

На правах рукописи



Осинцев Анатолий Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА**

Специальность 05.14.02 –
Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Глазырин Владимир Евлампиевич

Официальные оппоненты: Манусов Вадим Зиновьевич
доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный
технический университет, кафедра
СЭСИ, профессор

Вайнштейн Роберт Александрович,
доктор технических наук, доцент,
Национальный исследовательский
Томский Политехнический
университет, кафедра ЭЭС, доцент

Ведущая организация: Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Защита состоится: «20» июня 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «15» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимофеев Иван Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Генератор – сложный и дорогостоящий объект энергосистемы, осуществляющий выработку электроэнергии, который наиболее подвержен различным повреждениям. Внутренние междуфазные короткие замыкания (КЗ) способны привести к значительным разрушениям элементов машины, таким как статорная обмотка, активная сталь статора, пазовые клинья. Кроме того, КЗ в генераторе создает угрозу устойчивости энергосистемы, поэтому на синхронных генераторах должна устанавливаться быстродействующая защита, способная отключать внутренние КЗ без выдержки времени.

Основной защитой генератора от внутренних междуфазных КЗ является продольная дифференциальная токовая защита (ДЗ). Современные микропроцессорные ДЗ надежно не срабатывают при внешних повреждениях в случае точного преобразования первичных сигналов трансформаторами тока (ТТ). Однако при насыщениях ТТ под действием высоких уровней токов КЗ с большим содержанием апериодической составляющей тока и большой постоянной времени первичной сети возможна ложная работа этих защит в сквозных режимах, а также возможна задержка в срабатывании при внутренних повреждениях. Немаловажным фактором, негативно влияющим на устойчивость несрабатывания защит при внешних КЗ, является различие в характере протекания переходных процессов во вторичных цепях ТТ, установленных по концам защищаемого объекта, что может быть обусловлено использованием разнотипных ТТ, различием по величине вторичной нагрузки, а также различием схем соединений ТТ. Стоит отметить, что в зависимости от принципа построения, способа формирования тормозного сигнала и тормозной характеристики (или характеристики срабатывания), использования дополнительных мер в алгоритмах защиты нарушение устойчивости их функционирования проявляется различным образом.

Подтверждением недостатков ДЗ могли бы являться реальные осциллограммы повреждений, в которых зафиксирована их некорректная работа. Однако реальные осциллограммы вторичных токов ТТ, подверженных насыщению, практически отсутствуют по причине малой вероятности экстремальных переходных процессов, а также по причине отсутствия достаточного количества достоверной информации от регистраторов аварийных событий на электрических станциях. Проведение натурных испытаний на генераторе затруднительно из-за вероятности повреждения защищаемого объекта во время проведения экспериментов и из-за необходимости проведения большого числа опытов для получения достоверной информации. Полноценное аналитическое исследование поведения дифференциальных защит в переходных режимах затруднительно из-за сложности взаимодействия ТТ в группах, поэтому для анализа ДЗ необходимо использовать методы математического моделирования, позволяющие имитировать аварийные режимы в первичной сети и работу ТТ, собранных в группы.

В связи с этим актуальной является разработка методов и средств оценки устойчивости функционирования дифференциальной защиты, необходимой как

при выборе типа используемой защиты и расчёте её уставок, так и при реконструкции вторичных цепей или замене ТТ. К этой задаче можно отнести и оценку эффекта от использования дополнительных мер отстройки от переходного тока небаланса, например, при установке добавочного сопротивления в дифференциальную цепь.

Из-за наличия указанных недостатков существующих защит актуальной является разработка алгоритма дифференциальной защиты генератора, превосходящего по основным показателям устойчивости функционирования (селективность, быстрдействие и чувствительность) устройства, выпускаемые серийно.

Не менее важно отметить, что в виду большого многообразия в настоящее время продольных дифференциальных защит, актуальной является разработка методов и средств, позволяющих осуществить выбор наиболее подходящего устройства защиты для конкретного генератора, исходя из оценки уровня чувствительности к внутренним повреждениям, устойчивости несрабатывания при сквозных аварийных режимах и быстрдействия при внутренних КЗ.

Цель работы. Целью диссертационного исследования является разработка методов и средств количественной оценки устойчивости функционирования продольных дифференциальных защит генератора, а также выявление наиболее устойчивых признаков внешнего и внутреннего КЗ и их применение при совершенствовании алгоритма функционирования дифференциальной защиты.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- произведён анализ способов отстройки от тока небаланса в переходном режиме, используемых в алгоритмах дифференциальных защит;
- разработан программный комплекс для проведения исследований, включающий в себя математические модели первичного оборудования и ТТ с учётом их взаимодействия друг с другом в группах «звезда» и «двойная звезда»;
- разработаны средства, позволяющие преобразовывать выходные сигналы ТТ, полученные путем математического моделирования, в аналоговые сигналы, подаваемые непосредственно на входы устройства релейной защиты;
- разработана методика анализа устойчивости функционирования защит, использующая созданный программный комплекс имитационного моделирования переходных процессов в ТТ;
- проведены вычислительные и физические исследования устойчивости функционирования дифференциальных защит в различных аварийных режимах;
- разработана методика оценки чувствительности дифференциальных защит к внутренним повреждениям при наличии сквозного тока нагрузки;
- разработана методика оценки дифференциальных защит генератора по устойчивости несрабатывания при сквозных аварийных режимах и быстрдействию при внутренних КЗ;
- определены фиксируемые алгоритмом защиты наиболее информативные параметры, характерные только режимам внешнего или внутреннего КЗ;
- разработан новый, более совершенный алгоритм функционирования дифференциальной защиты генератора, оценена его эффективность и возможность технической реализации.

Методы исследования. Разработанные в диссертации научные положения основываются на применении теоретических и экспериментальных методов исследования в этой области и используют системный подход к проблеме. Решение поставленных в работе задач базируется на выводах фундаментальных и прикладных наук, таких как математический анализ, теоретические основы электротехники, теория имитационного моделирования, цифровая обработка сигналов, аналитические методы исследования продольных дифференциальных защит, теория планирования эксперимента, теория распознавания образов.

Достоверность и обоснованность основных научных положений и выводов работы подтверждается теоретическими обоснованиями, совпадением характера протекания переходных процессов в цепях ТТ, полученных при моделировании, с осциллограммами натуральных экспериментов, апробацией результатов работы на конференциях и семинарах, а также положительным опытом их внедрения в процесс проектирования ЗАО «Е4-СибКОТЭС».

Научная новизна диссертационной работы:

1. Произведён анализ и классификация способов отстройки от установившихся и переходных токов небаланса, используемых в алгоритмах дифференциальных защит генератора.

2. Разработаны математические модели групп ТТ «двойная звезда» и групп ТТ «звезда», работающих на общую нагрузку, с учётом реальной усреднённой характеристики намагничивания их сердечников.

3. Предложена методика анализа чувствительности дифференциальных защит генератора к внутренним КЗ при наличии сквозного тока нагрузки, основанная на преобразовании тормозных характеристик в характеристики срабатывания.

4. Предложена методика выбора конкретного устройства дифференциальной защиты генератора, исходя из обеспечения чувствительности к внутренним КЗ при наличии сквозного тока нагрузки.

5. Предложена методика анализа устойчивости функционирования дифференциальных защит при внешних КЗ, позволяющая оценить эффективность использования в них дополнительных мер отстройки от токов небаланса.

6. Предложена методика выбора конкретного устройства дифференциальной защиты генератора, исходя из оценки устойчивости несрабатывания при сквозных режимах и быстродайствия при внутренних КЗ.

7. Определены и предложены решения по реализации новых отличительных признаков аварийных режимов защищаемого объекта.

8. Разработан алгоритм функционирования дифференциальной защиты генератора, основанный на структурных методах теории распознавания образов и обеспечивающий более устойчивую идентификацию аварийных режимов.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. Разработан программный комплекс имитационного моделирования переходных процессов в цепях дифференциальной защиты генератора, в который интегрированы математические модели первичного оборудования и ТТ, собранных в группы, а также модуль сохранения осциллограмм вторичных токов ТТ в формат COMTRADE, необходимый для сопряжения данного комплекса с испытательными установками релейной защиты.

2. Разработанные программные средства могут быть использованы в проектных институтах, научно-исследовательских центрах, вузах и других организациях для решения задач анализа функционирования дифференциальных защит при заданной конфигурации защищаемого оборудования, а также для анализа эффективности работы защиты при выбранных уставках.

3. Разработанные методы и средства могут быть использованы проектными организациями при выборе наиболее полно отвечающей требованиям устойчивости функционирования дифференциальной защиты для заданного сочетания генератора и установленных на нём ТТ.

4. Предложенный алгоритм дифференциальной защиты генератора обладает лучшим сочетанием показателей устойчивости функционирования по сравнению с алгоритмами выпускаемых защит. Это обуславливает целесообразность его использования при реализации комплекса устройств релейной защиты синхронных генераторов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели групп ТТ «двойная звезда» и групп ТТ «звезда», работающих на общую нагрузку.

2. Методика оценки чувствительности дифференциальных защит генератора к внутренним повреждениям при наличии сквозного тока нагрузки.

3. Методика анализа устойчивости функционирования дифференциальных защит генератора при внешних и внутренних КЗ.

4. Методика выбора рекомендуемого к использованию устройства дифференциальной защиты генератора, исходя из оценки его устойчивости несрабатывания при сквозных аварийных режимах, чувствительности и быстродействия при внутренних КЗ.

5. Структурная схема и принцип действия разработанного алгоритма дифференциальной защиты генератора.

6. Сопоставление полученных в результате расчетов показателей устойчивости функционирования для разработанной защиты и для моделей некоторых серийно выпускаемых устройств.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электрических станций Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), на всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» в 2009, 2010 и 2012 гг. в г. Новосибирске, на международной молодёжной научно-технической конференции «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах» (г.Новосибирск, 2011 г.), на днях науки НГТУ в 2009, 2010 и 2012 гг., на международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в 2010 г.

Личный вклад. Автором совместно с научным руководителем определены принципы построения математических моделей ТТ, сформулированы минимальные требования к разработанному программному комплексу моделирования переходных процессов, предложен подход к оценке чувствительности защит при наличии сквозных токов нагрузки, предложен подход к построению

более совершенного алгоритма защиты. Самостоятельно разработаны математические модели первичного оборудования, модель группы ТТ «двойная звезда», модель групп ТТ «звезда», работающих на общую нагрузку, критерий ограничения области исследования защит и метод оценки их несрабатывания при внешних КЗ, подход к выбору используемого устройства дифференциальной защиты генератора, основанный на оценке быстродействия при внутренних КЗ, разработан и реализован новый алгоритм функционирования дифференциальной защиты, выполнены вычислительные и физические эксперименты как на разработанной защите, так и на серийно-выпускаемых устройствах.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 1 статья в сборнике научных трудов, 7 работ, опубликованных в сборниках международных и всероссийских конференций, 1 тезисы доклада.

Объем и структура работы.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Основное содержание диссертации изложено на 182 страницах, содержит 40 рисунков и 14 таблиц. Список использованных источников содержит 104 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, очерчен круг вопросов, затрагиваемых в диссертации.

В первой главе рассмотрены основные особенности ДЗ. Основное внимание уделяется наиболее распространенным защитам, выполненным по схеме с циркулирующими токами. Подчеркнуты достоинства и недостатки используемых принципов построения ДЗ, выполненных по такой схеме. Так, дифференциальный принцип подразумевает сравнение дифференциального тока с постоянной величиной, но в явном виде не нашел применения из-за невозможности одновременного выполнения требований по чувствительности и селективности. При использовании в защитах дифференциального с торможением принципа действия (ДЗТ) уставка их срабатывания зависит от величины тормозного сигнала. Использование данного принципа обеспечивает достаточный уровень торможения при внешних КЗ со снижением этого уровня при внутренних. К недостаткам рассматриваемого принципа можно отнести снижение тормозного сигнала при насыщении ТТ в режиме внешнего КЗ, то есть тогда, когда резко увеличивается ток небаланса. При построении ДЗ может быть использован и дифференциально-фазный принцип (ДФЗ), применение которого обеспечивает наибольший уровень чувствительности к внутренним КЗ, а также более высокий уровень отстроенности от внешних КЗ в случаях, когда происходит насыщение ТТ. Малая чувствительность к внутренним КЗ при наличии сквозного нагрузочного тока является основным недостатком ДФЗ. Необходимо от-

метить, что надежно отстроиться от токов небаланса, обусловленных насыщениями ТТ в режиме внешнего КЗ, не позволяет ни один из предложенных принципов, так как различие по величине между переходным током небаланса и током, возникающим в режиме внутреннего КЗ, практически отсутствует. Поэтому для обеспечения правильной работы ДЗ в таких режимах производители используют дополнительные признаки переходного тока небаланса, позволяющие однозначно идентифицировать внешнее КЗ. Одним из наиболее распространённых признаков переходного тока небаланса является его однополярность. Однако этот признак не всегда достаточно устойчив и в некоторых случаях может проявляться при внутренних КЗ, приводя к значительным задержкам в срабатывании. Большое содержание второй гармоники в токе небаланса, которое также широко используется для отстройки от внешних КЗ, является следствием его однополярности, поэтому данному признаку характерны те же недостатки, что и для предыдущего. В некоторых алгоритмах ДЗ при идентификации режимов учитывается качественный характер изменения токов при насыщении ТТ – внешнее КЗ фиксируется при более позднем появлении дифференциального тока по сравнению с тормозным. Основным недостатком данного признака считается снижение интенсивности его проявления уже во время второго и последующих насыщений ТТ. Все вышеописанные признаки переходного тока небаланса обладают как достоинствами, так и недостатками, не обеспечивая по отдельности достаточный уровень устойчивости несрабатывания ДЗ в таких режимах на всём интервале времени существования КЗ. Поэтому поиск путей повышения устойчивости функционирования ДЗ в переходном режиме остаётся актуальным. Первый путь – это замена традиционных ТТ на преобразователи тока, не подверженные насыщению – не нашел широкого применения из-за необходимости в таком случае реконструкции схем не только устройств релейной защиты, но первичного оборудования. Второй путь – комплексное применение дополнительных мер отстройки от токов небаланса – является наиболее целесообразным. Для поиска необходимого сочетания признаков внешнего КЗ, обеспечивающих достаточную устойчивость функционирования ДЗ, и анализа эффективности уже применяемых в современных устройствах способов дополнительной отстройки от переходных токов небаланса необходимо проведение исследований поведения ДЗ в различных переходных режимах, что наиболее целесообразно на математических моделях исследуемых объектов с использованием ЭВМ.

Во второй главе представлены результаты разработки программного комплекса имитационного моделирования переходных процессов в цепях ДЗ. В первую очередь, определены виды имитируемых аварийных режимов работы генератора, которые в большей степени влияют на устойчивость функционирования ДЗ. Это режимы внешних и внутренних междуфазных КЗ, а также режимы ошибочной синхронизации. Для принятых аварийных режимов определён перечень математических моделей, необходимый для имитации поступающих в защиту токов, а именно модели генератора, системы и ТТ, установленных по концам защищаемого объекта. Стоит отметить, что при анализе поведения дифференциальной защиты наиболее существенным является процесс насыще-

ния ТТ, характер которого зависит от величины и времени существования свободной апериодической составляющей тока, а также от характера изменения вынужденной составляющей тока в режиме КЗ. Поэтому при моделировании генератора и системы использовались упрощенные уравнения расчета фазных токов. В таком случае, ток поврежденной фазы в общем виде описывается выражением $i(t) = I_{m\Sigma} \cdot \sin(\omega t + \alpha) + I_{a(0)} \cdot e^{-t/T_a}$, где $I_{m\Sigma}$ – амплитуда суммы периодических слагающих тока КЗ, $I_{a(0)}$ – начальное значение апериодической составляющей, T_a – постоянная времени первичной сети. При моделировании генератора учитывалось также изменение во времени и периодической составляющей тока поврежденной фазы, поскольку в сочетании со значительным уровнем апериодической составляющей тока КЗ это изменение может привести к появлению задержки перехода тока фазы через ноль, что существенно ухудшает трансформацию тока во вторичную обмотку ТТ.

В режиме ошибочной синхронизации, то есть при включении возбужденного генератора в сеть с большим рассогласованием по углу между ЭДС генератора и напряжением системы, возникает переходной процесс, сопровождаемый протеканием уравнительных токов. Моделирование периодических составляющих первичных токов в таком режиме осуществлялось по выражению

$$i_{yp}(t) = \frac{\Delta e}{x_d + x_c} = \frac{2E}{x_d + x_c} \sin \frac{\delta(t)}{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha),$$

где α – угол напряжения генератора в момент включения в сеть, $\delta(t)$ – угол между ЭДС генератора и напряжением системы. Апериодическая составляющая аварийного тока в начальный момент времени равна по величине и противоположна по знаку мгновенному значению его периодической составляющей.

Взаимодействие ТТ, собранных в группы, существенно усложняет условия работы ДЗ и может приводить к её непредсказуемому поведению. Именно поэтому оно должно учитываться при моделировании ТТ. Вторичные обмотки ТТ, используемые в схеме ДЗ, совместно с последовательно подключенной нагрузкой, как правило, соединяются в «звезду». Однако на мощных генераторах со стороны нулевых выводов при расщепленной обмотке статора и установке ТТ в каждую ветвь используется иная схема их соединения – «двойная звезда». Таким образом, моделирование переходных процессов в группах ТТ «звезда» и «двойная звезда» является одной из наиболее важных задач, решение которой необходимо для оценки устойчивости функционирования ДЗ мощных генераторов.

Модель группы ТТ «звезда», описывающая её особенности функционирования с достаточной для анализа точностью, была разработана ранее. На основе принципов, используемых при формировании этой модели, разработана математическая модель группы ТТ «двойная звезда» с учетом следующих допущений: ТТ представлены в виде Г-образных схем замещения, учитывается реальная усредненная нелинейная характеристика намагничивания сердечника, не учитывается влияние частных гистерезисных циклов и активных потерь на перемагничивание. Процессы в группе ТТ «двойная звезда» описываются сис-

темой нелинейных дифференциальных уравнений (1), которой соответствует схема замещения, приведенная на рисунке 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{ji}}{dt} = L_{Tji} \frac{di_{2ji}}{dt} + R_{Tji} \cdot i_{2ji} + L_{Hj} \sum_i \frac{di_{2ji}}{dt} + \\ \quad + R_{Hj} \sum_i i_{2ji} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{2ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji}; \\ i_{1ji} = i_{\mu ji} + i_{2ji}; \\ L_{\mu ji} = \frac{d\Psi_{ji}}{di_{\mu ji}}; \end{array} \right. \quad (1)$$

где Ψ_{ji} – потокосцепление ТТ; i_{1ji} , i_{2ji} – приведенный первичный и вторичный токи ТТ; R_{Tji} , L_{Tji} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТ; $L_{\mu ji}$ – элемент нелинейности характеристики намагничивания ТТ; R_{Hj} , L_{Hj} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния нагрузки фазы; R_0 , L_0 – активное сопротивление и индуктивность рассеяния в нулевом проводе; $i=1, 2$ – номер ветви фазы; $j=A, B, C$.

Первое уравнение системы (1) можно записать в матричном виде $S' = N$, где $S_{ji} = \Psi_{ji} + L_{Tji} \cdot i_{\mu ji} + L_{Hj} \sum_i i_{\mu ji} + L_0 \sum_{j,i} i_{\mu ji}$ – вспомогательная переменная,

$$N = \begin{bmatrix} L_{TA1} \frac{di_{1A1}}{dt} + R_{TA1} \cdot i_{2A1} + L_{HA} \sum_i \frac{di_{1Ai}}{dt} + R_{HA} \sum_i i_{2Ai} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{1ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji} \\ L_{TA2} \frac{di_{1A2}}{dt} + R_{TA2} \cdot i_{2A2} + L_{HA} \sum_i \frac{di_{1Ai}}{dt} + R_{HA} \sum_i i_{2Ai} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{1ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji} \\ L_{TB1} \frac{di_{1B1}}{dt} + R_{TB1} \cdot i_{2B1} + L_{HB} \sum_i \frac{di_{1Bi}}{dt} + R_{HB} \sum_i i_{2Bi} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{1ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji} \\ L_{TB2} \frac{di_{1B2}}{dt} + R_{TB2} \cdot i_{2B2} + L_{HB} \sum_i \frac{di_{1Bi}}{dt} + R_{HB} \sum_i i_{2Bi} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{1ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji} \\ L_{TC1} \frac{di_{1C1}}{dt} + R_{TC1} \cdot i_{2C1} + L_{HC} \sum_i \frac{di_{1Ci}}{dt} + R_{HC} \sum_i i_{2Ci} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{1ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji} \\ L_{TC2} \frac{di_{1C2}}{dt} + R_{TC2} \cdot i_{2C2} + L_{HC} \sum_i \frac{di_{1Ci}}{dt} + R_{HC} \sum_i i_{2Ci} + L_0 \sum_{j,i} \frac{di_{1ji}}{dt} + R_0 \sum_{j,i} i_{2ji} \end{bmatrix}.$$

Первое уравнение системы (1) с учетом его второго уравнения также можно представить в матричном виде: $M \cdot I'_{\mu} = N$, где

$$M = \begin{bmatrix} L_{\Sigma A1} & L_{HA} + L_0 & L_0 & L_0 & L_0 & L_0 \\ L_{HA} + L_0 & L_{\Sigma A2} & L_0 & L_0 & L_0 & L_0 \\ L_0 & L_0 & L_{\Sigma B1} & L_{HB} + L_0 & L_0 & L_0 \\ L_0 & L_0 & L_{HB} + L_0 & L_{\Sigma B2} & L_0 & L_0 \\ L_0 & L_0 & L_0 & L_0 & L_{\Sigma C1} & L_{HC} + L_0 \\ L_0 & L_0 & L_0 & L_0 & L_{HC} + L_0 & L_{\Sigma C2} \end{bmatrix};$$

$$L_{\Sigma ji} = L_{\mu ji} + L_{Tji} + L_{Hj} + L_0.$$

Его решением является выражение $I'_{\mu} = M^{-1} \cdot N$, которое представляет собой систему дифференциальных уравнений относительно производных от токов намагничивания ТТ по времени. Матрица M содержит нелинейные элементы $L_{\mu ji}$, отражающие нелинейность характеристик намагничивания сердечников ТТ. Значение каждого такого элемента определяется следующим образом: в точке характеристики намагничивания сердечника ТТ, соответствующей текущему значению Ψ_{ji} , методами численного дифференцирования определяется значение его производной по току намагничивания, которое и является текущим значением $L_{\mu ji}$. Таким образом, полная система уравнений для группы ТТ «двойная звезда» имеет следующий вид

$$\begin{cases} I'_{\mu} = M^{-1} \cdot N \\ S' = N \\ L_{\mu ji} = f(\Psi_{ji}) \end{cases}$$

и является её математической моделью. Поскольку эта система представлена в явной форме Коши, то она пригодна к непосредственному решению средствами пакета MATLAB.

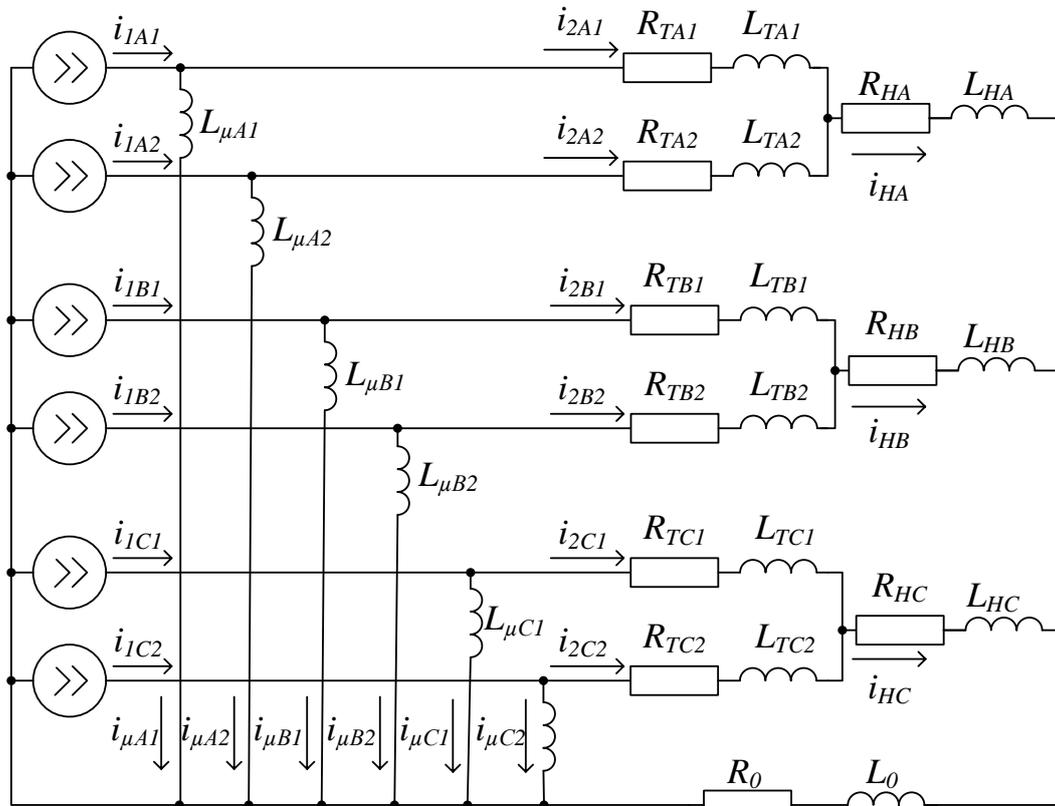


Рис.1. Схема замещения группы ТТ «двойная звезда»

Для отстройки от токов небаланса в некоторых случаях используется включение дополнительного активного сопротивления в дифференциальную цепь. Для исследования поведения ТТ в такой схеме и определения эффекта от

использования этой меры разработана модель взаимодействия групп ТТ «звезда», работающих на общую нагрузку. Полученные математические модели позволяют рассчитывать вторичные токи ТТ при известных первичных токах и значениях остаточных индукций в их сердечниках.

Следующим этапом разработки программного комплекса являлась имитация функционирования микропроцессорных ДЗ. При создании математических моделей исследуемых защит принят ряд допущений, обусловленных наличием коммерческой тайны заводов-изготовителей на часть решений, используемых в алгоритмах: для выделения основной гармоники токов плеч применяется единый для всех защит метод цифровой фильтрации; моделируются лишь те особенности алгоритмов защит, которые указаны в их технической документации; при отсутствии числовых значений используемых в алгоритмах параметров, их величина принимается исходя из физической интерпретации.

При наличии доступа к реальным устройствам ДЗ обеспечена возможность проведения физико-математического эксперимента. Для этого разработан программный модуль, обеспечивающий сохранение рассчитанных вторичных токов в формате COMTRADE. Тогда процесс исследования реального устройства с функцией ДЗ можно разделить на следующие этапы: расчет и сохранение в заданном формате вторичных токов ТТ исследуемой схемы, полученных путем моделирования; подача реальных аналоговых сигналов на входы исследуемого устройства при помощи испытательной установки РЕТОМ-51(61), позволяющей воспроизводить сигналы произвольной формы, сохраненные в формате COMTRADE; фиксация срабатывания выходного реле устройства.

Для наиболее эффективного исследования переходных процессов в цепях ДЗ сформирован специальный интерактивный инструментарий разработанного программного комплекса, позволяющий пользователю с достаточной простотой и наглядностью вводить необходимые для эксперимента параметры, а также получать результаты вычислений в удобном для него виде.

В третьей главе описываются предлагаемые методики анализа и сравнения дифференциальных защит генератора по основным характеристикам эффективности функционирования, а именно: чувствительности и быстродействию при внутренних КЗ и устойчивости несрабатывания при внешних КЗ.

Рассмотрим методику оценки чувствительности ДЗ к внутренним КЗ. Для современных ДЗ уставка начального тока срабатывания достигла таких малых значений, что их коэффициент чувствительности, определяемый согласно требованиям ПУЭ, значительно превышает нормированную величину, равную 2. Это обуславливается тем, что в расчетном режиме ток КЗ значительно превышает начальный ток срабатывания защиты, а тормозной сигнал при этом минимален, так как током обтекаются ТТ только со стороны нулевых выводов. Таким образом, сравнение защит по полученным в этом режиме коэффициентам не является корректным. Предлагается проводить оценку чувствительности ДЗ при токах внутреннего повреждения, соизмеримых с начальным током срабатывания защиты, и наличии тока нагрузки, вырабатываемого генератором. Тогда через линейные выводы генератора будет протекать сквозной ток нагрузки

$I_{СКВ}$, а через нулевые – сумма тока нагрузки и тока повреждения $I_{СКВ} + I_{КЗ}$. С точки зрения чувствительности, наиболее тяжелым является режим совпадения по углу тока повреждения с током нагрузки. В таком случае модуль дифференциального тока не изменится, а величина тормозного тока будет максимальной, то есть максимальным будет и ток срабатывания. Для оценки влияния таких режимов на работу ДЗ предлагается использовать характеристики срабатывания, отражающие зависимость тока срабатывания от сквозного тока нагрузки – $I_{СЗ} = f(I_{СКВ})$, которые могут быть получены путем преобразования тормозных характеристик алгоритмов ДЗ, где $I_{СЗ} = f(I_T)$.

Основные этапы формирования характеристик срабатывания рассмотрим на примере ДЗ генератора НПП «ЭКРА». Тормозная характеристика рассматриваемой защиты имеет излом при токе начала торможения $I_{НТ}$, следовательно и характеристика срабатывания также будет иметь излом с координатами:

$$I_{СЗ_{изл}} = I_{СЗ0},$$

$$I_{T_{изл}} = I_{НТ} = \sqrt{I_1 \cdot I_2} = \sqrt{(I_{СЗ_{изл}} + I_{СКВ_{изл}}) \cdot I_{СКВ_{изл}}}, \text{ или}$$

$$I_{СКВ_{изл}}^2 + I_{СЗ0} \cdot I_{СКВ_{изл}} - I_{НТ}^2 = 0.$$

Искомым решением является положительный корень квадратного уравнения относительно $I_{СКВ_{изл}}$:

$$I_{СКВ_{изл}} = \frac{\sqrt{I_{СЗ0}^2 + 4I_{НТ}^2} - I_{СЗ0}}{2}.$$

Определим зависимость тока срабатывания ДЗ от сквозного тока нагрузки после $I_{СКВ_{изл}}$ (до $I_{СКВ_{изл}}$ уставку срабатывания равна $I_{СЗ0}$):

$$I_{СЗ} = I_{СЗ0} + k_T(I_T - I_{НТ}) = I_{СЗ0} + k_T(\sqrt{(I_{СЗ} + I_{СКВ}) \cdot I_{СКВ}} - I_{НТ});$$

$$I_{СЗ} = \frac{k_T^2 \cdot I_{СКВ}}{2} \left[1 + \frac{2}{k_T \cdot I_{СКВ}} \left(\frac{I_{СЗ0}}{k_T} - I_{НТ} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{k_T} \right)^2 + \frac{4}{k_T \cdot I_{СКВ}} \left(\frac{I_{СЗ0}}{k_T} - I_{НТ} \right)} \right].$$

Вторая точка излома тормозной характеристики рассматриваемой защиты (параметр B) выбирается из условия отстройки от максимального рабочего тока генератора, поэтому при формировании характеристики срабатывания она не учитывается. Далее, для построения характеристики срабатывания ДЗ предварительно в соответствии рекомендациями производителя устройства необходимо рассчитать все требуемые уставки. На сформированной характеристике по изменению сквозного тока нетрудно оценить изменение уставки срабатывания защиты, то есть минимального тока внутреннего КЗ генератора, при котором алгоритм ДЗ выдаст сигнал на отключение. Как правило, уставка $I_{СЗ}$ значительно увеличивается по сравнению со своим начальным значением при до-

пустимых кратковременных перегрузках генератора. Преимуществом характеристики срабатывания по сравнению с тормозной характеристикой также является возможность отображения в одних координатных осях характеристик ДЗ различных производителей. Последнее позволяет наглядно сопоставить по чувствительности рассматриваемые ДЗ в различных нагрузочных режимах. Характеристики срабатывания для ряда защит различных производителей отображены далее на рисунке 4.

Сопоставление ДЗ по устойчивости несрабатывания при внешних КЗ и быстродействию при внутренних, в виду отсутствия каких-либо методик в данной области, предлагается проводить, используя разработанный программный комплекс моделирования переходных процессов в цепях ТТ. Выбрав интересные режимы и задав их начальные условия, рассчитываются вторичные токи ТТ, и в идеальном случае (при наличии технической возможности), в аналоговой форме подаются на входы реальных устройств ДЗ. Наиболее приемлемым является подход, когда предполагается использование математических моделей алгоритмов ДЗ, учитывающих все указанные в технической документации свойства. Преимуществом последнего варианта является возможность визуализации промежуточных сигналов, что позволяет проводить более тщательный и аргументированный анализ.

Для уменьшения времени исследования ДЗ в автоматическом режиме при внешних КЗ предлагается отсеивать те повреждения, в которых ток небаланса меньше начальной уставки срабатывания I_{C30} . Для таких случаев имеет смысл ввести понятие критического значения тока намагничивания $i_{кр.} = i_{нб.} = I_{C30}$ для ТТ, подверженного насыщению, и по характеристике намагничивания однозначно определить соответствующее критическое потокоцепление ТТ $\Psi_{кр.} = \Psi(i_{кр.})$. Для математического описания предложенного критерия использовался метод вспомогательных функций, основным допущением которого является применение прямоугольной характеристики намагничивания сердечников ТТ. Величину потокоцепления насыщения этой характеристики в работе предлагается приравнять критическому потокоцеплению. Тогда за условие «отсеивания» непоказательных режимов можно принять отсутствие насыщения всех ТТ группы. Для j -го ТТ группы «звезда» с активно-индуктивной нагрузкой это условие можно представить в следующем виде:

$$\frac{\omega \cdot (\Psi_{кр.} - \Psi_{rj})}{I_{mj} \cdot R_j} > \omega T_a \cdot \cos \alpha_j + \omega (T_{aB} - T_a) \cdot \cos \alpha_j \cdot e^{-\frac{t_{l.sj}}{T_a}} + \sin \alpha_j - \sin(\omega \cdot t_{l.sj} + \alpha_j) - \omega T_{aB} \cdot \cos(\omega \cdot t_{l.sj} + \alpha_j), \quad (2)$$

где Ψ_{rj} – остаточная индукция ТТ, I_{mj} – амплитуда периодической составляющей тока КЗ, $t_{l.sj}$ – время от начала КЗ до момента первого насыщения, α_j – угол первичного тока КЗ в соответствующей фазе, T_a – постоянная времени первичной цепи, T_{aB} – постоянная времени вторичной цепи.

Таким образом, для «отсеивания» режимов, при которых ток небаланса меньше начальной уставки срабатывания, необходимо, чтобы при любом значении $t_{1.sj}$ ресурс (левая часть выражения (2)) был бы больше его расхода (правая часть выражения (2)). Для того чтобы данное неравенство выполнялось при произвольном $t_{1.sj}$, достаточно выполнения условия

$$\frac{\omega \cdot (\Psi_{kp.} - \Psi_{rj})}{I_{mj} \cdot R_j} > \omega T_a \cdot \cos \alpha_j + \sin \alpha_j + \sqrt{1 + \omega^2 T_{aB}^2},$$

которое является искомым и позволяет уже на предварительном этапе расчета переходного процесса во вторичных цепях ДЗ "отсеять" те режимы, которые не влияют на устойчивость её функционирования.

Любое исследование связано с трудовыми и временными затратами, поэтому задача разработки методики анализа устойчивости функционирования дифференциальных защит, направленная на получение необходимых результатов при минимальных затратах, весьма важна. В работе предлагается два возможных пути её решения. Первый – это использование метода статистических испытаний (Монте-Карло). Здесь в качестве объекта исследования рассматривается математическая модель ДЗ, функция отклика которой (факт срабатывания при внешнем КЗ и время срабатывания при внутреннем) зависит от начальных условий эксперимента (факторов). Всё многообразие факторов можно разделить на регулируемые и нерегулируемые. К нерегулируемым факторам относятся параметры исследуемого генератора, ТТ, вторичной нагрузки ТТ и уставки защиты. Регулируемые факторы при использовании метода Монте-Карло рассматриваются в виде случайных величин. Одновременное изменение этих факторов случайным образом предполагает, что и результат эксперимента можно рассматривать как случайный. Поэтому при проведении большого числа опытов можно выявить наиболее значимые условия, влияющие на устойчивость функционирования ДЗ, а также области или точки в факторном пространстве, в которых происходит нарушение устойчивости работы алгоритма ДЗ.

Второй путь – это использование концепции последовательного эксперимента, где после каждого опыта производится анализ результатов и принимается решение о дальнейшем ходе эксперимента. Использование данной концепции подразумевает грамотно выбранную начальную точку плана эксперимента. При оценке устойчивости функционирования ДЗ, основной причиной нарушения которой являются искажения токов во вторичных цепях ТТ, в первую очередь необходимо учитывать тяжесть насыщения ТТ.

Для апробации предложенных методик выбран ряд производителей, таких как НПП «ЭКРА», Areva, Siemens, Schneider Electric, ДЗ которых отличаются друг от друга как по способу формирования тормозного сигнала, так и по виду тормозной характеристики. В качестве объекта защиты рассмотрен турбогенератор ТВВ-320-2. Исследования проводились на математических моделях рассматриваемых ДЗ, кроме того, для оценки корректности моделирования алгоритма ДЗ НПП «ЭКРА» проведены физические исследования на терминале защит ШЭ1110. Результаты испытаний подтвердили выявленную с помощью математических моделей возможность неустойчивой работы существующих

защит, особенно в случаях резко различающегося характера протекания переходных процессов в цепях ТТ различных групп.

Результаты анализа ДЗ могут охарактеризовать ту или иную защиту более «выигрышной» с точки зрения работы в одном из режимов, характеризующих устойчивость функционирования. Однако распространение этого утверждения на все остальные режимы является неправомерным. Решение о выборе ДЗ, обладающей наибольшей устойчивостью функционирования при внешних и внутренних КЗ, предлагается принимать по статистическим данным, полученным на ЭВМ, следующим образом:

1. При имитации внешних КЗ контролируется лишь факт срабатывания моделей алгоритмов исследуемых ДЗ, внутренних – время их срабатывания.

2. Проводится достаточное для анализа количество опытов имитации исследуемых режимов (более 1000 для каждого режима) методом Монте-Карло.

3. Из общего количества опытов оценивается вероятность ложных срабатываний каждой из моделей в сквозных режимах и вероятность попадания в заданные интервалы их времён срабатывания при внутренних КЗ.

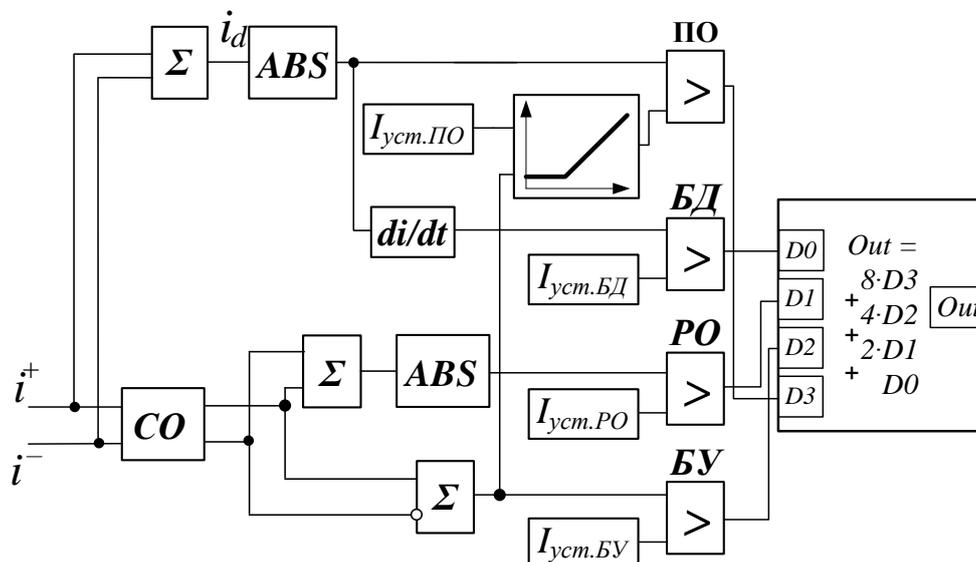
Четвертая глава посвящена разработке и экспериментальному исследованию дифференциальной защиты генератора, лишенной большей части недостатков, выявленных при испытаниях существующих защит.

При разработке защиты в первую очередь определены наиболее информативные признаки аварийных режимов работы генератора. В самом начале внешнего КЗ наиболее информативным является качественный признак – более позднее появление дифференциального тока по сравнению с тормозным.

При насыщении одного из ТТ плеч в таком режиме наиболее информативным, как показали эксперименты, является количественный признак – однополярность тока небаланса. Для исключения его проявления при внутренних повреждениях в работе предлагается одновременно контролировать и разнополярность токов плеч. В оставшейся части переходного процесса наиболее информативными признаками являются выявленные интегрально-качественные признаки удаленного КЗ, а именно: продолжительное затухание тока небаланса, а также продолжительный рост тормозного сигнала с одновременным снижением дифференциального. Наиболее информативным признаком внутреннего КЗ является превышение текущим значением дифференциального тока расчетной уставки срабатывания. Для обеспечения ускорения идентификации части таких режимов при значительных насыщениях ТТ предлагается также контролировать фазы токов плеч защиты и при их приблизительном равенстве в первом периоде КЗ выдавать сигнал на срабатывание защиты.

Для повышения точности идентификации аварийных режимов при построении защиты используется предложенное Л.В. Багинским и его учениками сочетание дифференциального, дифференциального с торможением и дифференциально-фазного принципов действия, а также структурный метод теории распознавания образов. Данный метод подразумевает, что в идентификации режима может участвовать множество электрических параметров, каждый из которых предназначен для контроля определённого признака режима. Проявление этих признаков фиксируется в виде соответствующих дискретных сигнала-

лов. Далее, полученные дискретные сигналы объединяются в одно целое (*слово*). Конечный *образ* будет представлять последовательность из этих *слов*, отстоящих друг от друга на период дискретизации. Структурная схема блока формирования слов (БФС), реализующего предложенный подход, представлена на рисунке 2.



- СО – схема ограничения;
- ПО, РО – пусковой и реагирующий орган;
- БД, БУ – блок дифференцирования и управления.

Рис.2. Структурная схема блока формирования слов

Структурный подход построения защиты подразумевает использование собственного языка, на котором необходимо описать признаки режимов работы генератора. Внутреннее КЗ с малыми сквозными токами при помощи БФС описывается образом пяти слов 2 и A (не менее одного A), а с большими – образом из шести слов 2, б, A, E (не менее одного A или E). Образы F6E, FD7, FA, B30AAA, B3021A, также характеризуют внутреннее КЗ и получены путем выделения комбинаций, не проявляющихся в сквозных аварийных режимах. Внешнее КЗ с использованием БФС характеризуется образами 44, 45, 64, 40, 53, 57, 34, 35. Признаком нормального режима является образ 000...000.

Итоговая структурная схема разработанного алгоритма ДЗ для фазы «А» отображена на рисунке 3, где i_{A1} , i_{A2} – токи первого и второго плеча; *Word_BFS* – слово режима, формируемое БФС; *id_Trend* – тренд изменения модуля дифференциального тока; *UnipolarFlag* – сигнал однополярности *id* при разнополярных i_{1A} , i_{2A} ; *Id_It_Trend* – фиксация увеличения *It* и одновременного уменьшения *Id*; *Filt_Op* – срабатывание дифференциального с торможением органа при контроле векторных значений токов; *Flag_KZ* – фиксация начала КЗ; *SignAgree* – фиксация равенства по знаку токов плеч; *Block* – сигнал блокировки алгоритма; *ExtStart* – фиксация первичного признака внешнего КЗ; *NormFlag* – фиксация нормального режима; *OverLoad* – фиксация перегрузочного режима; *AnormalState* – фиксация ненормального режима (момента начала аварии). Ранее упоминаемый БФС здесь является составной частью блока формирования дискретных сигналов (БФДС).

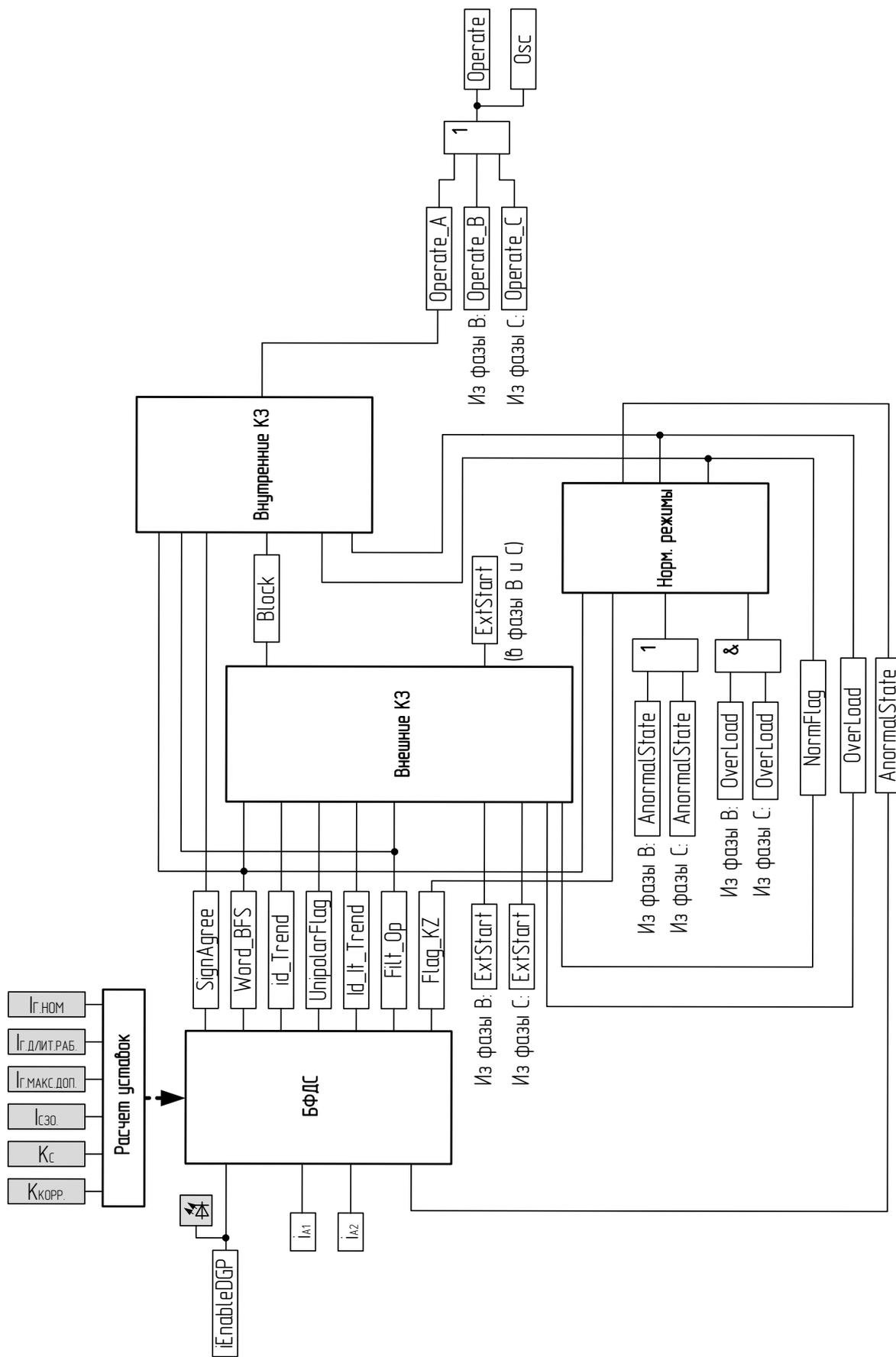


Рис.3. Структурная схема алгоритма ДЗ для фазы «А»

Реализация предложенного алгоритма ДЗ на языке С++ позволила интегрировать его в разработанный программный комплекс и применить к нему все ранее предлагавшиеся методики оценки устойчивости функционирования. В первую очередь проведена оценка чувствительности разработанной защиты к внутренним КЗ при наличии сквозного тока нагрузки. На рисунке 4 отображены характеристики срабатывания всех рассматривавшихся ДЗ, где в качестве защищаемого объекта принят генератор ТВВ-320-2. Примечательно, что область срабатывания защиты, использующей методы теории распознавания образов, является второй по величине после ДЗ фирмы Areva. Тем самым, обе эти защиты можно считать наиболее приоритетными для рассматриваемого генератора по чувствительности.

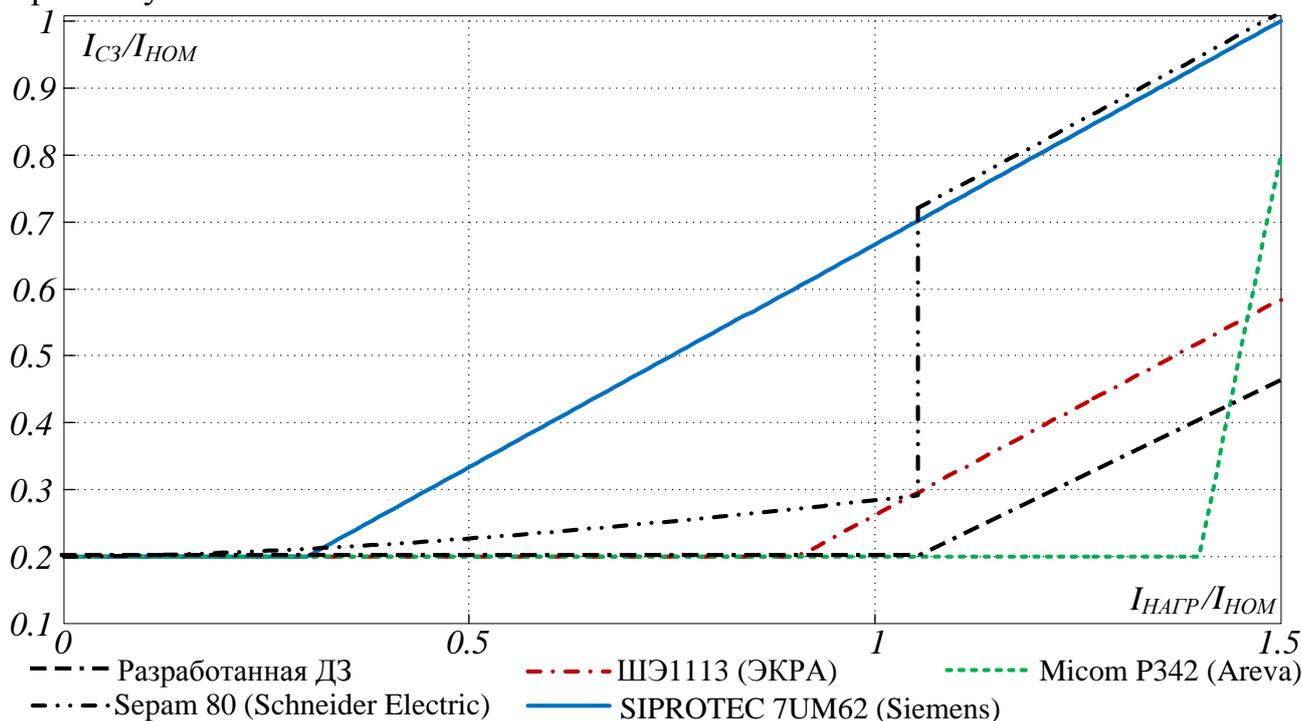


Рис.4. Характеристики срабатывания исследуемых дифференциальных защит

Результаты оценки устойчивости несрабатывания в сквозных режимах моделей исследуемых ДЗ (табл.1) показали, что разработанный алгоритм обладает значительно меньшей вероятностью излишней работы и для рассматриваемого генератора (ТВВ-320-2) является наиболее приоритетным.

Таблица 1

Данные об излишней работе ДЗ при расчете сквозных режимов на ЭВМ

Режим	Количество опытов	ШЭ 1113	Siprotec 7UM62	Micom P342	Sepam 80	Разраб. ДЗ
Двухфазное КЗ	11294	5727	5591	4760	2785	56
Трёхфазное КЗ	11359	4326	3720	3215	1363	0
Ошибочная синхронизация	8141	3147	4992	1555	1032	0
Итого	30794	13230	14303	9530	5180	56
Вероятность ложной работы		0.42963	0.46447	0.30948	0.1682	0.00182

Результаты имитации внутренних КЗ показывают, что все модели исследуемых защит в большинстве случаев срабатывают в первые два периода с момента КЗ (табл.2). Крайне малая вероятность появления задержек в срабатывании разработанной ДЗ обусловлена совпадением ряда факторов, которые приводят к фиксации в первые моменты аварии признаков внешнего КЗ, а лишь затем к распознаванию признаков внутреннего КЗ. При этом следует отметить, что разработанная ДЗ в большинстве случаев (99,85 %) срабатывает в первом периоде, превосходя по быстрдействию все остальные испытанные защиты.

Таблица 2

Данные времен срабатывания моделей ДЗ при имитации внутренних КЗ

Интервал, мс		0...20	20...40	40...60	100...140	140...	Итого
ШЭ 1113	Количество	0	38063	27	0	0	38090
	Вероятность	0	0.99929	0.00071	0	0	1
Siprotec 7UM62	Количество	0	23157	14933	0	0	38090
	Вероятность	0	0.60795	0.39205	0	0	1
Micom P342	Количество	0	38061	0	0	29	38090
	Вероятность	0	0.99923	0	0	0.00076	1
Seram 80	Количество	0	37035	27	42	986	38090
	Вероятность	0	0.9723	0.00071	0.0011	0.02589	1
Разраб. защита	Количество	38036	48	0	6	0	38090
	Вероятность	0.99858	0.00123	0	0.000157	0	1

В работе подтверждена возможность технической реализации разработанной ДЗ. Проверка работоспособности алгоритма проводилась на базе шкафа КПА-М производства ЗАО «ИАЭС» при помощи установки РЕТОМ-61, которая полностью подтвердила результаты, полученные при моделировании.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан программный комплекс имитационного моделирования электромагнитных переходных процессов в цепях трансформаторов тока, содержащий математические модели оборудования первичной сети (генератор и система), которые позволяют формировать осциллограммы токов, протекающих по плечам защиты во всех фазах защищаемого объекта, и математические модели групп ТТ «звезда» и «двойная звезда», а также групп ТТ «звезда», работающих на общую нагрузку, которые в зависимости от осциллограмм первичных сигналов позволяют формировать вторичные токи ТТ, поступающие в

дифференциальную защиту.

2. Разработан графический интерфейс комплекса имитационного моделирования, обеспечивающий с достаточной степенью наглядности ввод параметров, определяющих режим работы первичного оборудования (параметры генератора, системы, предаварийного и аварийного режимов), технических параметров и начальных условий трансформаторов тока, используемых защитой, а также вывод на экран необходимых результатов вычислительного эксперимента в виде графиков.

3. Обеспечена возможность использования результатов вычислительных экспериментов для исследования устойчивости функционирования физических устройств дифференциальных защит генератора в различных режимах путем сохранения осциллограмм вторичных токов плеч защиты, рассчитанных на математических моделях программного комплекса, в формате COMTRADE.

4. Обеспечена возможность оценки и сравнения устойчивости функционирования дифференциальных защит генератора в различных переходных режимах, в том числе и при наличии сопровождающих токов нагрузки, путём моделирования их алгоритмов.

5. Предложена методика выбора рекомендуемого к использованию устройства дифференциальной защиты генератора, исходя из обеспечения чувствительности к внутренним повреждениям при наличии сквозного тока нагрузки. При использовании этой методики определяются характеристики срабатывания рассматриваемых защит, получаемые из тормозных характеристик. Характеристика срабатывания непосредственно связывает ток срабатывания защиты со сквозным током нагрузки, характеризующим режим работы генератора.

6. Предложена методика анализа устойчивости функционирования дифференциальных защит генератора при внешних КЗ, позволяющая оценить эффективность использования дополнительных мер отстройки от токов небаланса. Результаты исследований показали, что наличие в алгоритмах дифференциальных защит дополнительных мер, улучшающих их отстроенность от таких токов, может приводить к ухудшению быстродействия устройств при внутренних КЗ. Более того, выявлены режимы внешнего КЗ, в которых, несмотря на применение дополнительных мер, фиксируется излишняя работа дифференциальных защит, то есть использование дополнительных мер в том виде, в котором они применяются в алгоритмах существующих устройств, является недостаточным.

7. Предложена методика выбора используемого устройства дифференциальной защиты генератора, исходя из оценки устойчивости несрабатывания при сквозных аварийных режимах и быстродействия при внутренних КЗ. Получаемые количественные показатели определяются на основе метода статистических испытаний, который в совокупности с предложенным критерием «отсеивания» части режимов, не являющихся репрезентативными с точки зрения оценки устойчивости функционирования дифференциальной защиты, приводит к уменьшению суммарного времени исследования переходных процессов в цепях защиты на ЭВМ в автоматическом режиме.

8. Разработан алгоритм функционирования продольной дифференциальной защиты генератора, основанный на использовании структурных методов теории

распознавания образов. Используемый подход позволил записать существующие отличительные признаки различных режимов в форме, более удобной для их идентификации, а также выявить и сформулировать дополнительные отличительные признаки внешнего и внутреннего КЗ, которые невозможно идентифицировать в алгоритмах, основанных на традиционном подходе. В алгоритме дополнительно применены новые интегрально-качественные признаки «удалённого» внешнего КЗ, а также реализованы выявленные дополнительные возможности дифференциально-фазного принципа, позволяющие ускорить идентификацию внутреннего КЗ.

9. Доказана возможность реализации разработанных алгоритмов защиты на базе современных микропроцессорных средств.

10. В разработанном алгоритме в полной мере учтены предложенные подходы к выбору используемого устройства дифференциальной защиты генератора, исходя из требований чувствительности и быстродействия при внутренних повреждениях и устойчивости несрабатывания при внешних КЗ. Результаты сопоставления разработанного алгоритма дифференциальной защиты с алгоритмами серийно-выпускаемых устройств, на примере генератора ТВВ-320-2, показали, что он имеет более высокие показатели устойчивости функционирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов:

1. Осинцев А. А. Моделирование переходных процессов в цепях дифференциальной защиты генератора [Текст] / А. А. Осинцев, В. Е. Глазырин // Электро. – 2011. – № 3. – С. 9–14.

2. Осинцев А. А. Оценка чувствительности дифференциальных защит генератора к внутренним повреждениям [Текст] / А. А. Осинцев, В. Е. Глазырин // Науч. вест. НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – № 4(45). – С. 103–110.

3. Осинцев А. А. Сопоставление отстроенности микропроцессорных дифференциальных защит генератора от внешних коротких замыканий при насыщениях трансформаторов тока [Текст] / А. А. Осинцев, В. Е. Глазырин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск : Изд-во НГАВТ, 2012. – №1. С. 364-367.

Научные публикации в других изданиях:

4. Осинцев А. А. Модель группы трансформаторов тока «двойная звезда» [Текст] / А. А. Осинцев // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – Ч. 3. – С. 144–145.

5. Осинцев А. А. Влияние ошибочной синхронизации генератора на устойчивость функционирования дифференциальной защиты [Текст] / А. А. Осинцев // Современные техника и технологии : сб. тр. XVI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3 т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – Т. 1. – С. 91–92.

6. Осинцев А. А. Испытания дифференциальной защиты генератора с направленным торможением [Текст] / А. А. Осинцев // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 4 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – Ч. 2. – С. 96–97.

7. Осинцев А. А. Исследование функционирования дифференциальной защиты генератора на базе реле ДЗТ-11/5 [Текст] / А. А. Осинцев, В. Е. Глазырин // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ. – 2010. – № 4(62). – С. 149–155.

8. Осинцев А. А. Математическая модель группы трансформаторов тока «звезда-звезда» при наличии общей нагрузки [Текст] / А. А. Осинцев // Современные техника и технологии : сб. тр. XVII междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3 т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2011. – Т. 1. – С. 100–102.

9. Осинцев А. А. Анализ устойчивости функционирования основных защит генератора при внешних КЗ [Текст] / А. А. Осинцев, В. Е. Глазырин // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах : материалы молодёжной междунар. науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD_ROM). – Загл. с титул. экрана.

10. Осинцев А. А. Анализ мер по отстройке от внешних КЗ в дифференциальной защите генератора терминала SEPAM 80 [Текст] / А. А. Осинцев // Современные техника и технологии : сб. тр. XVIII междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3 т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – Т. 1. – С. 83–84.

11. Осинцев А. А. Использование метода вспомогательных функций для ограничения области исследования дифференциальных защит генераторов [Текст] / А. А. Осинцев // Наука. Технологии. Инновации : материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – Ч. 5. – С. 163–164.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20
тел./факс. (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16, объём 1.5 п.л. тираж 100 экз.
заказ № 706 подписано в печать 14.05.2013 г.