

На правах рукописи

АТНИШКИН АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

**АДАПТИВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары 2019

Работа выполнена на кафедре теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: **Лямец Юрий Яковлевич**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лачугин Владимир Федорович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике Акционерного общества «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского»

Наумов Владимир Александрович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора – технический директор Общества с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «ЭКРА»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева»

Защита диссертации состоится « 19 » апреля 2019 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» по адресу г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, учебный корпус 3, зал заседаний Ученого совета, к. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова по адресу: 428034, Чувашская Республика, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан « ____ » февраля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.301.02
к.т.н., доцент

Серебрянников А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Изначально значимая задача совершенствования защит трансформаторов и автотрансформаторов становится еще более актуальной в условиях старения электроэнергетического оборудования. Большое разнообразие возможных режимов работы трансформатора, а также высокие требования, предъявляемые к распознающей способности релейной защиты, делают данную задачу сложной и многогранной.

Большой вклад в развитие теории цепей с магнитными сердечниками, изучение режимов работы и разработку защит трансформаторов внесен новочеркасской школой релейной защиты (ЮРГТУ-НПИ; А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, С.Л. Кужеков). Работы в этой области велись в Чебоксарах (ЧЭАЗ, ВНИИР, ЧГУ; А.М. Дмитренко, М.Г. Линт), созданные статические реле типа ДЗТ заменили электромеханические аналоги. Дальнейший этап развития защит трансформаторов начинается с приходом в релейную защиту микропроцессорной техники. Информационные возможности терминалов определили новый технический уровень защит. Развитию и интеллектуализации систем защиты способствовали труды отечественных ученых: В.А. Шуина (ИГЭУ), В.Ф. Лачугина (ЭНИН), Р.А. Вайнштейна (ТПУ), В.К. Ванина (СПбПУ), А.Г. Долгополова (МЭИ). Анализу алгоритмов и разработке усовершенствованных микропроцессорных защит трансформатора посвящены исследования отечественных компаний-производителей микропроцессорной релейной защиты (Релематика, ЭКРА, Бреслер). Среди работ зарубежных специалистов выделяются труды Z. Gajic (ABB), В. Kasztenny (General Electric), посвященные различным аспектам защиты трансформатора.

Эксплуатация трансформаторов после превышения расчетного срока службы сопряжена с повышенной вероятностью возникновения внутренних повреждений, связанных с нарушением изоляции. Наиболее частым видом повреждения являются витковые замыкания. Как известно, дифференциальная защита обладает ограниченной чувствительностью к витковым замыканиям, особенно на ранних этапах их развития. Остается медленнодействующая газовая защита, которая не избавляет от потребности в защите, чувствительной к данным повреждениям.

Важнейшей остаётся задача обеспечения надежного функционирования защиты трансформатора в характерных для него переходных режимах бросков намагничивающего тока (БНТ). При этом важно сохранить максимальное быстродействие защиты при внутренних коротких замыканиях (КЗ). Наряду с получившимися распространение способами отстройки на основе оценки гармонического состава дифференциального тока и наличия бестоковых пауз в зарубежных работах появляются принципиально новые, например, с использованием аппарата математической морфологии.

Особое внимание обращает на себя проблема обеспечения правильной работы быстродействующих защит в условиях насыщения измерительных трансформаторов тока (ТТ) класса Р с магнитопроводом без немагнитного зазора. В режимах глубокого насыщения ТТ снижается быстродействие защиты, появляется вероятность неселективного срабатывания при внешних КЗ. Среди основных направлений по исключению негативного влияния насыщения ТТ на релейную защиту выделяются: выбор ТТ с уче-

том переходных режимов, использование ТТ с немагнитным зазором, применение детекторов насыщения и работа по участку правильной трансформации, восстановление нелинейно искаженного тока. На текущий момент универсального решения, способного избавить релейную защиту от проблемы насыщения ТТ, не существует.

Вне всяких сомнений, разработка защиты трансформатора, обладающей повышенной чувствительностью к витковым замыканиям в обмотках, надежной отстройкой от аномальных нелинейных режимов, не снижающей быстродействие при внутренних повреждениях, а также правильно функционирующая при насыщении ТТ, является актуальной научно-технической задачей. Диссертация посвящена поиску путей ее решения.

В ходе исследований автор обращался за консультациями к кандидатам техн. наук А. В. Шевелеву и А. А. Белянину (ООО «Релематика»).

Цель работы заключается в повышении технического уровня цифровой релейной защиты трансформатора путем разработки адаптивных модификаций алгоритмов её работы.

Основные задачи исследования.

1. Обзор мировых тенденций в развитии защиты трансформаторов.
2. Применение метода локализации альтернативных режимов к защите трансформаторов.
3. Разработка способа адаптивного распознавания БНТ трансформатора с применением метода алгоритмических моделей.
4. Разработка адаптивных модификаций алгоритма дифференциальной защиты, чувствительных к витковым замыканиям в обмотках трансформатора.
5. Разработка модулей сегментации и коррекции вторичного тока для компенсации негативного влияния насыщенного ТТ на релейную защиту.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием положений теоретических основ электротехники, теоретических основ релейной защиты, методов математического моделирования. Моделирование процессов производилось в среде имитационного моделирования Simulink. Разработка программных модулей велась в среде программирования MATLAB.

Достоверность полученных результатов работы обеспечивается использованием обоснованных методов исследования, сопоставлением теоретических положений с результатами испытаний, обсуждением основных результатов работы со специалистами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Развитие метода локализации альтернативных режимов применительно к разработке защиты трансформатора.
2. Способы адаптивной защиты трансформатора с использованием алгоритмической модели.
3. Адаптивные модификации замера дифференциальной защиты трансформатора.
4. Способы сегментации и восстановления тока при насыщении ТТ.

Научная новизна работы:

1. Метод локализации альтернативных режимов получил развитие; представлены модификации алгоритмических моделей в зависимости от способа наблюдения

объекта, предложен общий подход к формированию замера защиты с использованием алгоритмической модели.

2. Разработаны адаптивные алгоритмы формирования замеров защиты с применением алгоритмической модели трансформатора, обеспечивающие быстродействующую отстройку защиты при БНТ и повышенную распознающую способность по отношению к режимам витковых замыканий в обмотках.

3. Предложены модифицированные замеры для дифференциальной защиты, обладающие повышенной распознающей способностью по отношению к режимам витковых замыканий в обмотках.

4. Разработаны способы сегментации электрической величины с использованием опорного сигнала и фильтра постоянной составляющей, позволяющие выделить участки правильной трансформации тока КЗ.

5. Разработаны способы коррекции вторичного тока при насыщении ТТ с использованием информации о токе на участках насыщения и без нее, сохраняющие работоспособность при остаточной индукции в сердечнике ТТ и имеющие высокое быстродействие.

Практическая значимость работы.

1. Разработанная алгоритмическая модель двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток Y_0/Δ как структурный элемент релейной защиты позволяет повысить ее технический уровень.

2. Адаптивный способ защиты трансформатора с использованием алгоритмической модели повышает надежность отстройки от БНТ и быстродействие, обеспечивает повышенную чувствительность к внутренним повреждениям.

3. Предложенные адаптивные замеры для дифференциальной защиты позволяют повысить чувствительность защиты к замыканиям малого числа витков в обмотках трансформатора.

4. Корректор вторичного тока обеспечивает правильную работу релейной защиты в режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательской и опытно-конструкторской работе ООО «Релематика» и приняты к внедрению в терминале релейной защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512».

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и республиканских конференциях: 1-я международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» (г. Чебоксары, 2017 г.), 6-я международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2015» (г. Иваново, 2015 г.), 7-я международная молодёжная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016» (г. Казань, 2016 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (г. Чебоксары, 2015 г., 2017 г.), всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электро-

энергетике» (г. Чебоксары, 2016 г.), республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов «Электротехника, электроэнергетика, электромеханика» (г. Чебоксары, 2014 г., 2016 г., 2017 г.), всероссийская 50-я научная студенческая конференция (г. Чебоксары, 2016 г.), региональный фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Учёный» (г. Чебоксары, 2013 г., 2014 г.).

Публикации. Содержание диссертационной работы нашло отражение в 20 научных работах, среди которых четыре статьи в изданиях из перечня ВАК и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования. Разработки защищены четырьмя патентами на изобретения.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (126 наименований) и приложения. Общий объём составляет 137 страниц, в том числе основного текста 118 страниц, 60 рисунков, четыре таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена цель работы, обоснована актуальность темы работы, отражено состояние проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, представлена структура диссертации.

Первая глава посвящена развитию метода адаптивного распознавания аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов. Приведены необходимый понятийный аппарат и описание метода. Дана классификация по способу наблюдения и общая характеристика алгоритмических моделей, выполняющих роль инструмента локализации. Предложены общие принципы формирования двухкоординатного замера для защиты объекта.

Релейная защита – наука о распознавании аварийных режимов наблюдаемого энергообъекта. Задачи распознавания повреждений рассматриваются с позиций противостояния контролируемых (α -) и альтернативных (β -) режимов защищаемого объекта. Подмножества аварийных и альтернативных режимов G_α и G_β защищаемого объекта преобразуются релейной защитой и отображаются в виде областей $S_\alpha = F(G_\alpha)$ и $S_\beta = F(G_\beta)$ в пространстве замера \mathbf{z} . Условие отстройки от альтернативных режимов, обеспечивающее селективность релейной защиты, имеет вид $\mathbf{z} \notin S_\beta$, а требование селективности, как известно, является первоочередным. О значении области S_β говорит ещё и то обстоятельство, что всё пространство замеров, за исключением S_β , свободно для распознавания аварийных режимов.

Принадлежность отображения \mathbf{z}_α аварийного режима \mathbf{x}_α защищаемого объекта области альтернативных режимов S_β , т.е. $\mathbf{z}_\alpha \in S_\beta$, означает неспособность защиты распознать данный режим \mathbf{x}_α . Неизбежное присутствие области S_β в пространстве замеров негативно сказывается на чувствительности защиты. Средством ослабления данного влияния является сжатие области S_β , что является прерогативой оператора F . Выполняемую

им функцию можно охарактеризовать как локализацию подмножества G_β альтернативных режимов. Оператор F становится инструментом локализации, если реализует функцию алгоритмической модели защищаемого объекта в его неповреждённом состоянии. Алгоритмическая модель относится исключительно к объекту и её задача – преобразовать наблюдаемые величины в замеры релейной защиты. Алгоритмическая модель неповреждённого объекта адекватна ему в альтернативных режимах и неадекватна в его аварийных режимах. В этом заключаются физические основы локализации альтернативных режимов, разграничения режимов разного типа и, как следствие, распознавания контролируемых режимов.

Алгоритмическая модель активируется наблюдаемыми величинами. Введено понятие о полном и неполном наблюдении энергообъекта по отношению к его алгоритмической модели, при этом полное наблюдение разделено на подклассы максимального, избыточного и достаточного наблюдения. Иллюстрацией служит рисунок 1, где \mathbf{i} и \mathbf{u} – n -мерные векторы токов и напряжений, n – число соединительных проводов – выводов объекта в одном месте, s и r – символы мест соединения объекта с электрической системой, x и y – символы ненаблюдаемых мест подключения элементов с неизвестными параметрами, l – символ ненаблюдаемого места соединения объекта с системой. Полное наблюдение, т.е. наблюдение всех мест соединения (рисунок 1 а, б, в), создаёт возможность выполнения защиты с абсолютной селективностью. При неполном наблюдении (рисунок 1 г) защита возможна только с относительной селективностью.

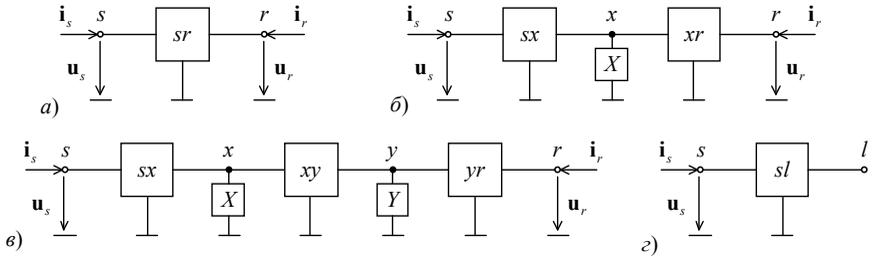


Рисунок 1 – Алгоритмические модели с различными типами наблюдения:

а – максимальным, б – избыточным, в – достаточным, г – неполном

Максимальное наблюдение подразумевает, что во всех местах s и r регистрируются и токи, и напряжения, а модель объекта не содержит неопределённых элементов. Пример активирования источниками напряжения \mathbf{u}_s и \mathbf{u}_r показан на рисунке 2. Наблюдаемые токи \mathbf{i}_s и \mathbf{i}_r могут быть сопоставлены (операция обозначена двунаправленной стрелкой) с реакцией модели на воздействие напряжений – токами $\hat{\mathbf{i}}_s$ и $\hat{\mathbf{i}}_r$. Следует отметить, что разности $\mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s$, $\mathbf{i}_r - \hat{\mathbf{i}}_r$ – это недавно обнаруженные локальные компоненты. Если объект не повреждён, то алгоритмическая модель ему адекватна, и сравниваемые векторы близки друг другу, в противном случае наблюдается расхождение.

При избыточном наблюдении сопоставлению подлежат модельные напряжения на неопределенном элементе X , определенные по векторам \mathbf{i}_s , \mathbf{u}_s в левой части и \mathbf{i}_r , \mathbf{u}_r в правой. Дополнением служит априорная информация о закономерностях работы этого элемента, устанавливающая взаимосвязь векторов \mathbf{i}_x и \mathbf{u}_x .

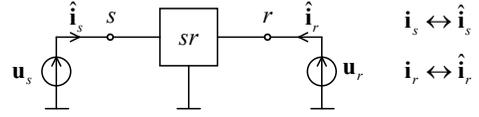


Рисунок 2 – Активирование алгоритмической модели с максимальным наблюдением

В случае достаточного наблюдения проверка адекватности модели защищаемому объекту опять же возможна лишь на основе априорной информации об элементах X и Y . При неполном наблюдении недостает информации из ненаблюдаемого места соединения энергообъекта с электрической системой. Наблюдаемые величины \mathbf{i}_s , \mathbf{u}_s преобразуются в ток и напряжение \mathbf{i}_l , \mathbf{u}_l в ненаблюдаемом месте l , но ещё предстоит найти дополнительную связь между ними.

Общий подход к формированию замеров возможен при максимальном и при избыточном наблюдении, когда реакции алгоритмических моделей на альтернативные режимы энергообъекта либо близки к наблюдаемым процессам, либо близки друг к другу. Пусть $\mathbf{v}_1(t)$ и $\mathbf{v}_2(t)$ – обозначение сравниваемых величин, $v_k(t)$, $k = \overline{1, n}$, – k -ый элемент n -мерного вектора $\mathbf{v}(t)$. Сравнение совершается на окне наблюдения $\xi \in (t_n, t)$. Для сопоставления функций $v_{1k}(t)$ и $v_{2k}(t)$ формируется двухкоординатный замер

$$\mathbf{z}_k(t) = \left[\hat{\lambda}_k(t), \sigma_k(t) \right]^T, \quad (1)$$

где $\hat{\lambda}_k(t)$ – оценка множителя $\lambda_k(t)$ в целевой функции, составленной по методу наименьших квадратов

$$\sigma_k^2(t) = \int_{t_n}^t \left(v_{1k}(\xi) - \lambda(t) v_{2k}(\xi) \right)^2 d\xi \rightarrow \min, \quad (2)$$

откуда

$$\hat{\lambda}_k(t) = \frac{\int_{t_n}^t v_{1k}(\xi) v_{2k}(\xi) d\xi}{\int_{t_n}^t v_{2k}^2(\xi) d\xi}, \quad (3)$$

а $\sigma_k(t)$ – невязка функций $v_{1k}(\xi)$ и $v_{2k}(\xi)$,

$$\sigma_k(t) = \frac{1}{t - t_n} \int_{t_n}^t \left(v_{1k}(\xi) - \hat{\lambda}_k(t) v_{2k}(\xi) \right) d\xi. \quad (4)$$

При абсолютном соответствии алгоритмической модели объекту создаются идеальные условия для локализации альтернативных режимов. Годографы всех замеров, производимых в этих режимах, отобразятся каждый на своей плоскости \mathbf{z}_k в единственную точку с координатами $\hat{\lambda}_k(t) \equiv 1$, $\sigma_k(t) \equiv 0$.

Во второй главе рассмотрено применение метода локализации альтернативных режимов для защиты трансформатора. Разработана алгоритмическая модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$ в базе мгновенных величин. Предложены замеры для защиты трансформатора с использованием его алгоритмической модели. Исследована их способность различать режимы внутренних повреждений и БНТ, что традиционно составляет проблему, проверена устойчивость функционирования при внешних КЗ.

Преимущество защиты с использованием алгоритмической модели состоит в способности формировать величины, недоступные наблюдению. В их числе пара величин, характеризующих состояние магнитопровода с нелинейной характеристикой намагничивания. Это приращение потокосцепления и намагничивающего тока трансформатора. Также предоставляется возможность использовать условие адекватности алгоритмической модели объекту как индикатора внутреннего повреждения.

Описание алгоритмической модели трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$ (рисунок 3) состоит из трех частей:

1) из описания первичных обмоток, приспособленного к определению напряжения намагничивания

$$u_{\mu v1} = \frac{d\Psi_{v1}}{dt} = u_{v1} - R_1 i_{v1} - L_1 \frac{di_{v1}}{dt}, \quad v = A, B, C, \quad (5)$$

где Ψ_{v1} – потокосцепление, R_1 и L_1 – сопротивление и индуктивность рассеяния каждой обмотки;

2) из описания вторичных обмоток, позволяющего определить токи в каждой обмотке

$$R_2 i_{v2} + L_2 \frac{di_{v2}}{dt} = \frac{1}{3} \left[\sum_{v=A,B,C} u_{\mu v, v-1, 2} + R_2 (i_{v3} - i_{v-1, 3}) + L_2 \frac{d(i_{v3} - i_{v-1, 3})}{dt} \right]; \quad (6)$$

3) из описания магнитопровода с целью определения тока намагничивания

$$i_{\mu v1} = i_{v1} - \frac{1}{k_T} i_{v2}, \quad (7)$$

где k_T – коэффициент трансформации.

Альтернативными по отношению к замыканиям в обмотках трансформатора являются режимы двух типов: первый – БНТ, второй – внешние КЗ. Задача распознавания

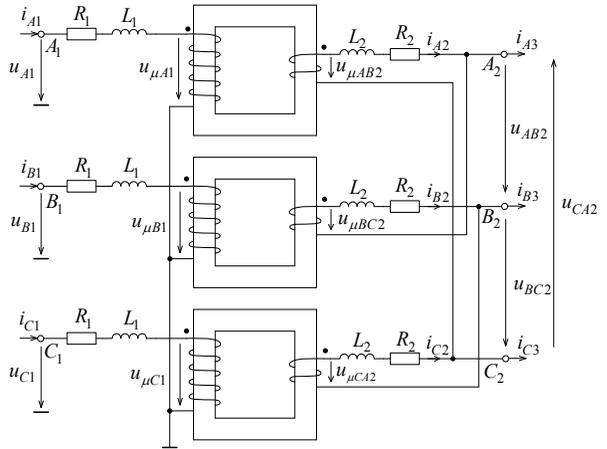


Рисунок 3 – Алгоритмическая модель двухобмоточного трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$

внутренних КЗ рассмотрена на примере имитационной модели трансформатора ТДН-63000/110 с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$. Наблюдаемые величины – токи и напряжения первичной обмотки i_{v1} , u_{v1} и токи на выводах вторичной обмотки i_{v3} .

Рассмотрены три варианта решения задачи, различающиеся формой учета ветви намагничивания:

1. Без привлечения априорной информации о ветви намагничивания. В таком случае ветвь намагничивания интерпретируется как неопределённый элемент алгоритмической модели, следовательно, это случай достаточного наблюдения. Вектор замера имеет вид

$$z_v(t) = [\Delta\Psi_{v1}(t), \Delta i_{\mu v1}(t)]^T. \quad (8)$$

Установлено, что замер (8) способствует разграничению витковых замыканий и БНТ. Модификацией замера является функция времени, имеющая смысл дифференциальной индуктивности ветви намагничивания фазы v трансформатора, $\lambda_v(t) = d\Psi_{v1}/di_{\mu v1}$. Хорошей наглядностью отличается трёхмерное отображение процессов в координатах $d\Psi_{v1}/dt$, $di_{\mu v1}/dt$, t . На рисунке 4 даны иллюстрации преобразования наблюдаемых величин в замер (8) при БНТ и при витковом замыкании. Отображение БНТ носит прерывистый характер с протяжёнными участками насыщения, а отображение замыкания – гладкий и спиралевидный.

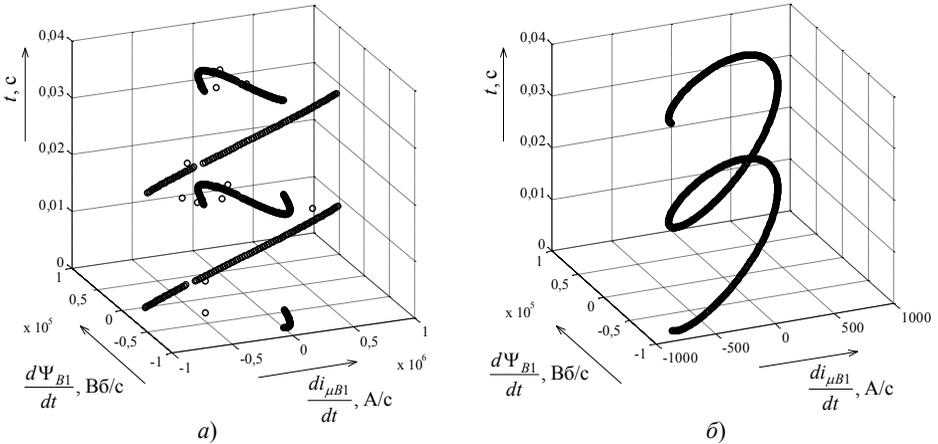


Рисунок 4 – Отображение процессов в трёхмерном пространстве:

a – БНТ, b – замыкание в одном витке

2. С моделью ветви намагничивания в области насыщения. Индуктивность L_μ ветви намагничивания неизвестна. Наблюдение сохраняет свой характер, оставаясь достаточным. Замер сформирован исходя из сопоставления пропорциональных (близких) величин. На основании равенства (5) имеем для приращений

$$L_{\mu l} \Delta i_{\mu v1}(t) = \Delta\Psi_{v1}(t),$$

и соответствующий замер на основе (1)-(4)

$$\mathbf{z}_v(t) = [\hat{L}_{\mu 1}(t), \sigma(t)]^T.$$

3. С задаваемой индуктивностью L_μ , когда приращение тока намагничивания определяется как

$$\Delta i_{\mu v 1}(t) = \frac{1}{L_{\mu 1}} \int_{t-\Delta t}^t u_{\mu v 1}(\xi) d\xi,$$

и наблюдение становится избыточным, так как имитационная модель приобретает способность определять приращения токов в треугольнике из соотношения (7) без обращения к контурному уравнению (6):

$$\Delta i_{v 2}^{(1)}(t) = k_T (\Delta i_{v 1}(t) - \Delta i_{\mu v 1}(t)),$$

где верхний индекс говорит о том, что преобразования совершаются без привлечения вторичных наблюдаемых токов $i_{v 3}$. Приращение выходного тока определяется алгоритмической моделью

$$\Delta i_{v 3}^{(1)}(t) = \Delta i_{v 2}^{(1)}(t) - \Delta i_{v-1, 2}^{(1)}(t),$$

а замеры $\mathbf{z}_v^{(1)}(t)$ формируются из пар приращений наблюдаемого тока $\Delta i_{v 3}(t)$ и тока модели $\Delta i_{v 3}^{(1)}(t)$ по алгоритму (3), (4).

Отображения замеров $\mathbf{z}_v^{(1)}(t)$ в трехмерном пространстве приведены на рисунке 5. Обращают на себя внимание качественные различия в ходе годографов при внешнем (рисунок 5 а) и витковом замыкании (рисунок 5 б). Первые имеют плоскую форму, располагаясь по преимуществу в плоскости $\hat{\lambda} = 1$, вторые – винтообразные. Алгоритмическая модель, составленная для неповрежденного объекта, оказывается неадекватной поврежденному объекту, что и проявляется в поведении годографа на плоскости замера.

Использование алгоритмической модели в защите трансформатора позволяет определить БНТ по параметрам, непосредственно характеризующим состояние магнитопровода, а также выявлять витковые замыкания по признаку нарушения локализации замера. Отстройка обеспечивается при обоих типах БНТ. Распространенные способы блокировки защиты при БНТ на основе содержания второй гармоники и отслеживания бестоковых пауз в дифференциальном токе снижают быстродействие защиты при внутренних повреждениях. Срабатывание происходит, как правило, не ранее чем через 25 мс с момента возникновения КЗ. Разработанные алгоритмы повышают надежность защиты, позволяют снизить время срабатывания защиты в пределе до размера текущего окна, на котором производится решение дифференциального уравнения (2 мс). Разумеется, данные алгоритмы предполагают измерение напряжений с одной стороны трансформатора.

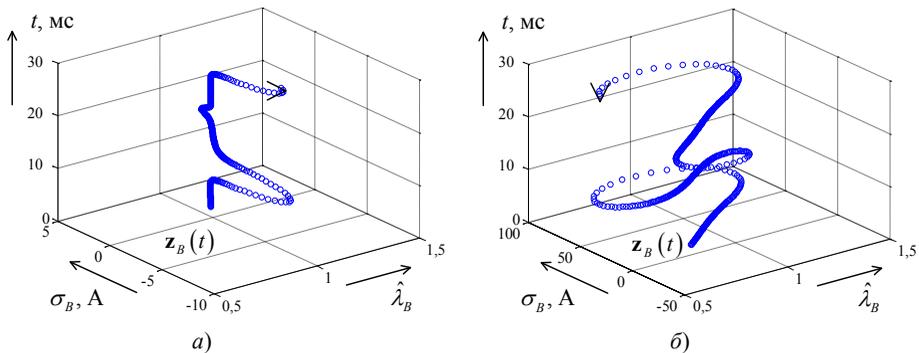


Рисунок 5 – Годографы замеров:

a – внешнее КЗ, *б* – замыкание в одном витке

В третьей главе представлены адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты, обладающие повышенной чувствительностью к витковым замыканиям. Путем имитационного моделирования исследована их распознающая способность при замыканиях в обмотках трансформатора и автотрансформатора. Проведен сравнительный анализ предложенных алгоритмов с иными алгоритмами дифференциальной защиты.

Основными причинами внутренних повреждений трансформаторного оборудования являются старение изоляции и недостаточная электродинамическая стойкость при внешних КЗ. Значительная доля повреждений приходится на витковые замыкания в обмотках, по статистическим данным на них приходится 70–80% внутренних повреждений в баке и до 45% от числа всех повреждений.

Распознавание виткового замыкания на ранней стадии развития снижает тяжесть последствий от его развития. В своё время использование для защиты трансформатора электронных реле типа ДЗТ-21 вместо электромеханических позволило реагировать на витковые замыкания в обмотках, правда, если замкнуто достаточно большое число витков. Микропроцессорные терминалы дифференциальной защиты имеют схожие характеристики срабатывания, а следовательно, и чувствительность к данным замыканиям осталась примерно на прежнем уровне. Уровень нераспознаваемости сохраняется существенным и составляет до 5-10% от общего числа витков обмотки. Для повышения чувствительности к витковым замыканиям современные зарубежные микропроцессорные устройства защит трансформаторов компаний ABB, SEL содержат дифференциальную защиту по токам обратной последовательности дополнительно к традиционной дифференциальной токовой защите. Однако исследования и практика показали, что причиной несрабатывания такой защиты может стать недостаточный уровень тока обратной последовательности на одной из сторон трансформатора при витковом замыкании. Подобное распределение токов обратной последовательности объясняется различием соответствующих эквивалентных сопротивлений по разным сторонам трансформатора.

Алгоритмы сравнения токов являются основными в дифференциальной защите. С целью повышения чувствительности к витковым замыканиям разработаны адаптивные алгоритмы, в которых центральное место занимает локализация того подмножества

наблюдаемых режимов, которое альтернативно режимам повреждения защищаемого объекта. Локализация осуществляется двухкоординатными замерами; каждый замер отображается на соответствующей плоскости. В наиболее простом алгоритме используются оценки адаптивных множителей одного из сравниваемых токов, в том числе при отсчетах с отклоняющимся аргументом, а также невязка результата оптимизационной процедуры.

Пусть $i_1(k)$ и $i_2(k)$ – отсчеты сравниваемых токов защищаемого объекта, $k = \text{ent}(t/\Delta t)$ – дискретное время, Δt – интервал дискретизации. В основе **алгоритма адаптивного масштабирования** лежит процедура оптимизационной цифровой обработки сравниваемых токов, например, по методу наименьших квадратов с одним адаптивным коэффициентом a , обеспечивающая высокое быстродействие дифференциальной защиты на текущем окне $d = k - k_x, \bar{k}$

$$\sigma^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k (i_q(d) - a i_p(d))^2 \rightarrow \min_a,$$

где $k_x + 1$ – ширина окна обработки, a – варьируемый параметр, $p = 1, 2 \neq q$.

Ввод адаптивного коэффициента позволяет учитывать небаланс дифференциального тока, вызванный различием по уровню токов плеч защиты. Небаланс в общем случае может быть обусловлен влиянием устройства РПН, намагничивающим током трансформатора, погрешностью ТТ, цифровым выравниванием токов плеч в терминале защиты. Режим виткового замыкания также характеризуется изменением фазовых соотношений сравниваемых защитой токов. Локализация области альтернативных режимов осуществляется на плоскости замера. Двухкоординатный замер формируется из оценки \hat{a} величины адаптивного коэффициента a и полученной невязки $\hat{\sigma}$

$$\mathbf{z}(k) = [\hat{a}(k), \hat{\sigma}(k)]^T. \quad (9)$$

В идеальном случае при совпадении токов $i_p(k)$ и $i_q(k)$ замер (9) отобразится в точку $\mathbf{z}_0 = [1, 0]^T$.

Алгоритм с адаптивным преобразованием тока. Масштабирование – простейшее преобразование наблюдаемого тока. Более общей процедурой является преобразование

$$i_r(k) = a_0 i_p(k) + a_r i_p(k+r),$$

где r – целое алгебраическое число. Параметры адаптации a_0 и a_r , они же коэффициенты нерекурсивного фильтра, определяются, как и раньше, по критерию наименьших квадратов

$$\sigma^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k (i_q(d) - i_r(d))^2 \rightarrow \min_{a_0, a_r}.$$

Данный алгоритм предоставляет возможность сформировать двухкоординатные замеры в различных вариантах; один из которых

$$\mathbf{a} = [a_r(k), a_0(k)]^T, \quad (10)$$

начиная с $r = \pm 1$. В идеальном случае при совпадении токов $i_p(k)$ и $i_q(k)$ замер (10) отобразится в точке $\mathbf{a}_0 = [0, 1]^T$.

Процедура обучения релейной защиты заключается в отображении подмножества однотипных режимов защищаемого объекта на плоскостях замеров и определении границ областей отображения. Процедура отображения альтернативных режимов на каждой из плоскостей совершается автономно, а области отображения на разных плоскостях предназначаются для реализации блокирующей или инверсной ей разрешающей функции. Первая реализуется по логической схеме ИЛИ, вторая – по схеме И. Обучающие режимы воспроизводятся имитационной моделью защищаемого объекта.

Проверка метода производилась на имитационной модели двухобмоточного трансформатора ТДН-63000/110 с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$. Параметры первичной и вторичной обмоток: $R_1 = 0,408$ Ом, $L_1 = 0,035$ Гн, $R_2 = 0,137$ Ом, $L_2 = 0,012$ Гн. Ветвь намагничивания в каждой фазе представлена индуктивностью с кусочно-линейной вебер-амперной характеристикой, состоящей из рабочего участка между началом координат и точкой 298,9 Вб, 2,236 А, а также линии насыщения, идущей через точку 299,0 Вб, 4,473 А. В качестве альтернативных режимов трансформатора выбраны нагрузочные режимы с передаваемой мощностью до 63 МВА и $\cos \varphi = 0,85$, а также внешние короткие замыкания через варьируемое переходное сопротивление R_f . Окно наблюдения и обработки протекающего процесса составляло 30 мс при частоте дискретизации 2 кГц. Сравниваемые токи: стороны ВН $i_1 = i_{A1} - 2i_{B1} + i_{C1}$ и стороны НН $i_2 = \eta(i'_{A2} - i'_{B2})$. Штрихами отмечены фазные токи, приведенные к стороне ВН, η – коэффициент неидентичности приведения. Далее приняты значения $\eta = 1,1$, $k_x = 3$ и $r = 1$. Напряжение источников изменяется по закону $u_\nu(t) = \sqrt{2/3} \cdot 115 \sin(\omega t + \gamma_\nu)$ кВ, $\nu = A, B, C$. На плоскостях замеров (9) и (10) (рисунок 6) приведены области отображения множества альтернативных режимов, создаваемых вариацией сопротивления $R_f = 0,1 \dots 30$ Ом и фазы коммутации $\gamma_A = 0 \dots 180^\circ$. Там же на рисунке 6 а, б приведены отображения режима виткового замыкания в обмотке ВН фазы В при замыкании 1% числа ее витков. В случае алгоритма адаптивного преобразования токов локализация имеет место при всех значениях $k \geq 3$.

Сравнение алгоритмов дифференциальной защиты в применении к автотрансформатору. Работоспособность алгоритмов проверена также на имитационной модели автотрансформатора типа АТДЦН-500000/500/220 с повреждениями в последовательной обмотке. Производилось сравнение трех типов дифференциальной защиты: традиционного её исполнения, варианта исполнения по токам обратной последовательности и предложенных адаптивных алгоритмов. В равных условиях только адаптивные алгоритмы позволили за время, равное трем интервалам дискретизации, выявить замыкание 1% последовательной обмотки. Нечувствительность традиционной дифференциальной защиты объясняется тем, что дифференциальный ток при витковом замыкании не превысил ток небаланса, от которого производится её отстройка. В случае дифференциальной защиты по токам обратной последовательности уровень тока обратной последовательности с одной из сторон оказался недостаточным для работы защиты.

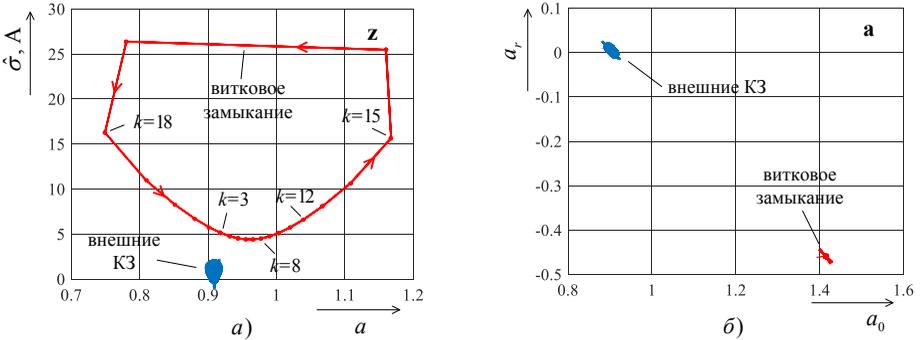


Рисунок 6 – Замеры дифференциальной защиты:

a – при адаптивном масштабировании; b – при адаптивном преобразовании

Четвертая глава посвящена проблеме сохранения работоспособности релейной защиты в режимах, сопровождающихся насыщением измерительных ТТ класса Р. Выполнен обзор и анализ основных направлений по исключению неправильной работы защиты при насыщении ТТ. Предложены способы сегментации электрической величины – процедуры, позволяющей выделить интервал правильной трансформации. Разработаны алгоритмы компенсации погрешности ТТ на интервалах насыщения.

С насыщением магнитопровода ТТ информация, важнейшая для релейной защиты, утрачивает достоверность. Наибольшие погрешности ТТ возникают при наличии остаточной намагниченности в магнитопроводе и аperiodической составляющей в первичном токе. При этом может оказаться, что продолжительность интервала правильной трансформации не превышает 2-3 мс.

Разработан алгоритм коррекции нелинейно искаженного тока, объединивший известные идеи выявления участков правильной трансформации и восстановления тока на участках насыщения. Процедура сегментации, т.е. выделения участка правильной трансформации, выполняется первой, она играет ключевую роль. Далее идёт процедура восстановления на основе алгоритмического моделирования (симуляции) и экстраполяции. Корректор тока как структурный элемент релейной защиты включает в свой состав три основных модуля – сегментатор, симулятор и экстраполятор, у каждого из которых имеются модификации, содержащие фильтры и селекторы.

На рисунке 7 приведена кривая тока с участком насыщения, там же показан восстановленный ток; $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – первичный и вторичный токи ТТ, $i_1'(t)$ – первичный ток, приведённый ко вторичной стороне. Наблюдают-

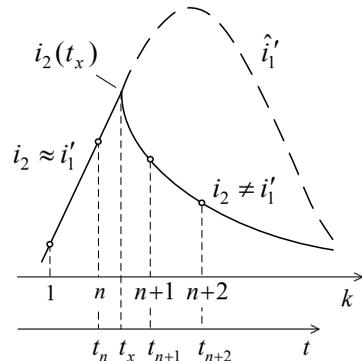


Рисунок 7 – Нелинейно искаженный и восстановленный токи

наблюдают-

ся отсчёты вторичного тока $i_2(k)$. В отсутствие насыщения допустимо принять равенство $i_1'(k) = i_2(k)$ при любых k . Задача сегментации заключается в обнаружении имеющегося интервала правильной трансформации, в данном случае $k = \overline{1, n}$. Задача восстановления тока состоит в определении функции $\hat{i}_1'(k)$ при $k \geq n+1$, близкой к $i_2(k)$.

Предложен алгоритм **сегментации**, где общий подход к выделению интервалов правильной трансформации связан с применением опорного сигнала, моделирующего ток $i_1'(k)$

$$i_{\text{он}}(k) = \sum_{d=0}^p x_d f_d(k), \quad (11)$$

где $f_d(k)$ – заданные функции, x_d – варьируемые коэффициенты, определяемые из условия близости опорного сигнала и наблюдаемого тока. Границы интервала правильной трансформации определяются путем постепенного наращивания его длины, при этом оценивается близость двух функций по критерию наименьших квадратов

$$\sum_{k=1}^n (i_2(k) - i_{\text{он}}(k))^2 \rightarrow \min_{x_d, d=0, p},$$

который приводит к $p+1$ уравнению относительно коэффициентов x_d

$$\sum_{k=1}^n f_g(k) \sum_{\substack{d=0 \\ d \neq g}}^p x_d f_d(k) = \sum_{k=1}^n i_2(k) f_g(k),$$

$$g = \overline{0, p},$$

с её решениями $\hat{x}_d(n)$ и к невязке

$$\Delta I_n = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(i_2(k) - \sum_{d=0}^p \hat{x}_d(n) f_d(k) \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Задача сегментации решается в пространстве значений $\hat{x}_d(n)$, $\Delta I(n)$ начиная со значения $n=3$ с его последующим увеличением до того предела, при котором значения $\hat{x}_d(n)$ и $\Delta I(n)$ остаются в области определения правильной трансформации. В качестве опорного может быть принят как простейший линейный сигнал, так и более сложные.

Альтернативный **способ сегментации** заключается в использовании быстродействующего фильтра, подавляющего синусоидальную составляющую и выделяющего оставшуюся аperiodическую составляющую по трем отсчетам наблюдаемой величины $i_2(k)$

$$\hat{i}_{\text{ан}}(k) = \frac{1}{4 \sin^2(\alpha/2)} \left[i_2(k) - 2i_2(k-1) \cos \alpha + i_2(k-2) \right], \quad (12)$$

где $\alpha = 2\pi/N$, N – число отсчётов на периоде частоты сети. С его помощью выделяется аperiodическая составляющая из наблюдаемого вторичного тока $i_2(k)$. Установлено, что с

наступлением насыщения ТТ наблюдается смена знака сигнала $\hat{i}_{\text{ан}}(k)$, а также его резкий выброс. Знак вторичного наблюдаемого тока i_2 при этом остается неизменным. Данные критерии положены в основу алгоритма сегментации. Пример функционирования алгоритма приведен на рисунке 8, прямоугольными точками отмечены моменты срабатывания сегментатора, говорящие всякий раз об очередном наступлении насыщения магнитопровода ТТ.

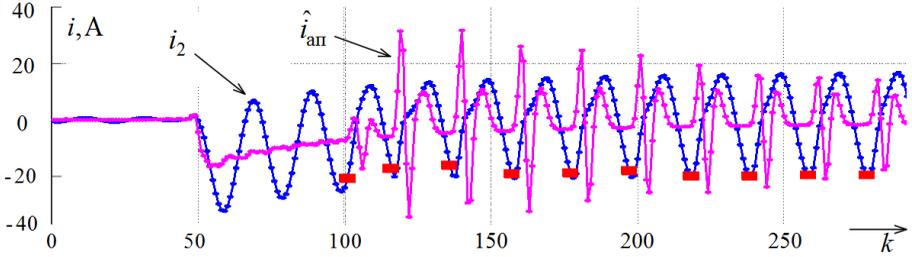


Рисунок 8 – Сегментация искаженного тока

Адаптивное восстановление. В случае, иллюстрируемом рисунке 7, задача восстановления тока заключается в определении функции $\hat{i}_1'(k)$, $k \geq n+1$. Незначительное число отсчётов $\hat{i}_1'(k)$, начиная с $k = n+1$, может быть получено путем экстраполяции опорного сигнала $i_{\text{он}}(k)$ за пределы интервала правильной трансформации. В разработанном алгоритме адаптивного восстановления тока, привлекающем информацию о модели трансформатора и определяющем её параметры, востребованы, по меньшей мере, три начальных отсчёта тока намагничивания. Их может предоставить опорный сигнал (11)

$$\hat{i}_1'(k) \approx i_{\text{он}}(k), \quad (13)$$

$$i_{\mu}(k) = i_{\text{он}}(k) - i_2(k), \quad (14)$$

$$k = n+1, n+2, n+3.$$

В простейшей линейной модели (рисунок 9), где L_{μ} – линеаризованная индуктивность ветви намагничивания в области насыщения, R и L – сопротивление и индуктивность нагрузки, ток намагничивания выражается через ток нагрузки с участием двух коэффициентов $\beta = R/L_{\mu}$ и $\eta = L/L_{\mu}$

$$i_{\mu}(t) = \beta \int_{t_0}^t i_2(v) dv + \eta (i_2(t) - i_2(t_0)). \quad (15)$$

На интервале дискретизации соотношение (15) с аппроксимацией интеграла по формуле трапеций преобразуется в рекуррентную формулу

$$i_{\mu}(k) = i_{\mu}(k-1) + c_0 i_2(k) + c_1 i_2(k-1), \quad (16)$$

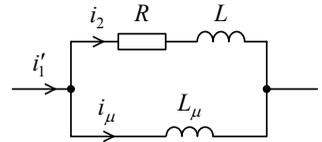


Рисунок 9 – Алгоритмическая модель ТТ

где $c_0 = \gamma + \eta$, $c_1 = \gamma - \eta$, $\gamma = \beta\Delta t/2$.

Трёх отсчётов (14) тока намагничивания достаточно для определения из уравнения (16), записанного для $k = n+2, n+3$, коэффициентов c_0 и c_1 . Затем уже, начиная с момента $k = n+4$, формула (16) выполняет восстановление тока $\hat{i}'_1(k)$:

$$\hat{i}'_1(k) = i_\mu(k) + i_2(k), \quad k \geq n+4.$$

Алгоритм **неадаптивного восстановления** может использоваться в случае, если параметры модели по рисунку 9 – известные интервальные величины. При этом нет необходимости в предсказании отсчётов (13), (14). Востребовано единственное начальное значение тока намагничивания $i_\mu(n+1)$, и тогда рекурсия (16) запускается со значения $i_\mu(n+2)$.

В алгоритме **восстановления путем экстраполяции** участка правильной трансформации задействованы быстродействующие способы разграничения периодической и аperiodической составляющих тока КЗ. Предварительная обработка участка правильной трансформации заключается в исключении из вторичного тока аperiodической составляющей (12)

$$i_{\text{пер}}(l) = i_2(l) - i_{\text{ап}}(l),$$

$$i_{\text{ап}}(l) = \hat{i}_{\text{ап}}(k), \quad l = k-2, k-1, k; \quad k = \overline{3, n}.$$

Комплекс основной частоты определяется путем обработки сигнала $i_{\text{пер}}(l)$ фильтром ортогональных составляющих n -го порядка

$$\underline{V}(n) = \underline{M}(n) \left[\underline{K}^*(n) \underline{S}(n) - n \underline{S}^*(n) \right],$$

$$\text{где } \underline{M}(n) = \frac{2j}{K^2(n) - n^2}, \quad \underline{K}(n) = \sum_{l=1}^n e^{j2\omega l}, \quad \underline{S}(n) = \sum_{l=1}^n i_{\text{пер}}(l) e^{j\omega l}.$$

На рисунке 10 приведена осциллограмма сигнала, нелинейно искаженного вследствие насыщения трансформатора тока при коротком замыкании на низшей стороне силового трансформатора подстанции Мамакан (Иркутская область), там же показан результат коррекции искаженного тока – восстановленный ток \hat{i}'_1 . Штрихпунктирной линией отмечен модельный ток КЗ

$$\hat{i}'_{1\text{мод}} = I_1 \sin \omega t + I_2 \cos \omega t + I_3 e^{-t/\tau}, \quad (17)$$

неизвестные параметры I_1, I_2, I_3, τ которого были определены по всем неискаженным отсчетам тока КЗ i_2 с помощью регрессионного анализа. Как следует из рисунка 10, на участках правильной трансформации токи i_2 и $\hat{i}'_{1\text{мод}}$, а на искаженных участках токи \hat{i}'_1 и $\hat{i}'_{1\text{мод}}$ практически совпадают, визуально подтверждая надлежащее качество восстановления тока.

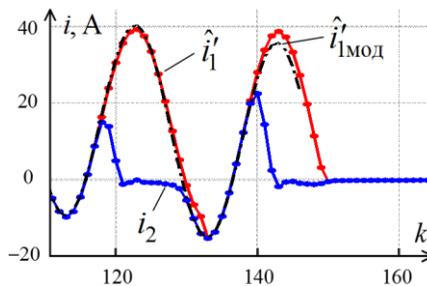


Рисунок 10 – Осциллограмма тока КЗ и результат коррекции

Пятая глава посвящена вопросам практического использования разработанных алгоритмов. Адаптивная дифференциальная защита трансформатора и модуль корректора вторичного тока при насыщении ТТ реализованы в терминале дифференциальной защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512» (рисунок 11) производства ООО «Релематика». Терминал содержит комплект основных и резервных защит двухобмоточного трансформатора 110–220 кВ, предназначен для защиты объекта от внутренних повреждений, а также от длительного протекания токов внешнего КЗ.

Разработанная адаптивная дифференциальная защита (на основе замера с адаптивным преобразованием), реализована в терминале в качестве опции, дополняющей традиционную дифференциальную защиту с процентным торможением, обладает повышенной чувствительностью к витковым замыканиям в обмотках трансформатора. Работа адаптивного дифференциального органа в соответствии с его предназначением разрешается при величинах сквозного тока через защищаемый трансформатор от 0,1 до 1,5 от базисного. Чувствительная адаптивная дифференциальная защита позволяет с высоким быстродействием (20 мс) распознать витковые замыкания, предотвратить их развитие в межфазные замыкания, замыкания на бак и магнитопровод в результате деградации изоляции, сокращая негативные последствия от повреждения.

Время срабатывания дифференциальной защиты трансформатора в условиях переходного режима КЗ с насыщением ТТ может затягиваться до десятых долей секунды, тогда как в отсутствие насыщения оно составляет не более 30 мс. Кроме того, как показала практика, при насыщении ТТ остается вероятность ложной работы защиты при внешних КЗ, несмотря на наличие блокировок. Корректор тока, выполняющий восстановление кривой тока на искажённых участках в темпе реального времени, повышает надежность работы защиты.

Разработанный корректор тока включает в себя сегментатор и модуль восстановления. Реализован предложенный алгоритм сегментации с использованием фильтра апериодической составляющей. Основной алгоритм сегментации дополнен модулем типа «детектор насыщения», используемым в дифференциальных защитах для отстройки от внешних КЗ с насыщением ТТ. Принцип действия заключается в отслеживании отставания во времени дифференциального тока $I_{\text{диф}}$ от тормозного $I_{\text{торм}}$, соответственно предполагает



Рисунок 11 – Терминал «ТОР 300 ДЗТ 512»

двустороннее наблюдение, в то время как основной алгоритм работоспособен и при одностороннем наблюдении. Обеспечивается корректная работа сегментатора при наличии апериодической составляющей в первичном токе КЗ. Срабатывание сегментатора, т.е. обнаружение начала участка насыщения ТТ, является условием запуска процедуры коррекции. Реализован алгоритм восстановления тока путем экстраполяции участка правильной трансформации. Правильная работа корректора тока обеспечивается с участками правильной трансформации от 3 мс. Окончание восстановления тока происходит по условию выхода на участок правильной трансформации, переходу через ноль разности $\hat{i}_1(k) - i_2(k)$ или по максимально допустимому времени восстановления.

Проведены функциональные испытания работы корректора тока в режимах, смоделированных в комплексах Matlab, RTDS, и на реальных осциллограммах, записанных в энергосистемах. В диссертации представлены осциллограммы испытаний и их анализ. Для оценки точности работы ТТ в режимах насыщения используется величина полной погрешности ТТ

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{k_T} i_2 - i_1 \right)^2 dt},$$

где I_1 – действующее значение первичного тока, к которому приводится численное значение погрешности; T – длительность периода тока. Полную погрешность удобно использовать и при анализе качества восстановления тока. В случае реальных осциллограмм для расчета параметра ε использовался синтезированный по участкам правильной трансформации модельный первичный ток (17). Рисунок 12 отражает результаты восстановления тока по осциллограмме, записанной на Кировской ТЭЦ. Показана динамика изменения полной погрешности ТТ до восстановления тока $\varepsilon_{\text{исх}}$ и после восстановления $\varepsilon_{\text{вос}}$.

Проведены испытания дифференциальной защиты с модулем корректора тока в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ. На рисунке 13 показано поведение дифференциального замера на плоскости относительных токов – дифференциального $I_{\text{диф}^*}$ и тормозного $I_{\text{торм}^*}$ – при внешнем КЗ на фоне насыщения ТТ при введенном корректоре тока и без него. Ввод корректора исключил попадание замера в зону срабатывания защиты, обеспечив устойчивость в сложном переходном режиме. По итогам испытаний подтверждено, что использование корректора тока в микропроцессорном терминале «ТОР 300 ДЗТ 512» в условиях насыщения ТТ сохраняет изначально высокое быстродействие защиты при внутренних КЗ на уровне 25-30 мс, а также повышает устойчивость защиты в режимах внешних КЗ.

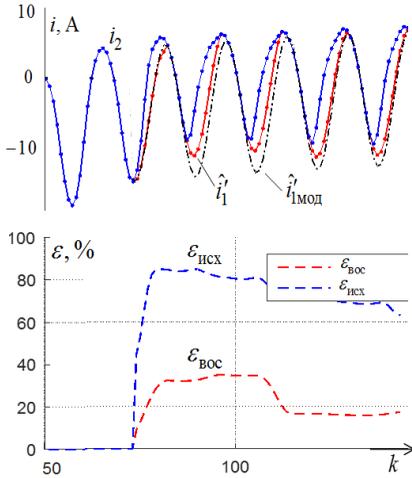


Рисунок 12 – Погрешности искаженного и восстановленного токов

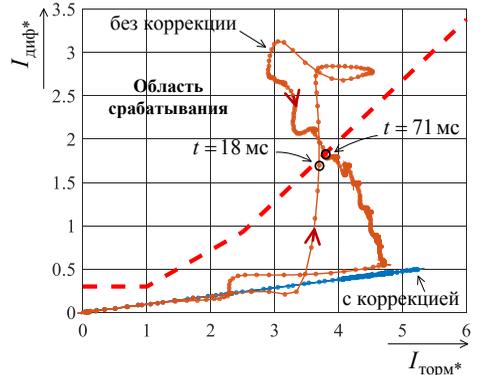


Рисунок 13 – Поведение дифференциальной защиты трансформатора в условиях насыщения ТТ

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Показано, что модель неповрежденного энергообъекта, в том числе трансформатора, может служить индикатором его повреждений. Тем самым реализуется концепция объединения всей доступной информации о контролируемом объекте. Модель представляет априорную информацию о его параметрах и вместе с тем обрабатывает текущую информацию о его состоянии.

2. Метод алгоритмических моделей в сочетании с методом локализации альтернативных режимов развиты применительно к задачам адаптивной релейной защиты трансформаторов и автотрансформаторов. Выполнена классификация алгоритмических моделей и способов наблюдения защищаемых объектов. Предложен общий способ формирования замеров защиты, использующей алгоритмическую модель неповрежденного объекта.

3. Разработана алгоритмическая модель трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$. Для защиты, реализуемой на основе данной модели, определены эффективные замеры. Предложены способы защиты трансформаторов, обеспечивающие высокую распознающую способность, которые за время порядка 5 мс позволяют разграничить режимы внутренних КЗ и БНТ, к тому же обладающие необходимой чувствительностью к витковым замыканиям.

4. Разработаны и применены в терминале защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512» адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора. Традиционный дифференциальный орган дополнен адаптивным дифференциальным моду-

лем, тем самым обеспечена высокая чувствительность к витковым замыканиям в обмотках и своевременное предотвращение развития виткового замыкания в аварию с тяжелыми последствиями.

5. Исследована распознающая способность к витковым замыканиям в последовательной обмотке автотрансформатора трех типов дифференциальной защиты: традиционного исполнения, по токам обратной последовательности и предложенных адаптивных алгоритмов. Установлено абсолютное преимущество последних по распознающей способности.

6. Разработаны способы сегментации, обеспечивающие надежное выделение участков правильной трансформации тока при насыщении ТТ, что необходимо для последующего восстановления искаженного тока. Предложены алгоритмы восстановления тока при насыщении ТТ с использованием алгоритмической модели ТТ и путем экстраполяции участка правильной трансформации с предварительной обработкой, обеспечивающие приемлемую погрешность восстановления.

7. Алгоритмы сегментации и восстановления применены при разработке модуля корректора тока в терминале защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512». Корректор нелинейно искаженного тока позволяет повысить быстродействие защиты при тяжелых внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ, а также повышает надежность несрабатывания при внешних КЗ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования

1. Атнишкин, А. Б. Модель неповрежденного энергообъекта как индикатор повреждения / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов, А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // *Электротехника*. – 2017. – № 7. – С. 60-65. (Atnishkin, A. B. A model of an intact power facility as an indicator of damage / Yu. Ya. Lyamets, P. I. Voronov, M. V. Martynov, A. B. Atnishkin, M. Yu. Shirokin // *Russian Electrical Engineering*. – 2017. – Vol. 88, № 7. – P. 453-458.) (0,69 п.л. / 0,14 п.л.).

2. Атнишкин, А. Б. Распознавание замыканий в последовательной обмотке автотрансформатора методами дифференциальной защиты / А. Б. Атнишкин, Ю. Я. Лямец // *Электрические станции*. – 2018. – № 6. – С. 42-46. (Atnishkin, A. B. Turn-To-Turn Fault Recognition in the Series Winding of an Autotransformer by Differential Protection Methods / A. B. Atnishkin, Yu. Ya. Lyamets // *Power Technology and Engineering*. – 2018. – Vol. 52, № 4. – P. 496-500.) (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).

3. Атнишкин, А. Б. Распознавание аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, А. Б. Атнишкин // *Электричество*. – 2018. – № 9. – С. 29-38. (1,16 п.л. / 0,39 п.л.).

4. Атнишкин, А. Б. Коррекция нелинейно искаженного тока / Ю. Я. Лямец, А. Б. Атнишкин, П. И. Воронов, И. Ю. Никонов // *Релейная защита и автоматизация*. – 2017. – № 4. – С. 49-53. (0,58 п.л. / 0,19 п.л.).

Публикации в других изданиях

5. Атнишкин, А. Б. Коррекция вторичного тока при насыщении измерительных трансформаторов / А. Б. Атнишкин // *Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики*. – 2018. – № 1. – С. 29-31. (0,35 п.л. / 0,35 п.л.).

6. Атнишкин, А. Б. Релейная защита с адаптивной информационной базой / А. Б. Атнишкин, П. И. Воронов, Ю. Я. Лямец // *Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: матер. I междунар. науч.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 32-35. (0,23 п.л. / 0,08 п.л.).

7. Атнишкин, А. Б. Локализация альтернативных режимов как метод алгоритмизации и обучения релейной защиты / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов, А. Б. Атнишкин // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем (ДНДС-2017): Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2017. – С. 237-240. (0,23 п.л. / 0,06 п.л.).

8. Атнишкин, А. Б. Использование модели трансформатора в основе алгоритма его защиты / А. Б. Атнишкин // ДНДС-2017: Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2017. – С. 230-232. (0,17 п.л. / 0,17 п.л.).

9. Атнишкин, А. Б. Моделирование витковых замыканий в обмотках силового трансформатора / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VII междунар. науч.-техн. конф. – Казань: КГЭУ, 2016. – С. 51-54. (0,58 п.л. / 0,29 п.л.).

10. Атнишкин, А. Б. Моделирование броска намагничивающего тока в силовом трансформаторе с учетом реальной характеристики намагничивания стали / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2016. – № 1. – С. 51-54. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.).

11. Атнишкин, А. Б. Работа дифференциальной токовой защиты трансформатора при витковых замыканиях / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике (ИТЭЭ-2016): Материалы X Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2016. – С. 258-259. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.).

12. Атнишкин, А. Б. Распределение токов при витковом замыкании в обмотке силового трансформатора / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин, Е. В. Широкина // ИТЭЭ-2016: Материалы X Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2016. – С. 255-257. (0,17 п.л. / 0,06 п.л.).

13. Атнишкин, А. Б. Дифференциальная защита трансформатора по токам обратной последовательности / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI междунар. науч.-техн. конф. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – С. 51-54. (0,46 п.л. / 0,23 п.л.).

14. Атнишкин, А. Б. Дифференциальная защита по току обратной последовательности как инструмент выявления повреждения трансформатора / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации. – 2015. – № 5. – С. 14-19. (0,69 п.л. / 0,35 п.л.).

15. Атнишкин, А. Б. Определение коэффициента чувствительности дифференциальной защиты трансформатора по токам обратной последовательности / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // ДНДС-2015: Материалы XI Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары, 2015. – С. 372-375. (0,23 п.л. / 0,12 п.л.).

16. Атнишкин, А. Б. Критерий обнаружения внутреннего повреждения в трансформаторе / А. Б. Атнишкин, М. Ю. Широкин // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2014. – № 1. – С. 13-15. (0,35 п.л. / 0,18 п.л.).

Патенты

17. Пат. 2655920 Российская Федерация, МПК H02N 7/045. Способ релейной защиты трехфазного трансформатора / Ю. Я. Лямец, **А. Б. Атнишкин**. Опубл. 30.05.2018. Бюл. № 16.

18. Пат. 2654056 Российская Федерация, МПК H02N 3/40. Способ релейной защиты энергообъекта / Ю. Я. Лямец, **А. Б. Атнишкин**, М. Ю. Широкин. Опубл. 16.05.2018. Бюл. № 14.

19. Пат. 2648991 Российская Федерация, МПК H02N 3/08, H02N 7/045. Способ восстановления тока при насыщении трансформатора / Ю. Я. Лямец, **А. Б. Атнишкин**. Опубл. 29.03.2018. Бюл. № 10.

20. Пат. 2647484 Российская Федерация, МПК H02N 3/28. Способ определения интервалов однородности (сегментации) электрической величины / Ю. Я. Лямец, **А. Б. Атнишкин**, А. А. Белянин. Опубл. 16.03.2018. Бюл. № 8.

АТНИШКИН АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

**АДАПТИВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать ___.__.2019 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,4.
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № ___

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»
428015, г. Чебоксары, пр. Московский, д.15