжной работы измерительных органов защиты при близких КЗ.

2. В работе показано, что использование традиционных методик расчета параметров срабатывания ступеней дистанционных защит при нетиповой конфигурации сети и использовании современного оборудования не позволяет учесть все особенности защищаемого объекта. Автором предлагается внести корректировки в эти методики, в которых необходимо учитывать не только указания нормативно-технических актов, но и требования к условиям эксплуатации установленного на объекте защиты оборудования, поскольку условия допустимой работы, указанные в технической документации на оборудование, часто оказываются более жесткими, чем указанные в нормативно-технической документации. Более того, использование расширенных

возможностей современных защит позволяет выбрать такой набор параметров срабатывания защит, который обеспечивает необходимые селективность и чувствительность их действия, а также в полной мере удовлетворяет требованиям, обусловленным особенностями современного, вновь устанавливаемого первичного оборудования электроэнергетических систем.

3. Предложен способ использования в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов с заданными характеристиками срабатывания. Такой способ не только позволяет получить необходимую чувствительность устройств и обеспечить надежную отстройку от нагрузочного режима, но и даёт проектировщику РЗ дополнительный инструментарий, расширяющий возможности выбора уставок защит в сетях сложной конфигурации.

4. Автором предложено дополнять устройство АОПЧ (при наличии в нем ступеней по скорости изменения частоты) дистанционным блокирующим органом, который выявляет попадание сопротивления замера в область коротких замыканий, при которых необходимо блокировать работу быстродействующих ступеней АОПЧ. Использование дистанционного блокирующего органа позволяет повысить быстродействие АОПЧ в аварийных режимах, связанных с недопустимым повышением частоты, существенно уменьшить ущерб, вызываемый излишним отключением оборудования на электрических станциях.

5. Разработаны алгоритмы, позволяющие формировать входные сигналы устройств релейной защиты и автоматики в виде токов и напряжений, подаваемых непосредственно на входы испытуемого объекта. Подаваемые на входы устройства сигналы позволяют проверять поведение дистанционных органов в асинхронных режимах работы контролируемого участка сети, в которых годограф вектора сопротивления замера имеет вид окружности.

6. Предложена методика определения диапазона допустимых значений периода асинхронного хода моделируемого режима при проверке устройств ПА и РЗ, использующих дистанционный принцип.

7. Предложена методика определения зоны несрабатывания в асинхронном режиме токовой блокировки дистанционной защиты при качаниях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Фролова, Е.И.** Применение дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на блоках линия - трансформатор. / Е. И. Фролова, В. Е. Глазырин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - Новосибирск: Изд-во НГAVT, 2012. - № 1. - С. 396-400.

2. **Фролова, Е.И.** Исследование с использованием математических моделей влияния переходных процессов в трансформаторах тока на поведение дистанционных органов / Е. И. Фролова, В. Е. Глазырин // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2012. - № 4. - С. 9-14.

3. **Фролова, Е.И.** Быстродействующая автоматика ограничения повышения частоты / В. В. Васильев, А. А. Осинцев, Д. Н. Бородин, Е. И. Фролова // Релейная защита и автоматизация. - 2016. - № 2. - С. 22-27.

4. **Фролова, Е. И.** Применение резервной дистанционной защиты на блочном трансформаторе / Е. И. Фролова, А. А. Осинцев // Электрические станции. - 2016. - № 2. - С. 38-41 (*переводная версия входит в базу Scopus*: Frolova E. I. Use of backup distance protection on a block transformer / E. I. Frolova, A. A. Osintsev // Power Technology and Engineering. - 2016. - Vol. 50, iss. 2. - P. 220–223).

5. **Фролова, Е.И.** Реализация характеристик срабатывания дистанционных защит / А. А. Осинцев, Е. И. Фролова, А. Е. Гоженко // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2017. – № 4. – С. 64–70.

6. **Фролова, Е.И.** Проверка дистанционного органа устройств РЗ и ПА в асинхронном режиме стандартными средствами испытательного комплекса «РЕТОМ» / В. Е. Глазырин, А. А. Осинцев, И. И. Литвинов, Е. И. Фролова // Электрические станции – 2017. – № 11. – С. 32–37 (*переводная версия входит в базу Scopus*: Verification of distance relay of relay protection and emergency control automation equipment in asynchronous mode by standard devices of the RETOM test complex / V. E. Glazyrin, A. A. Osintsev, I. I. Litvinov, E. I. Frolova // Power Technology and Engineering. - 2018. – Vol. 52, iss. 2. – P. 242-247).

7. **Фролова, Е.И.** Способ получения годографа асинхронного режима с заданными характеристиками для проверки работы дистанционного органа / В. Е. Глазырин, И. И. Литвинов, А. А. Осинцев, Е. И. Фролова // Электрические станции. - 2018. - № 6. - С. 36-41 (*переводная версия входит в базу Scopus*: Method of obtaining the hodograph of an asynchronous mode with given characteristics for testing the operation of a distance relay / V. E. Glazyrin, I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, E. I. Frolova // Power Technology and Engineering. - 2018. - Vol. 52, iss. 4. - P. 491–495).

8. **Фролова, Е.И.** Способ проверки правильности функционирования дистанционного органа в асинхронном режиме / А. А. Осинцев, Е. И. Фролова, И. И. Литвинов, Ф. В. Поддубняк // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн.. - 2018. – № 12. – С. 56–61.

9. **Фролова, Е.И.** Влияние погрешностей трансформаторов тока на работу цифровых токовых защит / В. Е. Глазырин, А. А. Осинцев, Е. И. Фролова, А. А. Ледовских // Вестник Казанского государственного энергетического университета. - 2019. – Т. 11, № 2 (42). – С. 83–90.

Публикации в зарубежных конференциях и изданиях, входящих в наукометрические базы данных Web of Science и/или Scopus:

10. **Frolova, E.I.** Automation of distance relay testing / V. E. Glazyrin, I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, E. I. Frolova // 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2019 : conf. proc., Altai Republic, Erlagol, 29 June – 3 July, 2019. – IEEE, 2019. – P. 711–715. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8823241>. - Title from screen - ISBN 978-1-7281-1753-9. - DOI: 10.1109/EDM.2019.8823241.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

11. Свидетельство №2019612506. Получение годографа асинхронного режима с заданными параметрами на комплексной плоскости / И.И. Литвинов, А.А. Осинцев, **Е.И. Фролова**, Ф.В. Поддубняк // зарегистр. 21.02.2019. -1 с.

12. Свидетельство №2019612683. Получение кругового годографа вектора сопротивления при неизменном действующем значении тока / И.И. Литвинов, А.А. Осинцев, **Е.И. Фролова** // зарегистр. 26.02.2019. -1 с.

13. Свидетельство №2019612684. Получение кругового годографа вектора сопротивления при неизменном действующем значении напряжения / И.И. Литвинов, А.А. Осинцев, **Е.И. Фролова** // зарегистр. 26.02.2019. -1 с.

Публикации в других научных изданиях:

14. **Фролова, Е.И.** Проблема выбора уставок дистанционной защиты кабельных линий / Е.И. Фролова // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. - 2011. – № 1. – С. 113-118.

Материалы международных и всероссийских конференций:

15. **Фролова, Е.И.** Динамическая устойчивость функционирования дистанционных измерительных органов. / Е. И. Фролова // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. Материалы всерос. науч. конф. молодых ученых 3-5 декабря 2010. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. Ч. 2. С. 126-127.

16. **Фролова, Е.И.** Влияние переходных процессов в трансформаторах тока на поведение дистанционных органов / Е. И. Фролова, В. Е. Глазырин // Международная молодежная научно-техническая конференция «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах», [г. Новосибирск], 21–24 сент. 2011 г. : тез. докл.. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 58–59.

17. **Фролова, Е.И.** Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты кабельно-воздушных линий. / Е. И. Фролова // Современная техника и технологии: сборник трудов 18 международной конференции. - Томск: Изд-во ТПУ, 2012. - Том 1. - С. 123-124.

18. **Frolova, E.I.** Research of transients influence in current transformers on the distance protection operation / A. A. Osintsev, E. I. Frolova // 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018) : proc., China, Harbin, 30 May – 1 June 2018. – Harbin : IEEE, 2018. – P. 914-920. - 1 flash card (CFP18786-USB). – Title with the label.

19. **Фролова, Е.И.** Влияние погрешностей трансформаторов тока на работу цифровых дистанционных защит / А. А. Ледовских, Е. И. Фролова, А. А. Осинцев // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 4. – С. 136–139.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 374. Подписано в печать 07.02.2020 г.