

На правах рукописи



Литвинов Илья Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО
ТРАНСФОРМАТОРА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Глазырин Владимир Евлампиевич

Официальные оппоненты: **Никитин Константин Иванович**
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Омский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Теоретическая и общая
электротехника»

Наумов Владимир Александрович
кандидат технических наук, заместитель
генерального директора – технический
директор научно-производственного
предприятия «ЭКРА»

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

Защита состоится «25» октября 2018 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.173.01 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
http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=16841

Автореферат разослан « » июля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Анастасия Георгиевна Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективная работа устройств релейной защиты (РЗ) должна обеспечивать надёжную и устойчивую работу электроэнергетических систем (ЭЭС), исключая или значительно уменьшая ущерб в случае возникновения аварии. Улучшение основных характеристик РЗ – селективности, быстродействия, чувствительности и надёжности – связано с несоизмеримо меньшими затратами, чем соответствующее повышение надёжности и устойчивости работы ЭЭС путём совершенствования её объектов и инфраструктуры.

Функции комплекта РЗ заключаются в срабатывании при возникновении внутренних повреждений и в несрабатывании при внешних повреждениях, а также в нормальных и аномальных режимах работы защищаемого объекта и ЭЭС в целом. На практике бывает затруднительно обеспечить чёткое выполнение перечисленных функций для всех возможных режимов работы защищаемого и измерительного оборудования, поэтому для характеристики работы средств РЗ используется понятие *устойчивости функционирования*. Устойчивость функционирования РЗ определяется: а) стабильностью несрабатывания при внешних повреждениях; б) сохранением чувствительности и заданного быстродействия при внутренних повреждениях. Часто причиной нарушения устойчивого выполнения средствами РЗ своих функций является увеличение погрешности измерительной части РЗ в переходном процессе (ПП), вызванного аварией в ЭЭС. Решение задачи повышения устойчивости функционирования РЗ должно быть направлено на обеспечение требуемых чувствительности и скорости срабатывания защиты при внутренних повреждениях защищаемого объекта и на надёжное обеспечение её несрабатывания при внешних повреждениях во всех возможных режимах работы силового и измерительного оборудования (включая переходные режимы).

Развитие энергосистемы требует установки силовых трансформаторов (СТ) и автотрансформаторов большей единичной мощности и более высоких классов напряжения (здесь и далее термин «силовой трансформатор» распространяется и на силовые автотрансформаторы). Повреждения СТ способны привести к существенному разрушению как самих СТ, так и создать угрозу устойчивой работе ЭЭС в целом, поэтому СТ в обязательном

порядке должны иметь надёжные и эффективные средства РЗ. Основной защитой мощных СТ является продольная дифференциальная защита (ДЗ), обладающая абсолютной селективностью и не требующая для своей работы выдержек времени. Дифференциальная защита СТ должна надёжно распознавать аномальные режимы и выявлять внутренние повреждения. К аномальным режимам работы СТ относятся броски тока намагничивания (БТН), повышение напряжения, перевозбуждение, перегрузки и внешние короткие замыкания (КЗ).

Высокий уровень токов КЗ в максимальных режимах и большие постоянные времени первичных цепей являются причиной насыщения измерительных трансформаторов тока (ТТ), что приводит к существенным искажениям входных токов основных защит СТ в ПП. Известные на сегодняшний день способы отстройки ДЗ от БТН не обеспечивают в достаточной степени устойчивое функционирование средств ДЗ, что приводит к замедлению её действия из-за искажений вторичных токов при внутренних КЗ, когда токи внутреннего повреждения и БТН очень часто практически «неразличимы» для защитного алгоритма. Насыщение измерительных ТТ в режиме внешних КЗ и появление значительных переходных токов небаланса вынуждают производителей средств ДЗ вводить динамическое торможение или блокировку защиты в этих режимах, что увеличивает время ликвидации аварии при возможном переходе внешнего КЗ во внутреннее повреждение. Применение измерительных ТТ, не подверженных насыщению, не всегда технически и экономически оправдано. Несовершенство существующих средств ДЗ проявляется также в снижении их чувствительности к внутренним повреждениям с малым током в режиме перевозбуждения СТ.

Таким образом, ДЗ трансформаторов ещё далека от технического совершенства и не всегда способна устойчиво функционировать при всём многообразии режимов работы защищаемого объекта. В целях повышения устойчивости функционирования защиты является актуальным совершенствование старых и разработка принципиально новых алгоритмов РЗ, использующих неоспоримые преимущества программной обработки информации.

По теме исследования известны диссертационные работы А.С. Засыпкина, В.П. Ерушина, В.Е. Глазырина, М.С. Ломана, А.М. Владимировича, М.А. Купарева и др. Повышение технического совершенства релейной защиты от внутренних повреждений трансформаторов в указанных работах достигалось на основе теоретического обобщения результатов исследований аварийных и аномальных режимов объекта защиты, процессов в первичных и вторичных цепях релейной защиты в этих режимах. По результатам этих исследований авторами предлагались различные технические решения, направленные на повышение чувствительности и быстродействия ДЗ в аварийных режимах работы СТ. Настоящее диссертационное исследование является продолжением работы М.А. Купарева, выполненной на кафедре электрических станций Новосибирского государственного технического университета под руководством В.Е. Глазырина. В диссертации М.А. Купарева задача повышения устойчивости функционирования ДЗ трансформатора решена на основании анализа формы кривой дифференциального тока, выполняемой в режиме реального времени. Как показало исследование, применение микропроцессорной обработки данных позволяет выявлять внутренние повреждения СТ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального сигнала даже в условиях глубокого насыщения измерительных трансформаторов тока.

Целью работы является разработка и реализация способов действия дифференциальной защиты силового трансформатора с повышенной устойчивостью функционирования на основе новых выявленных устойчивых признаков внешних и внутренних повреждений, нормальных и аномальных режимов работы силового трансформатора. Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Анализ существующих способов отстройки современных ДЗ трансформаторов от режимов внешних КЗ, БТН и перевозбуждений с целью определения путей совершенствования защиты.

2. Разработка адекватных математических моделей СТ и ТТ для изучения характеристик ПП в защищаемом СТ и измерительных цепях ДЗ.

3. Исследование характера ПП в первичных и вторичных цепях в следующих режимах: БТН нагруженного трансформатора; БТН,

возникающий при одновременном замыкании фаз силового выключателя, связывающего трансформатор с энергосистемой (так называемый «последовательный БТН»); внешние и внутренние КЗ, сопровождающиеся глубоким насыщением ТТ. Оценка устойчивости функционирования ДЗ СТ в перечисленных режимах.

4. Исследование влияния режима перевозбуждения на чувствительность ДЗ к витковым замыканиям.

5. Разработка предложений, направленных на повышение устойчивости функционирования ДЗ в рассмотренных режимах.

6. Реализация предложенных алгоритмов защиты средствами микропроцессорного терминала с целью подтверждения их технической реализуемости.

Объектом исследования является дифференциальная токовая защита силового трансформатора. **Предметом** исследования являются характерные особенности переходных и установившихся режимов в первичных и вторичных цепях дифференциальной защиты.

Научная новизна работы.

1. Разработана универсальная математическая модель СТ, учитывающая конструктивные особенности сердечника СТ, определён порядок расчёта численных параметров модели. На основе разработанной математической модели проведён анализ различий БТН в трёхфазном трёхстержневом СТ и группе однофазных СТ, в результате чего доказано, что при анализе БТН может быть использована модель группы однофазных трансформаторов вместо трёхфазного трёхстержневого СТ.

2. Впервые предложен усовершенствованный алгоритм контроля сдвига фаз, использующий информацию на интервалах идеальной трансформации ТТ и позволяющий повысить устойчивость функционирования ДЗ в условиях глубокого насыщения ТТ. Это позволяет более эффективно определять момент перехода внешнего КЗ во внутреннее повреждение в процессе развития аварии.

3. Разработан способ ДЗ, имеющий повышенную чувствительность к витковым замыканиям в режиме перевозбуждения СТ.

4. Средствами математического моделирования исследован БТН нагруженного СТ, возникающий при восстановлении питающего напряжения

после его кратковременной потери, а также БТН, возникающий при одновременном замыкании контактов силового выключателя. Впервые оценена эффективность применения ранее разработанных способов идентификации режима БТН и внутренних КЗ в указанных режимах. Предложены новые способы распознавания БТН и внутреннего КЗ.

5. Предложен способ адаптивного изменения уставок дифференциальной отсечки, позволяющий повысить её чувствительность.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработаны математические модели СТ, позволяющие получать корректную информацию о различных режимах: в режиме внешних и внутренних КЗ, в режиме БТН при включенной нагрузке, БТН при одновременном замыкании фаз выключателя, связывающего СТ с энергосистемой. Определён порядок расчёта численных параметров математических моделей СТ в режиме БТН.

2. Математические модели СТ и ТТ интегрированы в специальный программный интерфейс, обеспечивающий интерактивную настройку моделей и удобное отображение результатов компьютерного моделирования. Разработанные программные средства могут быть использованы как в проектных институтах и научно-исследовательских центрах, так и в вузах для решения задач изучения характера ПП в цепях ДЗ трансформаторов, а также для проведения разносторонних исследований поведения ДЗ в различных режимах работы силового и измерительного оборудования. Разработанные средства могут быть полезны проектным организациям, осуществляющим расчёт уставок защит трансформаторов.

3. Предложены новые алгоритмы действия для микропроцессорных защит трансформаторов. Их использование совместно с традиционными алгоритмами позволяет повысить устойчивость функционирования ДЗ трансформаторов, что обуславливает целесообразность их интеграции в серийно выпускаемые микропроцессорные устройства релейной защиты.

4. Экспериментальным путём подтверждена техническая реализуемость предложенных способов защиты с повышенной устойчивостью функционирования.

5. Результаты теоретических исследований включены в учебный процесс кафедры Электрических станций НГТУ: ключевые положения

диссертационного исследования включены курс лекций по современным средствам релейной защиты и автоматики, получен официальный акт внедрения в учебный процесс. Экспериментальное подтверждение работоспособности разработанных алгоритмов послужило основой для внедрения разработки в АО «ИАЭС».

Достоверность результатов работы подтверждена сопоставлением результатов вычислительных экспериментов, полученных в результате применения разработанных математических моделей силового и измерительного оборудования, с результатами натурных экспериментов, описание которых имеется в литературе.

Методология и методы исследования. Разработанные в диссертации научные положения основаны на применении теоретических и экспериментальных методов исследования в данной области и используют системный подход к проблеме. Решение поставленных в работе задач базируется на выводах таких фундаментальных и прикладных наук, как математический анализ, общая физика, теоретические основы электротехники, теория имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математические модели СТ, позволяющие анализировать их работу в режимах БТН и КЗ. Выявление отличительных характеристик режимов БТН в группах однофазных и в трёхфазных трансформаторах.

2. Совершенствование дифференциально-фазного принципа действия защиты силовых трансформаторов за счёт использования интервалов точной работы ТТ в переходных и установившихся режимах КЗ.

3. Исследование поведения ДЗ, реагирующей на характер изменения мгновенных значений дифференциального тока, при последовательном БТН и БТН нагруженного трансформатора. Определение новых отличительных признаков аварийных режимов работы трансформаторов.

4. Алгоритм чувствительной защиты для выявления витковых замыканий в обмотках трансформатора в режиме перевозбуждения.

5. Алгоритм адаптивной дифференциальной отсечки, учитывающий положение выключателей, связывающих трансформатор с нагрузкой и энергосистемой.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры электрических станций Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), на всероссийской научной конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные исследования» в 2016 году в г. Новосибирске, на всероссийской научной конференции аспирантов и магистрантов «Science in Progress», городской научно-практической конференции «Aspire to Science» в 2016 году в г. Новосибирске, на Днях науки НГТУ в 2018 году. Работа отмечена грантом факультета энергетики НГТУ в 2017 году.

Публикации по теме исследования. По результатам проведенных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 научные статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 2 работы, входящие в международную реферативную базу данных Web of Science; 6 работ, входящих в сборники международных, всероссийских и городских конференций, а также один патент на изобретение.

Личный вклад. Автором определены основные причины нарушения устойчивой работы ДЗ трансформаторов, установлены направления совершенствования ДЗ, выбрана аппаратно-программная база для реализации усовершенствованных алгоритмов ДЗ. Разработаны математические модели силовых трансформаторов, корректно работающие во всех режимах работы защищаемого объекта, определены численные параметры модели, реализован программный интерфейс, обеспечивающий интерактивное взаимодействие с разработанными моделями, выполнены вычислительные эксперименты, разработаны и реализованы усовершенствованные алгоритмы защиты СТ с повышенной устойчивостью функционирования.

Объём и структура работы. Диссертация изложена на 240 страницах, содержит 81 рисунок и 4 таблицы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка терминов, списка использованных источников и шести приложений. Список использованных источников содержит 86 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы её цель и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён обзор существующих в данное время ДЗ трансформаторов. Анализ литературы позволил установить следующие приоритетные направления совершенствования защитных алгоритмов.

Во-первых, установлено, что сочетание дифференциального и дифференциально-фазного принципа действия позволяет создать эффективную защиту, чувствительную к повреждениям как с большим, так и с малым током. Однако вследствие насыщения измерительных ТТ возможно возникновение ошибок в вычислении фазового сдвига между токами плеч ДЗ, что приводит к необходимости иметь значительную (около 60 градусов) уставку по углу блокировки для отстройки такой защиты от внешних повреждений. В результате этой отстройки защита может оказаться нечувствительной к внутренним КЗ, сопровождающимся вытекающими токами нагрузки. По этой причине необходимо повышение точности работы дифференциально-фазного алгоритма.

Во-вторых, до настоящего времени сохраняется вероятность недопустимой задержки в работе ДЗ при внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, так как такие режимы могут распознаваться защитой как БТН. По этой причине необходимо разработать эффективный алгоритм распознавания БТН и внутреннего КЗ, позволяющий без существенной задержки, вызванной насыщением ТТ, выявлять внутреннее повреждение. Для достижения этой цели можно использовать предложенный ранее способ распознавания БТН и внутренних КЗ, заключающийся в следующем. Если хотя бы в одной из фаз максимальная продолжительность постоянства знака производной дифференциального тока в первом периоде составляет 10 мс и более, то текущий режим относится к классу внутренних КЗ, иначе – к классу БТН. Для отстройки от БТН во втором и последующих периодах используется отличительный признак БТН, основанный на сравнении интервалов времени от момента перехода через нуль производной чётной полуволны дифференциального тока до моментов окончания предыдущей

(Δt_1) и начала следующей (Δt_2) полуволн. Внутренние КЗ характеризуются соотношением $\Delta t_1 \geq \Delta t_2$ (рисунок 1, а), а БТН – $\Delta t_1 < \Delta t_2$ (рисунок 1, б).

Однако справедливость этих признаков была установлена только для БТН, возникающих в условиях одновременного замыкания фаз выключателя (БТН, возникающий в условиях неодновременного замыкания фаз, называют «последовательным»), связывающего СТ с источником питания, а также в предположении отсутствия нагрузки на стороне низшего напряжения (НН). Поэтому необходимо убедиться в отсутствии ложной работы ДЗ, использующей этот признак, при последовательном БТН и БТН нагруженного СТ.

В-третьих, следует повысить чувствительность ДЗ к витковым замыканиям, возникающим при перевозбуждении, поскольку современные средства ДЗ трансформаторов блокируются в этом режиме, однако вероятность возникновения витковых замыканий в этом режиме, безусловно, возрастает.

В-четвёртых, целесообразно разработать средства повышения чувствительности дифференциальной отсечки, так как данное мероприятие повысит эффективность и устойчивость функционирования защит в целом.

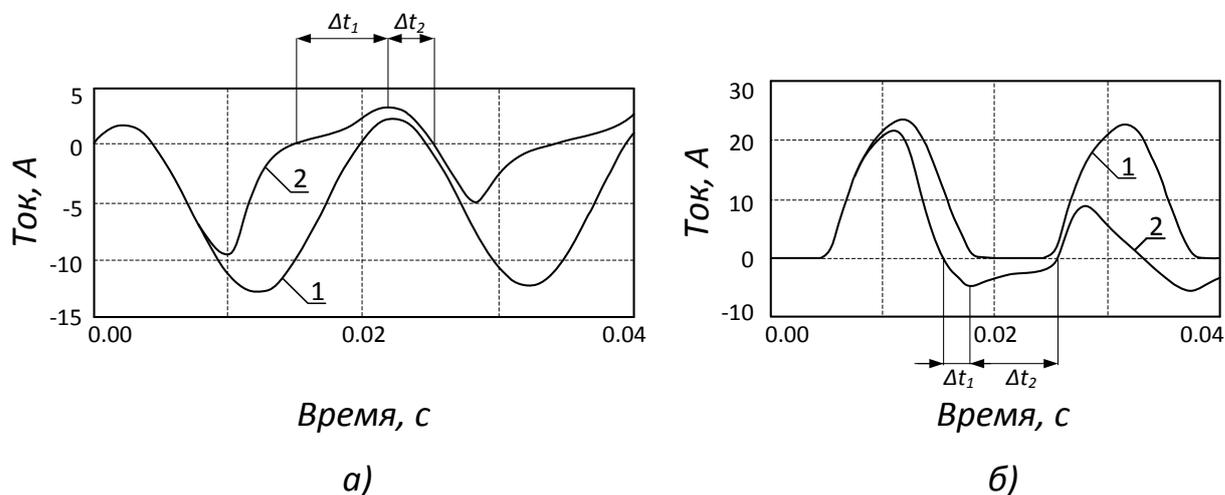


Рисунок 1 – Первичные и вторичные токи плеч ДЗ в условиях насыщения измерительных ТТ и интервалы Δt_1 и Δt_2 : а) при внутреннем КЗ; б) при БТН. Цифрой 1 обозначен ток в первичной обмотке ТТ, цифрой 2 – вторичный ток

Во второй главе рассмотрены вопросы математического моделирования ПП в первичных и вторичных цепях ДЗ. Математическое моделирование является наиболее целесообразным способом исследования ПП в первичных и вторичных цепях ДЗ. Математическая модель СТ в

режиме включения под напряжение описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Система (1) описывает электрическую часть СТ с 11-й группой соединения обмоток (рисунок 2). При составлении модели считаем, что стержням магнитопровода A , B и C соответствуют одноимённые фазы линии; числа витков обмоток на всех стержнях стороны ВН одинаковы и равны W_y , а на стороне НН соответственно числа витков равны W_d . На рисунке 2 приведена схема рассматриваемого СТ, на которой приняты следующие обозначения: e_a, e_b, e_c – эквивалентные фазные ЭДС; i_a, i_b, i_c, i_N – токи одноимённых фаз и ток в нейтрали СТ; R – эквивалентное активное сопротивление системы, питающей линии и обмоток СТ; R_d – активное сопротивление вторичной обмотки, соединённой в «треугольник»; L – суммарная эквивалентная индуктивность рассеяния системы, питающей линии и СТ; M_c – взаимная индуктивность фаз прилегающей сети; R_N – активное сопротивление заземления; W_y – число витков первичной обмотки, соединённой в «звезду»; W_d – число витков вторичной обмотки, соединённой в «треугольник», B_A, B_B, B_C – магнитные индукции магнитопроводов одноимённых фаз.

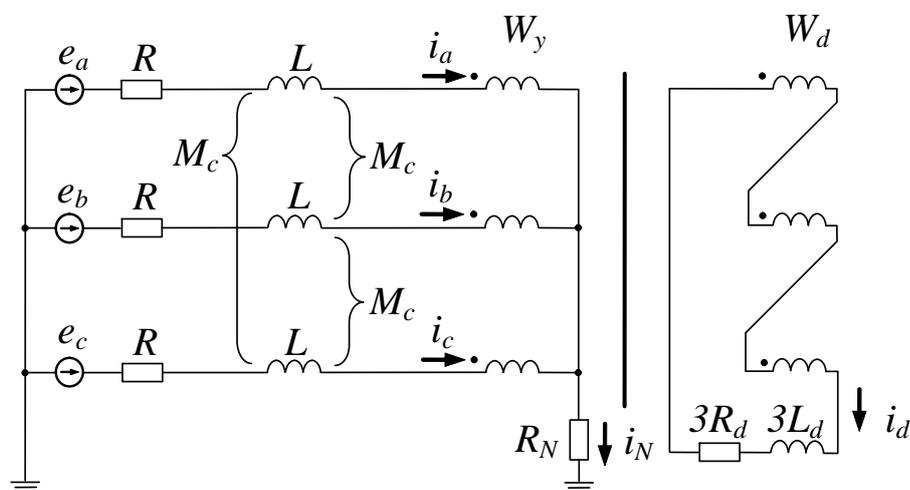


Рисунок 2 – Схема замещения электрических цепей СТ в режиме включения

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_A}{dt} + i_N R_N; \\ e_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_B}{dt} + i_N R_N; \\ e_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + W_y S \frac{dB_C}{dt} + i_N R_N; \\ W_d S \frac{dB_A}{dt} + W_d S \frac{dB_B}{dt} + W_d S \frac{dB_C}{dt} + 3 \cdot i_d R_d + 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt} = 0; \\ i_N = i_a + i_b + i_c. \end{array} \right. \quad (1)$$

Система (2) описывает магнитную систему СТ, выполненную в виде группы трёхфазного трёхстержневого трансформатора (рисунок 3, а), где R_{m0} и Φ_0 – соответственно магнитное сопротивление и магнитный поток нулевой последовательности:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_y \frac{di_a}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_b}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_c}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ S \frac{dB_A}{dt} + S \frac{dB_B}{dt} + S \frac{dB_C}{dt} + \frac{d\Phi_0}{dt} = 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\mu_{\partial A}$, $\mu_{\partial B}$, $\mu_{\partial C}$ – дифференциальная магнитная проницаемость магнитопроводов фаз A , B и C ; l_A , l_B , l_C – длины магнитопроводов одноимённых фаз.

Для описания магнитной системы СТ, выполненной в виде группы однофазных трансформаторов (рисунок 3, б), из системы (2) исключается последнее уравнение, а значение R_{m0} принимается равным нулю. При математическом моделировании магнитной системы используется сплайновая аппроксимация основной кривой намагничивания, при этом явление гистерезиса не учитывалось. Аналогичным образом составляется модель СТ для исследования БТН при подключенной нагрузке. При

моделировании внешних и внутренних КЗ допустимо пренебрегать нелинейностью ветви намагничивания в схеме замещения СТ. Поэтому задача моделирования ПП в этих режимах существенно облегчается, и могут быть применены стандартные инженерные программные пакеты. Для анализа ПП в цепях ДЗ используется математическая модель группы ТТ, разработанная на кафедре электрических станций Новосибирского государственного технического университета.

Проверка корректности воспроизведения БТН трансформатора выполнена следующим образом: на основании конструктивных данных рассчитаны параметры математической модели СТ, после чего заданы начальные условия моделирования, соответствующее появлению БТН двух характерных типов, приведённых в литературе – с максимально возможным периодическим (рисунок 4, а) и аperiodическим (рисунок 4, б) током включения в одной из фаз.

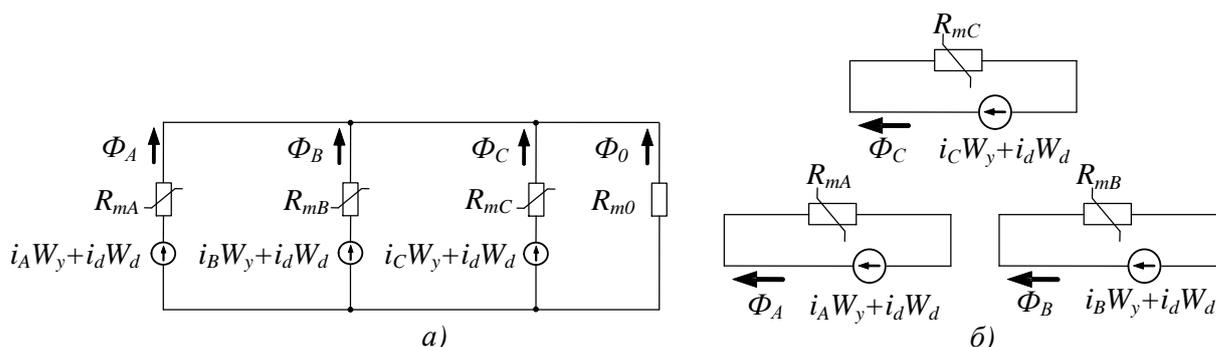


Рисунок 3 – Схема замещения магнитной системы трёхфазного СТ:
а) трёхстержневой трансформатор; б) группа однофазных трансформаторов

Установлено, что разработанная модель позволяет с достаточной точностью воспроизводить ПП при включении СТ под напряжение, так как характерные черты тока включения (длительность бестоковых пауз, отношение амплитуды периодического БТН к аperiodическому и т.п.) совпадают с таковыми, приведёнными в литературе. На рисунке 4 приведены характерные осциллограммы токов включения СТ, полученные на разработанной модели.

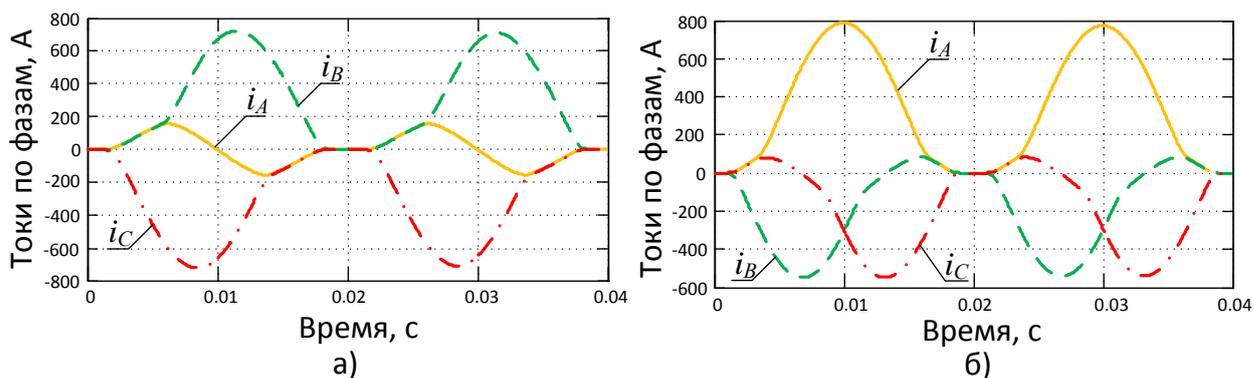


Рисунок 4 – Осциллограммы трёхфазных БТН, полученные на математической модели

В третьей главе рассмотрены пути решения задач, поставленных в результате анализа литературы. Так, для решения первой из поставленных задач (совершенствования функционирования дифференциально-фазной защиты) предлагается определять фазовый сдвиг на основании информации, получаемой на интервалах точной работы ТТ. Принципиальная возможность этого открывается из рассмотрения характера ПП при насыщении ТТ током аварийного режима с большой долей аperiodической слагающей. Насыщение ТТ и срыв тока могут произойти как на первой (рисунок 5, а), так и на второй полуволне (рисунок 5, б). Однако в обоих случаях началом участка точной работы можно считать начало интервала Δt_1 , который обозначает наименьший интервал между двумя точками смены знака производной тока. Сравнение фаз сигналов производится или по переходам через пиковые, или по переходам через нулевые значения. Интервал Δt_1 соответствует второму случаю. Если два сравниваемых сигнала имеют один и тот же знак вторичного тока в момент начала Δt_1 , то цифровое устройство рассчитывает фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ по формуле:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta T, \quad (3)$$

где ω – круговая частота основной гармоники; ΔT – разница по времени между началом интервалов Δt_1 двух сравниваемых сигналов.

Если два сравниваемых сигнала имеют различную полярность тока в моменты начала интервала Δt_1 , то к рассчитанному по формуле (3) значению $\Delta\varphi$ прибавляется 180 градусов. Данный алгоритм, очевидно, требует непосредственного контроля токов в обмотках ТТ, что не представляет существенных проблем, так как в настоящее время при применении

микропроцессорных устройств защиты практикуется соединение всех групп ТТ по схеме «звезда» со всех сторон СТ независимо от схемы соединения его обмоток, при этом фазовый сдвиг между токами плеч ДЗ компенсируется программно. На рисунке 6 показаны результаты определения фазового сдвига между сигналами тока при глубоком насыщении ТТ в режиме КЗ за сопротивлением СТ на стороне высшего напряжения (ВН).

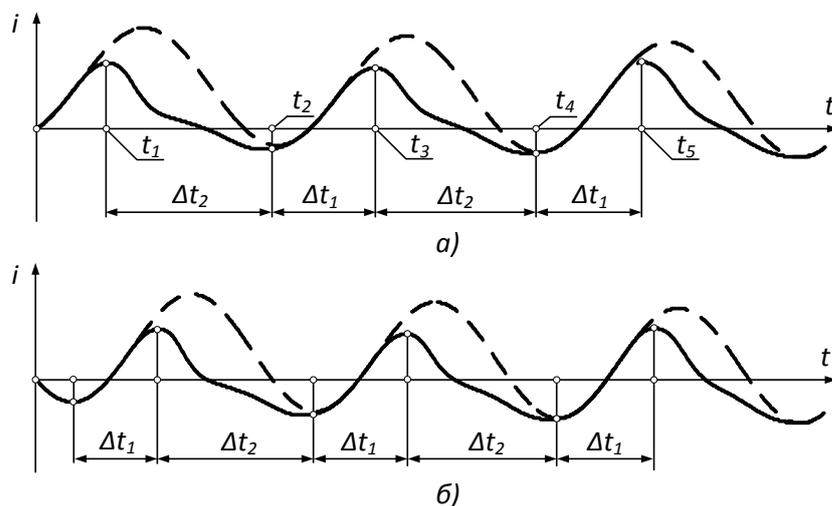


Рисунок 5 – Первичный (штриховая линия) и вторичный токи (сплошная линия) в обмотках ТТ при глубоком насыщении магнитопровода

Фазы векторов тока определяются в соответствии с предложенным алгоритмом, в то время как их модули даже в условиях насыщения ТТ могут быть определены как действующие значения искажённых сигналов тока. Как показывают численные эксперименты, погрешность определения фаз при реализации дифференциально-фазной защиты СТ может быть уменьшена практически вдвое по сравнению с распространёнными методами цифровой фильтрации, так как последние используют информацию не только на участках точной работы ТТ, но и на участках их работы с большой погрешностью. Так, максимальная погрешность определения фазового сдвига между сигналами по предложенному методу в первом периоде (рисунок 6) составляет около 25 градусов, тогда как при использовании цифровых фильтров Фурье погрешность составляет около 55 градусов. Соответственно, практически вдвое может быть повышена чувствительность ДЗ за счёт снижения уставки по углу блокировки.

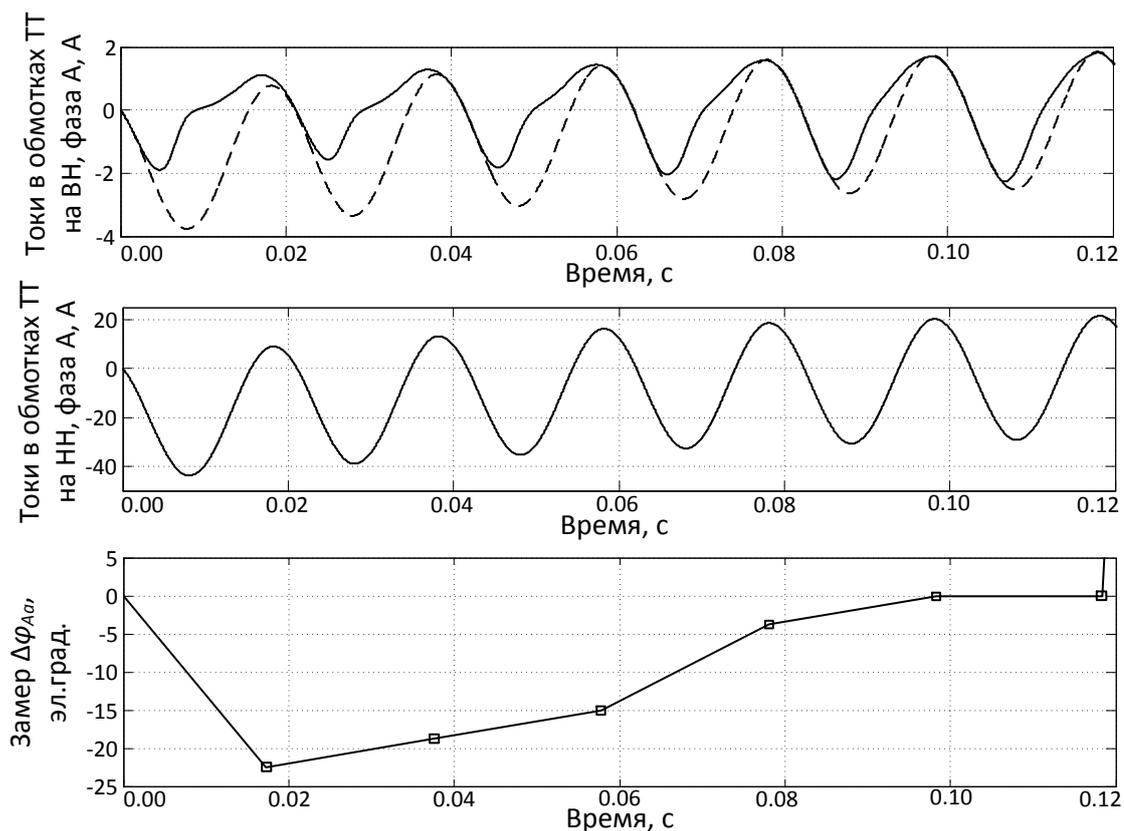


Рисунок 6 – Действие алгоритма определения сдвига по фазе

Далее в работе рассмотрены БТН, возникающие в особых условиях. Явления, присущие последовательному БТН, возникают только в том случае, если нейтраль СТ заземлена, а доключение остальных фаз происходит в момент отсутствия бестоковой паузы. В таком случае токи включения во всех фазах получают смещение по вертикальной оси за счёт появления дополнительной аperiodической составляющей (рисунок 7). В таком случае бестоковые паузы в первичном токе исчезают, однако они присутствуют в дифференциальном токе до момента насыщения одного из ТТ.

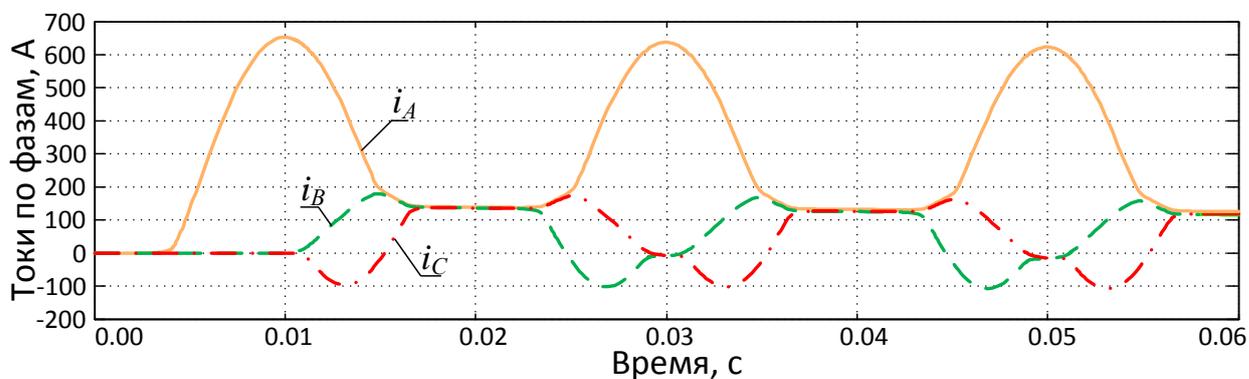


Рисунок 7 – Пример последовательного БТН при доключении фаз B и C

Наличие дополнительной аperiodической составляющей приводит к дополнительному искажению сигналов в цепях ДЗ, не учтённых ранее, поэтому, как показывают опыты, признаки внутренних КЗ проявляются в данном режиме при насыщении ТТ как в первом, так и в последующих периодах, поэтому возможно ложное действие защиты, использующей описанный ранее признак распознавания режима, при последовательном БТН. Так, на рисунке 8 показан пример длительности постоянства знака производной дифференциального тока в фазе A более 10 мс в первом периоде. Кроме того, для чётной полуволны тока в этой же фазе нарушается свойственное БТН соотношение интервалов Δt_1 и Δt_2 . Попытка отстроиться от этих явлений по скорости изменения дифференциального тока приводит к неоправданному усложнению защиты. В силу указанных причин применение ДЗ, использующей указанный ранее признак БТН и внутренних КЗ, нецелесообразно в условиях, когда возможен последовательный БТН.

Восстановление напряжения на СТ, к обмотке НН которого подключена нагрузка, также приводит к возникновению БТН. Особенностью данного вида БТН является наложение тока нагрузки на ток намагничивания, в результате чего токи в первичных цепях носят резко несинусоидальную форму, а бестоковые паузы в них исчезают. Однако бестоковые паузы сохраняются в дифференциальном токе, если токи плеч ДЗ идеально выравнены. В случае работы ТТ с погрешностью или при изменении коэффициента трансформации СТ действием устройства РПН в дифференциальной цепи возникает синусоидальный ток небаланса, приводящий к проявлению признаков внутренних КЗ в рассматриваемом режиме (рисунок 9). В силу указанных причин следует блокировать срабатывание ДЗ, использующей указанный ранее признак БТН и внутренних КЗ, на время, пока не завершится ПП восстановления напряжения на СТ. Так как область применения ранее предложенного эффективного метода распознавания режима оказалась ограничена, необходимо выявить новые и эффективные методы распознавания режима.

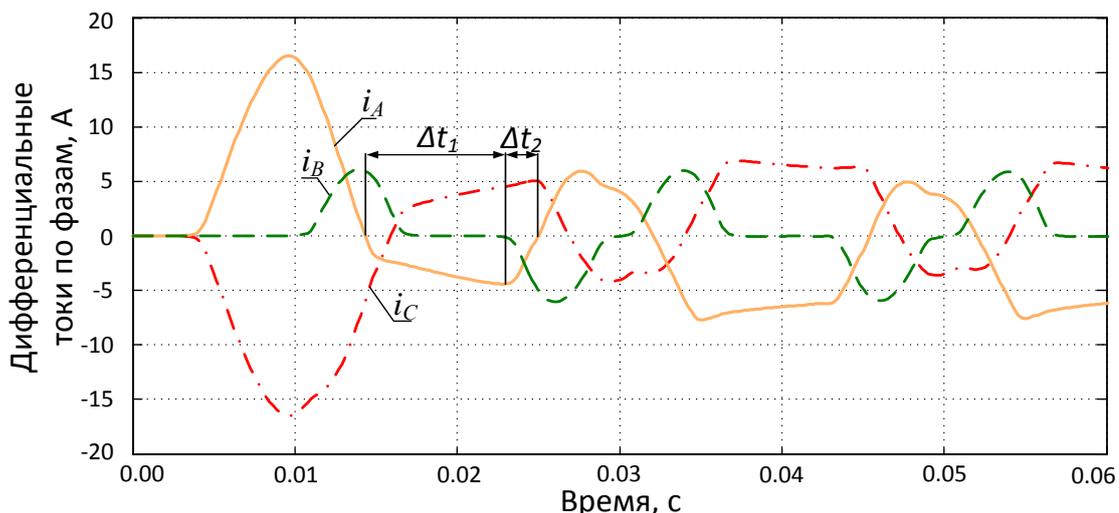


Рисунок 8 – Пример, иллюстрирующий проявление признаков внутренних КЗ при последовательном БТН в условиях насыщения ТТ

Были предложены следующие методы: а) на внутреннее КЗ указывает признак продолжительности возрастания модуля тока более 7,4 мс; б) при внутреннем КЗ значение производной дифференциального тока оказывается больше, чем при БТН, а поскольку её максимальное значение наступает раньше, чем наступает максимальное значение дифференциального тока, то это позволяет идентифицировать режим СТ в течение первых миллисекунд ПП, то есть до насыщения ТТ; в) режим внутреннего КЗ можно идентифицировать по признаку одновременного возрастания дифференциального и тормозного токов в первые миллисекунды ПП, при этом во избежание ложного отключения в режиме БТН следует в реальном времени контролировать режим работы СТ, позволяя защите действовать только в нормальных нагрузочных режимах, когда БТН невозможен; г) целесообразным оказывается адаптация уставки дифференциальной отсечки к текущему режиму работы СТ, который можно отследить по положению выключателей, связывающих СТ в энергосистемой или нагрузкой, в этом случае при фиксации неисправности блок-контактов выключателей уставка отсечки без выдержки времени изменяется до значения, исключающего её неправильную работу при наиболее неблагоприятном положении выключателя.

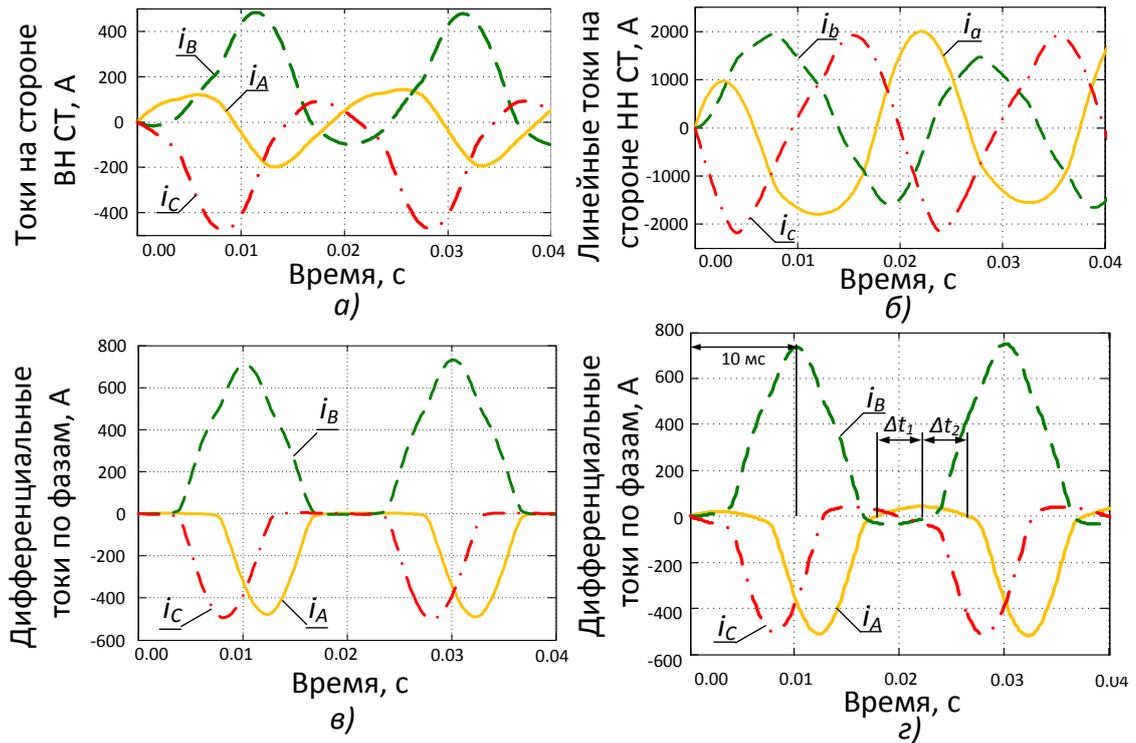


Рисунок 9 – Осциллограммы БТН нагруженного СТ: а) токи на стороне ВН СТ; б) токи в нагрузке на стороне НН СТ; в) дифференциальные токи при отсутствии тока небаланса; г) дифференциальные токи при наличии тока небаланса

Для выявления витковых замыканий при перевозбуждении следует использовать время-импульсный принцип действия. Чтобы избежать ложного действия ДЗ, защита вводится в работу только в условиях отсутствия БТН и токов со стороны нагрузки, что достаточно просто обеспечивается алгоритмически. Получая информацию с измерительного трансформатора напряжения (ТН), защита рассчитывает текущее значение кратности перевозбуждения трансформатора, после чего сравнивает рассчитанное свойственное данной кратности значение длительности бестоковой паузы с замеренным её значением. При этом, поскольку для выполнения ДЗ привлекается информация о напряжении на защищаемом СТ, необходим контроль исправности цепей измерительного ТН. В случае неисправности цепей напряжения уставка по бестоковой паузе устанавливается равной значению, соответствующему такой кратности перевозбуждения, при которой СТ должен быть немедленно отключен.

В четвёртой главе показана техническая реализуемость защитных алгоритмов, представленных в диссертации.

В приложениях подробно рассмотрены вопросы математического моделирования СТ, приведены результаты численных экспериментов, показывающих эффективность предложенных алгоритмов защиты, рассмотрены особенности их программной реализации на базе микропроцессорного устройства, приведены копии справок о внедрении.

В заключении приведены основные результаты теоретических исследований и разработок автора, направленные на повышение устойчивости функционирования ДЗ трансформатора, к которым относится следующее.

1. Разработаны математические модели СТ, позволяющие достоверно исследовать их работу в различных режимах. Рассмотрены отличия БТН в группах однофазных СТ, а также в трёхфазных СТ. Для исследования ПП во вторичных цепях использованы математические модели групп ТТ. Модели СТ и ТТ интегрированы в программно-испытательный комплекс, позволяющий в интерактивном режиме корректировать параметры используемых моделей, а также в наглядной и удобной форме получать результаты моделирования.

2. Предложен алгоритм сравнения фаз токов плеч ДЗ трансформатора, использующий интервалы точной работы ТТ. Применение данного метода позволяет повысить точность определения сдвига по фазе практически вдвое по сравнению с методами, основанными на цифровой фильтрации.

3. Определена область эффективного использования ранее предложенного алгоритма распознавания БТН и внутреннего КЗ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального тока в ПП. Установлено, что в режиме последовательного БТН в дифференциальной цепи появляются признаки внутреннего КЗ. Использование этого алгоритма для защиты СТ, в которых возможен последовательный БТН, нецелесообразно.

4. Признаки внутренних КЗ появляются в дифференциальном токе при восстановлении напряжения из-за наличия тока небаланса, обусловленного прохождением через СТ сквозных токов нагрузки. Поэтому при наличии токов нагрузки целесообразна блокировка срабатывания ДЗ по ранее предложенным признакам.

5. Для повышения устойчивости функционирования ДЗ трансформаторов предложены новые алгоритмы выявления внутренних КЗ в первые миллисекунды ПП.

6. Предложен способ выявления витковых замыканий в режиме перевозбуждения СТ.

7. Предложен способ повышения чувствительности дифференциальной отсечки за счёт адаптации её уставки к текущему режиму СТ.

8. Все предложенные способы повышения устойчивости функционирования ДЗ трансформатора целесообразно использовать совместно с традиционными защитными алгоритмами, которые используются ведущими фирмами-производителями средств ДЗ трансформаторов. Такой подход позволяет использовать преимущества каждого подхода и компенсировать недостатки, проявляющиеся при их раздельном использовании.

9. Доказана техническая реализуемость предложенных алгоритмов защиты на базе микропроцессорного терминала.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Литвинов И. И.** Усовершенствованный алгоритм сравнения фаз для дифференциальной защиты силового трансформатора = The improved algorithm comparison phase for differential protection of power transformer / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Электрические станции. – 2017. – № 2. – С. 54-58 (Переводная статья: **Litvinov I. I.** Improved algorithm for phase comparison for differential protection of a power transformer / I. I. Litvinov, V. E. Glazyrin // Power Technology and Engineering. - 2017. - Vol. 51, iss. 2. - P. 251–255. - DOI: 10.1007/s10749-017-0819-7).

2. **Литвинов И. И.** Составление математической модели силового трансформатора при его включении под напряжение и определение численных параметров модели / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2017. – № 1. – С.18-24.

3. **Литвинов И. И.** Анализ осциллограммы дифференциального тока при последовательном броске тока намагничивания силового трансформатора / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Новое в российской электроэнергетике :

науч.-техн. электрон. журн. - 2017. – № 5. – С. 17–27.

Публикации в изданиях, входящих в базу данных Web of Science:

4. Глазырин В. Е. Признаки аварийных режимов в цепях дифференциальных защит силовых трансформаторов = Semne ale regimurilor de avarie în circuitele protecției diferențiale ale transformatoarelor de putere / В. Е. Глазырин, **И. И. Литвинов** // Проблемы региональной энергетики = Problems of regional energy. - 2017. – № 1(33). – С. 24-31.

5. **Litvinov I. I.** Characteristic features of internal and external faults for use in differential protection / I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, V. E. Glazirin // Actual issues of mechanical engineering (AIME 2017) : proc. of the intern. conf., Tomsk, 27–29 July 2017. – Atlantis Press, 2017. – P. 425-432. - (Advances in Engineering Research ; vol.133). - ISBN 978-94-6252-406-4. - DOI: 10.2991/aime-17.2017.69.

Публикации в российских изданиях:

6. **Литвинов И. И.** Способ фиксации перехода короткого замыкания вне зоны действия дифференциальной защиты силового трансформатора во внутреннее повреждение / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Фундаментальные и прикладные исследования : сб. науч. трудов - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. - С. 106-108. - ISBN 978-5-7782-3103-0.

7. Глазырин В. Е. Уточнённый метод расчёта тока небаланса в дифференциальной защите силового трансформатора / В. Е. Глазырин, **И. И. Литвинов** // Фундаментальные и прикладные исследования : сб. науч. трудов - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. - С.103-106. - ISBN 978-5-7782-3103-0.

8. **Litvinov I. I.** Protection against turn-to-turn faults during overexcitation of a power transformer / I. I. Litvinov, E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Glazirin // Science in Progress : тез. Всерос. науч.-практ. конф. магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 122-123. - 32 copy - ISBN 978-5-7782-3094-1.

9. **Litvinov I. I.** Principles of mathematical modeling of magnetizing currents in power transformers banks / I. I. Litvinov, E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Glazirin // Aspire to science : тез. гор. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С.68-69. - 160 copy - ISBN 978-5-7782-2942-6.

10. **Litvinov I. I.** Improved protective algorithms against turn-to-turn faults in

power transformer windings / I. I. Litvinov ; research adviser V. E. Glazyrin ; language adviser E. T. Kitova // Science in Progress : тез. Всерос. науч.-практ. конф. магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 120-121. - ISBN 978-5-7782-3094-1.

11. **Litvinov I. I.** Detailed calculation of unbalance current in power transformer differential protection / I. I. Litvinov, E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Glazyrin // Science in Progress : тез. Всерос. науч.-практ. конф. магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 118-120. - 32 copy - ISBN 978-5-7782-3094-1.

Патентные документы:

12. Пат. РФ 2653705, МПК H02H 7/045. Способ дифференциальной отсечки силового трансформатора / **И. И. Литвинов**; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – № 2017101898; заявл. 20.01.2017 ; опубл. 14.05.18, Бюл. № 14. – 12 с.

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. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 983.
Подписано в печать 02.07.2018 г.