

На правах рукописи

НАВОЛОЧНЫЙ Александр Альбертович

**ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 6-10 кВ
ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ**

Специальность 05.14.02 – электростанции и
электроэнергетические системы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена в Вологодском государственном техническом университете (ВоГТУ)

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Булычев Александр Витальевич
- Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Смоловик Сергей Владимирович
- кандидат технических наук, доцент
Шмурьев Валентин Яковлевич
- Ведущая организация – ФГУП «НИИЭлектромаш»

Защита состоится «__» октября 2002 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29) в ауд. 325 главного здания.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «__» сентября 2002 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Терёшкин А.В.,
к.т.н., доцент

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение интенсивности возникновения повреждений в энергосистемах в условиях, когда качество электроснабжения во многом определяет уязвимость жизнеобеспечения общества, приводит к угрожающему росту вероятности их развития в тяжёлые аварии с катастрофическими последствиями. Преобладающим видом повреждений в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Доля ОЗЗ составляет более 75% от общего числа повреждений. Приблизительно каждое третье ОЗЗ впоследствии переходит в междуфазное короткое замыкание, что может приводить не только к техническим нарушениям электроснабжения, но и к возмущениям, способным нарушить управление процессами в энергосистемах.

Традиционные защиты от ОЗЗ реагируют на свершившийся факт замыкания и не позволяют с достаточной степенью точности определить место возникновения повреждения. Осуществляемое при этом экстренное отключение повреждённого участка сети не всегда является эффективной мерой сохранения требуемой степени надёжности энергосистемы, так как неожиданный перерыв поставки электроэнергии может приводить не только к огромным материальным убыткам, но и к социальным потрясениям.

Исключить возможность внезапного повреждения изоляции из-за её износа и обеспечить тем самым возможность предотвращения развития более тяжёлых аварий можно осуществляя непрерывный контроль состояния изоляции. Для этих целей необходимы пересмотр требований к системам защиты, разработка новых методов контроля состояния энергосистем и создание технических средств защиты на современной микроэлектронной базе, обеспечивающих существенное расширение их функциональных возможностей в части предупредительного действия с установлением места возникновения развивающегося повреждения.

В этой связи совершенствование защит электрических сетей 6-10 кВ от однофазных замыканий на землю играет существенную роль в обеспечении необходимой надёжности электроснабжения и представляет собой крупную и актуальную научно-техническую задачу.

Исследования по теме диссертации выполнялись в соответствии с целевой научно-технической программой «Повышение надёжности, экономичности и экологичности энергетической системы России».

Цель работы заключается в разработке и реализации новой высокоэффективной защиты электрических сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью, обладающей свойствами предупредительного действия и предназначенной для работы в составе автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) энергетических объектов.

Основные научные результаты и их новизна:

1. Разработана новая защита электрических сетей с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю на основе промышленного компьютера, обладающая улучшенными технико-экономическими характеристиками и предназначенная для работы как в составе АСУ ТП электроэнергетического объекта, так и автономно. Во вновь разработанной системе защиты реализована новая концепция построения защит, включающая в себя не только традиционное отключение элемента по факту его повреждения, но и предупреждение аварийных ситуаций на основе функций прогнозирования.

2. Предложены, исследованы и реализованы новые методы непрерывного контроля активного сопротивления и ёмкости изоляции электрической сети 6-10 кВ, позволяющие прогнозировать развивающиеся однофазные замыкания на землю; а также методы определения места внезапного повреждения изоляции при работающем оборудовании с нахождением повреждённого присоединения, идентификацией способа соединения обмоток повреждённого оборудования, выявлением повреждённой фазы (обмотки) и оценкой расположения точки повреждения внутри неё.

3. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные алгоритмы контроля состояния изоляции и защиты от однофазных замыканий на землю в режиме времени, максимально приближенном к реальному.

4. Исследованы частотные характеристики промышленных и лабораторных первичных преобразователей сигналов. Показано, что промышленные трансформаторы тока нулевой последовательности не обеспечивают требуемой точности преобразования тока нулевой последовательности

промышленной частоты. Их применение совместно с современными микропроцессорными устройствами возможно только при соответствующем учёте вносимых амплитудных и фазовых искажений.

5. Создана и использована в исследованиях база данных зарегистрированных сигналов, предназначенных для целей релейной защиты: на основании методов спектрального оценивания дана их характеристика и установлены требования к рабочему частотному диапазону устройств защиты.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Создан и испытан в условиях действующей реальной электрической сети 6 кВ опытный образец системы контроля изоляции и защиты от однофазных замыканий на землю. Испытания подтвердили основные теоретические положения диссертации и правомерность принятых допущений, предложенных рекомендаций и выводов.

2. Разработана и изготовлена физическая модель электрической сети с изолированной нейтралью, позволяющая оперативно изменять свою конфигурацию и режимы работы, а также контролировать происходящие в ней при этом процессы. Всесторонние исследования опытного образца устройства с использованием физической модели позволили выбрать наиболее оптимальные алгоритмы контроля и отладить программное обеспечение. Решена проблема сопряжения разработанного устройства защиты с защищаемыми объектами и АСУ.

3. Результаты исследований использованы при выполнении хозяйственных научно-исследовательских работ ОАО «Вологдаэнерго»: «Разработка методов и технических средств контроля изоляции и защиты по упреждающему принципу сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью, присоединённых к сборным шинам Вологодской ТЭЦ» и «Совершенствование методов расчёта параметров электрических сетей Вологдаэнерго на основе базы данных по технологическим нарушениям, зафиксированным цифровыми регистраторами аварийных процессов».

4. Материалы теоретических, методических и практических разработок нашли применение в учебном процессе Вологодского государственного технического университета и учебного центра ОАО «Вологдаэнерго».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на XV НТК «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2002» (Москва, 2002), на международных электронных НТК «Перспективные технологии автоматизации» (Вологда, 1999) и «Современные проблемы информатизации» (Воронеж, 2000), на межвузовских НТК «Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии» (Вологда, 2000) и «Вузовская наука – региону» (Вологда, 2001, 2002), а также на заседаниях кафедр «Электрические станции и автоматизация электрических систем» СПбГПУ и «Электроснабжение» ВоГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит: введение, 4 главы, заключение, список литературы и приложения. Общий объём работы – 189 страниц. Список литературы содержит 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования и показана структура диссертации.

В первой главе проведён анализ существующих способов решения проблемы, установлены требования к рабочему частотному диапазону устройств защиты, а также исследованы передаточные характеристики трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) экспериментальными методами.

Поскольку электрическому пробое изоляции, как правило, предшествует длительный процесс её старения, задачу обеспечения необходимой надёжности изоляции возлагают на систему профилактических испытаний и контроля. Традиционно используемые средства релейной защиты и сигнализации реагируют на факт свершившегося ОЗЗ и принципиально не могут его предупредить. Методы испытаний и контроля также обладают известными недостатками: сложность или громоздкость используемого оборудования, трудность интерпретации полученных оценок, недостаточная эффективность либо необходимость вывода из работы контролируемого оборудования.

Исключить возможность внезапного повреждения изоляции в случае постепенного ухудшения её параметров можно только осуществляя непрерывный контроль сопротивления изоляции в нормальном режиме работы сети, поэтому обоснованным и необходимым является пересмотр требований к системам защиты, предусматривающий не только традиционное отключение элемента по факту свершившегося его повреждения, но и заблаговременное предупреждение аварийных ситуаций на основе функций прогнозирования.

Задача определения требований к рабочему частотному диапазону устройства защиты решена на основе спектрального анализа зарегистрированных сигналов с трансформаторов тока нулевой последовательности, с трансформатора напряжения нулевой последовательности (ТННП) и с вновь вводимого блока – коммутатора – при однофазных замыканиях на землю. Методика основана на соотношении Парсеваля и заключается в нахождении такой верхней частоты анализируемого сигнала, при которой будет передана бóльшая часть его мощности. Используются следующие методы спектрального оценивания: периодограмм (окно Чебышева), Уэлча (окно Хэмминга), Берга и модифицированный ковариационный метод. Показано, что частота дискретизации АЦП устройства защиты должна составлять не менее 1260 Гц.

С целью сравнения проведены экспериментальные исследования передаточных характеристик как промышленных ТННП (типов ТЗРФ, ТЗРЛ и ТЗЛМ), так и лабораторных образцов (на основе ферритовой чашки и ферритового кольца; в обоих случаях число витков вторичной обмотки – 1000, первичной (трёхфазной) – 1, феррит марки 2000 НН). Показано, что промышленные ТННП не обеспечивают требуемой точности преобразования тока нулевой последовательности промышленной частоты. Обоснована необходимость учёта вносимых амплитудных и фазовых искажений при использовании ТННП совместно с современными микропроцессорными устройствами, а также совершенствования самих ТННП.

Во второй главе рассмотрен новый метод контроля состояния изоляции электрической сети 6-10 кВ и оценены его предельные возможности; разработана уточнённая математическая модель защищаемой электрической сети.

Коммутационный метод, не имеющий зоны нечувствительности, предназначен для защиты распределительной сети среднего напряжения с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю и основан на анализе сигналов, формируемых специально созданными цепями. Устройство, использующее коммутационный метод, может осуществлять непрерывный контроль основных параметров изоляции и в случае постепенного ухудшения последних становится возможным прогнозировать развивающиеся ОЗЗ и предпринимать необходимые меры по их предотвращению. Для внезапных ОЗЗ такое устройство позволяет определять место повреждения и отключать повреждённое оборудование.

Упрощенная с учётом допустимых ограничений схема замещения контролируемой сети с внедрёнными элементами защиты представлена на рис. 1. Здесь $Z_{из}$ – приведённое полное сопротивление изоляции сети относительно земли, величина которого служит одним из основных критериев исправности изоляции.

Суть метода заключается в следующем. В каждый момент времени с помощью коммутатора на основе диодов $VD_1 \div VD_6$ в сети выбираются фазы с наибольшим и наименьшим по абсолютному значению напряжениями относительно земли. Эти фазы через ограничительные сопротивления R_1 и R_2 посредством шунта $R_{ш}$ соединяются с землёй. Возникающий при этом ток утечки, оцениваемый по мгновенным значениям напряжения на шунте, несёт полную информацию об общем сопротивлении изоляции относительно земли, а в случае повреждения – о месте его расположения в обмотках повреждённого оборудования.

Рассматриваемая сеть является нелинейной, так как содержит нелинейные элементы – диоды, и потому требует специальных методов расчёта. Однако, считая

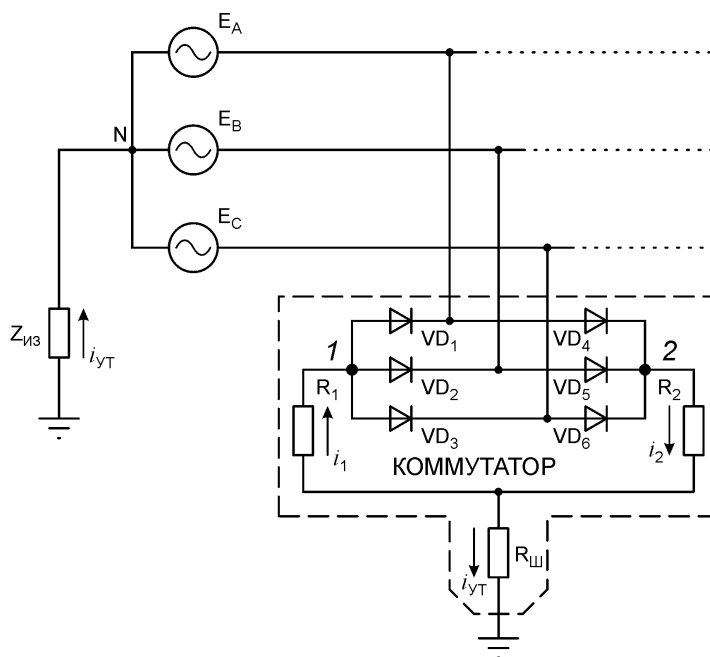


Рис. 1

диоды близкими по свойствам к идеальным, можно ввести эквивалентную замену симметричной системы синусоидальных э.д.с. E_A , E_B и E_C совместно с диодами $VD_1 \div VD_6$ системой двух несинусоидальных периодических э.д.с. e_I и e_{II} (рис. 2). Это позволяет использовать для расчёта тока утечки метод наложения относительно составляющих э.д.с. e_I и e_{II} .

Используя метод контурных токов, можно определить параметры составляющих тока утечки, обусловленных соответствующими составляющими несинусоидальных э.д.с.:

$$i_{yT(n)} = \frac{e_{I(n)} \cdot R_2 + e_{II(n)} \cdot R_1}{(R_2 + R_{III} + R_{II3}) \cdot R_1 + (R_{III} + R_{II3}) \cdot R_2}. \quad (1)$$

Несинусоидальные э.д.с. e_I и e_{II} определяются фазными напряжениями относительно земли и могут быть представлены в кусочно-непрерывной форме:

$$e_{II} = \begin{cases} u_{A0}, & \left(\frac{\pi}{6} + 2\pi k\right) \leq \omega t < \left(\frac{5\pi}{6} + 2\pi k\right) \\ u_{B0}, & \left(\frac{5\pi}{6} + 2\pi k\right) \leq \omega t < \left(\frac{3\pi}{2} + 2\pi k\right) \\ u_{C0}, & \left(\frac{3\pi}{2} + 2\pi k\right) \leq \omega t < \left(\frac{13\pi}{6} + 2\pi k\right) \end{cases}; \quad e_I = \begin{cases} u_{C0}, & \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi k\right) \leq \omega t < \left(\frac{7\pi}{6} + 2\pi k\right) \\ u_{A0}, & \left(\frac{7\pi}{6} + 2\pi k\right) \leq \omega t < \left(\frac{11\pi}{6} + 2\pi k\right) \\ u_{B0}, & \left(\frac{11\pi}{6} + 2\pi k\right) \leq \omega t < \left(\frac{5\pi}{2} + 2\pi k\right) \end{cases};$$

$$k \in Z \quad \left(\begin{array}{l} Z - \text{множество} \\ \text{целых чисел} \end{array} \right).$$

В свою очередь, напряжения фаз относительно земли зависят от повреждённой фазы, способа соединения обмоток оборудования, в котором произошло повреждение (треугольник или звезда), а также от места повреждения. Таким образом, алгоритм исследования включает в себя разложение в ряд Фурье каждой из несинусоидальных э.д.с. e_I и e_{II} для различных случаев повреждения, расчёт и анализ составляющих тока утечки, обусловленных отдельными составляющими указанных э.д.с.

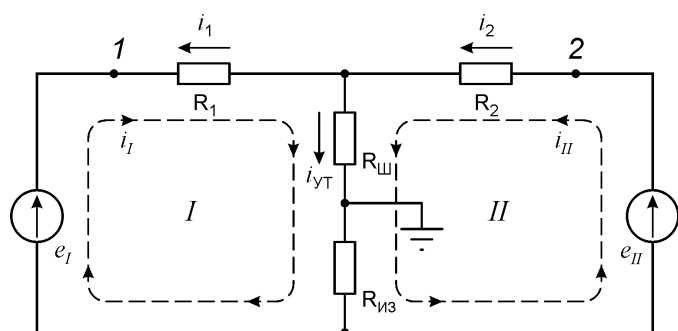


Рис. 2

В результате исследований получен ряд соотношений, наиболее важные из которых представлены ниже в виде таблицы. Предпочтительные для расчётов выражения заключены в

рамку. Строки таблицы при движении сверху вниз фактически задают алгоритм контроля сопротивления изоляции.

Для определения эквивалентного сопротивления изоляции можно использовать либо постоянную ($I_{(YT)0}$), либо третью гармоническую ($c_{I_{(YT)3}}$) составляющую тока утечки, причём использование третьей гармонической составляющей предпочтительнее, так как позволяет:

- расширить диапазон измеряемых значений сопротивления;
- повысить надёжность устройства защиты за счёт упрощения средств гальванической развязки от защищаемой сети;
- повысить точность измерения при выборе равных по величине ограничительных сопротивлений.

Измерение амплитудного значения первой гармонической составляющей тока утечки ($c_{I_{(YT)1}}$), а также величины фазового сдвига (φ) между ней и опорным сигналом, в качестве которого может быть использована, например, э.д.с. фазы А, позволяет определить способ соединения обмоток повреждённого присоединения («треугольник» или «звезда»), саму повреждённую обмотку, а также удалённость места повреждения от места установки защиты.

Для нормального функционирования устройства защиты в сети должны быть исключены все прочие цепи утечки на землю, в том числе и в нейтрали первичной обмотки измерительного ТН. Это приведёт к выводу из работы традиционной неселективной защиты, функции которой будут возложены на вновь вводимое устройство. В то же время изменение схемы включения ТН уменьшает вероятность возникновения опасных феррорезонансных перенапряжений. Если заземление нейтрали ТН принципиально необходимо, оно может быть осуществлено по переменному току через конденсатор.

Третья глава посвящена исследованию процессов контроля состояния изоляции в условиях стационарных и переходных режимов работы защищаемой электрической сети. Предложена методика более точного измерения активного сопротивления изоляции, а также определения её распределённой ёмкости; осуществлено схемотехническое (компьютерное) и физическое моделирование процессов контроля. Показано, что использо-

Краткая сводка соотношений, используемых для определения параметров повреждения

Определяемый параметр	«звезда»			«треугольник»		
	обмотка А	обмотка В	обмотка С	обмотка АВ	обмотка ВС	обмотка СА
Эквивалентное активное сопротивление изоляции	$1) R_{ИЗ} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_m \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \frac{1}{I_{(VT)0}} \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - R_{III};$ $2) R_{ИЗ} = \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} U_m \frac{1}{c_{I_{(VT)3}}} \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} - R_{III}.$					
Фазовый сдвиг при соответствующей повреждённой обмотке	$\varphi = \pi$ (180°)	$\varphi = \frac{5\pi}{3}$ (300°)	$\varphi = \frac{\pi}{3}$ (60°)	$\varphi = \pi \div \frac{5\pi}{3}$ (180° ÷ 300°)	$\varphi = \frac{5\pi}{3} \div 2\pi,$ $\varphi = 0 \div \frac{\pi}{3};$ $\left(300^\circ \div 360^\circ, \right.$ $\left. 0^\circ \div 60^\circ \right)$	$\varphi = \frac{\pi}{3} \div \pi$ (60° ÷ 180°)
Коэффициент удалённости места повреждения	$1) \alpha = 1 - \frac{1}{U_m} \left(\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_{III} + R_{ИЗ} \right) c_{I_{(VT)1}};$ $2) \alpha = 1 - \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \frac{c_{I_{(VT)1}}}{I_{(VT)0}};$ $3) \alpha = 1 - \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \frac{c_{I_{(VT)1}}}{c_{I_{(VT)3}}}.$	$\alpha = \frac{3 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right)}{2}$	$\alpha = \frac{1}{2} - \frac{2\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right)}{1}$	$\alpha = \frac{\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right) + 1}{\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right) + 3}$	$\alpha = \frac{\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right) + 1}{\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right) + 3}$	$\alpha = \frac{\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right) + 1}{\sqrt{3} \operatorname{tg} \left(\Phi + \frac{\pi}{2} \right) + 3}$

вание метода не изменяет нормальных условий работы защищаемой электрической сети.

Переходные режимы при ОЗЗ в защищаемой электрической сети связаны с перераспределением зарядов ёмкостей повреждённой и неповреждённых фаз, поэтому исследование процессов контроля требует учёта ёмкости изоляции сети относительно земли.

Поскольку схема замещения цепи утечки для сети с активно-ёмкостным характером сопротивления изоляции по постоянной составляющей (рис. 3) совпадает со схемой замещения той же цепи для ранее рассмотренного случая (см. рис. 2), активное сопротивление изоляции относительно земли может быть рассчитано непосредственно по постоянной составляющей тока утечки (по верхней формуле таблицы).

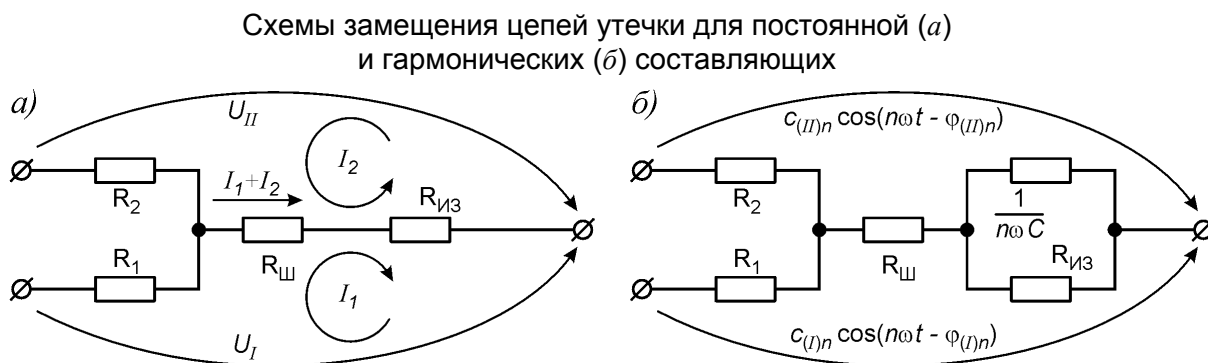


Рис. 3

Третья гармоники тока утечки (измеренная и представленная в комплексном виде парой значений: амплитудой и начальным фазовым сдвигом) в этом случае используется для определения эквивалентной ёмкости изоляции всей защищаемой сети:

$$C_{ИЗ} = j \cdot \frac{1}{3 \omega} \cdot \left(\frac{3 \sqrt{3} U_m (R_1 + R_2) +}{R_{ИЗ} (3 \sqrt{3} U_m (R_1 + R_2) +} \right. \quad (2)$$

$$\left. \frac{+ 8 \pi \dot{I}_{(YT)3} ((R_2 + R_{Ш} + R_{ИЗ})R_1 + (R_{Ш} + R_{ИЗ})R_2)}{+ 8 \pi \dot{I}_{(YT)3} ((R_2 + R_{Ш})R_1 + R_{Ш}R_2)} \right).$$

Первая гармоническая составляющая, как и ранее, может быть использована для определения параметров повреждения. Специфика рассматриваемого случая заключается в том, что значения граничных фазовых сдвигов, используемых для выявления повреждённой обмотки, должны

рассчитываться при определении места повреждения, тогда как в предыдущем случае они были известными (см. табл.) и неизменными.

Для определения повреждённого присоединения в условиях значительных ёмкостных токов замыкания на землю может быть рекомендован способ сравнения фаз токов нулевой последовательности присоединений, в том числе (если требуется) и в начальный момент времени переходного режима. В этом случае различие передаточных характеристик промышленных ТТНП не будет иметь существенного значения.

Ввиду сложности предлагаемого алгоритма работы в качестве аппаратной базы устройства контроля целесообразно использовать сигнальный процессор или промышленный компьютер. При этом удобно возложить функции определения коэффициентов Фурье непосредственно на управляющую программу с использованием методов численного интегрирования.

Для схемотехнического моделирования в исследованиях использован модуль PSpice A/D, входящий в состав EDA-системы OrCad 9.2.

Для физического моделирования процессов контроля разработана физическая модель сети с изолированной нейтралью. Модель выполнена по блочному принципу, благодаря чему имеется возможность изменения и расширения конфигурации исследуемой сети. Используемые в ячейках моделей сосредоточенные ёмкости, замещающие соответствующие распределённые ёмкости изоляции реальной сети, выбраны (рассчитаны) с учётом максимально допустимого ёмкостного тока замыкания на землю (30 А для сети 6 кВ).

Результаты схемотехнического и физического моделирования подтвердили данные о процессах в защищаемой сети при контроле состояния изоляции коммутационным методом, полученные путём теоретических исследований. Проверена возможность определения повреждённого присоединения по току нулевой последовательности. Длительность переходных процессов в цепи шунта не превышает 0,02 с, что учтено при разработке алгоритмов контроля.

Четвёртая глава посвящена разработке и исследованию опытного образца микроэлектронного устройства контроля изоляции. Здесь же предложена структура АСУ, в состав которой должно входить разрабатываемое

устройство, рассмотрены средства внутрисистемной связи АСУ и окончательно сформулированы требования к аппаратному и программному обеспечению устройства защиты.

Разрабатываемое устройство занимает второй (уровень программируемых логических контроллеров) и первый (уровень устройств связи с объектом) уровни архитектуры АСУ. Ввиду необходимости контроля и сравнения большого количества сигналов в приближенном к реальному режиму времени, выбран централизованный вариант исполнения системы на основе промышленного компьютера.

Опытный образец устройства выполнен на базе обычного персонального компьютера. В качестве устройства аналогового ввода используется система сбора данных L-761 отечественной фирмы L-Card, выполненная в виде внутренней платы на PCI-шину компьютера. В качестве операционной системы выбрана ОС Windows 2000 (рекомендуется использование расширений реального времени). Для быстрой разработки, модификации и экспериментальной проверки алгоритмов работы устройства использована система численной математики MatLab 6.0, позволяющая достаточно легко осуществлять необходимый вид обработки экспериментально полученных данных. При этом решена задача обращения к функциям сбора данных платы L-761 непосредственно из среды системы MatLab в режиме времени, максимально приближенном к реальному.

Проведены всесторонние испытания устройства контроля в лабораторных условиях на разработанной физической модели сети с изолированной нейтралью, которые включали в себя проверку работы устройства:

- при исправной изоляции сети ;
- при глухих замыканиях на землю выводов фазы С «звезды» модели сети;
- при глухих замыканиях на землю отводов обмотки ВС «треугольника» модели сети;
- при замыканиях на землю тех же отводов через переходное сопротивление 10 кОм.

Результаты испытаний подтвердили правильность разработанной методики контроля и позволили выбрать оптимальные алгоритмы функционирования устройства контроля.

Опытный образец устройства испытан в электрических сетях Вологодской ТЭЦ и принят в опытную эксплуатацию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Осуществлена разработка новой защиты сетей с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю на основе промышленного компьютера, обладающей улучшенными технико-экономическими характеристиками и предназначенной для работы как в составе АСУ ТП электроэнергетического объекта, так и автономно. Во вновь разработанной системе защиты реализована новая концепция построения защит, включающая в себя не только традиционное отключение элемента по факту его повреждения, но и предупреждение аварийных ситуаций на основе функций прогнозирования.

2. Предложены, исследованы и реализованы новые методы непрерывного контроля активного сопротивления и ёмкости изоляции электрической сети 6-10 кВ, позволяющие прогнозировать развивающиеся однофазные замыкания на землю; а также методы определения места внезапного повреждения изоляции при работающем оборудовании с нахождением повреждённого присоединения, идентификацией способа соединения обмоток повреждённого оборудования, выявлением повреждённой фазы (обмотки) и оценкой расположения точки повреждения внутри неё. На основе предложенных алгоритмов разработано действующее программное обеспечение системы защиты.

3. Решена проблема сопряжения микроэлектронных устройств защиты с защищаемыми объектами и АСУ. Определено место разрабатываемой системы защиты в составе АСУ ТП ТЭЦ. Сформулированы требования к аппаратному и программному обеспечению системы.

4. Исследованы частотные характеристики промышленных и лабораторных первичных преобразователей сигналов. Показано, что промышленные трансформаторы тока нулевой последовательности не обеспечивают требуемой точности преобразования тока нулевой последовательности промышленной частоты. Их применение совместно с современными мик-

ропроцессорными устройствами возможно только при соответствующем учёте вносимых амплитудных и фазовых искажений.

5. На основании методов спектрального оценивания дана характеристика используемых для целей релейной защиты сигналов и установлены требования к рабочему частотному диапазону устройств защиты. Создана и использована в исследованиях база данных зарегистрированных сигналов с трансформаторов тока нулевой последовательности ТЭЦ при однофазных замыканиях на землю.

6. Создан и всесторонне исследован на физической модели сети, а также в условиях действующей реальной электрической сети опытный образец системы контроля изоляции и защиты сетей с номинальным напряжением 10 кВ от однофазных замыканий на землю. Проведённые испытания подтвердили основные теоретические положения диссертации и правомерность принятых допущений, предложенных рекомендаций и выводов.

7. Результаты исследований использованы при выполнении хозяйственных научно-исследовательских работ ОАО «Вологдаэнерго»: «Разработка методов и технических средств контроля изоляции и защиты по упреждающему принципу сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью, присоединённых к сборным шинам Вологодской ТЭЦ» и «Совершенствование методов расчёта параметров электрических сетей Вологдаэнерго на основе базы данных по технологическим нарушениям, зафиксированным цифровыми регистраторами аварийных процессов».

8. Материалы теоретических, методических и практических разработок нашли применение в учебном процессе Вологодского государственного технического университета и учебного центра ОАО «Вологдаэнерго».

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Наволочный А.А. Анализ метода контроля изоляции высоковольтных электродвигателей / А.А. Наволочный // Научно-техническая конференция «Молодёжь и наука – в XXI век»: Тезисы докладов. – Вологда: ВоПИ, 1998. – С. 5-6.

2. Наволочный А.А. Совершенствование противоаварийной автоматики блоков электродвигатель–трансформатор / А.А. Наволочный // Перспективные технологии автоматизации: Тезисы докладов международной электронной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 1999. – С. 92-93.
3. Булычев А.В. Упреждающее оценивание теплового старения изоляции электрических машин / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, И.В. Черепанов // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: Материалы II Международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С. 193-195.
4. Булычев А.В. Повышение эффективности средств защиты от внутренних повреждений асинхронных электродвигателей / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, И.В. Черепанов // Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы межвузовской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С. 72-73.
5. Булычев А.В. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю на основе коммутационного метода / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, И.В. Черепанов // Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии: Материалы межвузовской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С. 78-79.
6. Булычев А.В. Защита разветвлённых электрических сетей с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю / А.В. Булычев, В.А. Гуляев, А.А. Наволочный // Современные проблемы информатизации в непромышленной сфере и экономике: Труды V международной электронной научной конференции. – Воронеж: ЦЧКИ, 2000. – С. 114-115.
7. Наволочный А.А. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю в сети 6-10 кВ с изолированной нейтралью / А.А. Наволочный // Сборник научных статей аспирантов ВоГТУ. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С. 6-9.
8. Булычев А.В. Система контроля изоляции КИЗ–2000 для сетей, присоединённых к сборным шинам вологодской ТЭЦ / А.В. Булычев, В.А. Гуляев, А.А. Наволочный, Н.Д. Поздеев // Вузовская наука – региону:

- Материалы второй региональной межвузовской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2001. – С. 54-56.
9. Булычев А.В. Использование современных компьютерных технологий при разработке устройств релейной защиты / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Н.Д. Поздеев // Вузовская наука – региону: Материалы III региональной межвузовской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – С. 104-105.
 10. Булычев А.В. Фильтрация измерительных сигналов релейной защиты на базе разложения в ряд Фурье / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Н.Д. Поздеев // Вузовская наука – региону: Материалы III региональной межвузовской научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – С. 106-107.
 11. Булычев А.В. Защита электрической сети с изолированной нейтралью от однофазных замыканий на землю по упреждающему принципу / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Н.Д. Поздеев // Релейная защита и автоматика энергосистем 2002: Сборник докладов XV научно-технической конференции. – М.: СРЗА ЦДУ ЕЭС России, 2002. – С. 206-208.
 12. Булычев А.В. Особенности построения систем контроля изоляции и защиты / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Н.Д. Поздеев // Электроснабжение. Новые технологии: Доклады межвузовской электронной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – С. 15-17.
 13. Булычев А.В. Особенности коммутационного метода контроля состояния изоляции сетей с изолированной нейтралью / А.В. Булычев, А.А. Наволочный, Н.Д. Поздеев // Электроснабжение. Новые технологии: Доклады межвузовской электронной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2002. – С. 19-21.

ЛР № 020717 от 02.02.1998

Подписано в печать 15.08.2002
Печать офсетная. Бумага офисная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ .

Отпечатано РИО ВоГТУ, г. Вологда, ул. Ленина, 15