

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

На правах рукописи

Атнишкин Александр Борисович

АДАПТИВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Лямец Юрий Яковлевич

Чебоксары – 2018

Оглавление

Введение.....	4
ГЛАВА 1 МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕЖИМОВ.....	9
1.1 О разграничении режимов релейной защитой.....	9
1.2 Алгоритмические модели.....	11
1.3 Алгоритмические модели в задаче локализации режимов	12
1.4 Формирование замеров для защиты	17
1.5 Выводы.....	19
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЕГО АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	21
2.1 Способы отстройки защиты трансформатора при БНТ.....	21
2.2 Разработка алгоритмической модели трансформатора.....	26
2.3 Замеры для защиты трансформатора.....	29
2.4 Выводы.....	38
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ МОДИФИКАЦИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА	40
3.1 Анализ алгоритмов защиты трансформатора в режимах внутренних повреждений	40
3.2 Распределение токов при витковых замыканиях в обмотках и их распознаваемость традиционной защитой	44
3.3 Разработка адаптивных модификаций алгоритма дифференциальной защиты..	50
3.4 Проверка алгоритмов на имитационной модели двухобмоточного трансформатора.....	55
3.5 Сравнение алгоритмов дифференциальной защиты в применении к автотрансформатору.....	59
3.6 Выводы.....	65
ГЛАВА 4 СЕГМЕНТАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО ИСКАЖЕННОГО ТОКА	67
4.1 Проблема насыщения ТТ	67

4.2 Анализ способов обеспечения правильной работы дифференциальных защит при насыщении ТТ.....	79
4.3 Разработка алгоритмов сегментации	87
4.4 Разработка алгоритмов восстановления тока.....	95
4.5 Выводы.....	105
ГЛАВА 5 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ.....	107
5.1 Адаптивная дифференциальная защита трансформатора.....	107
5.2 Корректор тока при насыщении ТТ	108
5.3 Выводы.....	115
Заключение	117
Список сокращений и условных обозначений.....	119
Список литературы	121
Приложение А. Осциллограммы испытаний корректора тока.....	135

Введение

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). Разработки 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 учетом 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 технических 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 быстросействующую 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 быстросействие.

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 быстросействие, 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 электроэнергетике» (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 21 научной работе, среди которых четыре статьи в изданиях из перечня ВАК, включая две статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных. Разработки защищены четырьмя патентами на изобретения.

ГЛАВА 1 МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕЖИМОВ

В недавнее время наметился и явно начал нарастать интерес к такому построению релейной защиты, которое делает её безуставочной (setting-less [110]) и к тому же самонастраивающейся (corrective [105]). Вообще говоря, концепция не нова. Так, она отчётливо просматривается в известном реле Бреслера [115] – родоначальнике класса многофазных реле. Но если прежде её реализации носили эвристический характер, то ныне оказалось возможным построить на её основе метод распознавания аварийных состояний энергообъекта. Характерной чертой метода, анонсированного в [61, 62], является названное локализацией обособление режимов, альтернативных контролируемым – тем, что обусловлены повреждением защищаемого объекта. Имеются приложения метода [123-125, 28], однако есть необходимость в обобщении и развитии существующих представлений.

1.1 О разграничении режимов релейной защитой

Релейная защита – наука о распознавании аварийных режимов наблюдаемого энергообъекта. Не лежит на поверхности, но тем не менее очевиден тот факт, что распознавание приходится проводить в инверсном порядке, направляя основные усилия на отстройку от альтернативных режимов. Энергообъект является частью электрической системы. Всё множество режимов которой подразделяется на два множества: α -режимов (отслеживаемых), обусловленных повреждением наблюдаемого энергообъекта, и β -режимов (альтернативных), к которым относятся все прочие режимы электрической сети. Они никак не связаны с аварийным состоянием именно этого объекта, и к релейной защите предъявляется категорическое требование не срабатывать в β -режимах (условие селективности). В иерархии требований к свойствам релейной защиты чувствительность к α -режимам и быстрота реакции на них идут после селективности и не носят столь категорического характера. Оптимизация релейной защиты по чувствительности и быстродействию происходит в условиях

ограничений, накладываемых жёсткими требованиями обеспечения селективности.

Традиционный подход к обеспечению селективности – полный учёт всех элементов подмножества β -режимов и отстройка от него на этапе задания уставок, в общем случае – характеристик срабатывания защиты. Эту процедуру правомерно представить как обучение защиты с учителем – имитационной моделью электрической системы, содержащей защищаемый объект [53, 54]. Обучение происходит путём отображения подмножества β -режимов в пространстве замеров, а практически – на легко обозримых плоскостях двухкоординатных замеров.

Пусть G – множество режимов электрической системы, $\mathbf{x} \in G$ – вектор параметров, определяющих режим, и потому идентифицируемый с ним. Выделим из множества G подмножество G_α аварийных режимов \mathbf{x}_α защищаемого энергообъекта. Остаётся подмножество G_β режимов \mathbf{x}_β электрической системы, альтернативных режимам \mathbf{x}_α . В итоге имеем $G_\alpha \cup G_\beta = G$, $\mathbf{x}_\alpha \in G_\alpha$, $\mathbf{x}_\beta \in G_\beta$. Пусть далее F – оператор осуществляемого релейной защитой преобразования вектора режима \mathbf{x} в замер $\mathbf{z} = F(\mathbf{x})$, отображаемый точкой в пространстве замеров. Соответственно, подмножество G_β отобразится в виде области $S_\beta = F(G_\beta)$. Иллюстрация приведена на рисунке 1. Отметим особую роль области S_β , а также области пересечения $S_{\alpha\beta} = S_\alpha \cap S_\beta$. 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 \mathbf{x}_α .

Противостояние α - и β -режимов подводит к новой задаче локализации отображений β -режимов, в идеале – к сжатию областей S_β вплоть до точки на

каждой из плоскостей замеров. Найден инструмент локализации – алгоритмическая модель наблюдаемого объекта в его неповреждённом состоянии.

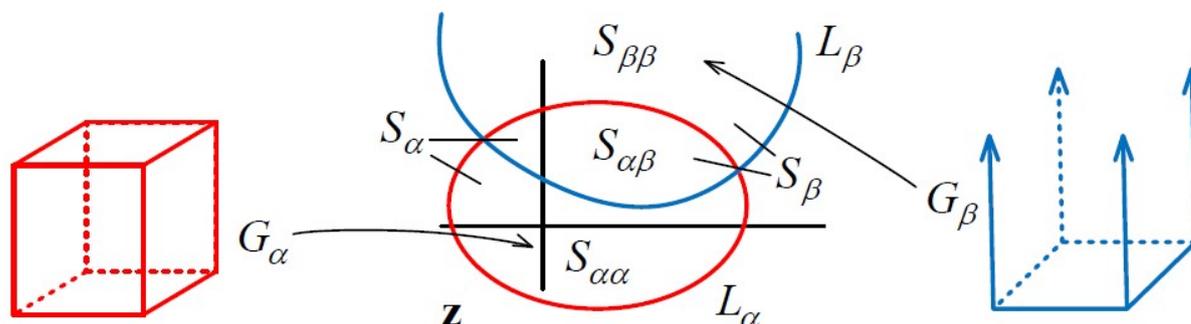


Рисунок 1 – Пример областей отображения режимов на плоскости

1.2 Алгоритмические модели

Понятие «алгоритмическая модель» возникло два десятилетия тому назад. К настоящему времени не осталось сомнения в том, что алгоритмические модели оказались эффективным инструментом распознавания факта и места повреждения энергообъекта (задачи защиты и локации) [10]. К представлениям об алгоритмических моделях привели в своё время две причины [64]. Обе были обусловлены нарастающим интересом к микропроцессорной релейной защите. Первая – техническая, связанная с поиском адаптивных алгоритмов распознавания повреждений линий электропередачи [44, 45]. Вторая – методическая. В 1995 г. на кафедре ТОЭ Чувашского университета открылась специальность «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», там же и введена в учебный план дисциплина «теоретические основы релейной защиты (ТОРЗ)», соединяющая курс ТОЭ с курсами релейной защиты и автоматики. Данное научное направление основано в 50-х годах Г. И. Атабековым [1]. С тех пор появились новые задачи. Представляется, что алгоритмические модели могут служить инструментом их решения, будь то задачи релейной защиты, причем не ограничиваясь линиями электропередачи, или же локации повреждений.

Алгоритмическая модель энергообъекта является преобразователем наблюдаемых величин в замеры. Преобразование совершается адекватно

реальным процессам, если защищаемый объект не повреждён, и неадекватно в случае его повреждения [58, 62].

Существует принципиальное различие между двумя типами моделей – алгоритмической и имитационной. Имитационная модель охватывает не только защищаемый объект, но и остальную часть системы, и воспроизводит режимы системы. Алгоритмическая модель относится исключительно к наблюдаемому объекту, активируется наблюдаемыми величинами и её задача – формировать замеры релейной защиты. В составе имитационной модели имеется блок данного объекта. Алгоритмическая модель структурно адекватна этому блоку при условии, что имитируется β -режим. Для абсолютной адекватности необходимо ещё совпадение параметров. Так или иначе проявляется следующая закономерность: в β -режимах алгоритмическая модель физически адекватна имитационной модели, а α -режимах физически неадекватна, поскольку не учитывает повреждения, изменяющего структуру блока, имитирующего защищаемый объект [58].

К числу основных функций алгоритмических моделей относятся следующие:

- разграничение режимов разного типа, что объясняется адекватностью модели наблюдаемому объекту в β -режимах электрической сети и неадекватностью в α -режимах;
- формирование из выходных величин замеров защиты;
- локализация отображений β -режимов благодаря свойству адекватности и надлежащему подбору замеров;
- обучение виртуальных реле путём активирования алгоритмической модели сигналами имитационной модели, воспроизводящей режимы заданного типа.

1.3 Алгоритмические модели в задаче локализации режимов

Задача распознавания подмножества α -режимов решается при помощи процедуры локализации противостоящего ему подмножества β -режимов.

Инструментом локализации служит алгоритмическая модель неповреждённого энергообъекта, адекватная ему в альтернативных режимах и неадекватная в случае его повреждения.

Пусть $\mathbf{z}_\alpha = F(\mathbf{x}_\alpha)$ – отображение аварийного режима \mathbf{x}_α защищаемого объекта в пространстве замеров. Если окажется, что $\mathbf{z}_\alpha \in S_\beta$, это будет означать неспособность защиты распознать данный режим \mathbf{x}_α . Неизбежное присутствие области S_β в пространстве замеров негативно влияет на чувствительность защиты. Единственное средство ослабить влияние – сжатие области S_β , что является прерогативой оператора F . Выполняемую им функцию можно охарактеризовать как локализацию подмножества G_β альтернативных режимов. Как было показано в [61], оператор F становится инструментом локализации, если реализует функцию алгоритмической модели защищаемого объекта в его неповреждённом состоянии. Иначе говоря, алгоритмическая модель является преобразователем сигналов в структуре релейной защиты. Алгоритмическая модель неповреждённого объекта адекватна ему в альтернативных режимах и неадекватна в его аварийных режимах. Именно в этом можно усмотреть физические основы локализации альтернативных режимов, разграничения режимов разного типа и, как следствие, распознавания контролируемых режимов.

Иллюстрации областей отображения режимов для традиционного замера и замера по методу локализации альтернативных режимов приведены на рисунке 2.

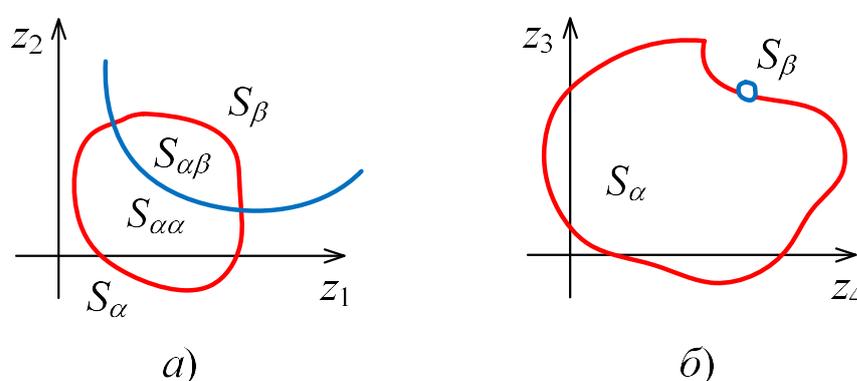


Рисунок 2 – Пример областей отображения режимов на плоскости:

a – традиционного замера; *б* – замера с использованием метода локализации

Алгоритмическая модель активируется наблюдаемыми величинами. Введено понятие о полном и неполном наблюдении энергообъекта по отношению к его алгоритмической модели, полное наблюдение разделено на подклассы максимального, избыточного и достаточного наблюдения. Иллюстрацией служит рисунок 3, 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 (рисунок 3 б, в), l – символ ненаблюдаемого места соединения объекта с системой (рисунок 3 г). Полное наблюдение, т.е. наблюдение всех мест соединения (рисунок 3 а, б, в) создаёт возможность выполнения защиты с абсолютной селективностью. При неполном наблюдении (рисунок 3 г) приходится довольствоваться защитой с относительной селективностью.

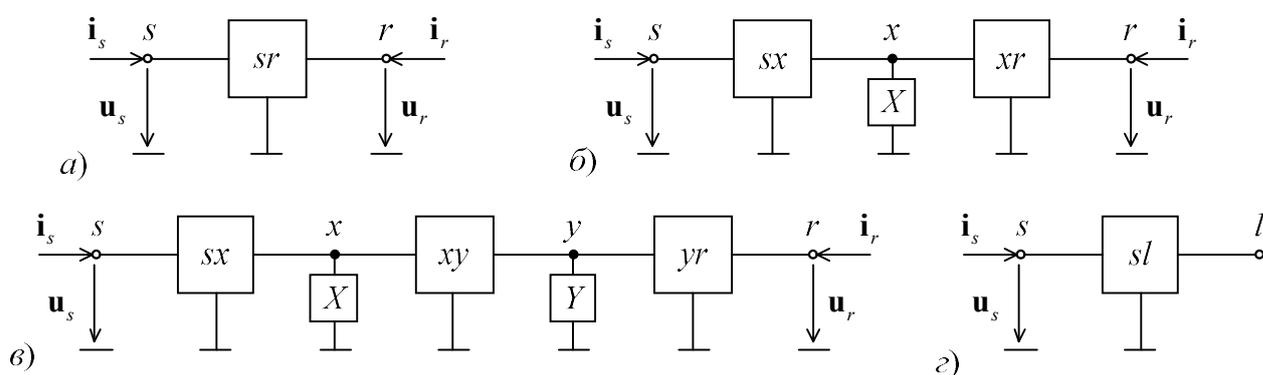


Рисунок 3 – Алгоритмические модели с различным наблюдением:

a – максимальным, b – избыточным, $в$ – достаточным, $г$ – неполном

Термин «максимальное наблюдение» подразумевает, что во всех местах s и r регистрируются и токи, и напряжения, а модель объекта не содержит неопределённых элементов. Для активирования модели по рисунку 3 а достаточно половины из общего числа $4n$ наблюдаемых величин, по одной величине на каждый вывод. Пусть это будут источники напряжений \mathbf{u}_s и \mathbf{u}_r (рисунок 4 а). Наблюдаемые токи \mathbf{i}_s и \mathbf{i}_r при этом остаются в резерве и могут быть сопоставлены с реакцией модели на воздействие напряжений – токами $\hat{\mathbf{i}}_s$ и

\hat{i}_r . Операция сопоставления наблюдаемой величины с её моделью обозначена двунаправленной стрелкой. Следует отметить, что разности наблюдаемых величин и реакций модели – это недавно обнаруженные локальные компоненты [60]. Если объект не повреждён, то алгоритмическая модель ему адекватна, и сравниваемые векторы близки друг другу. Если же повреждён, то наступает неадекватность, и реакции \hat{i}_s , \hat{i}_r расходятся с наблюдаемыми токами.

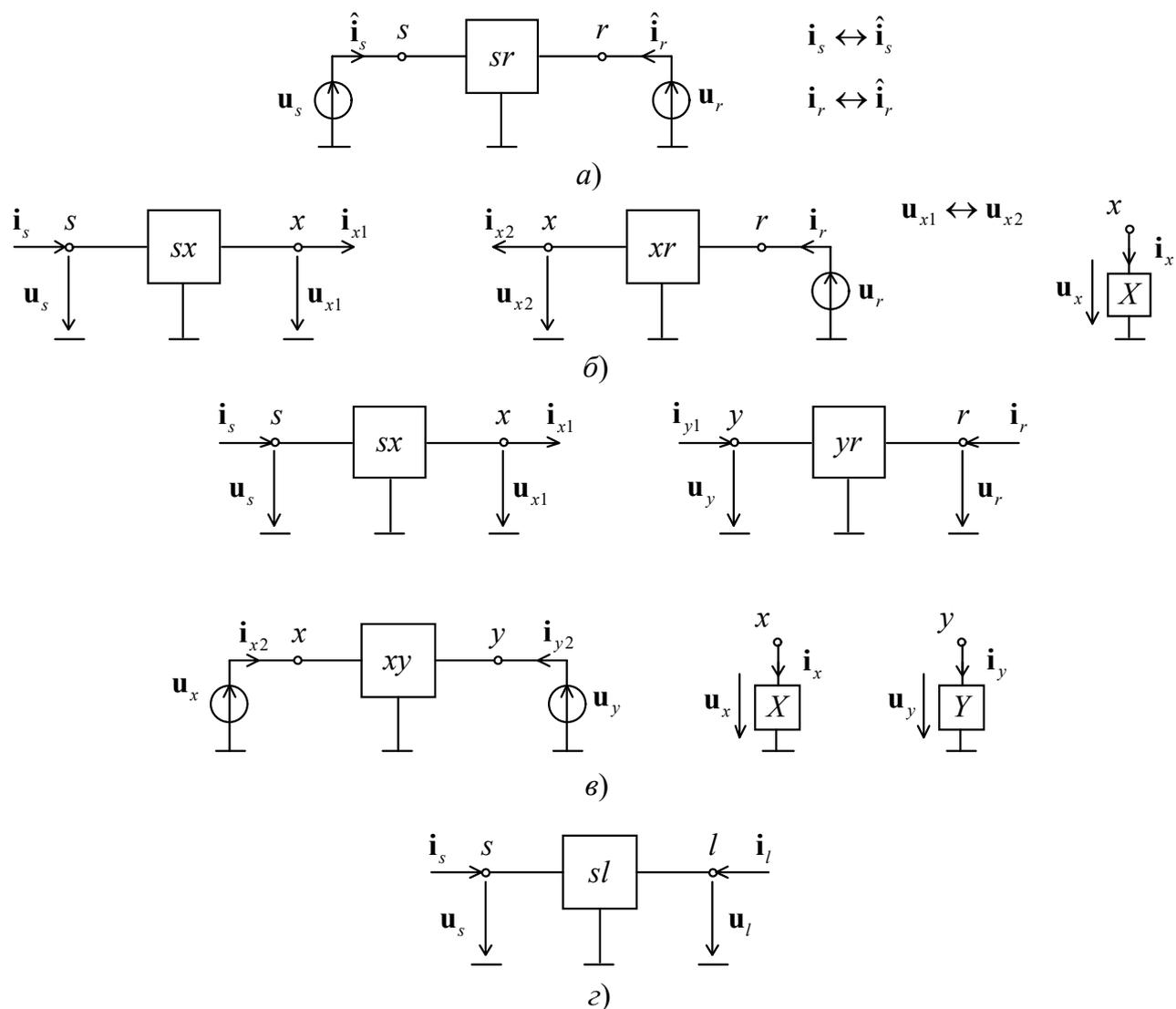


Рисунок 4 – Активирование алгоритмических моделей с различными типами наблюдения:

a – максимальным, b – избыточным, c – достаточным, d – неполном

Термин «избыточное наблюдение» означает, что резерв наблюдаемых величин имеется, но он меньше, чем при максимальном наблюдении. Модель по

рисунку 4 б активируется по частям. Левая часть sx преобразует наблюдаемые векторы $\mathbf{i}_s, \mathbf{u}_s$ в выходные величины $\mathbf{i}_{x1}, \mathbf{u}_{x1}$. В свою очередь, правая часть xr преобразует $\mathbf{i}_r, \mathbf{u}_r$ в $\mathbf{i}_{x2}, \mathbf{u}_{x2}$. Сопоставлению в данном случае подлежат модельные напряжения \mathbf{u}_{x1} и \mathbf{u}_{x2} , близкие к совпадению при неповреждённом объекте и расходящиеся при его повреждении. Необходимо отметить, что режим ненаблюдаемого элемента X в данной модели определяется векторами его тока $\mathbf{i}_x = \mathbf{i}_{x1} + \mathbf{i}_{x2}$ и напряжения \mathbf{u}_x , определяемого, например, как среднее арифметическое векторов \mathbf{u}_{x1} и \mathbf{u}_{x2} . Имеющаяся априорная информация о закономерностях работы этого элемента устанавливает взаимосвязь векторов \mathbf{i}_x и \mathbf{u}_x , которая добавляет к условию близости напряжений \mathbf{u}_{x1} и \mathbf{u}_{x2} дополнительное условие, действующее адекватно только в тех случаях, когда объект не повреждён.

Термин «достаточное наблюдение» говорит о том, что хотя объект и наблюдается во всех местах соединения с системой, его собственные ненаблюдаемые, но влияющие на его состояние неопределённые элементы X и Y , исключают возможность активирования модели частью наблюдаемых величин, как на рисунке 4 а, либо преобразования наблюдаемых в каждом месте величин в одно и то же напряжение модели, как на рисунке 4 б. Остаётся возможность определения состояния самих элементов X и Y , для чего порознь используются три части алгоритмической модели: сначала крайние в качестве многополюсников обратной и прямой передачи, формирующие векторы $\mathbf{i}_{x1}, \mathbf{u}_x$ и $\mathbf{i}_{y1}, \mathbf{u}_y$, а затем средняя часть, активируемая источниками напряжений $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y$ (рисунок 4 в). В данном случае проверка адекватности модели защищаемому объекту возможна лишь на основе априорной информации об элементах X и Y .

Наконец, термин «неполное наблюдение» свидетельствует о том, что данный случай стоит особняком, коль скоро никакие преобразования не способны восполнить недостающую информацию из ненаблюдаемого места соединения энергообъекта с электрической системой. Наблюдаемые величины $\mathbf{i}_s, \mathbf{u}_s$

преобразуются в ток и напряжение i_l , u_l в ненаблюдаемом месте l , но ещё предстоит найти дополнительную связь между ними. Главное же, что короткое замыкание в месте l может быть отнесено в равной мере как к числу повреждений защищаемого объекта, так и к числу альтернативных режимов, причина возникновения которых находится за его пределами. Уступая требованию селективности релейной защиты, придётся отдать предпочтение альтернативным режимам. Как следствие, чувствительность защиты к замыканию в месте l будет заведомо нулевой.

1.4 Формирование замеров для защиты

В терминалах релейной защиты наблюдаемые электрические величины преобразуются в замеры, отображаемые каждый на своей плоскости с очерченной на ней областью срабатывания или областью блокирования [94]. В общем случае замер, представленный в базисе мгновенных значений, за время наблюдения описывает на плоскости годограф – геометрическое место отображений в разные моменты времени. В частном случае используется базис комплексных значений, тогда комплекс замера отображается на комплексной плоскости. Вещественная и мнимая части комплекса являются координатами отображения, иначе говоря, комплекс по определению является двухкоординатным замером. Данное свойство придает комплексному базису некую универсальность, пока что несвойственную общему базису мгновенных значений. Между тем, наметился такой подход к построению алгоритмов микропроцессорной релейной защиты, который ведет к универсальному представлению замеров в виде годографов отображений как функций времени. Подбор замеров составляет содержание метода локализации режимов, альтернативных режимам повреждения защищаемого объекта [62]. Годографы отображений замера, подобранного соответствующим образом, в альтернативных режимах локализуются на плоскости в ограниченной области, сосредоточенной в окрестности точки или линии, положение которых определяют идеальные условия формирования замера.

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. В модели на рисунке 4 а реакции $\hat{\mathbf{i}}_s(t)$, $\hat{\mathbf{i}}_r(t)$ близки к наблюдаемым функциям $\mathbf{i}_s(t)$, $\mathbf{i}_r(t)$, а в модели по рисунку 4 б близки друг к другу реакции $\mathbf{u}_{x1}(t)$ и $\mathbf{u}_{x2}(t)$. У близких функций близки и приращения во времени от начального момента t_H до текущего момента t : $\Delta \mathbf{i}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}(t_H)$, $\Delta \mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t_H)$. В качестве t_H может быть принят момент смены наблюдаемых режимов t_0 , что подходит для нарастающего окна наблюдения, либо $t_H = t - \Delta t$, где Δt – фиксированный интервал времени, что естественно для текущего окна наблюдения. Пусть $\mathbf{v}_1(t)$ и $\mathbf{v}_2(t)$ – обозначение сравниваемых величин, как токов или напряжений, так и их приращений, $v_k(t)$, $k = \overline{1, n}$ – k -ый элемент n -мерного вектора $\mathbf{v}(t)$. Сравнение совершается на окне наблюдения $\xi \in (t_H, t)$. Для сопоставления функций $v_{1k}(t)$ и $v_{2k}(t)$ сформируем двухкоординатный замер

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

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

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

откуда

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

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

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

Изменяющийся во времени замер $\mathbf{z}_k(t)$ описывает годограф в трёхмерном пространстве с координатами $\hat{\lambda}_k, \sigma_k, t$. Если предположить, что алгоритмическая модель по рисунку 3 а или 3 б не отличается от той части имитационной модели электрической системы, которая представляет защищаемый объект, то тем самым будут созданы 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 $\hat{\lambda}_k(t) \equiv 1, \sigma_k(t) \equiv 0$.

В общем случае алгоритмическая модель действует в базисе мгновенных токов и напряжений, в частном случае – в базисе комплексных величин. Соединение результатов наблюдения текущего и предшествующего режимов защищаемого объекта целесообразно всегда, но в первом случае просто необходимо для задания начальных условий, с которыми алгоритмическая модель входит в текущий режим. Величины предшествующего режима участвуют в формировании замеров непосредственно или же косвенным образом – через аварийные составляющие токов и напряжений или же через менее известные локальные компоненты [60].

1.5 Выводы

1. Представления о модели неповреждённого объекта как об индикаторе повреждения основываются на физически отчётливых представлениях о двух типах режимов системы, в состав которой входит наблюдаемый объект, – его собственные аварийные режимы и все альтернативные режимы, а также об адекватности модели объекту в альтернативных режимах и неадекватности в собственных аварийных режимах.

2. Распознавание подмножества аварийных режимов защищаемого объекта решается с помощью процедуры локализации противостоящего ему подмножества альтернативных режимов.

3. Инструментом локализации наблюдаемых режимов, альтернативных режимам повреждения защищаемого энергообъекта, служит алгоритмическая модель, составленная для его неповреждённого состояния в базисе мгновенных или комплексных значений.

4. Введено понятие о полном и неполном наблюдении объекта по отношению к его алгоритмической модели, при этом полное наблюдение разделено на подклассы максимального, избыточного и достаточного наблюдения.

5. Методика локализации носит общий характер при условии полного наблюдения защищаемого объекта. Основные её процедуры – формирование с помощью алгоритмической модели неповреждённого объекта двухкоординатных замеров и отображение их на своих плоскостях.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЕГО АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

2.1 Способы отстройки защиты трансформатора при БНТ

Бросок намагничивающего тока – это переходный процесс, проявляющийся в резком увеличении намагничивающего тока силового трансформатора (автотрансформатора) или трансформаторного комплекса (совокупности соединенных друг с другом трансформаторов), вызванный включением под напряжение или восстановлением напряжения после отключения внешнего КЗ, обусловленный возникновением свободной апериодической составляющей в магнитном потоке, приводящей к насыщению магнитопровода [29]. Амплитуда тока при бросках в начальный момент времени может в несколько раз превышать номинальное значение тока трансформатора. Дифференциальной защитой трансформатора броски тока воспринимаются как токи небаланса, т.е. являются ложными дифференциальными токами, поэтому необходимо применение специальных мер для их разграничения режимов БНТ и внутренних повреждений. Стоит заметить, режим БНТ трансформатора является непростым для распознавания защитой. Амплитуда, форма и длительность бросков тока зависят от множества факторов, среди которых момент времени включения трансформатора под напряжение, соединение обмоток трансформатора, остаточная индукция в магнитопроводе, материал магнитопровода и его характеристика намагничивания.

Распространено применение специальных блокировок для отстройки защиты трансформатора от режимов БНТ [27]. К защите трансформатора предъявляются жесткие требования – отстройка от режимов БНТ должна быть надежной и не должна снижать изначально высокое быстродействие защиты при внутренних повреждениях. Высокое быстродействие защиты позволяет минимизировать ущерб при повреждениях, способствует сохранению динамической устойчивости энергосистемы. Излишнее срабатывание защиты при БНТ сопряжено с износом коммутационных аппаратов, к тому же отключение

тока индуктивного характера вызывает высокие перенапряжения, что может представлять угрозу для трансформатора и быть косвенной причиной возникновения внутреннего КЗ [32].

В микропроцессорных защитах трансформатора широкое применение получили способы отстройки торможением второй гармонической составляющей намагничивающего тока и отслеживанием бестоковых пауз в дифференциальном токе. Данные способы позволяют выполнить блокировку защиты при апериодических и периодических бросках тока [27, 18-21]. К недостаткам относят снижение быстродействия защиты при внутренних повреждениях как минимум на один период промышленной частоты. В условиях насыщения ТТ [71, 42] при внутренних КЗ, когда форма тока существенно несинусоидальна, время срабатывания защиты может увеличиваться до сотен мс. В [109] отмечается, что с повышением класса напряжения и длины линии электропередачи ток при внутреннем повреждении трансформатора может содержать значительное число гармонических компонент, что также снижает быстродействие защиты.

Современные силовые трансформаторы проектируются с расчетом на работу при повышенных значениях магнитной индукции, применяются новые улучшенные типы электротехнической стали для магнитопровода, обладающие высокой прямоугольностью характеристики намагничивания. Данные обстоятельства приводят к уменьшению доли содержания второй гармоники в дифференциальном токе (по отношению к основной) и уменьшению бестоковой паузы при БНТ, что снижает эффективность блокировок. Ранее эмпирическим путем определено оптимальное значение уставки блокировки по второй гармонике – примерно 10-15 %. Однако для современных трансформаторов содержание второй гармоники в дифференциальном токе может быть ниже. Снижение уставки до уровня 5-7 % ведет к ощутимому перевесу баланса надежности срабатывания и несрабатывания защиты трансформатора в сторону последнего, и требует обоснования.

Примером низкого содержания второй гармоники в дифференциальном токе может служить осциллограмма БНТ при постановке трансформатора на

холостой ход на подстанции Ферросплав (Свердловская область), представленная на рисунке 5. Показаны токи стороны ВН трансформатора, дифференциальные токи, а также содержание второй гармоники в дифференциальном токе фазы B . Минимальное содержание второй гармоники составило 7,71 % в момент времени $t = 114$ мс. Длительность бестоковой паузы в дифференциальном токе фазы B составляет менее 5 мс.

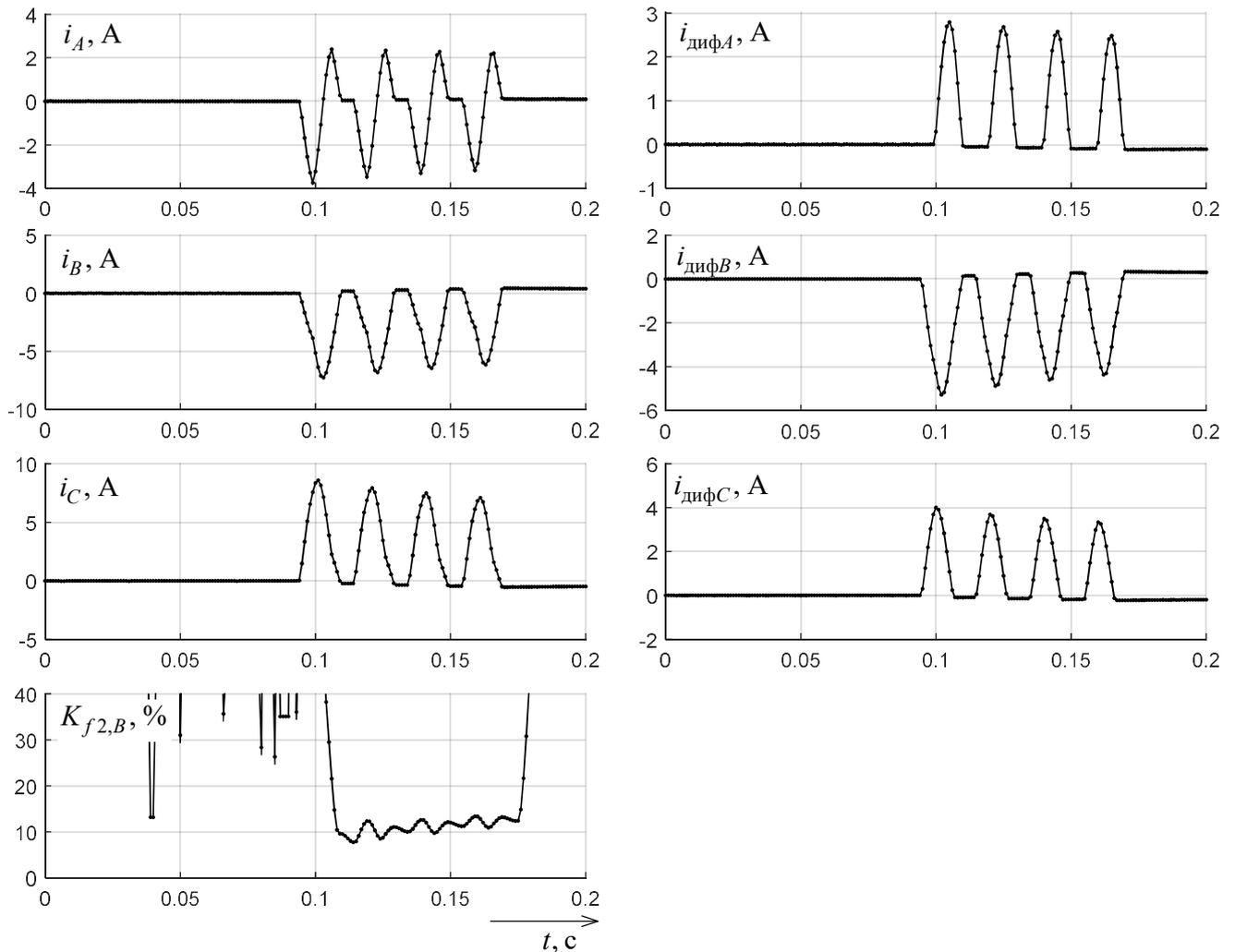


Рисунок 5 – Осциллограмма токов при БНТ и содержание второй гармоники в дифференциальном токе фазы B

В [32] предложен усовершенствованный алгоритм отстройки от бросков тока намагничивания, позволяющий выполнить отстройку при малой доле содержания второй гармоники. Способ идентификации основан на оценке разности фаз между векторами второй и основной гармоник тока намагничивания. По результатам испытаний авторами установлено, что алгоритм

повышает надежность несрабатывания защиты при БНТ при одновременном обеспечении надежности несрабатывания при внутренних КЗ.

Способ выполнения защиты трансформатора с использованием его модели был представлен в работе [109]. Основная идея предложенного алгоритма на примере однофазного двухобмоточного трансформатора (рисунок 6) заключается в регулярной проверке равенства, описывающего работу трансформатора,

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + u_2 + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt},$$

где u_1 и i_1 – напряжение и ток обмотки высшего напряжения (ВН), u_2 и i_2 – то же для обмотки низшего напряжения (НН), R_1 и L_1 – сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки ВН, R_2 и L_2 – то же для обмотки НН. Равенство выполняется в случае нормального режима работы, БНТ и внешних КЗ, в противном случае делается вывод о внутреннем повреждении. Алгоритм имеет высокое быстродействие, ему не требуются данные о магнитной характеристике стали магнитопровода, однако необходимо измерение токов и напряжений с обеих сторон трансформатора (максимальное наблюдение). Предложена модификация для защиты трехфазных трансформаторов, в том числе с распространенной группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$.

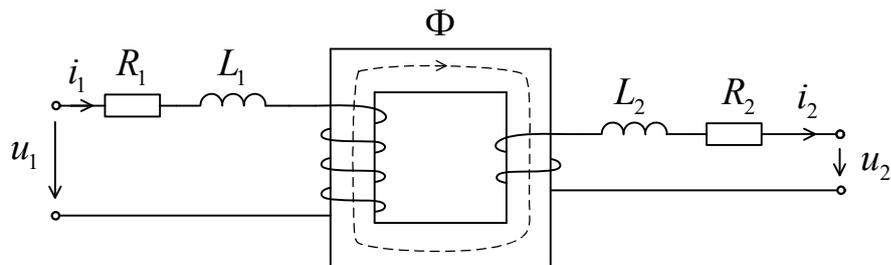


Рисунок 6 – Однофазный двухобмоточный трансформатор

Представляет интерес подход к распознаванию БНТ с использованием математической морфологии [114, 106], предложенный сравнительно недавно. Математическая морфология – теория и техника анализа и обработки геометрических структур, основанная на теории множеств, топологии и случайных функциях. В основном применяется в обработке цифровых

изображений. Кардинально отличается от методов обработки сигналов, основанных на интегральных преобразованиях, таких как преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. В отличие от них, преобразования с помощью операторов математической морфологии нелинейны. Более того, математическая морфология имеет дело с формой сигнала во временной области, а не в частотной.

Представлены два алгоритма с применением математической морфологии для идентификации БНТ. В первом алгоритме (Morphological Decomposition Scheme) разделение режимов БНТ и внутренних КЗ производится по асимметрии волны тока. В случае БНТ (рисунок 7 а) проявляется асимметрия формы волны как по амплитуде, так и по длительности положительной и отрицательной полуволн. На рисунке 7 б представлен ток внутреннего КЗ, это периодический сигнал с затухающей экспоненциальной составляющей. После обработки сигнала с помощью операторов математической морфологии (рисунок 7 в) положительная и отрицательная полуволны имеют схожую длительность и амплитуду, делается вывод о режиме КЗ. Данный алгоритм позволяет определить аperiodический тип БНТ, требуется окно наблюдения более 20 мс. Альтернативный алгоритм (Multi-resolution Decomposition Scheme for Inrush Identification) обладает большим быстродействием, его окно наблюдения составляет 10 мс. С помощью операторов математической морфологии выполняется декомпозиция сигнала тока на компоненты, определение БНТ выполняется по параметрам выделенных компонент. Обеспечивается надежная работа с второй гармоникой менее 10 %. Впрочем, опробование новых алгоритмов еще предстоит на практике.

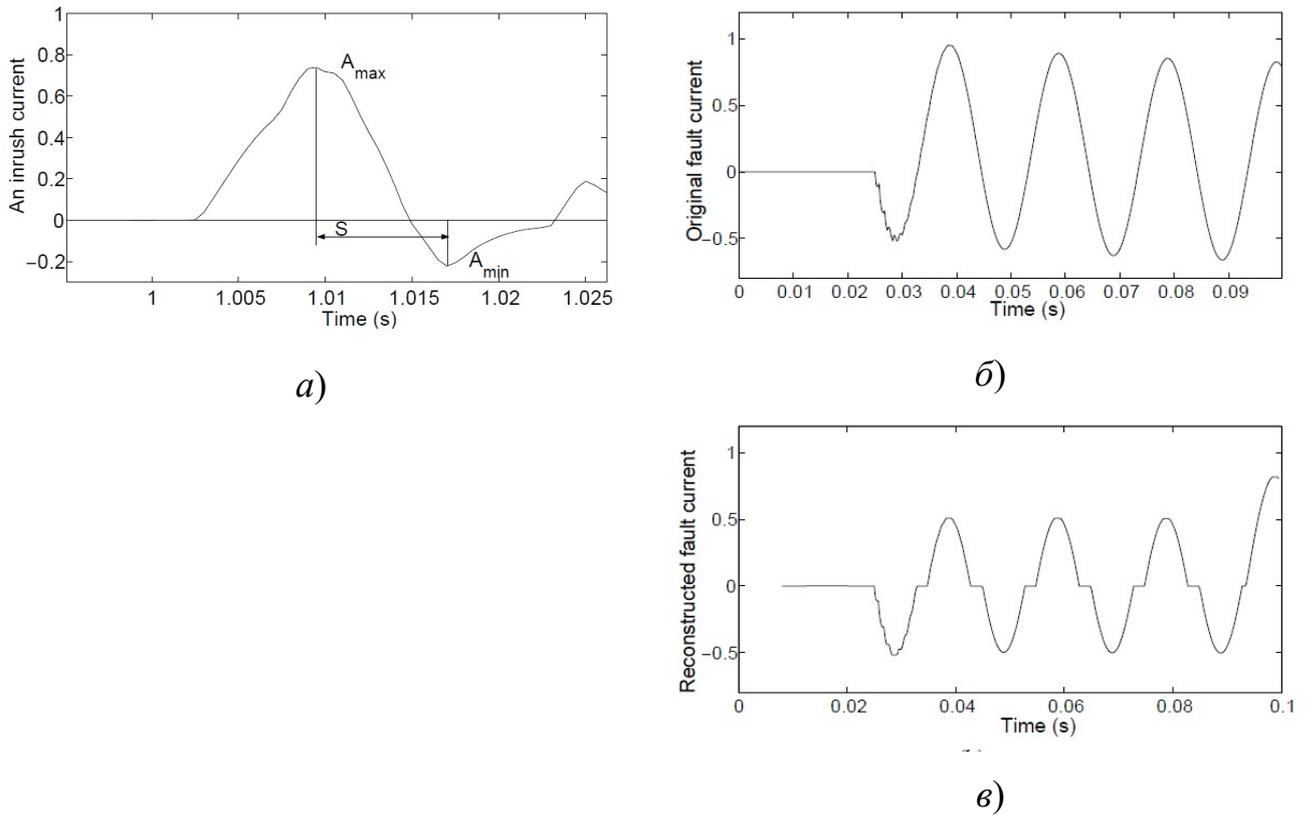


Рисунок 7 – Форма волны тока:

a – в режиме БНТ, *б* – в режиме внутреннего КЗ,

в – в режиме КЗ после декомпозиции

2.2 Разработка алгоритмической модели трансформатора

Выполнение защиты трансформатора с использованием метода локализации β -режимов подразумевает использование алгоритмической модели неповреждённого трансформатора. Наибольшее распространение имеет соединение обмоток трехфазного двухобмоточного трансформатора по схеме «звезда с нулем – треугольник» (Y_0/Δ), данная схема соединения приведена на рисунке 8.

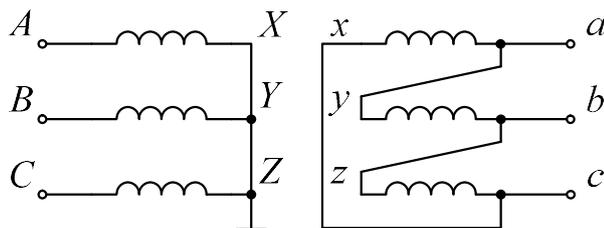


Рисунок 8 – Схема соединения обмоток трансформатора $Y_0/\Delta-11$

В качестве основы для построения алгоритмической модели трехфазного двухобмоточного трансформатора с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$ принята структурная схема по рисунку 9.

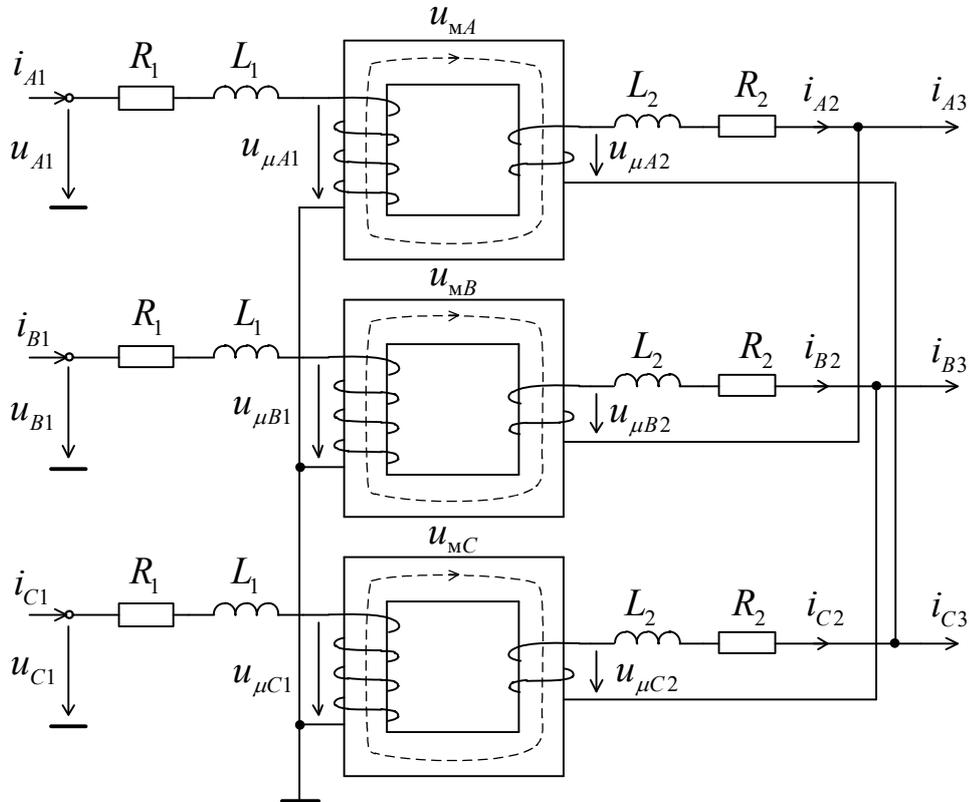


Рисунок 9 – Структурная схема трансформатора с соединением обмоток $Y_0/\Delta-11$

Представление трехфазного трансформатора в виде группы однофазных допустимо в том числе в нелинейных режимах работы, т.к. при этом обеспечивается приемлемая для целей релейной защиты точность моделирования [29]. Наблюдаемые величины – токи и напряжения первичной обмотки i_{v1} , u_{v1} и токи на выводах вторичной обмотки i_{v3} , здесь $v = A, B, C$ – обозначение произвольной фазы. Помимо наблюдаемых величин на схеме показаны токи вторичных обмоток i_{v2} , первичные и вторичные напряжения намагничивания $u_{\mu v1}$, $u_{\mu v2}$.

Алгоритмическая модель представлена на рисунке 10 и условно разделена на две части; первая – для фазы v от входа первичной обмотки до ветви намагничивания вторичной обмотки с напряжением $u_{\mu v2}$.

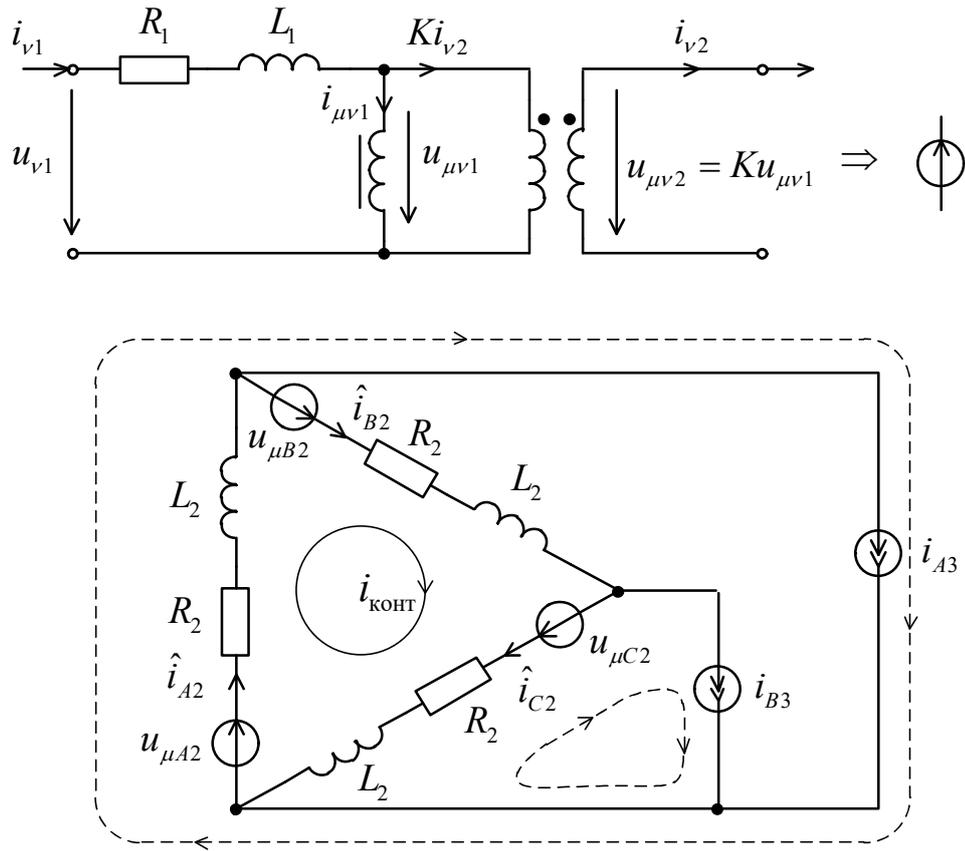


Рисунок 10 – Алгоритмическая модель трансформатора

Структурная схема описывается уравнениями первичной обмотки

$$u_{\mu v1} = u_{v1} - R_1 i_{v1} - L_1 \frac{di_{v1}}{dt}, \quad (5)$$

взаимосвязью вторичных токов

$$i_{v3} = i_{v2} - i_{v-1,2}, \quad (6)$$

где $v-1$ – обозначение отстающей фазы; уравнениями магнитной цепи

$$u_{\mu v1} = \frac{d\Psi_{v1}}{dt}, \quad (7)$$

$$u_{\mu v2} = K u_{\mu v1}, \quad (8)$$

$$i_{v1} - (1/K) i_{v2} = i_{\mu v1}, \quad (9)$$

где Ψ_{v1} – потокосцепление первичной обмотки, обусловленное основным потоком магнитопровода, K – коэффициент трансформации, $i_{\mu v1}$ – ток намагничивания, приведённый к первичной стороне; уравнением контурного тока треугольника обмоток

$$\frac{di_{\text{КОНТ}}}{dt} + \frac{1}{\tau_2} i_{\text{КОНТ}} = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{L_2} \sum_{v=A,B,C} u_{\mu v 2} - \frac{1}{\tau_2} (i_{A3} - i_{B3}) - \frac{d(i_{A3} - i_{B3})}{dt} \right], \quad (10)$$

где $\tau_2 = L_2/R_2$, и связью с ним токов отдельных обмоток

$$i_{A2} = i_{\text{КОНТ}} + i_{A3}, \quad (11)$$

$$i_{B2} = i_{\text{КОНТ}}, \quad (12)$$

$$i_{C2} = i_{\text{КОНТ}} - i_{B3}. \quad (13)$$

Алгоритмическая модель двухобмоточного трансформатора активируется наблюдаемыми величинами, позволяет определить токи в обмотках НН, соединенных в «треугольник».

2.3 Замеры для защиты трансформатора

Рассмотрена задача распознавания внутренних повреждений (α -режимы), а именно витковых замыканий в обмотках трёхфазного трансформатора с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$. К противостоящим β -режимам относятся нагрузочные режимы, режимы внешних КЗ, БНТ, перевозбуждение трансформатора.

Для активирования алгоритмической модели наблюдению подлежат токи и напряжения первичной обмотки $i_{v1}(t)$, $u_{v1}(t)$, $v = A, B, C$, а также токи $i_{v3}(t)$ за треугольником вторичных обмоток.

В качестве имитационной модели использовалась сеть с трансформатором типа ТДН-63000/110 с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$. Трансформатор 110/35 кВ мощностью 63 МВА имеет следующие параметры обмоток: $R_1 = 0,408$ Ом, $L_1 = 0,035$ Гн, $R_2 = 0,137$ Ом, $L_2 = 0,012$ Гн. Данные значения предоставляются как имитационной, так и алгоритмической моделям. Ветвь намагничивания трансформатора в имитационной модели представлена индуктивностью с кусочно-линейной вебер-амперной характеристикой $\Psi_1(i_{\mu 1})$, проходящей в первом квадранте через начало координат и две другие точки – (298,88 Вб; 2,236 А) и (298,97 Вб; 4,473 А). Магнитопроводы современных трансформаторов изготавливаются из холоднокатаной анизотропной

электротехнической стали с высокой прямоугольностью характеристики намагничивания и низкими удельными магнитными потерями [73], что делает допустимым пренебрежение частными циклами перемагничивания [27]. Система представлена симметричным трехфазным источником напряжений $u_{v1}(t) = \sqrt{2/3} \cdot 115 \sin(\omega t + \gamma_v)$ кВ с сопротивлением $Z_S^{(1)} = Z_S^{(0)} = 0,6 + j3,3$ Ом. Бросок имитировался включением трансформатора в режиме холостого хода при $\gamma_A = 0$. Витковые замыкания в обмотках трансформатора моделировались согласно методике [95].

Какому типу наблюдения отвечает алгоритмическая модель, определяется подмоделью ветви намагничивания. Далее рассмотрены три варианта в порядке упрощения и предложены соответствующие замеры для защиты.

2.3.1 Без привлечения априорной информации о ветви намагничивания

В таком случае ветвь намагничивания интерпретируется как неопределённый элемент алгоритмической модели, следовательно, это случай достаточного наблюдения, не предоставляющий возможности оставить в резерве ни одну из наблюдаемых величин, но позволяющий вместе с тем сформировать три замера с использованием всех закономерностей (5)-(13). Вектор замера имеет вид

$$\mathbf{z}_v(t) = [\Delta\Psi_{v1}(t), \Delta i_{\mu v1}(t)]^T, \quad (14)$$

где

$$\Delta\Psi_{v1}(t) = \int_{t-\Delta t}^t u_{\mu v1}(\xi) d\xi, \quad (15)$$

$$\Delta i_{\mu v1}(t) = i_{\mu v1}(t) - i_{\mu v1}(t - \Delta t). \quad (16)$$

Приращение потокосцепления определяется на основании соотношений (5) и (7). Приращение тока намагничивания – по соотношению (9) после определения токов вторичных обмоток i_{v2} , что совершается на основании соотношений (8), (10)-(13).

Наиболее простой модификацией замера является функция времени, имеющая смысл дифференциальной индуктивности ветви намагничивания фазы ν неповреждённого трансформатора

$$\lambda_\nu(t) = \frac{d\Psi_{\nu 1}(t)}{di_{\mu\nu 1}(t)}. \quad (17)$$

В соответствии с моделью неповреждённого трансформатора напряжения вторичных обмоток

$$\hat{u}_{\nu, \nu-1, 2} = u_{\mu\nu, \nu-1, 2} - R_2 i_{\nu 2} - L_2 \frac{di_{\nu 2}}{dt}. \quad (18)$$

Располагая наблюдаемыми напряжениями $u_{\mu\nu, \nu-1, 2}$, можно добавить к замерам (17) ещё два независимых замера из трёх имеющихся

$$\varepsilon_{\nu, \nu-1}(t) = \frac{u_{\nu, \nu-1, 2}(t) - \hat{u}_{\nu, \nu-1, 2}(t)}{u_{\nu, \nu-1, 2}(t) + \hat{u}_{\nu, \nu-1, 2}(t)}.$$

На рисунках 11 и 12 даны иллюстрации преобразования наблюдаемых величин в замер (17) с помощью алгоритмической модели при БНТ и при витковых замыканиях.

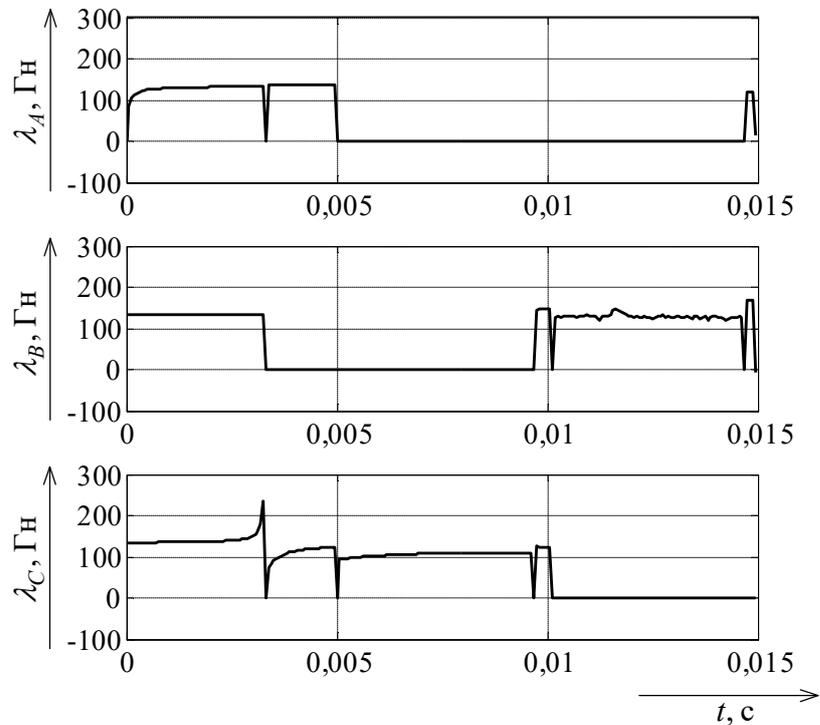


Рисунок 11 – Изменение замеров $\lambda_\nu(t)$ в режиме БНТ

Витковое замыкание через переходное сопротивление 0,1 Ом имитировалось в одном витке первичной обмотки фазы В. Время наблюдения всех режимов составляло 15 мс.

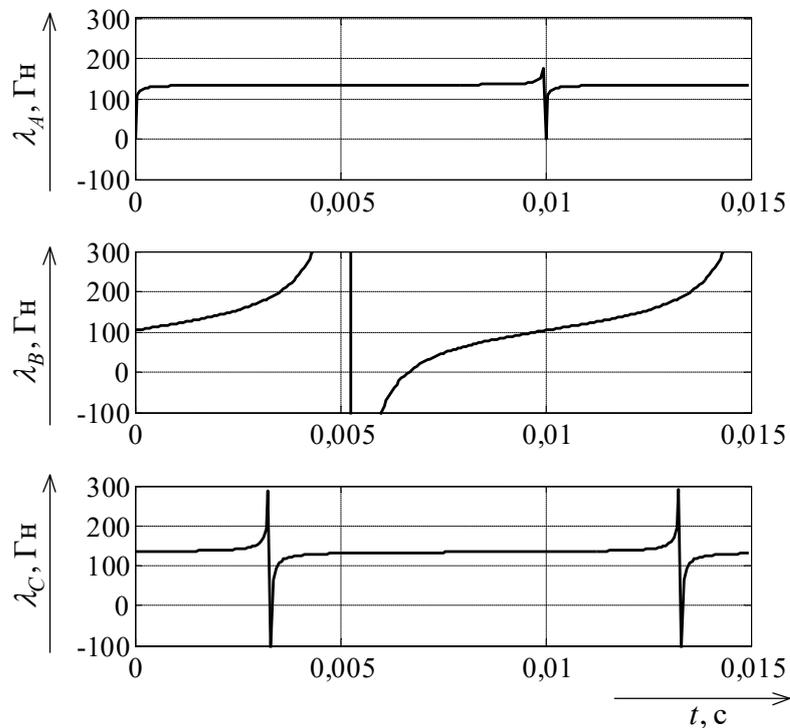


Рисунок 12 – Изменение замеров $\lambda_v(t)$ в режиме виткового замыкания

Как видно из рисунков 11 и 12, замеры $\lambda_v(t)$ при насыщении магнитопровода каждой фазы принимают нулевой уровень, а при замыкании в обмотке изменяются по иному закону.

Большой наглядностью обладает трёхмерное отображение двух противоположных процессов в координатах $\frac{d\Psi_{v1}}{dt}$, $\frac{di_{\mu v1}}{dt}$, t (рисунок 13), говорящее о том, что отображение броска тока носит прерывистый характер с протяжёнными участками насыщения, а отображение КЗ – гладкий и спиралевидный.

Таким образом, установлено, что замер (14)-(16) способствует разграничению витковых замыканий и БНТ трансформатора.

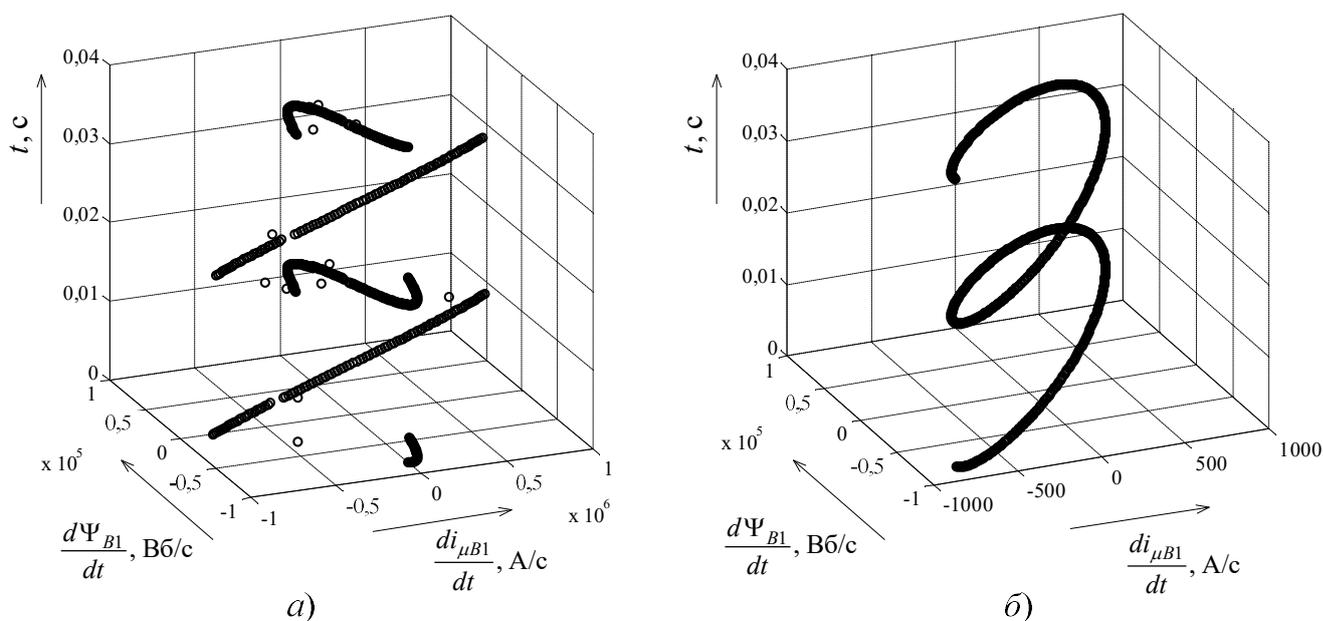


Рисунок 13 – Отображение процессов фазы B в трёхмерном пространстве:

a – бросок намагничивающего тока, b – замыкание в одном витке

2.3.2 С моделью ветви намагничивания ненасыщенного трансформатора

Индуктивность L_μ ветви намагничивания неизвестна. Наблюдение сохраняет свой характер, оставаясь достаточным, но замер (14) целесообразно заменить замером, проистекающим из сопоставления близких величин на основе (3), (4). На основании равенства (7) имеем для приращений

$$L_{\mu 1} \Delta i_{\mu v 1}(t) = \Delta \Psi_{v 1}(t), \quad (19)$$

и соответствующий замер

$$\mathbf{z}_v(t) = \left[\hat{L}_{\mu 1}(t), \sigma(t) \right]^T, \quad (20)$$

$$\hat{L}_{\mu 1}(t) = \frac{\int_{t_H}^t \Delta \Psi_{v 1}(\xi) \Delta i_{\mu v 1}(\xi) d\xi}{\int_{t_H}^t \Delta i_{\mu v 1}^2(\xi) d\xi}, \quad (21)$$

$$\sigma(t) = \frac{1}{t - t_H} \int_{t_H}^t \left(\Delta \Psi_{v 1}(\xi) - \hat{L}_{\mu 1}(t) \Delta i_{\mu v 1}(\xi) \right) d\xi. \quad (22)$$

2.3.3 С задаваемой индуктивностью ветви намагничивания L_μ

В данном случае приращение тока намагничивания определяется непосредственно из (15), (19)

$$\Delta i_{\mu v1}(t) = \frac{1}{L_{\mu 1}} \int_{t-\Delta t}^t u_{\mu v1}(\xi) d\xi, \quad (23)$$

и наблюдение становится избыточным, так как имитационная модель приобретает способность определять приращения токов в треугольнике из соотношения (9) без обращения к контурному уравнению (10):

$$\Delta i_{v2}^{(1)}(t) = K \left(\Delta i_{v1}(t) - \Delta i_{\mu v1}(t) \right), \quad (24)$$

где верхний индекс говорит о том, что преобразования совершаются без привлечения вторичных наблюдаемых токов i_{v3} . Приращение выходного тока определяется алгоритмической моделью на основании равенства (6)

$$\Delta i_{v3}^{(1)}(t) = \Delta i_{v2}^{(1)}(t) - \Delta i_{v-1,2}^{(1)}(t), \quad (25)$$

а замеры $\mathbf{z}_v^{(1)}(t)$ формируются из пар приращений наблюдаемого тока $\Delta i_{v3}(t)$ и тока модели $\Delta i_{v3}^{(1)}(t)$ по алгоритму (3), (4).

Возможность обойтись без уравнения (10) экономит вычислительные ресурсы релейной защиты, но имеет вместе с тем и обратную сторону: недоиспользуется априорная информация, заключённая в алгоритмической модели. Отсюда следует целесообразность формирования наряду с замерами $\mathbf{z}_v^{(1)}(t)$ ещё и замеров $\mathbf{z}_v^{(2)}(t)$, получаемых также по алгоритму (3), (4), но на этот раз путём сравнения приращений $\Delta i_{v2}^{(1)}(t)$ с $\Delta i_{v2}^{(2)}(t)$; последние определяются из уравнения (10) и равенств (11)-(13).

В частном случае данного варианта ток намагничивания вообще исключается из рассмотрения, т.е. принимается $L_\mu \rightarrow \infty$. Казалось бы, алгоритмическая модель предельно упрощается, но это касается всё той же ветви алгоритма, отмеченной верхним индексом 1, которая ограничивается связями (9) и (6) между токами, не привлекая не только априорную информацию в виде

уравнений (5) и (10), но и часть текущей информации, заключённую в наблюдаемых напряжениях. Следовательно, и в данном случае целесообразно дополнительно сформировать замеры $\mathbf{z}_v^{(2)}(t)$ путём определения токов $i_{v2}^{(2)}(t)$ с помощью соотношений (5), (10)-(13) и сравнения их с токами $i_{v2}^{(1)}(t) = (1/K)i_{v1}(t)$.

В приводимой далее иллюстрации метода применяются алгоритмические модели с $L_\mu \rightarrow \infty$ и $L_\mu = \text{const}$. Имитировались внешние и внутренние повреждения. Внешние – междуфазные короткие замыкания $K_{AB}^{(2)}$ на выводах вторичной обмотки через переходное сопротивление 5 Ом. Внутренние – витковые замыкания в первичной обмотке фазы B через переходное сопротивление 0,1 Ом. Алгоритмические модели и формируемые в них замеры подобраны с таким расчётом, чтобы одни модели и замеры наилучшим образом учитывали специфику внешних замыканий, а другие – внутренних. В первой алгоритмической модели, ориентированной на внешние замыкания, ток намагничивания не учитывается ($L_\mu \rightarrow \infty$). В ней формируются замеры

$$\mathbf{z}_{v,v-1}(t) = \left[\hat{\lambda}_{v,v-1}(t), \sigma_{v,v-1}(t) \right]^T, \quad (26)$$

интерпретируемые как линейные, так как определяются по разности фазных токов, модельных

$$\hat{i}_{v,v-1,3}(t) = \hat{i}_{v3}(t) - \hat{i}_{v-1,3}(t) \quad (27)$$

и наблюдаемых $i_{v3}(t)$, $i_{v-1,3}(t)$. Во второй алгоритмической модели, ориентированной на витковые замыкания, ветвь намагничивания представлена индуктивностью $L_\mu = 133,7$ Гн, совпадающей со значением индуктивности в имитационной модели на рабочем участке нелинейной характеристики намагничивания. Формируемые фазные замеры

$$\mathbf{z}_v(t) = \left[\hat{\lambda}_v(t), \sigma_v(t) \right]^T \quad (28)$$

определяются на базе приращений токов первого типа $\Delta i_{v2}^{(1)}(t)$, определяемых как в (24), и приращений второго типа $\Delta i_{v2}^{(2)}(t)$, определяемые с привлечением контурного уравнения (10).

На рисунке 14 приведены годографы замеров (26) и (28) при внешнем коротком замыкании $K_{AB}^{(2)}$ и при замыкании в одном проценте витков первичной обмотки. В предшествующем режиме трансформатор нёс номинальную нагрузку с $\cos \varphi = 0,85$. Момент замыкания $t_0 = 0$. Цифровая обработка наблюдаемых величин проводилась с частотой дискретизации 16 кГц на текущем окне наблюдения продолжительностью $\Delta t = 2$ мс при общем времени наблюдения 30 мс.

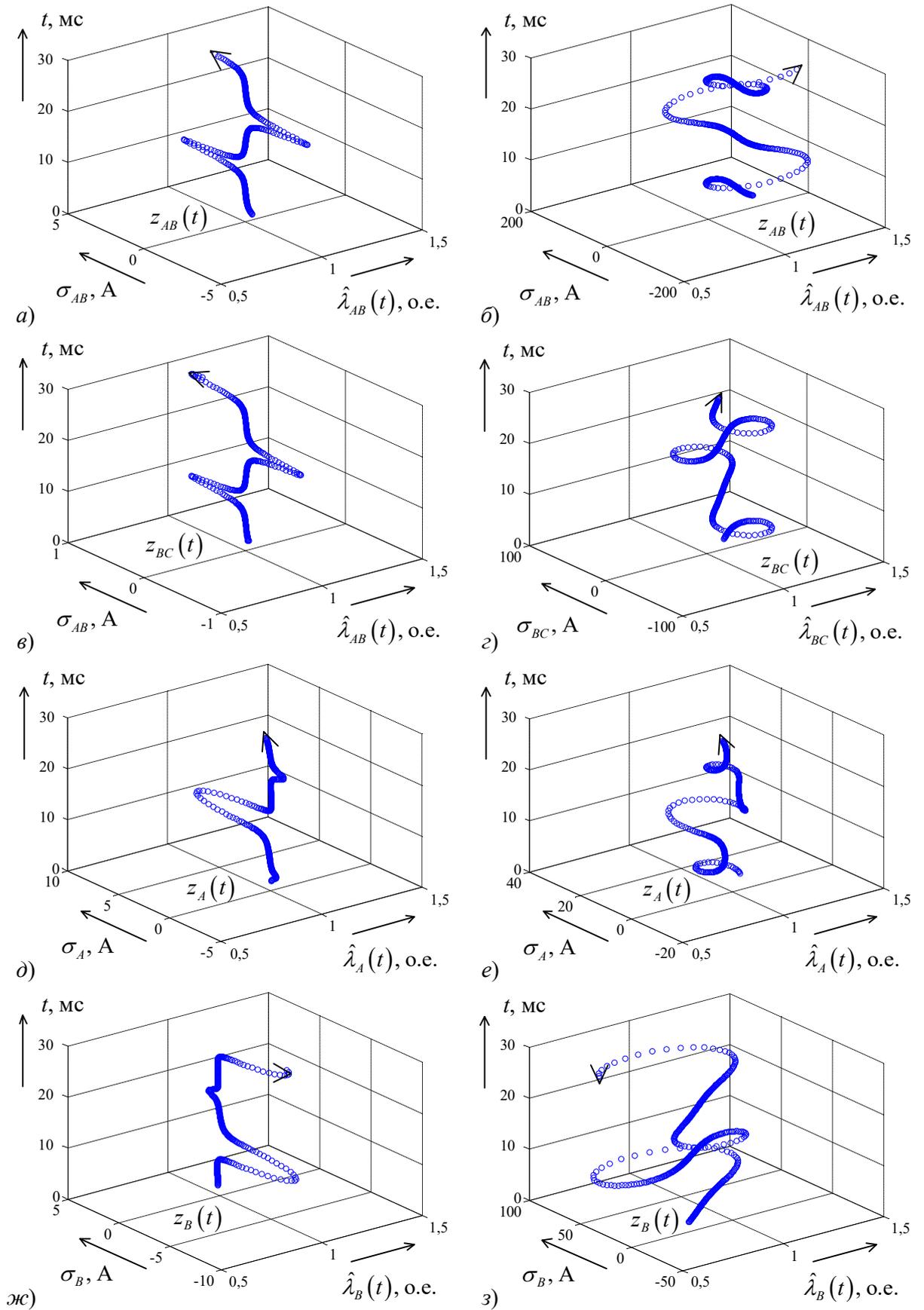


Рисунок 14 – Годографы замеров:

$a, в, д, ж$ – при внешнем замыкании $K_{AB}^{(2)}$; $б, г, е, з$ – при витковом замыкании

Обращают на себя внимание качественные различия в ходе годографов при внешнем (рисунки 14 *а, в, д, ж*) и внутреннем замыканиях (рисунки 14 *б, з, е, з*). Первые имеют плоскую форму, располагаясь по преимуществу в плоскости $\hat{\lambda} = 1$, вторые – винтообразные. Они по-разному ориентированы относительно прямой $\hat{\lambda} = 1, \sigma = 0$, на которой располагались бы годографы внешних замыканий при идеальной локализации. Казалось бы, первый замер (26) создаёт для этого необходимые условия, однако не все. Не учитывается ток намагничивания, присутствующий в имитационной модели, чем и объясняются имеющие место отклонения годографов внешних замыканий от идеальной линии. Тем не менее, привязка годографов к этой линии очевидна. Подтверждается предположение, что годографы линейных замеров (рисунки 14 *а, в*) превосходят годографы фазных замеров (рисунки 14 *д, ж*) по степени локализации альтернативных режимов. Годографы виткового замыкания (рисунки 14 *б, з, е, з*) отличаются не только формой, но и масштабом изменения. Как и предполагалось, к замыканию витков в фазе *В* наиболее чувствителен замер $z_B(t)$ (рисунок 14 *з*), годограф которого характеризуется наибольшим диапазоном изменений координаты $\hat{\lambda}_B$.

2.4 Выводы

1. Распространенные способы блокировки защиты трансформатора в режимах БНТ по контролю второй гармоники и по отслеживанию бестоковых пауз в дифференциальном токе снижают быстродействие защиты и могут быть неэффективны для современных трансформаторов.

2. Разработана алгоритмическая модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с группой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$ в базисе мгновенных величин, позволяющая определять приращения намагничивающих токов и потокосцеплений фаз. Модель может быть использована как структурный элемент при разработке защиты.

3. Определены эффективные замеры для защиты трансформатора, реализуемой на основе его алгоритмической модели. Рассмотрены три варианта формы учета ветви намагничивания трансформатора.

4. Предложенные способы защиты трансформатора обеспечивают высокую распознающую способность, позволяют разграничить режимы внутренних КЗ и БНТ за время порядка 5 мс, к тому же обладают необходимой чувствительностью к витковым замыканиям.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ МОДИФИКАЦИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Анализ алгоритмов защиты трансформатора в режимах внутренних повреждений

Значительная доля повреждений трансформаторного оборудования приходится на витковые замыкания в обмотках (рисунок 15). Согласно статистическим данным 70–80% от числа всех повреждений трансформаторов связано с повреждением изоляции обмоток [8, 98], на витковые замыкания приходится 25–45% от всех повреждений трансформаторов в зависимости от мощности и условий эксплуатации [67]. Как явствует из обзора повреждений трансформаторов первоочередными причинами повреждений в обмотках являются старение изоляции и недостаточная электродинамическая стойкость при внешних КЗ [8, 84]. Также к причинам относят наличие влаги в масле, обнажение обмоток вследствие понижения уровня масла, дефекты провода обмотки (заусенцы, внутренние раковины, плохая пайка), неправильная укладка и другие факторы.



Рисунок 15 – Витковое замыкание в обмотке автотрансформатора

Принимая во внимание современные реалии эксплуатации – работа оборудования с перегрузкой, с превышением расчетного срока службы,

вероятность возникновения внутренних повреждений в трансформаторах повышается. Существуют математические модели старения, показывающие оценку возникновения повреждений оборудования будущем, то есть прогнозные показатели надежности. На рисунке 16 представлен график функции повреждения трансформаторов (модифицированная модель Гомпертца) в зависимости от срока эксплуатации.

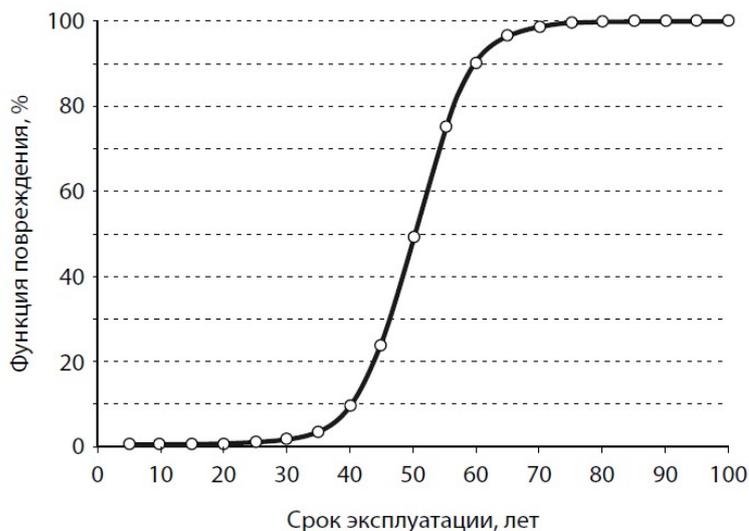


Рисунок 16 – Распределение функции повреждения оборудования в зависимости от срока эксплуатации

Выявление витковых замыканий в обмотках хотя и входит в число задач диагностики трансформатора, однако очевидна важность автоматического быстрого выявления и ликвидации их средствами релейной защиты на начальном этапе развития повреждения. При витковых замыканиях в обмотках ток ввода во много раз меньше тока в поврежденных витках, от которого зависит быстрота и объем разрушения трансформатора [29, 87]. Поэтому основная быстродействующая дифференциальная защита, предназначенная для работы при всех видах внутренних повреждений, имеет относительно невысокую чувствительность к замыканиям в обмотках. Газовая защита в свою очередь имеет большое время срабатывания при малом числе замкнутых витков. Более чувствительными к витковым замыканиям являются защиты, фиксирующие изменение картины поля рассеяния и использующие для этого индукционные

датчики [29, 67]. Однако данные защиты имеют недостатки (наличие зоны нечувствительности в середине обмотки, трудности крепления и эксплуатации широкого применения), не имеют широкого распространения.

В результате ограниченной чувствительности или быстрого действия защиты повреждение развивается до той величины, пока не окажется распознанным. Развитие может приводить к более серьезным повреждениям (выгоранию меди в нескольких проводниках обмоток, нарушению межвитковой и межкатушечной изоляции, повреждению магнитопровода, разгерметизации бака) с дорогим ремонтом, подчас сравнимым со стоимостью нового трансформатора. В некоторых случаях деградация изоляции в конечном итоге может привести к катастрофическим последствиям в виде пожара и взрыва [84]. Таким образом, задача выявления витковых замыканий на ранней стадии развития и с высоким быстрым действием представляется актуальной.

Примечательно, что дифференциальный принцип – один из первых в релейной защите и находит применение в системах защиты энергообъектов уже более века. Вместе с тем, дифференциальная защита трансформатора совершенствуется, получает дополнительные модули в своей структуре. Ведется непрерывный поиск решений для оптимизации отдельных функций защиты с оглядкой на эксплуатационный опыт работы защитных систем в сетях и новые технические возможности. Выполнение отстройки защиты от режима БНТ с помощью торможения второй гармонической составляющей дифференциального тока и время-импульсного торможения в электронных реле ДЗТ-21 позволило существенно понизить начальный ток срабатывания по сравнению с предшествующими электромеханическими реле ДЗТ-11, тем самым был обеспечен определенный уровень чувствительности к витковым замыканиям. С переходом на микропроцессорную базу дифференциальная защита трансформатора получает такие нововведения как цифровая компенсация группы соединения обмоток трансформатора и выравнивание токов плеч. Подробно исследованы и находят применение в устройствах различные способы формирования тормозного тока защиты [103, 65]. Технически возможным для

терминалов является учет положения устройства РПН с целью адаптивной корректировки коэффициента выравнивания токового плеча, однако на практике решение не получило широкого распространения. Следует иметь в виду, что одна из составляющих тока небаланса обусловлена изменением коэффициента трансформации защищаемого трансформатора. Обобщая, ток срабатывания цифровой дифференциальной защиты трансформатора с процентным торможением примерно равен таковому в статических реле, т.к. используются одинаковые критерии отстройки от небалансов, включая БНТ, а, следовательно, и чувствительность к витковым замыканиям остается на прежнем уровне.

Компанией АВВ (Швеция) относительно недавно предложен и применен в интеллектуальных электронных устройствах защиты трансформатора алгоритм дифференциальной защиты по токам обратной последовательности (sensitive negative sequence based turn-to-turn fault protection), более чувствительной к слабым внутренним повреждениям [96, 112]. Данная защита также реализована в устройствах защиты компании SEL (США), по информации производителя инновационная функция дифференциальной защиты по токам обратной последовательности (innovative negative-sequence differential protection) позволяет выявить замыкания до 2% замкнувшихся витков обмотки [111]. Принцип действия основан на сравнении токов обратной последовательности по сторонам трансформатора (рисунок 17). Известно, что место повреждения является источником несимметрии. Токи обратной последовательности направлены из поврежденного трансформатора в стороны ВН и НН прилегающих сетей. В то время как при внешнем повреждении ток обратной последовательности втекает с одной стороны и вытекает с другой. Сравнение по углу θ между векторами токов обратной последовательности по сторонам $I_{ВН}^{(2)}$ и $I_{НН}^{(2)}$ разрешается только при условии превышения их модуля определенной величины. Преимущество в чувствительности, по сравнению с традиционным дифференциальным замером, достигается в первую очередь за счет малой уставки срабатывания измерительных органов тока обратной последовательности. Подробное описание алгоритма,

исследование надежности и чувствительности, рассмотрение вопросов применения для защиты различных объектов приводится в [98, 104, 2].

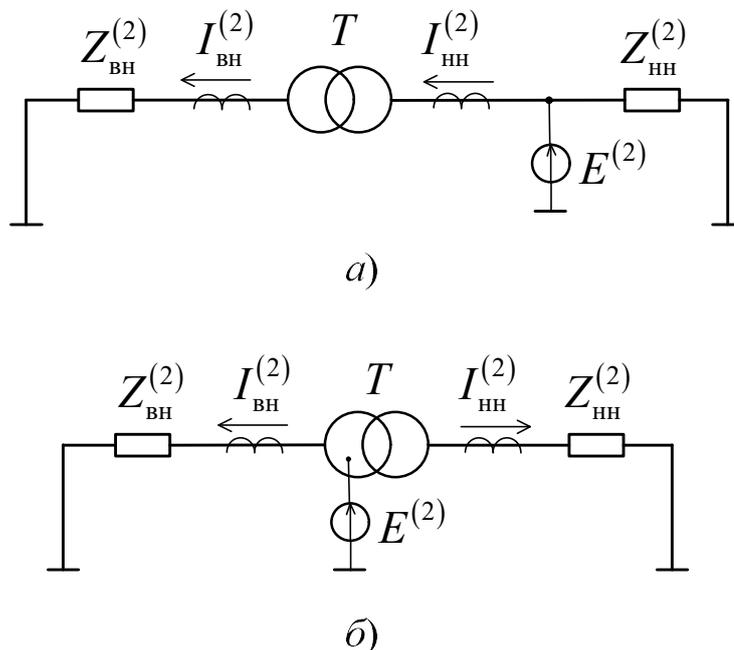


Рисунок 17 – Протекание токов обратной последовательности:

а – при внешнем КЗ, *б* – при внутреннем замыкании

3.2 Распределение токов при витковых замыканиях в обмотках и их распознаваемость традиционной защитой

Как отмечалось, особенностью режима витковых замыканий в обмотках является то, что они не вызывают значительного увеличения токов на выводах [29, 87]. Проведено исследование распределения токов и чувствительности традиционной дифференциальной защиты при витковых замыканиях в обмотках трехфазного двухобмоточного трансформатора ТДН-63000/110 с группой соединения $Y_0/\Delta-11$. Параметры имитационной модели приведены в подразделе 2.3 настоящей работы. Витковые замыкания производились через переходное сопротивление $R_f = 0,15$ Ом в обмотках фазы *В* трансформатора на стороне ВН «звезды» и на стороне НН «треугольника».

На рисунке 18 представлены зависимости действующих значений основной гармоники токов фаз на выводах стороны ВН от количества замкнувшихся витков при повреждении в обмотке ВН (*а*) и повреждении в обмотке НН (*б*). Как и

ожидалось, ток на выводе поврежденной фазы возрастает интенсивнее с увеличением числа замкнувшихся витков, нежели токи выводов неповрежденных фаз, как при замыкании в обмотке ВН, так и в обмотке НН. При 15% замкнувшихся витков токи поврежденной фазы B превышают свое номинальное значение примерно в 10 и в 5 раз, соответственно, при замыканиях на сторонах ВН и НН.

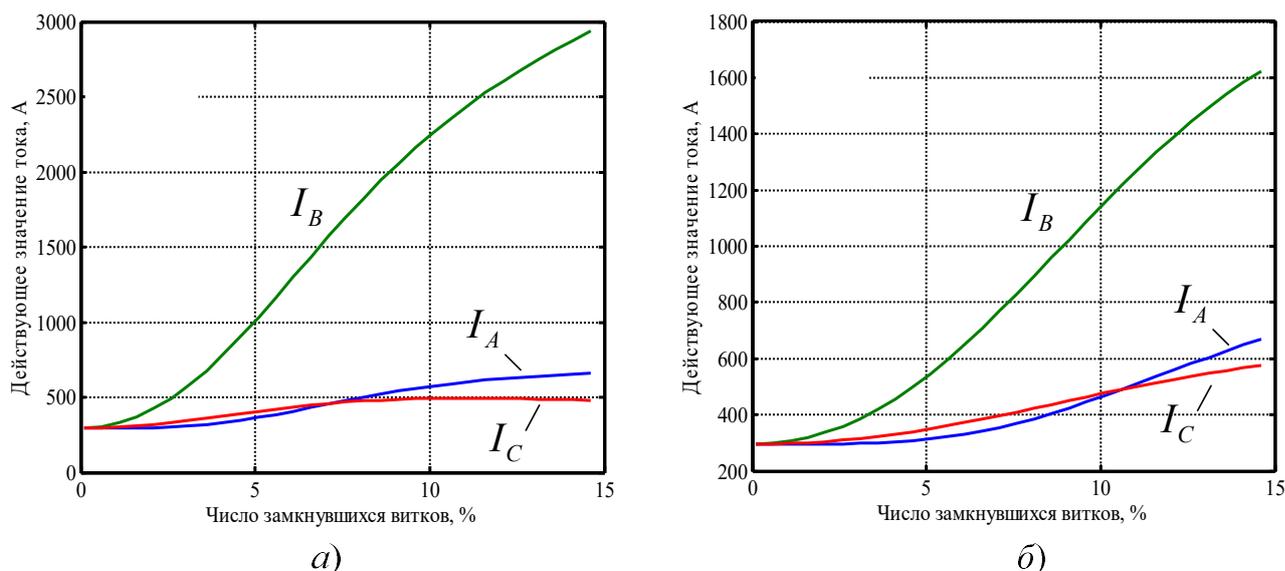


Рисунок 18 – Токи выводов стороны ВН:

a – витковое замыкание на стороне ВН; $б$ – витковое замыкание на стороне НН

На рисунке 19 представлены действующие значения токов на выводах стороны НН при тех же замыканиях, что и в предыдущем случае. Ввиду того, что трансформатор получает питание со стороны ВН, с ростом числа замкнувшихся витков увеличения фазных токов НН не происходит. В фазах A и B наблюдается снижение токов, ток фазы C остается неизменным.

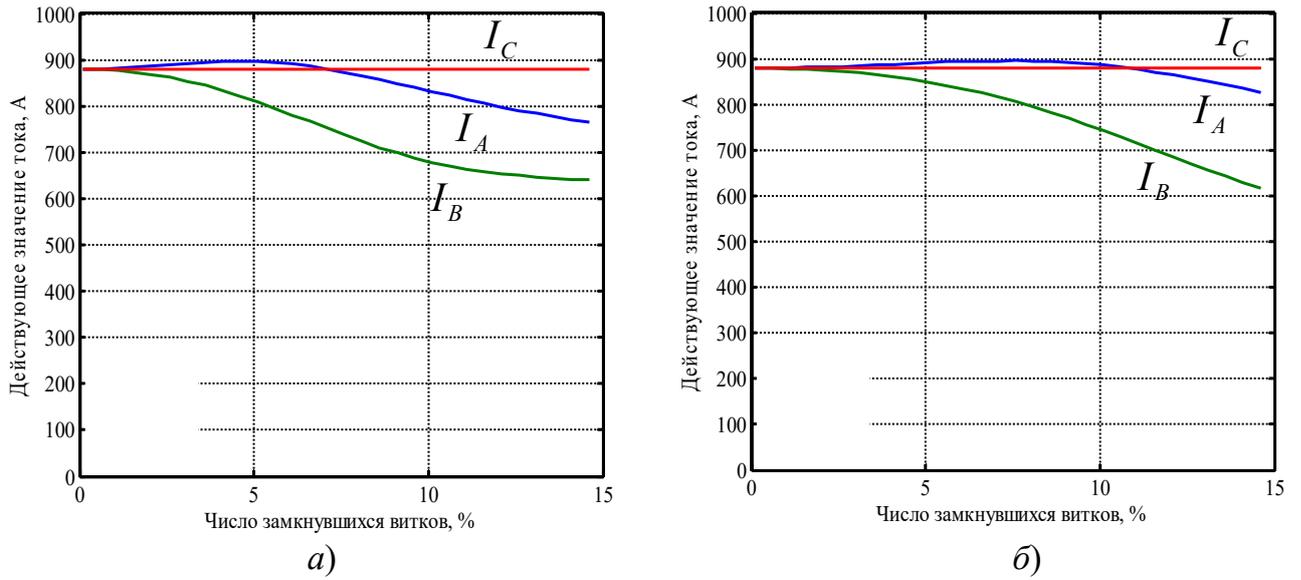


Рисунок 19 – Токи выводов стороны НН:

a – витковое замыкание на стороне ВН; $б$ – витковое замыкание на стороне НН

На рисунке 20 показаны зависимости для токов в поврежденной части обмотки. Данные токи во много раз превышают больше токов на выводах, достигают десятков килоампер и опасны с точки зрения термической стойкости проводника обмотки и его изоляции.

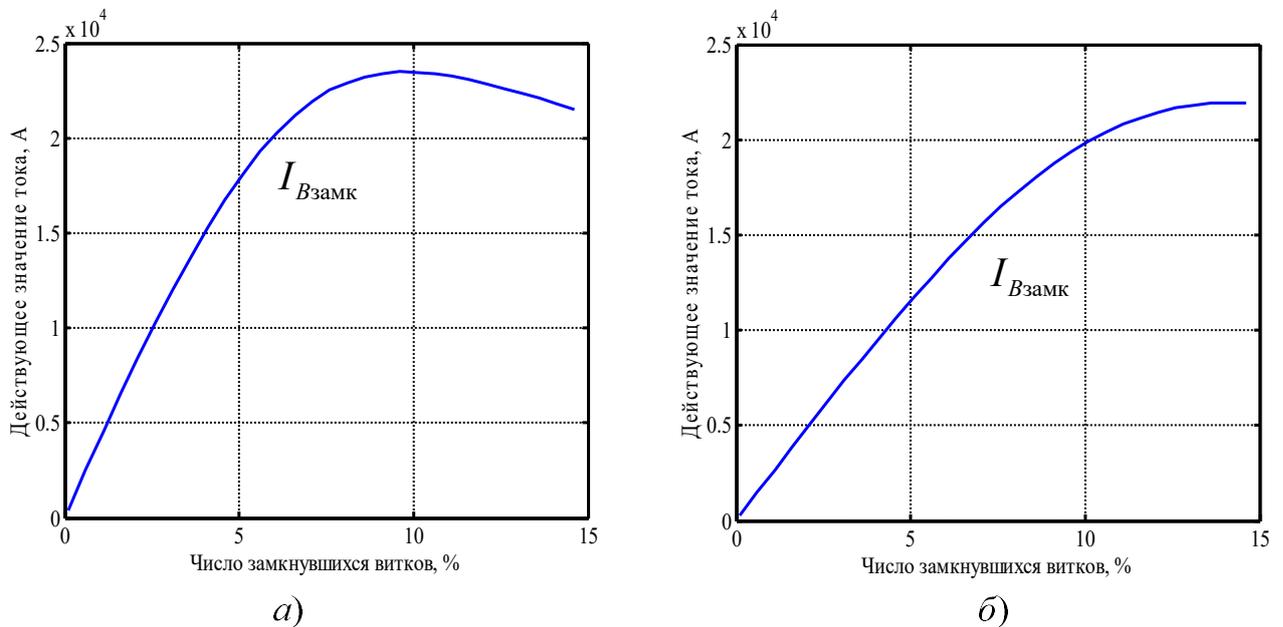


Рисунок 20 – Ток замкнувшихся витков:

a – витковое замыкание на стороне ВН; $б$ – витковое замыкание на стороне НН

На рисунке 21 показаны графики изменения сдвига фаз векторов токов одноименных фаз по сторонам трансформатора. С увеличением числа

замкнувшихся витков во всех трех фазах наблюдается отклонение от первоначального сдвига 30° , характерного для трансформатора с 11 группой соединения обмоток без повреждения.

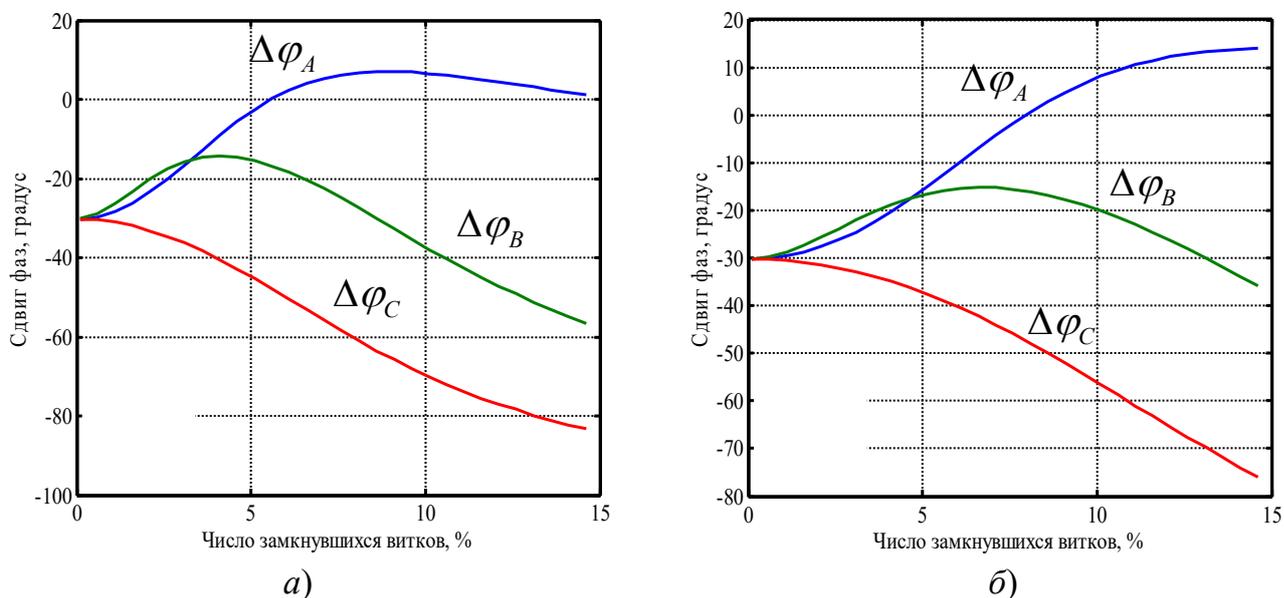


Рисунок 21 – Сдвиг фаз токов по сторонам:

a – витковое замыкание на стороне ВН; *б* – витковое замыкание на стороне НН

На рисунках 22, 23 представлены графики изменения токов замкнувшихся при витковых замыканиях в обмотках фазы *B* сторон ВН и НН в зависимости от числа замкнувшихся витков при различных переходных сопротивлениях R_f . При минимальных значениях R_f графики имеют явно выраженный экстремум, который постепенно вырождается с увеличением переходного сопротивления. Таким образом, наибольшую опасность представляют витковые замыкания небольшой части обмотки через минимальное активное сопротивление, поскольку характеризуются наибольшими токами в поврежденной части, при относительно небольших изменениях токов выводов, и возможной нечувствительностью дифференциальной защиты к ним.

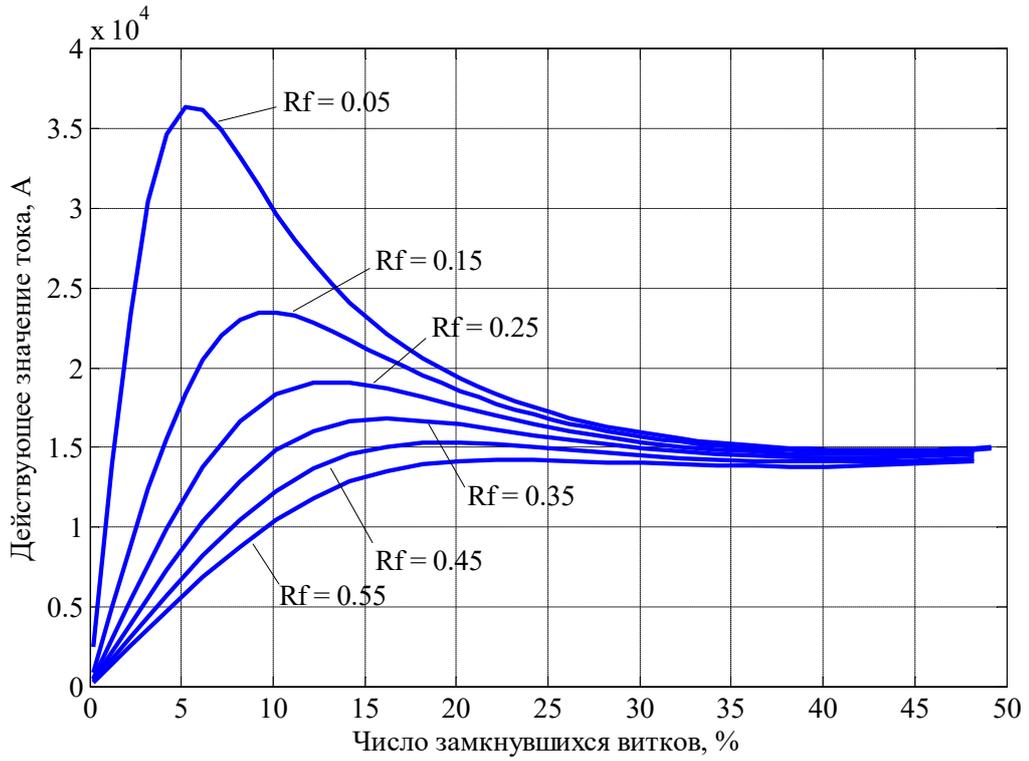


Рисунок 22 – Ток замкнувшихся витков при различных переходных сопротивлениях (витковое замыкание на стороне ВН)

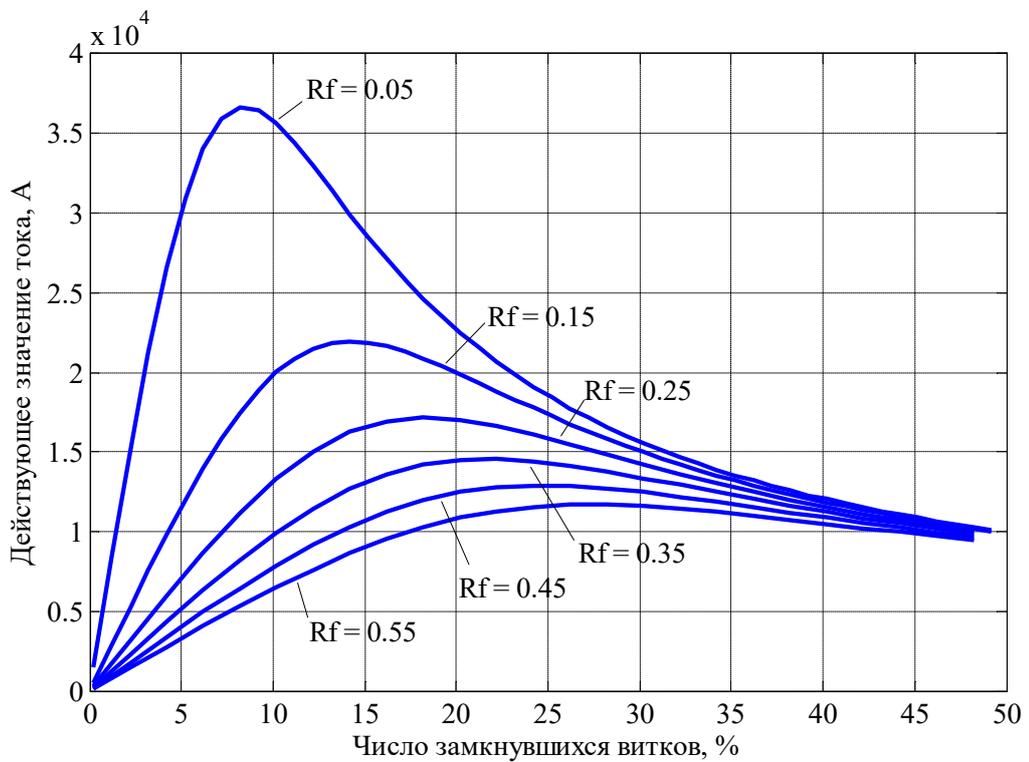


Рисунок 23 – Ток замкнувшихся витков при различных переходных сопротивлениях (витковое замыкание на стороне НН)

Далее проверялся алгоритм дифференциальной защиты трансформатора при витковых замыканиях с тормозной характеристикой, состоящей из одного ненаклонного и двух наклонных участков, задаваемой следующим образом:

$$I_{\text{сраб}}(I_{\text{торм}}) = \begin{cases} 0,3, & I_{\text{торм}} \in [0, 1]; \\ I_{\text{сраб}}(1) + 0,5(I_{\text{торм}} - 1), & I_{\text{торм}} \in (1, 2,5]; \\ I_{\text{сраб}}(2,5) + 0,7(I_{\text{торм}} - 2,5), & I_{\text{торм}} > 2,5. \end{cases} \quad (29)$$

Торможение осуществляется максимальным из токов плеч защиты. На рисунке 24 представлены графики дифференциальных токов фаз, тока срабатывания защиты в зависимости от числа замкнувшихся витков обмотки.

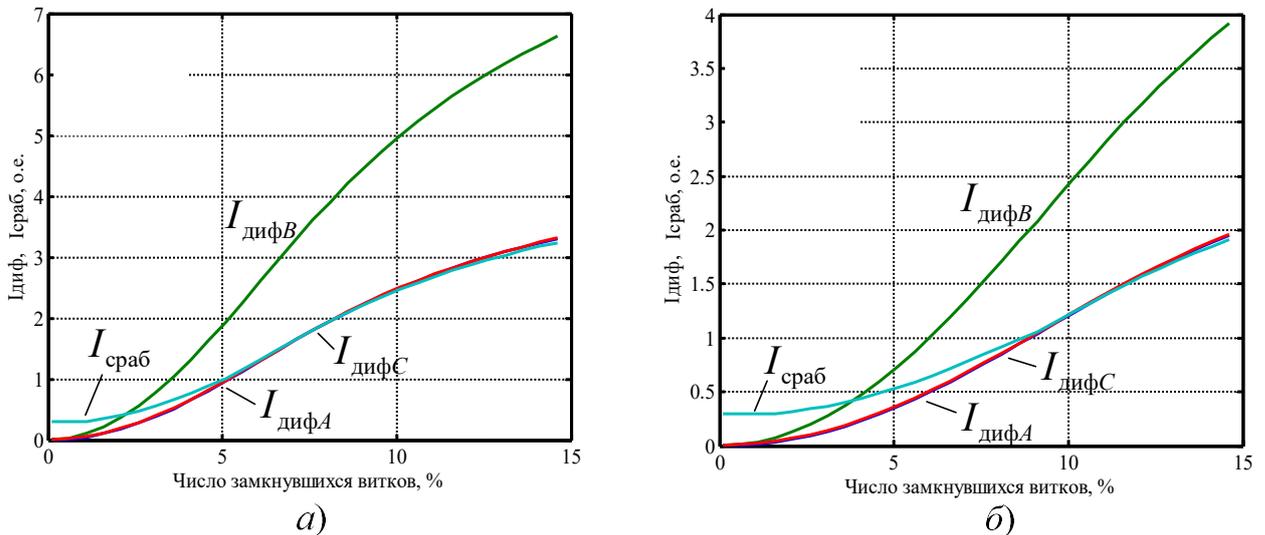


Рисунок 24 – Работа алгоритма дифференциальной защиты трансформатора:

a – витковое замыкание на стороне ВН; *б* – витковое замыкание на стороне НН

С увеличением числа замкнувшихся витков, возрастает ток срабатывания защиты вследствие торможения. Срабатывание дифференциального органа фазы *B* происходит только после 2,5% замкнутых витков на стороне ВН, что примерно соответствует 17 виткам данной обмотки. В случае повреждения на стороне НН срабатывание произошло при 3,9% замкнутых витков, что примерно соответствует 15 виткам. Подтверждается ограниченная чувствительность традиционного алгоритма дифференциальной защиты трансформатора к данному виду повреждений.

3.3 Разработка адаптивных модификаций алгоритма дифференциальной защиты

Алгоритмы сравнения мгновенных значений двух токов являются основными в дифференциальной защите. Одним из путей повышения технического совершенства релейной защиты является разработка алгоритмов, обладающих адаптивными свойствами.

В настоящем подразделе метод локализации применяется к алгоритмам дифференциальной защиты. Ключевое положение в предлагаемых модификациях алгоритма дифференциальной защиты трансформатора – локализация того подмножества наблюдаемых режимов, которое альтернативно режимам повреждения защищаемого объекта. Локализация выполняется посредством двухкоординатных замеров, формируемых на регулярной основе по методу наименьших квадратов. Помимо традиционно используемых дифференциального и тормозного тока вводятся оценки адаптивных множителей одного из сравниваемых токов, в том числе при отчетах с отклоняющимся аргументом, а также невязка результата оптимизационной процедуры. Что касается предпосылок создания и функционального назначения алгоритмов – преследовалась цель обеспечения высокой чувствительности к замыканиям в обмотках трансформатора с малым числом замкнувшихся витков.

Ранее обращалось особое внимание на тесную связь метода локализации с алгоритмическими моделями, адекватными защищаемым объектам в их неповрежденном состоянии [123, 125, 126]. Однако было бы неверно полагать, что двухкоординатные замеры не представляют интереса вне связи с алгоритмическими моделями. В данном случае рассматриваются алгоритмы для распознавания витковых замыканий в обмотках силового трансформатора без применения его алгоритмической модели.

3.3.1 Неадаптивный алгоритм дифференциальной локализации

Пусть $i_1(k)$ и $i_2(k)$ – отсчеты сравниваемых токов имитационной модели защищаемого объекта, $k = \text{ent}(t/\Delta t)$ – дискретное время, Δt – интервал

дискретизации. Один из токов $i_p(k)$, $p=1$ или 2 , наблюдается с мультипликативной погрешностью: $\eta i_p(k)$ – наблюдаемый ток, η – постоянный множитель. Второй ток $i_q(k)$, $q=1, 2 \neq p$, наблюдается без погрешности. Сформируем знакоположительные дифференциальный и тормозной токи по симметричной схеме

$$\begin{matrix} i_{\text{д}}(k) \\ i_{\text{т}}(k) \end{matrix} = \left[\frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k (i_q(d) \mp \eta i_p(d))^2 \right]^{1/2}, \quad (30)$$

где $k_x + 1 = \Delta k$ при фиксированном окне суммирования отсчетов. На растущем окне $k_x = k - k_0$, где k_0 – момент смены режима наблюдаемого объекта. В альтернативных режимах имитационной модели имеет место равенство

$$i_p(k) = i_q(k). \quad (31)$$

При таком условии из (30) последует линейная зависимость между дифференциальным и тормозным токами

$$i_{\text{д}}(k) = \frac{|1 - \eta|}{1 + \eta} i_{\text{т}}(k). \quad (32)$$

Годографом двухкоординатного замера

$$\mathbf{i}_{\text{тд}}(k) = [i_{\text{т}}(k), i_{\text{д}}(k)]^T \quad (33)$$

является прямая, проходящая на плоскости $\mathbf{i}_{\text{тд}}$ через начало координат. Данный признак принят в качестве критерия распознавания той группы альтернативных режимов, для которой справедливо условие (31). Информации, предоставляемой годографом замера (33) на интервале времени $k = \overline{1, n}$, также может быть придана форма замера. Так, условие наименьших квадратов

$$\sum_{k=1}^n (i_{\text{д}}(k) - \lambda i_{\text{т}}(k))^2 \rightarrow \min \quad (34)$$

определит оценку множителя λ

$$\hat{\lambda} = I_{\text{дт}}^2 / I_{\text{тт}}^2, \quad (35)$$

$$I_{\text{дт}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_{\text{д}}(k) i_{\text{т}}(k), \quad (36)$$

$$I_{\text{тт}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_{\text{т}}^2(k) \quad (37)$$

и невязку между наблюдаемой функцией $i_{\text{д}}(i_{\text{т}})$ и прямой $i_{\text{д}} = \hat{\lambda} i_{\text{т}}$. Абсолютная невязка

$$\sigma^2 = I_{\text{дд}}^2 - \hat{\lambda} I_{\text{дт}}^2, \quad (38)$$

относительная

$$\sigma_*^2 = \sigma^2 / I_{\text{дд}}^2 = 1 - \hat{\lambda} \hat{\mu}, \quad (39)$$

где

$$I_{\text{дд}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n i_{\text{д}}^2(k), \quad (40)$$

$\hat{\mu}$ – оценка параметра в критерии

$$\sum_{k=1}^n (i_{\text{т}}(k) - \mu i_{\text{д}}(k))^2 \rightarrow \min. \quad (41)$$

Примеры двухкоординатных замеров, формируемых из величин (35)–(39)

$$\mathbf{v} = [\hat{\lambda}, \sigma_*]^T, \quad (42)$$

$$\mathbf{I}_{\text{т}} = [I_{\text{тт}}, \sigma]^T. \quad (43)$$

Процедура обучения релейной защиты заключается в отображении подмножества одноплатных режимов защищаемого объекта на плоскостях замеров и определении границ областей отображения [53, 54, 56]. 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 [50, 51, 52]. Обучающие режимы воспроизводятся имитационной моделью защищаемого объекта.

3.3.2 Алгоритм адаптивного масштабирования

Высокое быстродействие дифференциальной защиты обеспечивает процедура оптимизационной цифровой обработки сравниваемых токов, например, по методу наименьших квадратов с одним адаптивным коэффициентом a , обеспечивающая высокое быстродействие дифференциальной защиты на текущем окне $d = \overline{k - k_x, k}$

$$\sigma^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k (i_q(d) - ai_p(d))^2 \rightarrow \min_a, \quad (44)$$

где a – варьируемый параметр. Его оценка

$$\hat{a}(k) = I_{pq}^2(k) / I_{pp}^2(k), \quad (45)$$

$$I_{pq}^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k i_p(d) i_q(d), \quad (46)$$

$$I_{pp}^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k i_p^2(d), \quad (47)$$

с абсолютной невязкой

$$\hat{\sigma}^2(k) = I_{qq}^2(k) - \hat{a}(k) I_{pq}^2(k), \quad (48)$$

$$I_{qq}^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k i_q^2(d), \quad (49)$$

и относительной невязкой

$$\hat{\sigma}_*^2(k) = \frac{\hat{\sigma}^2(k)}{I_{qq}^2(k)}. \quad (50)$$

Соответствующие двухкоординатные замеры

$$\mathbf{z}(k) = [\hat{a}(k), \hat{\sigma}(k)]^T, \quad (51)$$

$$\mathbf{I}(k) = [I_{pp}^2(k), \hat{\sigma}(k)]^T \quad (52)$$

по форме схожи с замерами (42), (43), но представляют собой более общую конструкцию, так как создают собственные годографы, в то время как (42), (43) – результаты обработки чужого годографа на полном окне наблюдения.

В идеальном случае при совпадении токов $i_p(k)$ и $i_q(k)$ замер (51) отобразится в точку $\mathbf{z}_0 = [1, 0]^T$, а замер (52) – в ось I_{pp} на его плоскости.

3.3.3 Алгоритм с адаптивным преобразованием

Масштабирование – простейшее преобразование наблюдаемого тока. Более общей процедурой является преобразование

$$i_r(k) = a_0 i_p(k) + a_r i_p(k+r), \quad (53)$$

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

$$\sigma^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k (i_q(d) - i_r(d))^2 \rightarrow \min_{a_0, a_r}, \quad (54)$$

и предстают в виде

$$a_0(k) = \frac{1}{D(k)} (I_{rr}^2(k) I_{pq}^2(k) - I_{pr}^2(k) I_{qr}^2(k)), \quad (55)$$

$$a_r(k) = \frac{1}{D(k)} (I_{pp}^2(k) I_{qr}^2(k) - I_{pr}^2(k) I_{qp}^2(k)), \quad (56)$$

$$D(k) = I_{pp}^2(k) I_{rr}^2(k) - I_{pr}^4(k), \quad (57)$$

$$I_{rr}^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k i_p^2(d+r), \quad (58)$$

$$I_{pr}^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k i_p(d) i_p(d+r), \quad (59)$$

$$I_{qr}^2(k) = \frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k i_q(d) i_p(d+r). \quad (60)$$

Данный алгоритм создает максимально возможное число вариантов формирования двухкоординатных замеров, например,

$$\mathbf{a}(k) = [a_r(k), a_0(k)]^T, \quad (61)$$

начиная с $r = \pm 1$, а также замер (52), где невязка определяется согласно (53)–(56)

$$\hat{\sigma}(k) = \left[\frac{1}{k_x + 1} \sum_{d=k-k_x}^k (i_q(d) - a_0(k)i_p(d) - a_r(k)i_p(d+r))^2 \right]^{1/2}. \quad (62)$$

В идеальном случае при совпадении токов $i_p(k)$ и $i_q(k)$ замер (61) отобразится в точку $\mathbf{a}_0 = [0, 1]^T$.

3.4 Проверка алгоритмов на имитационной модели двухобмоточного трансформатора

Рассмотрено применение предложенных алгоритмов на примере имитационной модели трехфазного двухобмоточного трансформатора 110/35 кВ мощностью 63 МВА с соединением обмоток по схеме «звезда с нулем – треугольник, 11-ая группа» (рисунок 25). Исследуется разграничение внешних КЗ и витковых замыканий в обмотке высшего напряжения. 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 298,88 Вб, 2,236 А, а также линии насыщения, идущей через точку 298,97 Вб, 4,473 А. Напряжение источников изменяется по закону $u_\nu(t) = \sqrt{2/3} \cdot 115 \sin(\omega t + \gamma_\nu)$ кВ, $\nu = A, B, C$, $\gamma_A = 90^\circ$. К числу режимов, альтернативных повреждениям трансформатора, относятся нагрузочные режимы (Нг – нагрузка) с передаваемой мощностью до 63 МВА и $\cos \varphi = 0,85$, а также внешние КЗ через варьируемое переходное сопротивление R_f .

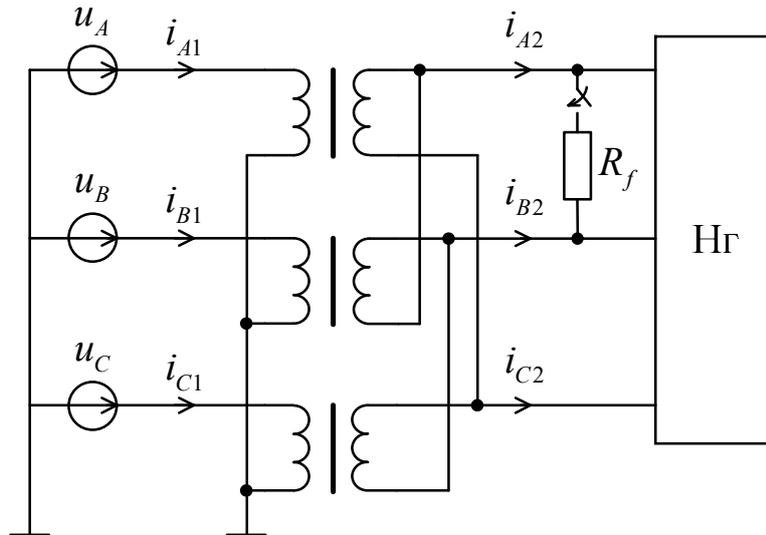


Рисунок 25 – Имитационная модель для воспроизведения режимов, альтернативных повреждению трансформатора

Окно наблюдения и обработки протекающего процесса составляло 30 мс при частоте дискретизации 2 кГц ($n = 60$). Сравнимые токи: стороны ВН

$$i_1 = i_{A1} - 2i_{B1} + i_{C1}, \quad (63)$$

стороны НН, приведенный к стороне ВН с коэффициентом неидентичности η

$$i_2 = \eta(i'_{A2} - i'_{B2}), \quad (64)$$

который приводит к небалансу дифференциального тока в нормальном нагрузочном режиме. Штрихами отмечены фазные токи, приведенные к стороне ВН. Небаланс в общем случае может быть обусловлен влиянием устройства РПН, намагничивающим током, погрешностью измерительных трансформаторов тока, цифровым выравниванием токов плеч в терминале защиты. Далее принято значение $\eta = 1,1$.

Годограф замера (33) на рисунке 26 а получен в режиме внешнего КЗ с $R_f = 5$ Ом. Обработка годографа по алгоритму (37)–(43) дает следующие значения замеров: $\mathbf{v} = [0,0475; 0,0055]^T$, $\mathbf{I}_T = [3431,1; 0,8914]^T$ А. На рисунке 26 б приведена область 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 26 приведено отображение режима

виткового замыкания в обмотке ВН фазы B при замыкании 1% числа ее витков. В идеализированном случае без учета тока намагничивания годограф замера (33) представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Отклонение от идеализированного случая тем заметнее, чем выше удельный вес тока намагничивания в токе i_1 . Режим виткового замыкания нарушает локализацию годографа замера $\mathbf{i}_{\text{ТД}}$ вдоль прямой, что непременно отражается на плоскости замера \mathbf{v} – возрастает невязка σ_* .

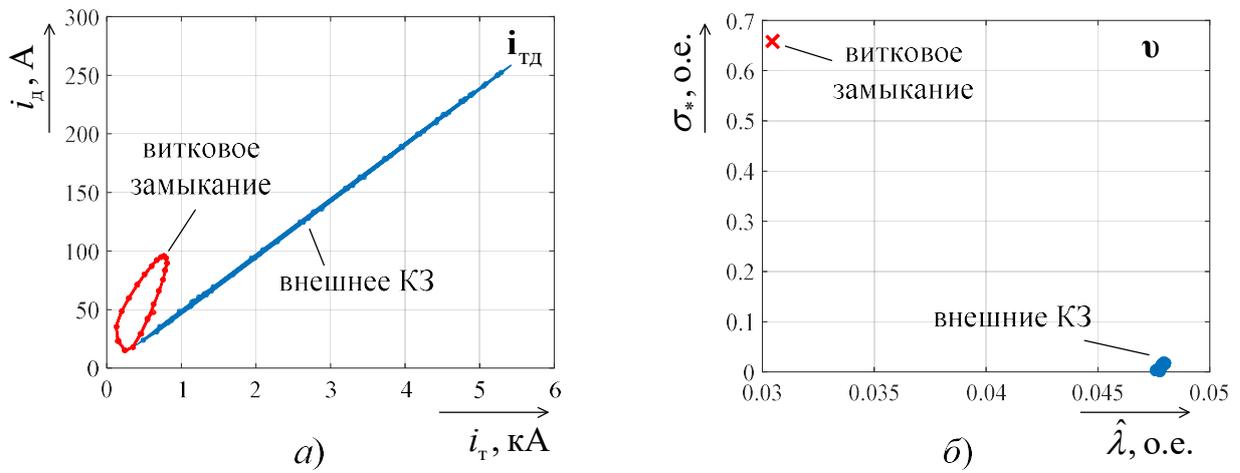


Рисунок 26 – Варианты двухкоординатных замеров

На рисунке 27 приведены отображения замера \mathbf{z} алгоритма адаптивного масштабирования для тех же режимов имитационной модели, что и в предыдущем примере, при $k_x = 3$. Видно, что область альтернативных режимов локализуется в окрестности конкретного значения адаптивного коэффициента a и околонулевой невязки $\hat{\sigma}(k)$, тогда как годограф внутреннего повреждения таким свойством не обладает и не пересекает данную область.

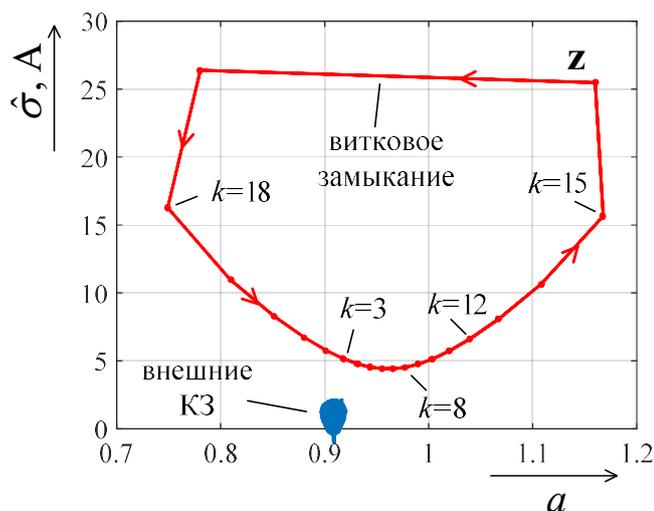


Рисунок 27 – Годограф замера при адаптивном масштабировании
(момент возникновения замыкания $k=0$)

Распознающая способность алгоритма с адаптивным преобразованием тока (замер a) при $r=1$ проиллюстрирована на рисунке 28, где локализация режимов имеет место при всех значениях $k \geq 3$. Витковое замыкание приводит к изменению коэффициентов a_0 и a_r , характеризующих изменение амплитуды и фазы тока при повреждении.

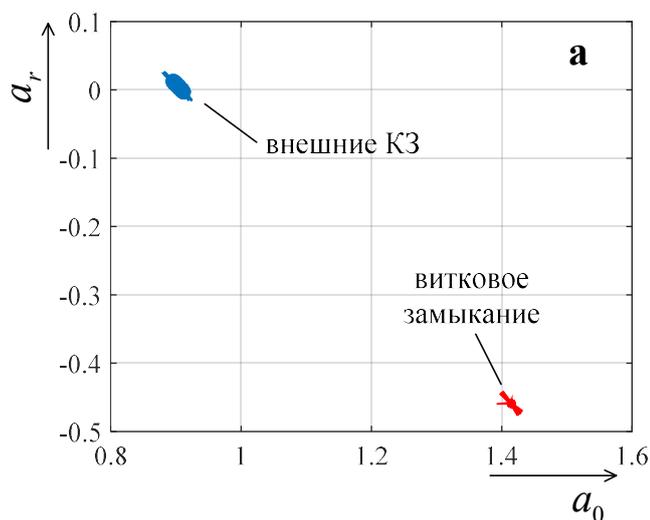


Рисунок 28 – Вариант адаптивного преобразования тока

3.5 Сравнение алгоритмов дифференциальной защиты в применении к автотрансформатору

Силовые автотрансформаторы обеспечивают связь двух сетей высокого класса напряжения. Последовательная обмотка автотрансформатора выполняется наружной, вероятность витковых и межкатушечных замыканий в ней наибольшая, поэтому следует учитывать этот вид повреждения. Подробный анализ функционирования защит при витковых замыканиях в последовательной обмотке автотрансформатора проведен в [30], по итогам которого авторы сделали заключение о преимуществе дифференциальной защиты в микропроцессорных терминалах, нежели реле серии ДЗТ, и нечувствительности дистанционной защиты к данному типу повреждения.

В настоящем подразделе на примере имитационной модели сети с автотрансформатором 500 кВ исследуется распознающая способность к витковым замыканиям трех типов цифровой дифференциальной защиты: традиционного исполнения, защиты по токам обратной последовательности, а также дифференциальной защиты, действующей по принципу адаптивного масштабирования и преобразования токов плеч.

3.5.1 Имитационная модель сети

На рисунке 29 представлена имитационная модель линии электропередачи, соединяющей две энергосистемы с уровнями напряжений 510 кВ (ЭС1) и 230 кВ (ЭС2). Дополнительные параметры элементов сети прямой и нулевой последовательностей приведены в таблице 1.

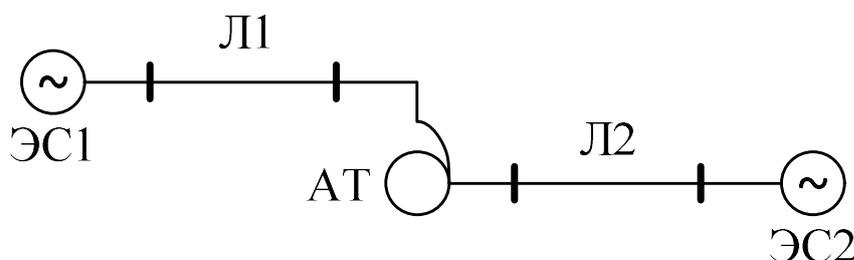


Рисунок 29 – Схема электрической сети

Таблица 1 – Параметры элементов электрической сети

Элемент	$R_1, \text{Ом}$	$R_0, \text{Ом}$	$X_1, \text{Ом}$	$X_0, \text{Ом}$
ЭС1	–	–	7	14
ЭС2	–	–	27	19
Л1	3	18	30	141
Л2	5	12,5	20	60

Связь двух энергосистем обеспечивается автотрансформатором мощностью 500 МВА с номинальными напряжениями обмоток 500 кВ и 230 кВ; напряжение КЗ составляет 12%, ток холостого хода – 0,3%. Концы обмоток автотрансформатора соединены в звезду, нейтральная точка заземлена, что соответствует обозначению $Y_{н,авт}$. В сети наблюдается переток активной мощности от ЭС1 к ЭС2, угол передачи δ составляет 20° , при этом загрузка автотрансформатора составляет 55% от номинальной мощности автотрансформатора.

В имитационной модели автотрансформатора (рисунок 30) в нулевой момент времени на фоне нормального нагрузочного режима часть витков $n_{замк} = 1\%$ последовательной обмотки фазы В замыкается через переходное сопротивление $R_f = 0,1 \text{ Ом}$. Общая обмотка автотрансформатора при этом не повреждена.

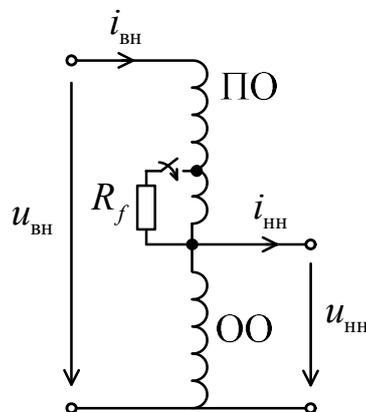


Рисунок 30 – Имитационная модель фазы автотрансформатора с замыканием в последовательной обмотке (ПО – последовательная обмотка, ОО – общая обмотка)

Основу всех трех исследуемых алгоритмов защиты составляет дифференциальный принцип, предполагающий сравнение токов по сторонам. Наблюдению подлежат фазные токи $i_{вн}$ и $i_{нн}$ на выводах сторон ВН и НН соответственно, которые преобразуются в замеры. Частота дискретизации сигналов принята равной 2 кГц. Время наблюдения процесса от момента замыкания составляет 30 мс. Введена мультипликативная погрешность фазных токов второго плеча защиты $\eta = 1,1$.

3.5.2 Традиционный дифференциальный замер

Алгоритм определения вектора дифференциальных токов

$$\mathbf{i}_{\text{диф}} = \mathbf{i}_1 - \mathbf{i}_2, \quad (65)$$

где $\mathbf{i}_{\text{диф}} = [i_{\text{диф}A} \quad i_{\text{диф}B} \quad i_{\text{диф}C}]^T$; $\mathbf{i}_1 = \mathbf{M} \times \mathbf{i}_{\text{вн}}$, $\mathbf{i}_2 = \mathbf{M} \times \mathbf{i}_{\text{нн}}$ – векторы токов после компенсации составляющей нулевой последовательности; $\mathbf{i}_{\text{вн}} = [i_{\text{вн}A} \quad i_{\text{вн}B} \quad i_{\text{вн}C}]^T$,

$\mathbf{i}_{\text{нн}} = [i_{\text{нн}A} \quad i_{\text{нн}B} \quad i_{\text{нн}C}]^T$ – векторы наблюдаемых фазных токов сторон ВН и НН автотрансформатора в относительных единицах, за базисные значения приняты соответствующие номинальные токи сторон автотрансформатора;

$$\mathbf{M} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{– матрица компенсации составляющей нулевой}$$

последовательности.

Торможение дифференциальной защиты осуществлялось полусуммой токов плеч

$$\mathbf{i}_{\text{торм}} = (1/2)(\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2). \quad (66)$$

Для отображения годографа замера дифференциальной защиты на двухкоординатной плоскости из мгновенных дифференциальных и тормозных токов фаз $i_{\text{диф}}$ и $i_{\text{торм}}$ выделены действующие значения основной гармонической составляющей $I_{\text{диф}}$ и $I_{\text{торм}}$, соответственно. Замер защиты принимает вид

$$\mathbf{i} = [I_{\text{диф}} \quad I_{\text{торм}}].$$

Выбрана тормозная характеристика, состоящая из трех участков. Величину тока срабатывания защиты $I_{\text{сраб}}$ можно записать как интервальную функцию от тормозного тока

$$I_{\text{сраб}}(I_{\text{торм}}) = \begin{cases} 0,3, & I_{\text{торм}} \in [0, 1]; \\ I_{\text{сраб}}(1) + 0,37(I_{\text{торм}} - 1), & I_{\text{торм}} \in (1, 2,5]; \\ I_{\text{сраб}}(2,5) + 0,59(I_{\text{торм}} - 2,5), & I_{\text{торм}} > 2,5. \end{cases} \quad (67)$$

Условие срабатывания защиты имеет вид

$$I_{\text{диф}} > I_{\text{сраб}}(I_{\text{торм}}). \quad (68)$$

На рисунке 31 приведено поведение годографа дифференциального замера для фазы B при витковом замыкании, где k – дискретное время.

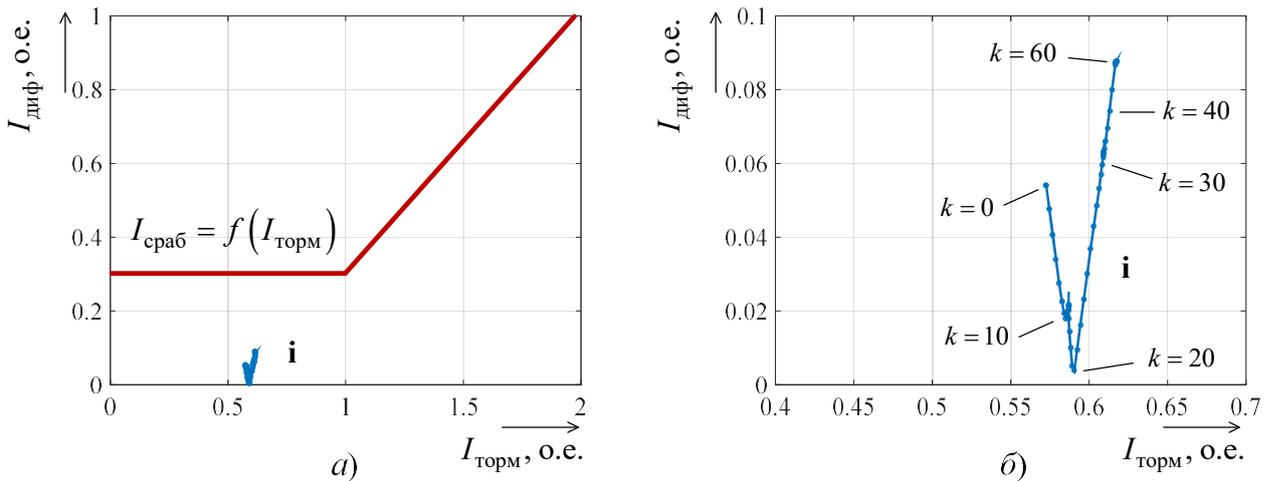


Рисунок 31 – Замер дифференциальной защиты для поврежденной фазы B :

a – отображение замера дифференциальной защиты при замыкании в ПО;

b – то же в увеличенном масштабе

Наличие дифференциального тока в начальный момент вызвано введенной погрешностью η . Начальное снижение дифференциального тока объясняется особенностью токораспределения при замыкании – ток стороны ВН в поврежденной фазе возрос, а ток НН – уменьшился. Затем наблюдалось увеличение дифференциального тока, обусловленное повреждением, однако установившееся значение оказалось недостаточным для срабатывания защиты.

3.5.3 Дифференциальная защита по токам обратной последовательности

Дифференциальная защита по токам обратной последовательности получила применение в интеллектуальных электронных устройствах компаний ABB, SEL как чувствительный орган к витковым замыканиям, дополняющий традиционную дифференциальную защиту.

В качестве параметров срабатывания с учетом направления токов на рисунке 30 приняты рекомендуемые в руководстве по эксплуатации терминала [111] значения: $I_1^{(2)} > 0,04$, $I_2^{(2)} > 0,04$, $\theta > 120^\circ$. На рисунке 32 представлено изменение рабочих величин алгоритма во времени при замыкании в последовательной обмотке.

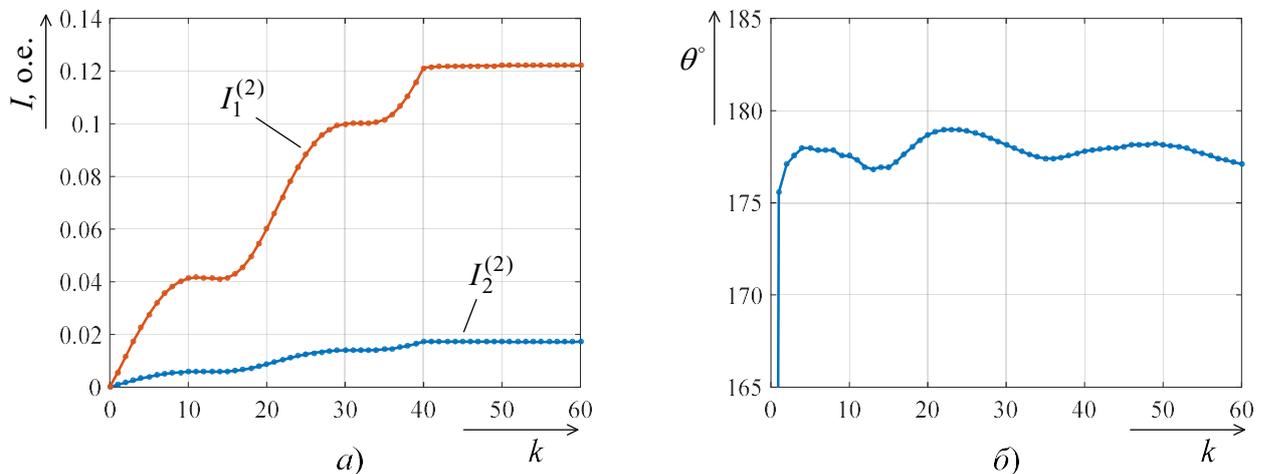


Рисунок 32 – Поведение дифференциальной защиты по токам обратной последовательности при витковом замыкании:

a – токи обратной последовательности по сторонам; b – фазовый сдвиг

Можно увидеть, что причиной несрабатывания является низкий уровень тока обратной последовательности на стороне НН, недостаточный для запуска сравнения сдвига фаз. Хотя вычисленный фазовый сдвиг говорит о верной работе критерия, и повреждение можно было бы классифицировать как внутреннее. Примеры обработки осциллограмм витковых замыканий, в которых также наблюдался низкий недостаточный для срабатывания уровень тока обратной последовательности по одной из сторон трансформатора, приводились в [97, 2]. Среди причин подобного распределения токов, а, следовательно, и

несрабатывания защиты, следует отметить: 1) малый уровень ЭДС обратной последовательности при незначительных несимметриях; 2) различие в уровнях эквивалентных сопротивлений обратной последовательности по сторонам от места повреждения.

3.5.4 Адаптивные дифференциальные замеры

Далее исследуется функционирование представленных ранее алгоритмов с адаптивным масштабированием и адаптивным преобразованием токов плеч дифференциальной защиты применительно к автотрансформатору. К основным особенностям алгоритмов следует отнести работу по мгновенным величинам токов, а также то, что формируемые замеры – двухкоординатные, это обеспечивает универсальность и гибкость задания области блокирования или срабатывания защиты. Выделение областей срабатывания или блокирования защиты на плоскости замера требует предварительного обучения. Высокая чувствительность замеров обеспечивается путем их формирования таким образом, чтобы область режимов, альтернативных повреждениям локализовалась, а оставшееся пространство было свободным для распознавания внутренних повреждений.

При исследовании адаптивных алгоритмов выбрано окно 2 мс для обработки и формирования точки замера, $r = 2$.

Характеристика срабатывания защиты строится по результатам обучения защиты на множестве режимов, воспроизводимых имитационной моделью. Принципиальным условием является несрабатывание защиты в режимах, альтернативных режимам повреждения защищаемого объекта. К альтернативным режимам относятся нагрузочные режимы, внешние КЗ. Анормальные режимы работы трансформатора, такие как бросок намагничивающего тока и перевозбуждение, также относятся к альтернативным и были рассмотрены во второй главе настоящей работы.

Для построения области блокирования проводились все виды КЗ на выводах автотрансформатора – однофазное, двухфазное, двухфазное на землю,

трехфазное. Варьировались переходное сопротивление R_f в месте КЗ в пределах от 0 до 30 Ом, а также начальная фаза источника ЭДС в фазе A ЭС1 от 0° до 180° . Итогом обучения явились области внешних КЗ для замеров z и a , представленные на рисунке 33. Также на рисунке 33 приведены годографы замеров виткового замыкания в последовательной обмотке.

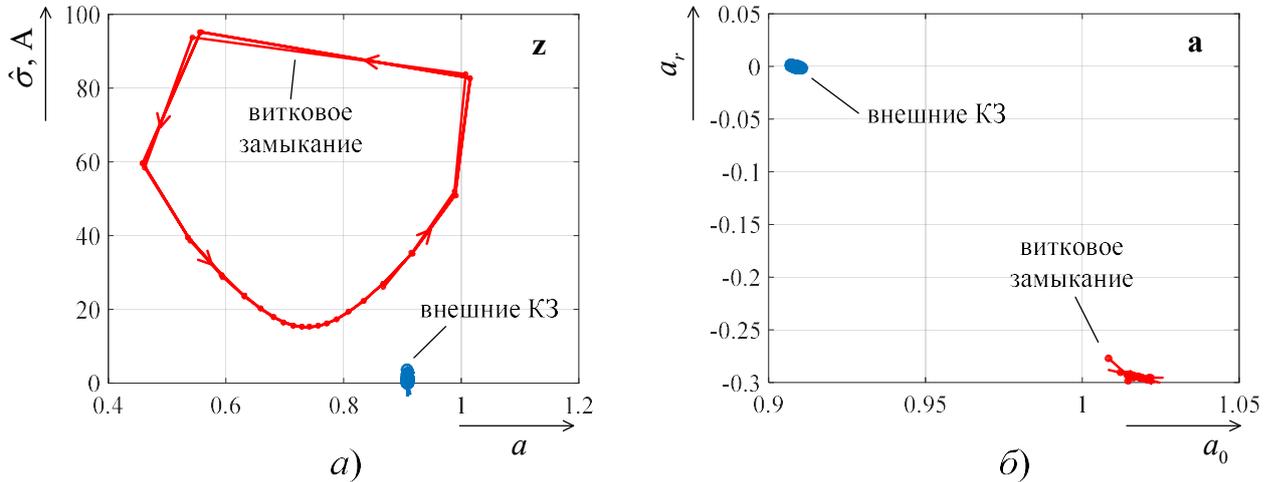


Рисунок 33 – Годографы замеров:

a – с адаптивным масштабированием токов плеч;

b – с адаптивным преобразованием токов плеч

В случае алгоритма с адаптивным масштабированием (рисунок 33 a) годограф при витковом замыкании не пересекает ранее построенную область альтернативных режимов, а также не локализуется в одной точке, что позволяет судить о внутреннем повреждении в защищаемом объекте. Замер с адаптивным преобразованием токов (рисунок 33 b) плеч также позволил распознать режим виткового замыкания.

3.6 Выводы

1. Хотя характеристики микропроцессорной дифференциальной защиты трансформатора превосходят аналогичные у электромеханических реле в плане чувствительности к замыканиям в обмотках, предел распознаваемости замыканий остается недостаточно высоким. Традиционная дифференциальная защита нуждается в дополнении чувствительным органом к витковым замыканиям.

2. Причиной несрабатывания дифференциальной защиты по токам обратной последовательности при замыкании с малым числом витков может стать недостаточный уровень тока обратной последовательности на одной из сторон трансформатора.

3. Алгоритмы дифференциальной защиты допускают общую интерпретацию по методу локализации режимов, альтернативных режимам повреждения защищаемого объекта. Инструментом решения задачи локализации являются двухкоординатные замеры, формируемые по критерию наименьших квадратов.

4. Процедуре сравнения двух токов как основе дифференциального способа релейной защиты может быть придан адаптивный характер, когда хотя бы один из токов подвергается адаптивному масштабированию или моделированию нерекурсивным преобразованием.

5. Функциональные возможности разработанных адаптивных алгоритмов дифференциальной защиты превосходят традиционный алгоритм с замером в координатах дифференциального и тормозного тока, алгоритм по токам обратной последовательности.

ГЛАВА 4 СЕГМЕНТАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО ИСКАЖЕННОГО ТОКА

4.1 Проблема насыщения ТТ

Надежность функционирования и быстродействие микропроцессорной релейной защиты определяется не только аппаратным и программно-функциональным обеспечением терминала, но также зависит от возможностей первичных аналоговых преобразователей, в частности, электромагнитных ТТ.

В России широкое применение нашли защитные ТТ, магнитопроводы которых изготовлены из электротехнической стали и не имеют немагнитного зазора. Измерительные ТТ данного типа могут быть подвержены насыщению, что вносит нелинейные искажения в форму кривой вторичного тока (рисунок 34), создавая погрешность. Таким образом, информация, важная для релейной защиты, с насыщением магнитопровода трансформатора тока утрачивает достоверность. Погрешности могут быть настолько велики, что могут вызвать существенную задержку срабатывания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), а также их ложное действие или отказ. Негативному влиянию вследствие насыщения ТТ подвержены прежде всего быстродействующие защиты, к которым относятся защиты по принципу действия являющиеся дифференциальными. Также сюда относятся первые ступени ступенчатых защит, например, дистанционной защиты. Вопросу насыщения ТТ уделялось «пристальное внимание» в нашей стране в 60–80-х годах прошлого века, проблемам работы ТТ в переходных режимах КЗ было посвящено большое число работ отечественных специалистов [68]. Не потеряла актуальности проблема влияния насыщенного ТТ на релейную защиту и сегодня.

Для оценки точности работы ТТ в режимах насыщения используются полная, токовая и угловая погрешности [33], причем они могут использоваться как для установившегося, так и для переходного режима. Полная погрешность ТТ ε является более общей, вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (n_{\text{ТНОМ}} i_2 - i_1)^2 dt}, \quad (69)$$

где I_1 – действующее значение первичного тока, к которому приводится численное значение погрешности; T – длительность периода тока (интервал интегрирования); i_1 , i_2 – мгновенные значения первичного и вторичного тока; $n_{\text{ТНОМ}}$ – номинальный коэффициент трансформации ТТ.

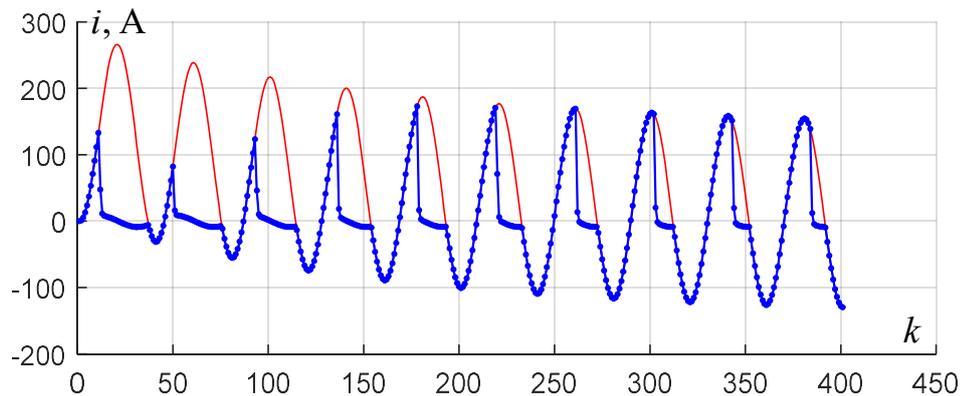


Рисунок 34 – Осциллограмма первичного приведенного и вторичного токов при насыщении ТТ (полная погрешность $\varepsilon = 97\%$ на первом периоде, $\varepsilon = 36\%$ на последнем периоде)

Основными причинами, способствующими насыщению ТТ при протекании через него тока КЗ или пусковых токов мощных двигателей, не превышающего предельную кратность, установленную производителем в соответствии с заданными техническими характеристиками, являются:

- величина и длительность протекания апериодической составляющей тока КЗ;
- величина остаточной намагниченности той же полярности, которую имеет апериодическая составляющая тока КЗ.

Проблема обеспечения правильного функционирования релейной защиты в условиях насыщения ТТ с годами не только не теряет своей остроты, но более того, ещё и обостряется по мере повышения уровня токов КЗ в электрических системах.

4.1.1 Типы ТТ для релейной защиты

Действующая нормативная база ГОСТ 7746-2015 «Трансформаторы тока. Общие технические условия» [14], регламентирующая производство ТТ, выделяет два класса точности ТТ для защиты и автоматики – 5Р и 10Р, что соответствует 5% и 10% допустимой полной погрешности. Пределы допустимых полных погрешностей вторичных обмоток для защиты (рисунок 35) при номинальной вторичной нагрузке и при токе номинальной предельной кратности должны обеспечиваться в установившемся режиме тока. Работа в переходных режимах для перечисленных классов ТТ в ГОСТ не нормируется. Лишь отмечается, что дополнительные требования к отдельным видам трансформаторов (в том числе трансформаторов, предназначенных для работы с нормированной точностью в переходных режимах) в связи со спецификой их конструкции или назначения следует устанавливать в стандартах, технических условиях, договорах или контрактах на трансформаторы конкретных типов. Не нормируется также и уровень остаточной намагниченности, который для ТТ классов 5Р и 10Р может достигать более 80 % и носит случайный характер. Остаточная намагниченность может быть устранена только размагничиванием, тяжелая ситуация может возникнуть при неблагоприятном моменте включения при АПВ, когда индукция удвоится в значении. Считается, что вероятность неправильной работы защит из-за остаточной намагниченности ТТ классов 5Р и 10Р достаточно мала, однако не исключена.



Рисунок 35 – Обмотки ТТ

В стандарте МЭК 61869-2 [99] выделяется четыре класса точности ТТ для релейной защиты P, PX, PR, PXR, нормируемых для установившихся режимов. Для характеристики работы в переходных режимах различают три класса защитных ТТ: TPX, TPY, TPZ. Магнитопроводы ТТ класса TPX выполнены без немагнитного зазора, метрологические характеристики определяются максимальным мгновенным значением погрешности в течение заданного цикла переходного процесса, остаточный магнитный поток не ограничивается. ТТ класса TPY имеют немагнитный зазор, метрологические характеристики определяются максимальным мгновенным значением погрешности в течение заданного цикла переходного процесса, остаточный магнитный поток не должен превышать 10% потока насыщения. ТТ класса TPZ имеют значительный зазор, метрологические характеристики определяются амплитудным мгновенным значением переменной составляющей тока в течение однократной подачи питания при максимальной постоянной составляющей и при заданной постоянной времени вторичной цепи, требования по ограничению погрешности постоянной составляющей отсутствуют, остаточный магнитный поток фактически должен отсутствовать.

Немагнитный зазор в магнитопроводе приводит к увеличению тока намагничивания, увеличивая тем самым погрешность ТТ. Характеристики намагничивания различных типов ТТ показаны на рисунке 36.

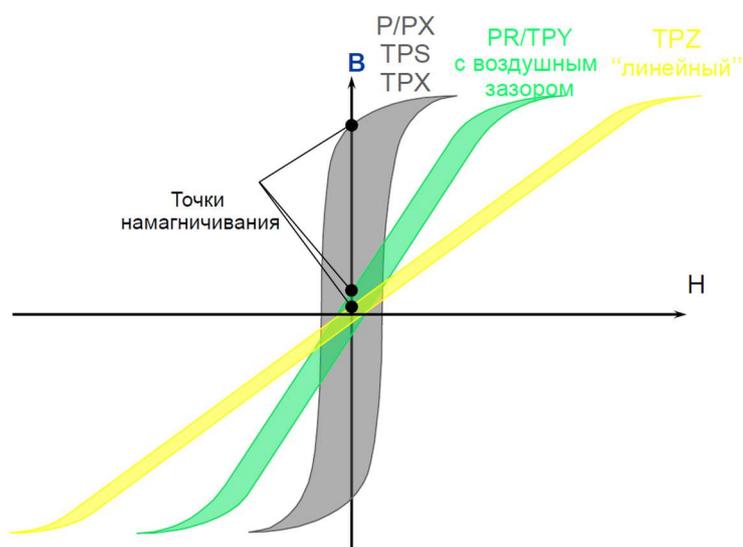


Рисунок 36 – Характеристики намагничивания ТТ классов TPX, TPY, TPZ

4.1.2 Выбор ТТ для защиты

Выбор ТТ для защиты выполняется таким образом, чтобы обеспечить правильное функционирование защиты в режимах насыщения при искаженной форме кривой тока, а именно, устойчивость срабатывания защиты при внутренних КЗ и селективность несрабатывания защиты при внешних КЗ [33].

В настоящее время РД 34.35.106 «Указания по расчету сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях релейной защиты» отменен и проектировщики выполняют расчеты ТТ с учетом требований, содержащихся в руководствах по применению МП терминалов, а также на основании упрощенных методик в тех случаях, когда подобные требования не сформулированы фирмами-производителями [25]. По-прежнему актуальны основные методические положения, содержащиеся в книге Е. П. Королева и Э. М. Либерзона [33].

Для многих типов защиты (например, ступенчатой токовой) определенная точность работы необходима в первую очередь при токах КЗ, равных параметрам их срабатывания, для других защит это могут быть максимальные значения сверхтоков. Считается достаточным иметь в этих режимах $\varepsilon \leq 10\%$ [83]. Наиболее известны три практических способа расчетной проверки трансформаторов тока на 10 % погрешность [89]: по кривым предельной кратности, по фактическим вольт-амперным характеристикам (ВАХ), по типовым кривым намагничивания трансформаторной стали и параметрам данного типа трансформаторов тока.

Данный подход ($\varepsilon \leq 10\%$) к определению требований к достаточно точной работе ТТ не исключает возможности их работы со значительно большими погрешностями. Так, например, при близких КЗ со значительными кратностями тока магнитопровод ТТ защиты может насыщаться и ε превышать 10 %. Такие режимы должны учитываться, с тем чтобы повышенные погрешности не приводили к отказам измерительных органов защиты, для которых устанавливаются обычно экспериментально, максимально допустимые значения погрешности.

Особенность современных микропроцессорных реле также в том, что они имеют существенно более низкое (на 1-2 порядка) сопротивление, нежели статические и, тем более, электромеханические реле, что несколько снижает требования к ТТ. Нагрузка на ТТ при этом в большей мере обусловлена сопротивлением соединительных проводов, характер нагрузки преимущественно активный.

Методики выбора ТТ для релейной защиты:

а) с использованием кривых предельной кратности

Наиболее распространенный при проектировании, ставший традиционным, способ выбора защитных ТТ по условию 10 % полной погрешности в условиях максимального тока заключается в использовании кривых предельной кратности $K_{10} = f(Z_n)$. Методика изложена в [33]. Кривые предельной кратности представляют зависимость отношения максимального первичного тока к номинальному от нагрузки ТТ при выполнении условия $\varepsilon \leq 10\%$ в установившемся режиме. Ориентируясь на кривые предельной кратности можно характеризовать правильную работу ТТ при различных режимах и сопротивлениях нагрузки. Данная методика не учитывает насыщение ТТ апериодической составляющей тока КЗ и остаточную намагниченность, что в ряде случаев может приводить к неверной работе релейной защиты. Кривые предельной кратности предоставляются предприятием-изготовителем ТТ. Пример кривых предельной кратности для ТТ ТОЛ-СЭЩ-10-IV приведен на рисунке 37.

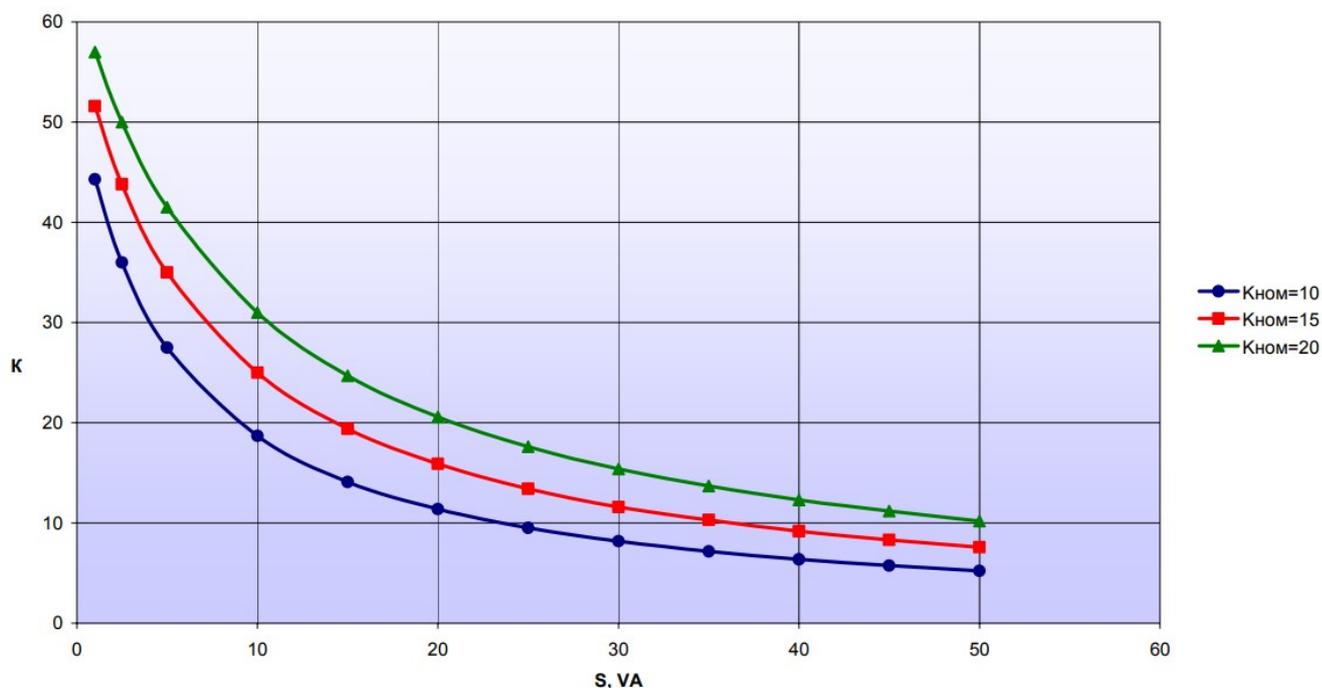


Рисунок 37 – Кривые предельной кратности вторичных обмоток для защиты с классом точности 5P, 10P, $S_{\text{ном}} = 20 \text{ ВА}$, $I_{\text{ном.перв}} = 1500, 2000 \text{ А}$

б) с учетом переходных режимов и остаточной индукции

В соответствии с требованиями МЭК 61869-2 [99] зарубежные производители устройств релейной защиты указывают требования к переходным характеристикам ТТ, гарантирующих их правильную работу в переходных режимах. Выбор ТТ для защит с учетом переходных режимов и остаточной индукции также рассматривается в стандарте IEEE C37.110-2007 [100]. В нормативной документации РФ аналогичные требования отсутствуют. Однако в последнее время данному подходу к выбору ТТ в нашей стране уделяется все большее внимание, что нашло отражение в статьях российских исследователей, предлагающих соответствующие методики выбора ТТ [23, 24, 38].

Необходимость учитывать возникающие при КЗ электромагнитные переходные процессы возникает поскольку устройства основной релейной защиты часто работают без выдержки времени. Первичный ток в переходном режиме КЗ имеет формулу:

$$i_1 = I_{m1} \left(e^{-t/\tau} \cos \psi - \cos(\omega t + \psi) \right), \quad (70)$$

где ψ – угол, характеризующий фазу I_{m1} в момент $t = 0$; τ – постоянная времени затухания апериодической составляющей первичного тока. При $\psi = 0^\circ$ апериодическая составляющая имеет максимальное значение.

По результатам статистических анализов, где производится учет частоты и амплитуды апериодической составляющей тока КЗ, 100 % содержание апериодической составляющей наблюдается очень редко, в общем случае процентное ее содержание меньше 70 % [86]. Исследования НПИ, ВНИИЭ показали, что вероятность больших начальных значений апериодической составляющей составляет 0,1 и менее. Статистические данные [100] на основе исследования 141 ТТ класса 230 кВ по величине остаточной намагниченности приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Остаточная намагниченность ТТ

Остаточная индукция, % $B_{нас}$	Процент ТТ
0–20	39
21–40	18
41–60	16
61–80	27

Выбор ТТ для защиты с учетом функционирования в переходных режимах (70) подразумевает при определении необходимого коэффициента предельной кратности использование дополнительных коэффициентов запаса, учитывающих:

- возрастание индукции сердечника вследствие одностороннего намагничивания сердечника ТТ апериодической составляющей тока КЗ;
- возможную остаточную индукцию в сердечнике ТТ.

Требуемая рабочая предельная кратность ТТ с учетом функционирования в переходных режимах и при остаточной индукции согласно методике, приведенной в [86], может быть определена по выражению

$$ALF' = \frac{I_F}{I_N} \cdot K_{TF} \cdot K_{Rem}, \quad (71)$$

где I_F/I_N – отношение максимального тока КЗ к первичному номинальному току ТТ; K_{TF} – коэффициент запаса, учитывающий одностороннее намагничивание сердечника ТТ при наличии апериодической составляющей в токе повреждения; $K_{Rem} = 1/(1 - K_r)$ – коэффициент запаса, учитывающий остаточную индукцию; K_r – коэффициент остаточной индукции. При величине остаточной намагниченности 80 %, коэффициент запаса имеет значение $K_{Rem} = 5$.

Максимальное значение коэффициента запаса K_{TF} вычисляется как отношение максимальной индукции в переходном режиме (70) к максимальной индукции в установившемся режиме:

$$K_{TF} = \frac{B_{\max}}{B_{\sim}} = 1 + \omega \cdot T_S \cdot \left(\frac{T_N}{T_S} \right)^{\frac{T_S}{T_S - T_N}}, \quad (72)$$

где T_N – постоянная времени апериодической составляющей; T_S – постоянная времени вторичной цепи ТТ. Достигается через время t_m

$$t_m = \frac{T_S T_N}{T_S - T_N} \ln \frac{T_N}{T_S}. \quad (73)$$

В большинстве случаев для ТТ с замкнутым магнитопроводом соблюдается условие $T_S \gg T_N$, что позволяет упростить выражение для коэффициента запаса K_{TF} :

$$K_{TF} = 1 + \omega \cdot T_N. \quad (74)$$

Как отмечалось в [6], выбор ТТ с учетом коэффициента запаса (74), сохраняя при этом разумное сечение токовых цепей и размеры ТТ, часто не представляется возможным. Несколько снизить требования к ТТ по предельной кратности возможно, если работу без насыщения необходимо обеспечить лишь в течение определенного времени t_M . Тогда при $T_S \gg T_N$ вводится коэффициент запаса

$$K'_{TF} = 1 + \omega \cdot T_N \cdot \left(1 - e^{-t_M/T_N} \right). \quad (75)$$

На рисунке 38 приведена зависимость $K'_{TF} = f(T_N)$ при различных малых значениях времени до насыщения t_M . Как видно, коэффициент K'_{TF} даже при относительно больших постоянных времени T_N может принимать значения меньше 1, как, например, при $t_M = 4$ мс. При больших значениях t_M коэффициент K'_{TF} существенно выше. Таким образом, требования к ТТ быстродействующих дифференциальных защит, имеющих время срабатывания 3–5 мс, могут быть существенно снижены [94].

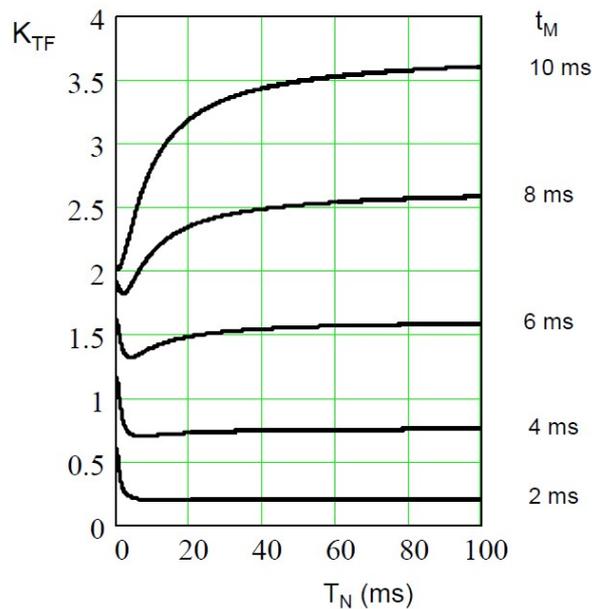


Рисунок 38 – Значения коэффициента K'_{TF}

при малых допустимых временах ненасыщенного состояния ТТ

в) методики производителей РЗА

Компания Siemens предполагает выбор ТТ для устройств защиты с учетом переходных режимов и возможной остаточной намагниченности в магнитопроводе ТТ. В руководствах по эксплуатации на терминал защиты приводятся требования по минимально допустимому времени без насыщения. В [86] приведены рекомендации компании Siemens для устройств дифференциальной защиты генератора 7UM6, силового трансформатора 7UT6. При внутренних КЗ требуется время работы без насыщения $t_M \geq 4$ мс, что

соответствует $K'_{TF} \geq 0,75$. При внешних КЗ необходимо время без насыщения $t_M \geq 5$ мс, что соответствует $K'_{TF} \geq 1,2$.

При значениях $K'_{TF} \leq 1$ расчетным становится установившийся режим КЗ, если в нем выполняется требование к полной погрешности ТТ $\varepsilon \leq 10\%$, т.е. используется кратность тока КЗ в установившемся режиме для выбора ТТ. Если же значение ALF' , полученное при $K'_{TF} \leq 1$, используется для расчета номинальной предельной кратности по значениям номинальной и рабочей нагрузки, как это выполняется в [86], это означает, что в установившемся режиме внешнего КЗ возможно насыщение ТТ и погрешность ε может существенно превысить 10 %. Однако данная ситуация не является критичной, поскольку устройства дифференциальной защиты имеют программный детектор насыщения, который при внешних КЗ блокирует защиту или вводит дополнительное торможение [25].

Дистанционные защиты требуют большего времени измерения, чем дифференциальные защиты, поэтому существенно возрастают требования к ТТ. По данным [85] минимально необходимое время измерений, включая запас, для дистанционных защит 7SA6 принимается равным 25 мс, что соответствует $K'_{TF} = 8$ при $T_N = 0,1$ с. Для более новых версий 7SA63 может быть принято значение $K'_{TF} = 5$, что соответствует $t_M \approx 14$ мс.

В руководствах на терминалы ABB RED 670, REL 670 приводятся следующие требования к ТТ. При КЗ в начале линии кратность тока КЗ умножается на коэффициент α , причем $\alpha = 2$ при $T_N \leq 50$ мс и $\alpha = 3$ при $T_N > 50$ мс. При КЗ в конце первой зоны защиты кратность тока КЗ умножается на коэффициент $K = 4$ при $T_N \leq 30$ мс и $K = 6$ при $T_N > 30$ мс [25].

Рекомендации по выбору ТТ в руководствах на микропроцессорные терминалы дифференциальной и дистанционной защиты отечественных производителей, как правило, предполагают выбор ТТ по току установившегося режима КЗ.

Выбор ТТ для дифференциальной защиты шин (ДЗШ) ТОР 300 ДЗШ 51Х [80] производства Релематика выполняется исходя из условия, что полная погрешность в установившемся режиме не должна превышать 50 % при максимальном токе внешнего КЗ (в режиме максимального сквозного тока). Схожие характеристики приводятся для ДЗШ ШЭ2710 561 [93] производства ЭКРА. ДЗШ не срабатывает при внешних КЗ с апериодической составляющей с постоянной времени до 0,3 с, если токовая погрешность ТТ не превышает 30 % в установившемся режиме при активной нагрузке ТТ. ДЗШ действует с гарантированным временем при внутренних КЗ, если токовая погрешность не превышает 50 % при аналогичных условиях.

В требованиях к ТТ для защит трансформаторов ТОР 300 ДЗТ 5ХХ (Релематика) [79] и ШЭ2607 042 (ЭКРА) [92] указано, что необходимо обеспечить полную погрешность ТТ в установившемся режиме в пределах 10 % при максимальном токе внешнего КЗ. В [79] рекомендуется на стороне ВН использовать ТТ с приведенной предельной кратностью $K'_{10} \geq 30$, на сторонах СН и НН $K'_{10} \geq 20$. Приведенная предельная кратность рассчитывается по формуле

$$K'_{10} = \frac{I_{\text{ном,ТТ}}}{I_{\text{ном,тр}}} K_{10},$$

где $I_{\text{ном,ТТ}}$ – первичный номинальный ток ТТ, $I_{\text{ном,тр}}$ – номинальный ток защищаемого трансформатора. В [92] рекомендуется применять ТТ с $K_{10} \geq 20$.

В [25] отмечается, что выбор ТТ для отечественных цифровых защит по условиям переходного процесса представляется затруднительным не только потому, что отсутствуют данные о минимально необходимом времени измерения защит, но и отсутствует утвержденная методика расчета параметров ТТ по значению времени точной трансформации. Существует потребность в разработке современной версии указаний по расчету ТТ, включающей также обзор и сравнение существующих методов от фирм-производителей защит, характеристики и технические данные по ТТ по ГОСТ 7746-2001. Предпочтение отдается методике расчета ТТ в переходном процессе, основанной на понятии об

интервале достаточно точной трансформации и позволяющей оценивать пригодность цифровых защит по временам срабатывания измерительных органов. Необходимость разработки отечественного стандарта требований к защитным ТТ, предназначенным для работы в переходных режимах, также отмечается в [41].

4.2 Анализ способов обеспечения правильной работы дифференциальных защит при насыщении ТТ

Применение ТТ с немагнитным зазором в магнитопроводе, использование методик выбора ТТ, учитывающих переходный режим и другие факторы, снижение сопротивления вторичной цепи – меры по исключению глубокого насыщения ТТ вовсе или на определенном промежутке времени после начала КЗ. Исключив насыщение ТТ, устраняется источник погрешности токов во вторичной цепи, тем самым обеспечиваются условия для правильного функционирования релейной защиты. Однако при данном подходе зачастую для достижения ожидаемого результата требуется замена ТТ на более мощные, либо другого типа, увеличение сечения контрольных кабелей и т.п., что непременно связано со значительными вложениями средств.

В то же время активно развивается подход, заключающийся в применении в защитах алгоритмов, позволяющих адаптироваться к условиям переходного режима КЗ с насыщением ТТ. Традиционным здесь можно считать применение процентного торможения в дифференциальных защитах. Но с началом использования микропроцессорных терминалов, предоставляющих широкие информационные возможности, разрабатываются и появляются и принципиально новые алгоритмы. Учитывая, что вопросы оптимизации и экономические аспекты принимают все большее значение, развитие данного направления по обеспечению правильной работы защит при насыщении ТТ видится особенно перспективным.

В [34] проведен сравнительный анализ нескольких направлений по обеспечению селективности и быстродействия микропроцессорных дифференциальных защит трансформаторов в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ:

- оптимизация параметров характеристик защит с процентным торможением по условию отстройки от влияния погрешностей ТТ в переходных режимах;
- применение дополнительных элементов и методов, в том числе дифференциально-фазного принципа (ДФЗ);
- применение защит, учитывающих особенности трансформации вторичного тока ТТ в переходных режимах (наличие интервалов правильной трансформации);
- компенсация погрешностей ТТ с насыщенными магнитопроводами.

По итогам анализа наиболее целесообразными направлениями были отмечены последние два. Вопросы координации функционирования ТТ и устройств РЗА в переходных режимах КЗ рассмотрены в [41]. Сделан вывод, что для действующих крупных электростанций с установленными на них ТТ класса ТРХ в микропроцессорных защитах целесообразно использовать усовершенствованные алгоритмы обработки информации, получаемой от ТТ. Отмечены следующие способы: разработка алгоритмов функционирования устройств РЗА, базирующихся на распознавании аварийного режима на интервале достаточно точной трансформации ТТ (2-3 мс), разработка алгоритмов функционирования устройств РЗА с виртуальной компенсацией погрешностей ТТ.

4.2.1 Гармоническое торможение в дифференциальной защите трансформатора

При работе ТТ с погрешностью более 10% нелинейно искаженный вторичный ток содержит кроме основной спектр высших гармоник

$$i_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n\max} \sin(n\omega t + \Psi_n), \quad (76)$$

где $I_{n\max}$ – амплитуда n -й гармоники тока; Ψ_n – начальная фаза n -й гармоники. Реализованные в дифференциальной защите трансформатора блокировки по второй и другим высшим гармоническим составляющим дифференциального тока

от режимов БНТ и перевозбуждения, обеспечивают дополнительное торможение защиты в режимах, сопровождающихся насыщением измерительных ТТ.

Важно отметить, что в установившемся режиме КЗ при насыщении ТТ кривая тока симметрична относительно оси абсцисс, поэтому в ней содержатся только нечетные гармоники [33], следовательно отсутствуют условия для торможения второй гармонической составляющей. Подобное произошло на одной из тяговых подстанций 220 кВ в Иркутской области, где установлен однофазный трансформатор. Осциллограмма токов плеч, дифференциального тока и содержание второй гармоники в нем показаны на рисунке 39. Отчетливо видно глубокое насыщение ТТ стороны СН, причем насыщение в установившемся режиме внешнего КЗ, что исключено при правильном выборе и подключении к защитной обмотке ТТ. Дифференциальный ток в установившемся режиме принял симметричную форму содержание второй гармоники в нем составило не более 2 %.

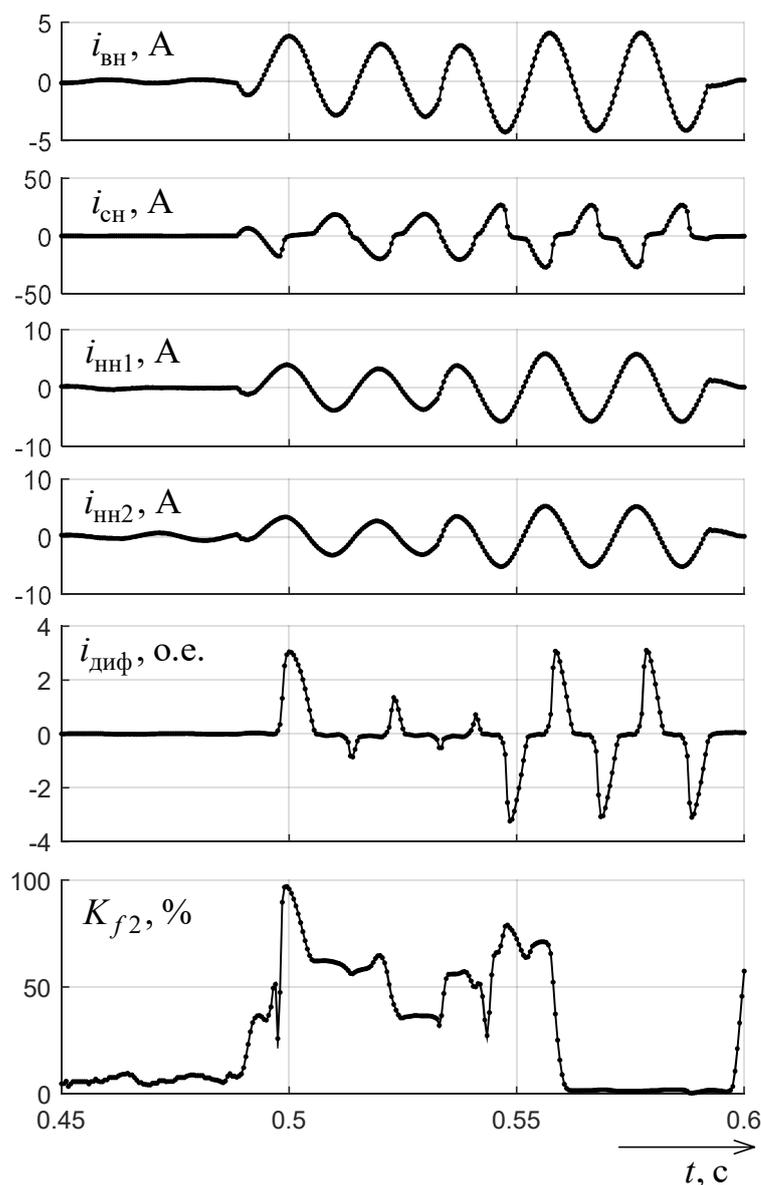


Рисунок 39 – Осциллограмма внешнего КЗ с насыщением ТТ в установившемся режиме

В случае внешних КЗ с однополярным насыщением ТТ данные блокировки позволяют дополнительно отстроиться от неселективных срабатываний защиты, тем самым наблюдается положительный эффект от их действия в текущих условиях. Осциллограмма дифференциального тока защиты автотрансформатора в канале фазы B при внешнем КЗ с аperiodической составляющей, сопровождающимся насыщением ТТ плеча стороны ВН, показана на рисунке 40. Относительное содержание второй гармоники на время насыщения ТТ не опускалось ниже 20%.

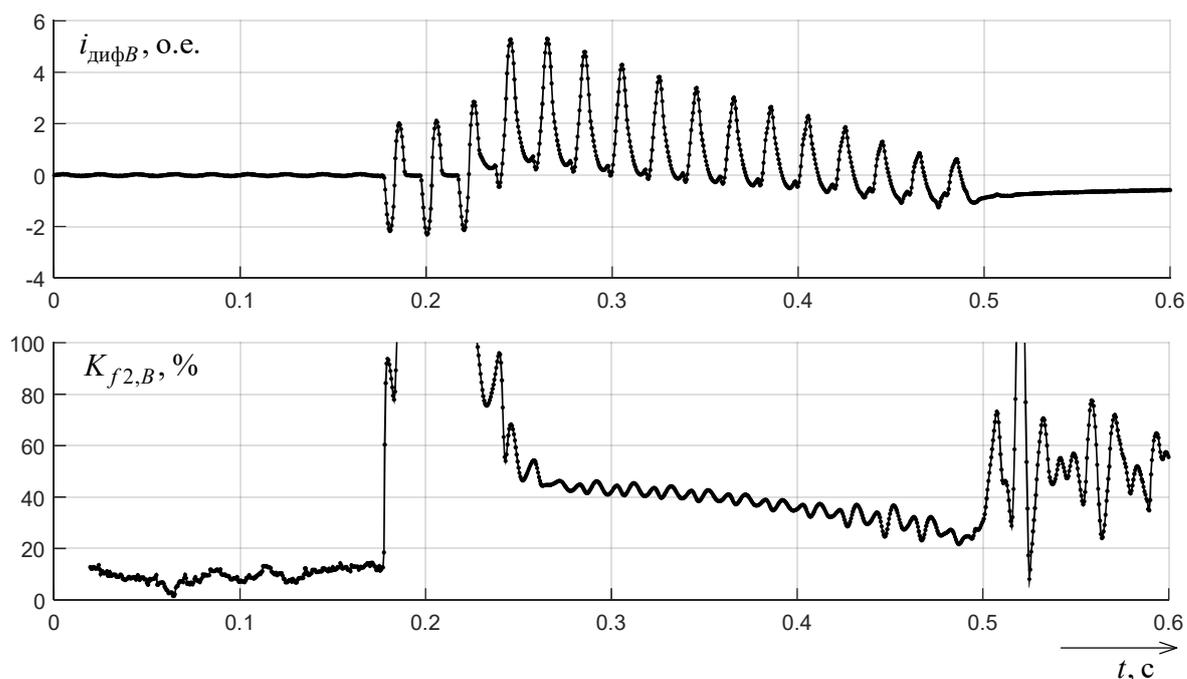


Рисунок 40 – Дифференциальный ток при насыщении ТТ стороны ВН в переходном режиме внешнего КЗ и содержание второй гармоники

При внутренних КЗ и в отсутствие срабатывания дифференциальной токовой отсечки, действующей без торможения, гармоническое торможение может приводить к замедлению дифференциальной защиты. Отключение в таком случае происходит по мере выхода ТТ из насыщения, т.е. снижения доли второй гармонической составляющей, либо посредством иной защиты.

4.2.2 Применение детекторов насыщения ТТ

В микропроцессорных устройствах дифференциальной защиты распространено использование детекторов насыщения ТТ. Потребность в их использовании продиктована тем, что процентное торможение не всегда обеспечивает правильную работу в переходных режимах.

Известен способ выполнения детектора насыщения ТТ [86] (детектора внешнего КЗ), применяемый в терминалах защиты трансформатора Siemens 7UT6, на основе отслеживания дифференциального и тормозного токов. В начальной стадии протекания тока внешнего КЗ ТТ не насыщен, и дифференциальный ток остается низким, тогда как тормозной ток существенно возрастает. Данный признак позволяет сделать вывод о внешнем КЗ и заблокировать основной измерительный

орган (ИО) дифференциальной защиты во избежание неверного срабатывания при насыщении ТТ на время, необходимое для его ликвидации защитами смежного участка, где произошло КЗ. Годографы замера дифференциальной защиты при внутреннем КЗ, а также при внешнем КЗ сопровождающимся насыщением ТТ с одной из сторон приведены на рисунке 41 [17].

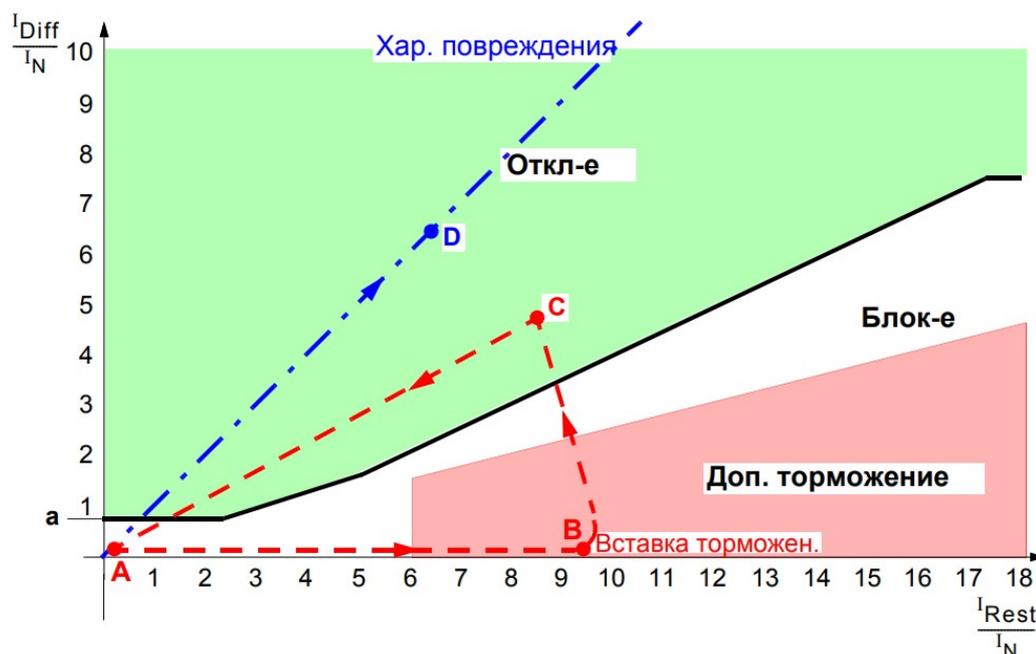


Рисунок 41 – Рабочая характеристика дифференциальной защиты и характеристика повреждения

В то же время стандартом организации ФСК ЕЭС [78] определено требование ко времени срабатывания дифференциальной защиты трансформатора при переходе внешнего КЗ во внутреннее в условиях наличия насыщения ТТ, которое должно составлять не более 60 мс. Это накладывает определенные ограничения на время блокирования в подобных алгоритмах детекторов внешнего КЗ. Однако в [17] отмечается, что детектор насыщения в устройстве защиты трансформатора Siemens 7UT6 выполнен таким образом, что блокировка прекращается, как только рабочая точка устойчиво перемещается (более хотя бы одного цикла) к характеристике повреждения (90% угла наклона от характеристики повреждения). Это позволяет надежно определять

прогрессирующие повреждения в защищаемой зоне даже после внешнего повреждения с насыщением ТТ.

В терминалах защиты трансформатора ABB RET 670 [112] применяется специальный орган (unrestrained negative sequence differential protection) для сохранения быстродействия защиты при внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ. Орган является дискриминатором внешнего/внутреннего КЗ, основан на сравнении токов обратной последовательности по сторонам. При попадании замера дифференциальной защиты в область срабатывания и идентификации замыкания как внутреннего по сдвигу фаз между токами обратной последовательности по сторонам трансформатора сигнал на отключение формируется без учета блокировки по второй гармонике или по паузам в дифференциальном токе. Учитывая, что возврат блокировки по второй гармонике происходит как правило не ранее, чем через период с момента начала КЗ, использование данного позволяет произвести отключение менее чем за период и до начала глубокого насыщения ТТ (рисунок 42).

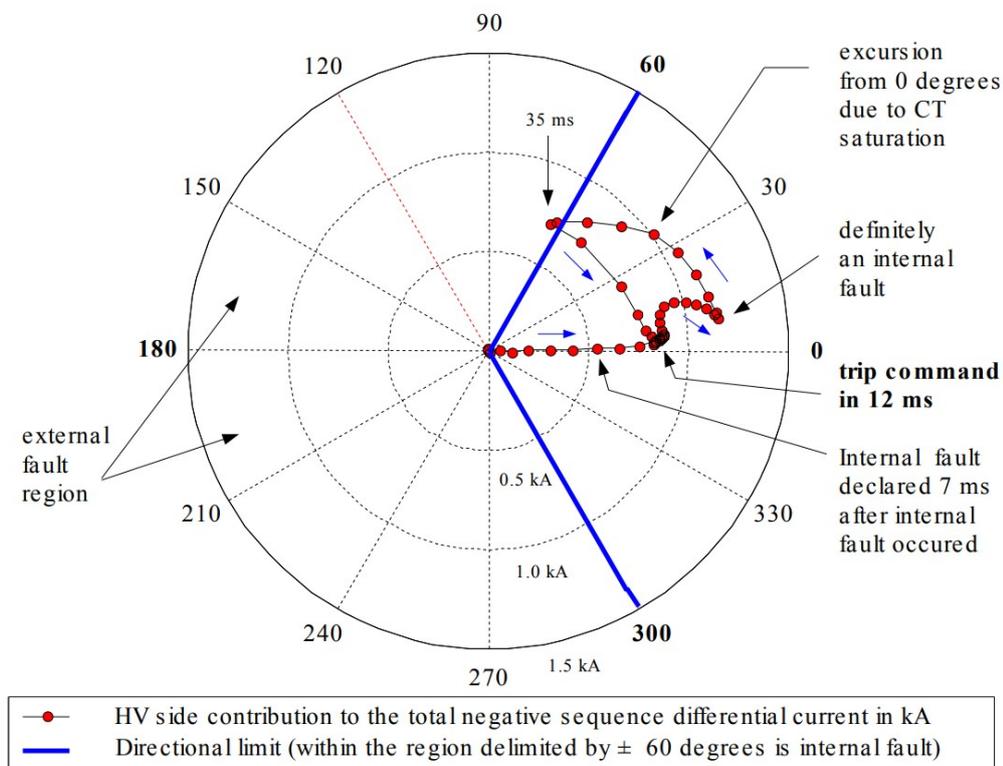


Рисунок 42 – Работа органа по токам обратной последовательности при внутреннем КЗ с насыщением ТТ

4.2.3 Сегментация и восстановление искаженного сигнала

Коррекция сигнала, искажённого вследствие насыщения магнитопровода трансформатора тока, принадлежит к числу задач теоретических основ релейной защиты. Общая задача допускает разделение на составные части: сегментацию, экстраполяцию, восстановление, спектральный анализ. Общая методика коррекции нелинейно искаженного тока предложена в [48, 49, 47], структура цифровой обработки входной величины при информационном анализе процесса показана на рисунке 43.

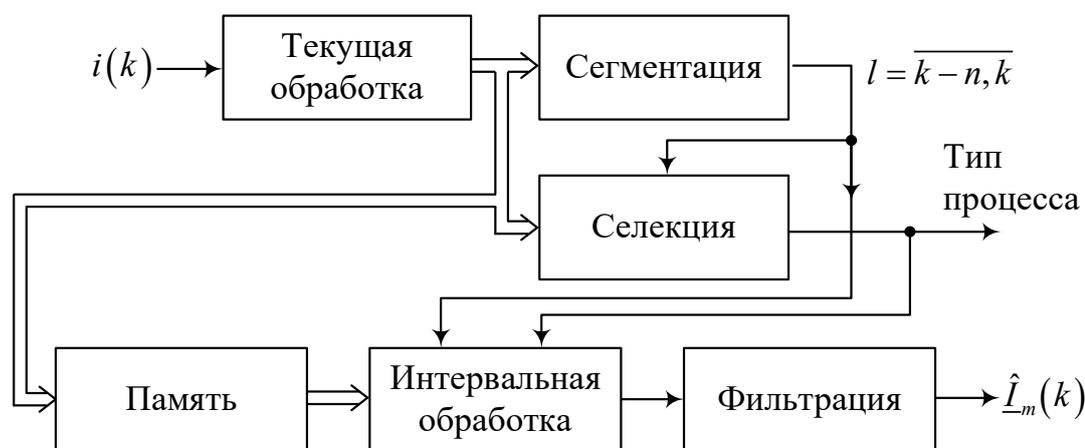


Рисунок 43 – Структура цифровой обработки тока при насыщении ТТ

Со временем в ней произошли изменения, которые, однако, нельзя считать принципиальными. Изменилась иерархия процедур. Сегментация сохранила ключевое значение. Далее идёт процедура восстановления на основе алгоритмического моделирования (симуляции) и экстраполирования. Корректор тока как структурный элемент релейной защиты включает в свой состав такие модули как сегментатор, симулятор и экстраполятор, у каждого из которых имеются модификации, содержащие фильтры и селекторы.

Сегментация – процедура выделения участков правильной трансформации. Наиболее объективным способом определения начала насыщения ТТ является принцип, широко используемый в дифференциальных защитах под названием «детектор насыщения» (обнаружение отставания во времени дифференциального тока от тормозного) [39]. Защиты с односторонним (неполным) наблюдением объекта, например, дистанционная защита линии, не располагают токами,

необходимыми для реализации детектора насыщения. Ввиду этого предлагаются иные способы сегментации [116, 117, 118, 113]. Организация обмена данными по стандарту МЭК 61850 с помощью шины процесса делает доступной для устройств защиты информацию о токах и напряжениях, не задействованных в алгоритмах защит данного устройства. Данная информация может быть использована в решении задачи выявления насыщения ТТ, т.е. сегментации.

Микропроцессорные терминалы РЗА предлагают широкие информационные возможности для решения задачи получения информации о первичном токе в условиях насыщения ТТ. Методам восстановления (коррекции) тока при насыщении ТТ посвящено немало число отечественных [48, 47, 35, 39, 120] и зарубежных работ [113, 101, 108, 119]. Обстоятельный обзор способов восстановления тока при насыщении ТТ сделан совсем недавно в [39]. При этом известные алгоритмы формирования сигнала, пропорционального первичному току ТТ разделены на две группы:

- использующие параметры характеристики намагничивания ТТ;
- не использующие характеристики намагничивания ТТ.

Основным недостатком алгоритмов первой группы является отсутствие информации об остаточной намагниченности в сердечнике ТТ в момент возникновения КЗ. К алгоритмам второй группы данный недостаток не относится, однако при их реализации необходима предварительная фильтрация, что ограничивает их быстродействие. Достаточно точное значение восстановленного первичного тока может быть получено только спустя 8-20 мс после начала переходного процесса, что может накладывать ограничение на использование данных алгоритмов.

4.3 Разработка алгоритмов сегментации

4.3.1 Постановка задачи

Пусть $i_1(t)$ и $i_2(t)$ – первичный и вторичный токи трансформатора тока, $i_1'(t)$ – первичный ток, приведённый ко вторичной стороне. Наблюдаются отсчёты

вторичного тока $i_2(k) = \text{ent}(t/\Delta t)$, где k – дискретное время, Δt – интервал дискретизации. В отсутствие насыщения допустимо принять равенство

$$i_1'(k) = i_2(k) \quad (77)$$

при любых k . С наступлением насыщения равенство (77) сохраняет силу только на интервалах правильной трансформации. На графике тока $i_2(k)$, показанном на рисунке 44, участок правильной трансформации охватывает моменты $k = \overline{1, n}$. Процесс насыщения наблюдается, начиная с отсчёта $i_2(n+1)$.

Задача сегментации заключается в обнаружении имеющегося интервала правильной трансформации, в данном случае $k = \overline{1, n}$.

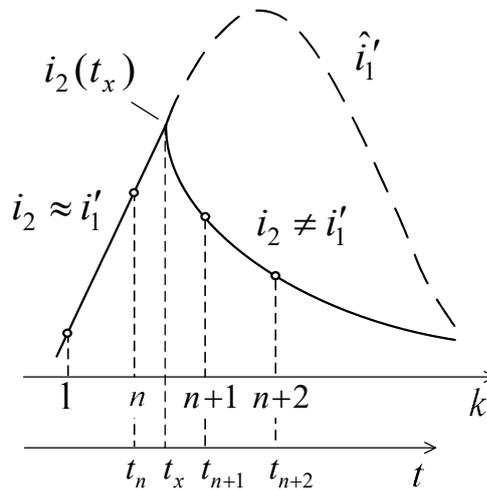


Рисунок 44 – Нелинейно искаженный и восстановленный токи

4.3.2 Способ сегментации с применением опорного сигнала

Общий подход к выделению интервалов правильной трансформации связан с применением опорного сигнала, моделирующего ток $i_1'(k)$

$$i_{\text{оп}}(k) = \sum_{d=0}^p x_d f_d(k), \quad (78)$$

где $f_d(k)$ – заданные функции, x_d – варьируемые коэффициенты, определяемые из условия близости опорного сигнала и наблюдаемого тока. Ограничимся неизвестными x_d , а границы интервала правильной трансформации будем

определять путем наращивания его длины. Оценим близость двух функций по критерию наименьших квадратов

$$\sum_{k=1}^n (i_2(k) - i_{\text{оп}}(k))^2 \rightarrow \min_{x_d, d=0, p}, \quad (79)$$

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

$$\sum_{k=1}^n f_g(k) \sum_{\substack{d=0 \\ d \neq g}}^p x_d f_d(k) = \sum_{k=1}^n i_2(k) f_g(k), \quad (80)$$

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

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

$$\Delta I_n = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(i_2(k) - \sum_{d=0}^p \hat{x}_d(n) f_d(k) \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (81)$$

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.

Например, при двухпараметрическом опорном сигнале

$$i_{\text{оп}}(k) = x_0 + x_1 f_1(k) \quad (82)$$

система (80) сводится к двум уравнениям

$$\begin{aligned} nx_0 + b_1(n)x_1 &= I_1(n), \\ b_1(n)x_0 + b_2(n)x_1 &= I_2(n), \end{aligned} \quad (83)$$

где

$$I_1(n) = \sum_{k=1}^n i_2(k), \quad (84)$$

$$I_2(n) = \sum_{k=1}^n i_2(k) f_1(k), \quad (85)$$

$$b_1(n) = \sum_{k=1}^n f_1(k), \quad (86)$$

$$b_2(n) = \sum_{k=1}^n f_1^2(k). \quad (87)$$

Решение уравнений (83)

$$\hat{x}_0(n) = a_{01}(n)I_1(n) + a_{02}(n)I_2(n), \quad (88)$$

$$\hat{x}_1(n) = a_{11}(n)I_1(n) + a_{12}(n)I_2(n), \quad (89)$$

сопровождается невязкой

$$\Delta I(n) = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (i_2(k) - \hat{x}_0(n) - \hat{x}_1(n)k)^2 \right]^{1/2}. \quad (90)$$

В связи с тем, что основную информацию о характере процесса несут оценка $\hat{x}_1(n)$ и невязка $\Delta I(n)$, местом обучения сегментатора становится плоскость $(\hat{x}_1(n), \Delta I(n))$, на которой отображается вектор замера $\mathbf{x}_n = [\hat{x}_1(n), \Delta I(n)]^T$. Обучение сегментатора проводится по известной методике [53, 54, 63]. Её итогом является область S_n – геометрическое место отображения интервалов правильной трансформации множества процессов насыщения трансформатора тока. Множество включает в себя осциллограммы токов реальных КЗ, записанные в электрических системах, но по большей части его составляют процессы, воспроизводимые имитационными моделями энергообъектов.

Сегментатор начинает действовать при $n = 3$, обрабатывая тройки отсчётов $i_2(k)$ и формируя из каждой замер \mathbf{x}_3 . Предположим, что тройка отсчётов $i_2(1)$, $i_2(2)$, $i_2(3)$ выполнила условие правильной трансформации

$$\mathbf{x}_3 \in S_3, k = \overline{1, 3}.$$

Это значит, что последующий отсчёт $i_2(4)$ необходимо присоединить к первоначальной группе из трех отсчётов, сформировать вектор \mathbf{x}_4 и проверить, выполняется ли и на этот раз условие правильной трансформации

$$\mathbf{x}_4 \in S_4, k = \overline{1, 4}.$$

Если оно выполняется, делается вывод, что четвертый отсчёт тоже принадлежит участку правильной трансформации. Идя в той же последовательности, придем, наконец, к тому, что на отсчёте $i_2(n)$ условие выполняется:

$$\mathbf{x}_n \in S_n, k = \overline{1, n},$$

а на отсчёте x_{n+1} – нет:

$$\mathbf{x}_{n+1} \notin S_{n+1}, k = \overline{1, n+1}.$$

В таком случае число n указывает продолжительность интервала правильной трансформации, а отсчёты $i_2(1)$ и $i_2(n)$ – его границы в дискретном времени.

Далее рассмотрено применение в качестве опорных линейного и косинусоидального сигналов, однако могут быть выбраны и более сложные.

4.3.2.1 Линейный опорный сигнал

Простейший из опорных сигналов

$$i_{\text{оп}}(k) = x_0 + x_1 k. \quad (91)$$

Для него общие выражения (85)–(89) конкретизируются следующим образом

$$I_2(n) = \sum_{k=1}^n k i_2(k), \quad (92)$$

$$b_1(n) = \sum_{k=1}^n k = \frac{n(n+1)}{2}, \quad (93)$$

$$b_2(n) = \sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}, \quad (94)$$

$$a_{01}(n) = \frac{2(2n+1)}{n(n-1)}, \quad a_{02}(n) = -\frac{6}{n(n-1)}, \quad (95)$$

$$a_{11}(n) = 2a_{02}(n), \quad a_{12}(n) = \frac{12}{n(n^2-1)}. \quad (96)$$

Значения коэффициентов (95), (96) для $n = \overline{3, 7}$ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты сегментатора с линейным опорным сигналом

n	a_{01}	a_{02}	a_{11}	a_{12}
3	2,3333	-1,0000	-2,0000	0,5000
4	1,5000	-0,5000	-1,0000	0,2000
5	1,1000	-0,3000	-0,6000	0,1000
6	0,8667	-0,2000	-0,4000	0,0571
7	0,7143	-0,1429	-0,2857	0,0357

4.3.2.2 Косинусоидальный опорный сигнал

Ещё один двухпараметрический сигнал

$$i_{\text{оп}}(k) = x_0 + x_1 \cos \alpha k,$$

где $\alpha = 2\pi/N$, N – число отсчётов на периоде частоты сети, повторяет форму тока КЗ при наиболее неблагоприятной фазе коммутации. В данном случае выражения (85)–(87) принимают вид

$$I_2(n) = \sum_{k=1}^n i_2(k) \cos \alpha k, \quad (97)$$

$$b_1(n) = \sum_{k=1}^n \cos \alpha k = \frac{\cos \frac{\alpha}{2} - \cos \frac{(2n+1)\alpha}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (98)$$

$$b_2(n) = \sum_{k=1}^n \cos^2 \alpha k = \frac{1}{2} \left(n + \frac{\sin(2n+1)\alpha - \sin \alpha}{2 \sin \alpha} \right). \quad (99)$$

Через $b_1(n)$, $b_2(n)$ определяются коэффициенты $a(n)$ (таблица 4).

Таблица 4 – Коэффициенты сегментатора с косинусоидальным опорным сигналом

n	a_{01}	a_{02}	a_{11}	a_{12}
3	0,3726	-0,1281	-0,2562	0,4180
4	0,3014	-0,1365	-0,2730	0,3623
5	0,2689	-0,1555	-0,3110	0,3512
6	0,2625	-0,1901	-0,3802	0,3773
7	0,2856	-0,2552	-0,5104	0,4564

4.3.3 Способ сегментации на основе фильтра постоянной составляющей

Альтернативный способ сегментации заключается в использовании быстродействующего фильтра, подавляющего синусоидальную составляющую и выделяющего оставшуюся аperiodическую составляющую. В задаче сегментации может использоваться его наиболее быстродействующая модификация – по трем отсчетам наблюдаемой величины. Ток КЗ может содержать аperiodическую составляющую, однако в пределах тройки соседних отсчетов она изменяется незначительно. Фильтр подавляет периодическую составляющую основной частоты в наблюдаемом сигнале, выделяя аperiodическую составляющую,

$$\hat{i}_{\text{ан}}(k) = \frac{1}{4\sin^2(\alpha/2)} [i_2(k) - 2i_2(k-1)\cos\alpha + i_2(k-2)]. \quad (100)$$

С его помощью выделяется аperiodическая составляющая из наблюдаемого вторичного тока $i_2(k)$.

Минимизация влияния высших гармоник во вторичном токе на результат фильтрации может быть достигнута использованием модификации фильтра, на который подается тройка не соседних отсчетов, а «через один»

$$\hat{i}_{\text{ан}}(k) = \frac{1}{4\sin^2(\alpha/2)} [i_2(k) - 2i_2(k-2)\cos 2\alpha + i_2(k-4)]. \quad (101)$$

Пример обработки фильтром (100) осциллограммы с насыщением ТТ приведен на рисунке 45.

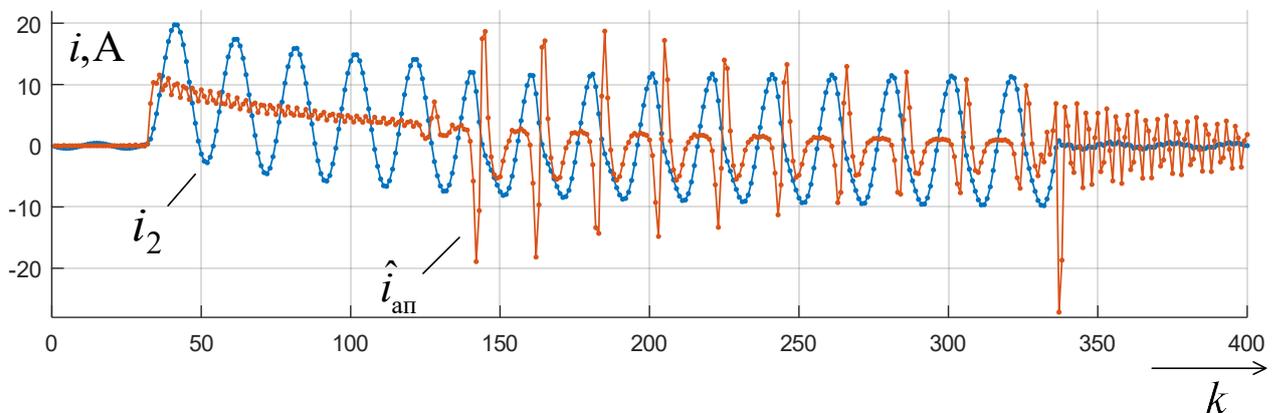


Рисунок 45 – Обработка осциллограммы фильтром постоянной составляющей

Отчетливо видно, что в моменты наступления насыщения наблюдаются «всплески» выделенного тока $\hat{i}_{\text{ап}}$. Установлено, что с наступлением насыщения ТТ наблюдается смена знака $\hat{i}_{\text{ап}}$, а также его резкий выброс. Знак вторичного наблюдаемого тока i_2 при этом остается неизменным. Данные критерии положены в основу алгоритма сегментации.

Логическая схема предложенного алгоритма сегментации показана на рисунке 46. Алгоритм выполняется на текущем окне наблюдения из $m+1$ отсчетов токов i_2 и $i_{\text{ап}}$. Число m может быть принято небольшим, например, равным 2-3 при частотах дискретизации 1-2 кГц. Контролируется равенство знаков отсчетов тока i_2 на всем окне. То же контролируется и для тока $i_{\text{ап}}$, но за исключением последнего отсчета тока $i_{\text{ап}}$ на данном окне. Производится сравнение величины абсолютной величины предпоследнего отсчета тока i_2 с заданным уровнем $i_{\text{уст}}$. Также выполняется сравнение усредненного значения $i_{\text{ап}}$ на окне $\overline{k-m, k-1}$ с заданным уровнем $i_{0\text{уст}}$, поскольку расчет идет на то, что насыщение ТТ вызвано наличием апериодической составляющей в токе КЗ. При выполнении всех условий принимается решение о наступлении насыщения ТТ, последний «ненасыщенный» отсчет тока i_2 относится к моменту времени $k_{\text{кон}} = k - 2$.

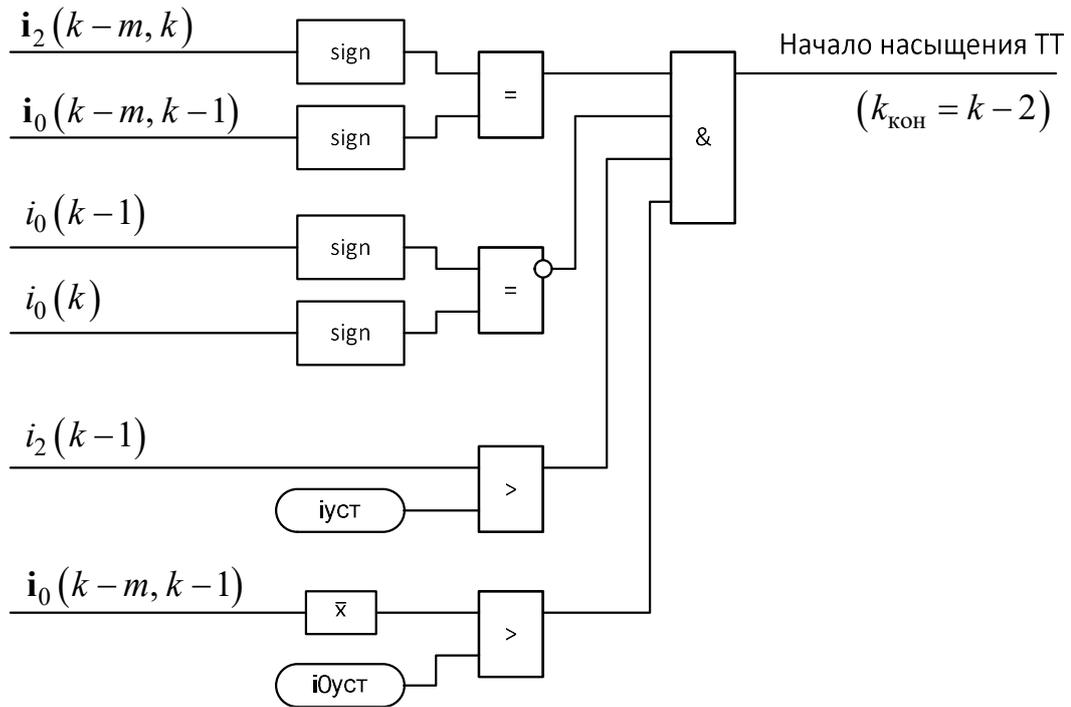


Рисунок 46 – Логическая схема сегментатора

4.4 Разработка алгоритмов восстановления тока

Задача восстановления заключается в определении функции \hat{i}'_1 , более близкой к истинному току i'_1 , нежели наблюдаемый на интервале насыщения ток i_2 [113, 101].

4.4.1 Адаптивное восстановление

В случае, отражённом на рисунке 44, речь идёт о 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 $i_{\text{оп}}(k)$ за пределы интервала правильной трансформации. В 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, например, сигнал (91) с коэффициентами (88), (89), (95), (96)

$$\hat{i}'_1(k) \approx i_{\text{оп}}(k) = \hat{a}_0(n) + \hat{a}_1(n)k, \quad (102)$$

$$i_{\mu}(k) = i_{\text{оп}}(k) - i_2(k), \quad (103)$$

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

В простейшей линейной модели (рисунок 47), где L_μ – линеаризованная индуктивность ветви намагничивания в области насыщения, R и L – сопротивления и индуктивность нагрузки, ток намагничивания выражается через ток нагрузки с участием двух коэффициентов $\beta = R/L_\mu$ и $\eta = L/L_\mu$

$$i_\mu(t) = \beta \int_{t_0}^t i_2(v) dv + \eta (i_2(t) - i_2(t_0)). \quad (104)$$

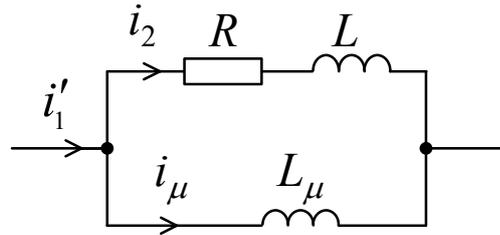


Рисунок 47 – Алгоритмическая модель трансформатора для процедуры восстановления тока

На интервале дискретизации соотношение (104) с аппроксимацией интеграла по формуле трапеций преобразуется в рекуррентную формулу

$$i_\mu(k) = i_\mu(k-1) + c_0 i_2(k) + c_1 i_2(k-1), \quad (105)$$

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

Трёх отсчётов (103) тока намагничивания достаточно для определения из уравнения (105), записанного для $k = n+2, n+3$, коэффициентов c_0 и c_1 . Затем уже, начиная с момента $k = n+4$, формула (105) выполняет восстановление тока $\hat{i}'_1(k)$:

$$\hat{i}'_1(k) = i_\mu(k) + i_2(k), \quad k \geq n+4. \quad (106)$$

Пример работы алгоритма восстановления тока приведен на рисунке 48. Частота дискретизации сигнала составляет 4 кГц. Тонкой сплошной линией отмечен наблюдаемый ток, пунктирной линией – первичный приведенный ток. Выходной сигнал после выполнения восстановления, отмеченный жирной сплошной линией, состоит из участка правильной трансформации, экстраполированного участка (отсчеты отмечены кружками) и восстановленного участка. Результат, как видно, практически совпадает с первичным приведенным током.

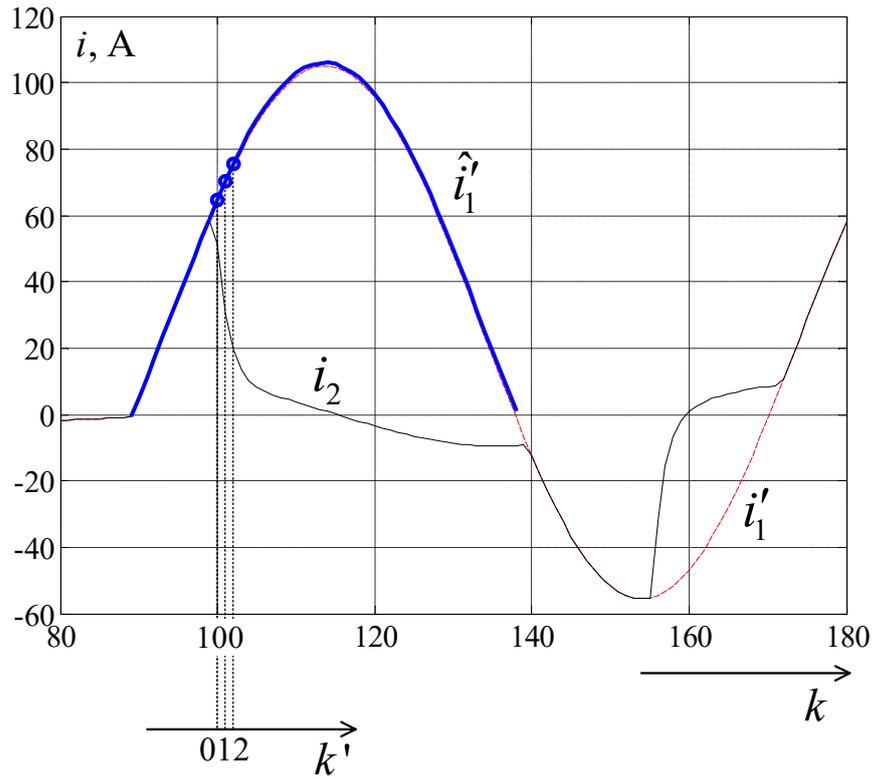


Рисунок 48 – Пример восстановления тока при насыщении ТТ

Широкие функциональные возможности предложенного способа вытекают из того обстоятельства, что ни используемый для экстраполяции модельный сигнал, ни используемая при синтезе адаптивного корректора искаженного тока модель трансформатора не ограничены конкретной реализацией. Микропроцессорные терминалы релейной защиты выполняют синтез адаптивных модулей в темпе реального времени без каких-либо затруднений, если выполняемые операции описываются алгебраическими соотношениями, как это представлено в данном способе.

4.4.2 Неадаптивное восстановление

Предположим, что параметры модели по рисунку 47 – известные интервальные величины. В этом случае нет необходимости в предсказании отсчетов (102), (103), что требовалось ранее не только для определения коэффициентов c_0 и c_1 , но и для запуска рекурсии. Теперь же, когда коэффициенты известны, востребовано единственное начальное значение тока

намагничивания $i_\mu(n+1)$, и тогда рекурсия (105) запускается со значения $i_\mu(n+2)$.

Чтобы определить отсчёт $i_\mu(n+1)$, заметим, что в момент t_x , когда начинается насыщение, правомерно принять $i_\mu(t_x) = 0$. Тогда из (104) определится искомое значение

$$i_\mu(t_{n+1}) = i_\mu(n+1) = \frac{R\Delta t_x}{2L_\mu}(i_2(t_x) + i_2(t_{n+1})) + \frac{L}{L_\mu}(i_2(t_{n+1}) - i_2(t_x)). \quad (107)$$

Что же касается момента t_x и значения тока $i_2(t_x)$, то они определяются пересечением двух прямых. Первая – та, что определена для участка правильной трансформации

$$i_{21}(t) = \hat{x}_0 + (\hat{x}_1/\Delta t)t. \quad (108)$$

Вторая – проведенная через две точки $i_2(t_{n+1})$ и $i_2(t_{n+2})$

$$\begin{aligned} i_{22}(t) &= y_0 + (y_1/\Delta t)t, \\ y_0 &= (1/\Delta t)(i_2(t_{n+1})t_{n+2} - i_2(t_{n+2})t_{n+1}), \\ y_1 &= i_2(t_{n+2}) - i_2(t_{n+1}). \end{aligned} \quad (109)$$

Из (102) и (103)

$$\begin{aligned} t_x &= \frac{y_0 - x_0}{x_1 - y_1} \Delta t, \\ i_2(t_x) &= i_{21}(t_x) = i_{22}(t_x). \end{aligned} \quad (110)$$

В отличие от адаптивного алгоритма, неадаптивный алгоритм чувствителен к задаваемым параметрам γ и η из описания (110) модели трансформатора тока. Чувствительность носит своеобразный характер, что иллюстрируется результатами испытания алгоритма (рисунки 49, 50). Имитационная модель трансформатора тока с параметрами нагрузки $R = 1$ Ом, $L = 2$ мГн и кусочно-линейной ветвью намагничивания, вебер-амперная характеристика которой задаётся потокосцеплением $\psi_s = 0,08$ Вб и индуктивностью ветви намагничивания в области насыщения $L_\mu = 0,38$ мГн. Модель активируется током

$$i_1'(t) = I_m (e^{-t/\tau} - \cos \omega t)$$

с $I_m = 50$ А, $\tau = 80$ мс. Наблюдаемый ток $i_2(t)$ дискретизируется с частотой 2 кГц ($N = 40$, $\Delta t = 0,5$ мс).

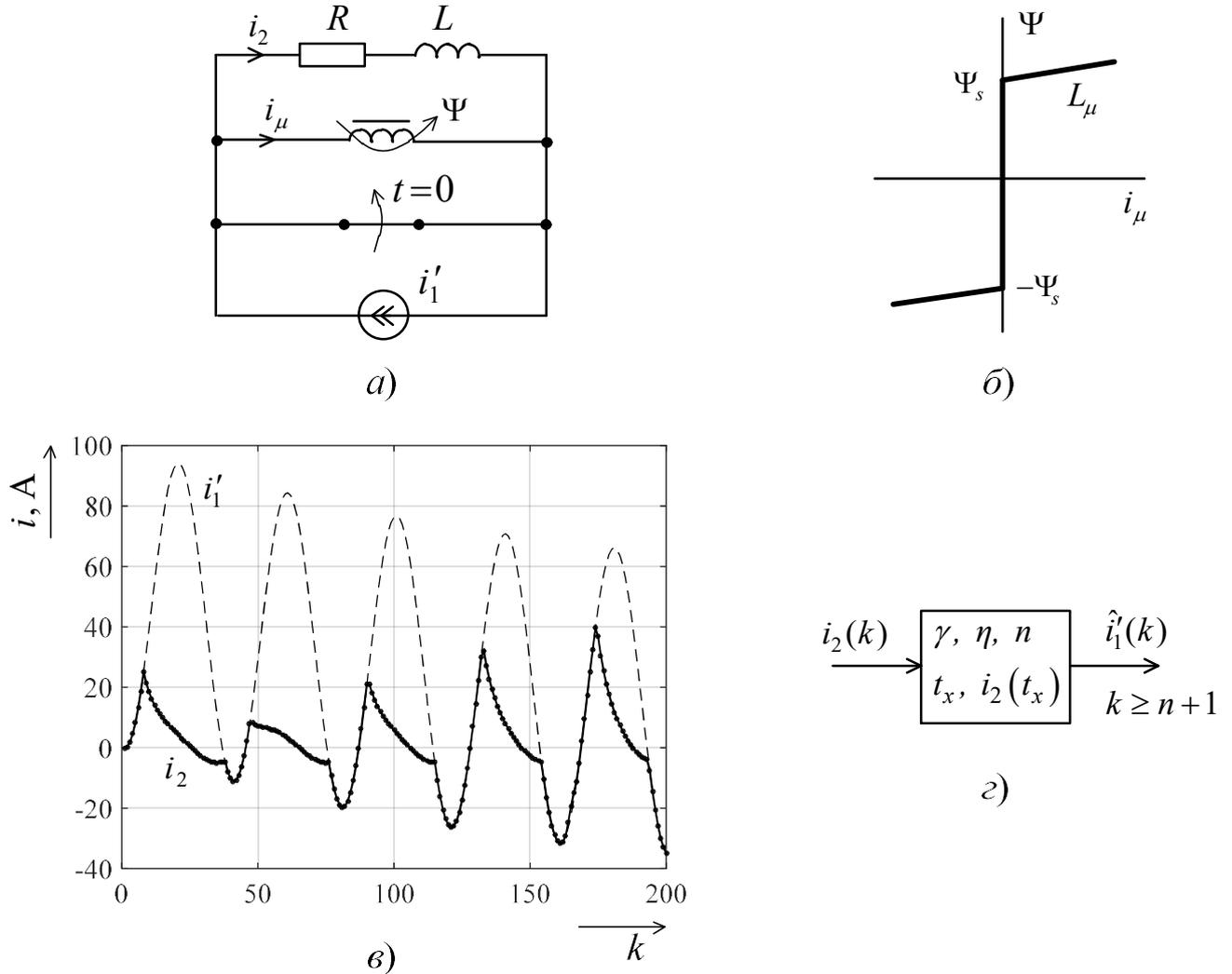


Рисунок 49 – К испытанию корректора:

a – имитационная модель трансформатора тока; b – характеристика намагничивания; c – воздействующий источник i_1' и реакция на него i_2 ;

d – алгоритмическая модель трансформатора тока

Влияние отклонений величин γ и η , задаваемых в описании (104), от значений $\gamma_{\text{мод}}$ и $\eta_{\text{мод}}$, принятых в имитационной модели на рисунке 49, демонстрируют графики на рисунке 50.

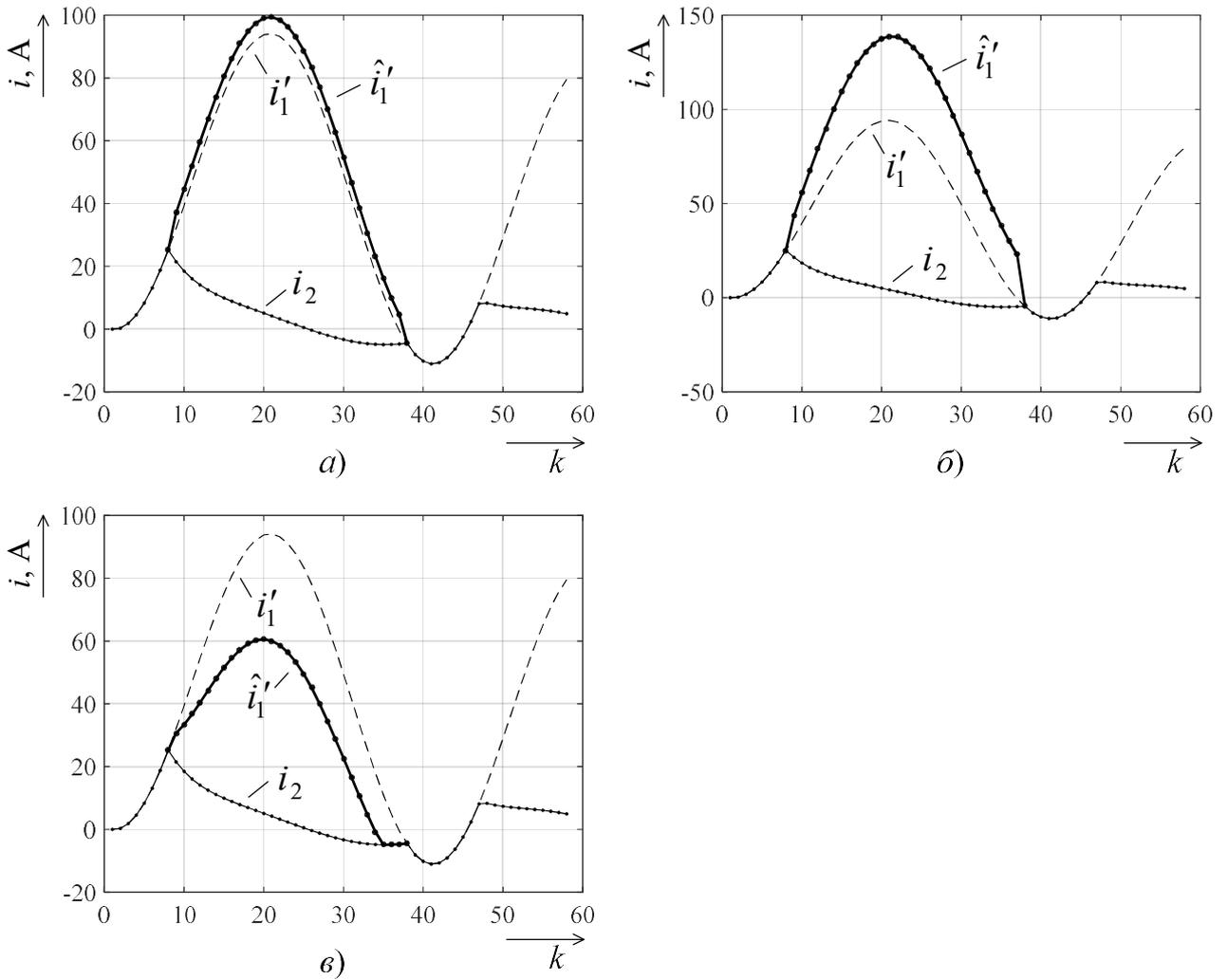


Рисунок 50 – Чувствительность алгоритмической модели (симулятора)

трансформатора тока к отклонению задаваемых параметров γ и η

от параметров имитационной модели (рисунок 49 а) $\gamma_{\text{им}}$ и $\eta_{\text{им}}$:

а – $\gamma = \gamma_{\text{им}}$, $\eta = \eta_{\text{им}}$; б – $\gamma = 1,3\gamma_{\text{им}}$, $\eta = 1,2\eta_{\text{им}}$; в – $\gamma = 0,7\gamma_{\text{им}}$, $\eta = 0,8\eta_{\text{им}}$

4.4.3 Восстановление путем экстраполяции участка правильной трансформации

Способ восстановления вторичного тока ТТ основан на определении параметров первичного тока на интервале без искажения с последующей экстраполяцией на искаженный участок. Задействованы быстродействующие способы разграничения периодической и аperiodической составляющих в составе переходной электрической величины. Данный способ восстановления относится к группе алгоритмов, не использующих параметры характеристики намагничивания

ТТ, имеет высокое быстродействие, минимальный участок правильной трансформации может составлять всего 3 мс.

Комплекс основной частоты входного сигнала $\nu(k)$ определяется с помощью фильтра ортогональных составляющих n -го порядка [55, 121, 63]

$$\underline{V}(n) = \underline{M}(n) \left[\underline{K}(n) \underline{S}(n) - n \underline{S}(n) \right], \quad (111)$$

$$\underline{M}(n) = \frac{2j}{K^2(n) - n^2},$$

$$\underline{K}(n) = \sum_{k=1}^n e^{j2\alpha k},$$

$$\underline{S}(n) = \sum_{k=1}^n \nu(k) e^{j\alpha k}.$$

Время его установления $t_{\text{уст}} = (n+1)\Delta t$.

Выделение комплексного значения синусоидальной величины с помощью фильтра ортогональных составляющих на малом окне наблюдения, ограниченном участком правильной трансформации ТТ, без предварительной обработки сигнала может происходить с недопустимо низкой точностью вследствие наличия других составляющих в исходном сигнале. ЭЭС является сложной динамической системой, в которой при возмущениях, в частности при КЗ, возникают переходные процессы, приводящие в ряде случаев к появлению апериодических и высокочастотных составляющих в токе и напряжении. Переходные процессы также возникают и в измерительных ТТ и ТН, что приводит к возникновению дополнительных переходных составляющих и в ряде случаев к насыщению измерительных ТТ, что существенно искажает форму сигналов, подводимых к устройствам релейной защиты [94].

Предварительная обработка двух соседних отсчетов наблюдаемого сигнала по методу скользящего среднего позволяет уменьшить влияние высокочастотных составляющих на дальнейшую фильтрацию сигнала и может быть задействована. Учитывая, что модельный сигнал тока КЗ в ЭЭС (70) состоит из периодической и апериодической слагающих, а также то, что

апериодическая составляющая является одной из основных причин насыщения ТТ полезным дополнением к алгоритму выделения ортогональных составляющих служит процедура предварительного исключения из вторичного тока апериодической составляющей (100)

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

$i_{\text{ап}}(l) = \hat{i}_{\text{ап}}(k)$, $l = k - 2, k - 1, k$; $k = \overline{3, n}$. Затем комплекс основной частоты сигнала $i_{\text{пер}}(l)$ определяется с помощью фильтра ортогональных составляющих (111). Алгоритмы предварительной обработки сигнала выполняются в темпе реального времени и не вносят задержки.

Опыты показали, что при обрабатываемых интервалах правильной трансформации длиной 3-7 мс предпочтительней выделять из полученных отсчетов апериодической составляющей $i_{\text{ап}}(k)$, $k = \overline{3, n}$ их среднее арифметическое значение $i_{\text{ап.сред}}$ и предварительную обработку вторичного тока выполнять следующим образом:

$$i_{\text{пер}}(l) = i_2(l) - i_{\text{ап.сред}}. \quad (112)$$

Пример восстановления тока по реальной осциллограмме с насыщением ТТ с подстанции Мамакан (Иркутская область) приведен на рисунке 51, где отмечены исходный ток i_2 , восстановленный по предлагаемому алгоритму ток \hat{i}'_1 , а также модельный ток КЗ

$$\hat{i}'_{1\text{мод}} = I_1 \sin \omega t + I_2 \cos \omega t + I_3 e^{-t/\tau}, \quad (113)$$

неизвестные параметры I_1, I_2, I_3, τ которого были определены по всем неискаженным отсчетам тока КЗ i_2 с помощью регрессионного анализа, используя набор инструментов Curve Fitting ToolBox в программном комплексе Matlab. Полученный результат восстановления удовлетворительный, исходную полную погрешность удалось значительно уменьшить, что говорит об эффективности алгоритма.

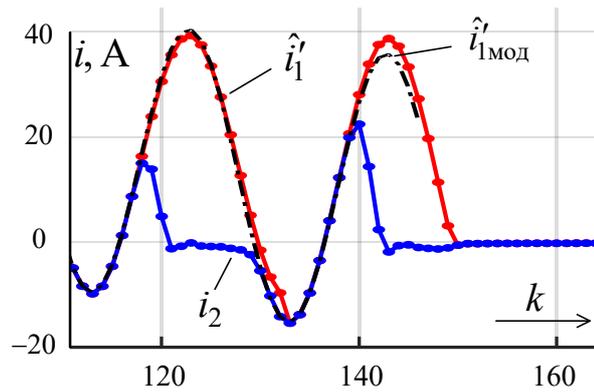


Рисунок 51 – Восстановление тока при насыщении ТТ

4.4.4 Цифровая обработка восстановленного тока

Процедура восстановления ограничена условием

$$\text{sign } i_{\mu}(k) = \text{const}, \quad (114)$$

$$k > n + 1,$$

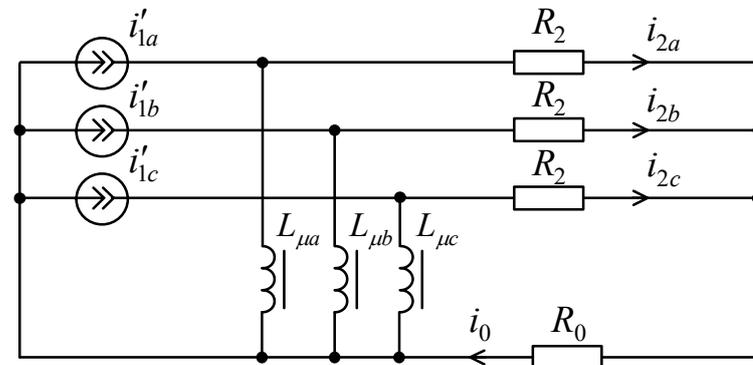
иначе, моментом перехода разности $i_1'(k) - i_2(k)$ через нулевое значение.

Основанием для приостановления процедуры может стать также появление в наблюдаемом токе очередного участка правильной трансформации.

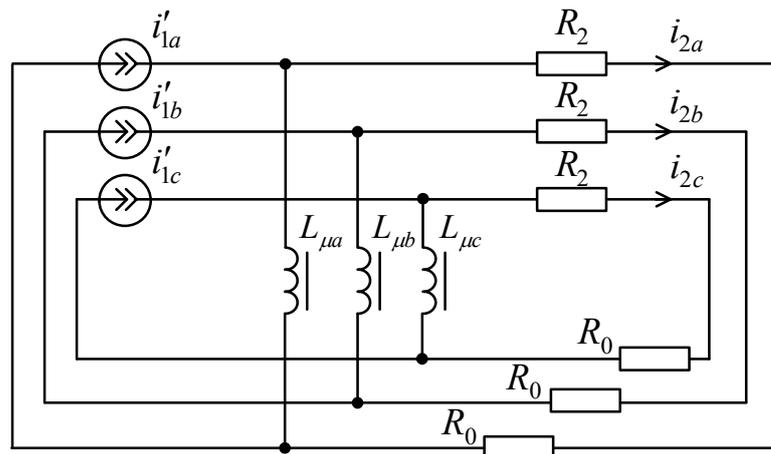
Отдельного внимания заслуживает случай глубокого насыщения магнитопровода, когда условие (114) приостанавливает процесс восстановления, и, тем не менее, сегментатор не подтверждает выход из насыщения. Или же условие (105) продолжает выполняться спустя время порядка периода частоты сети, а выход из насыщения не происходит. Тогда для способов адаптивного и неадаптивного восстановления ничего не остаётся, как принудительно приостановить восстановление и далее экстраполировать восстановленный ток с присущей ему закономерностью, которую предстоит обнаружить. Решение задачи с помощью быстродействующих способов разграничения периодической и аperiodической составляющих в составе переходной электрической величины рассмотрено ранее в способе восстановления путем экстраполяции участка правильной трансформации тока.

4.4.5 Область применения предложенных алгоритмов восстановления

Как отмечалось в [39], практически невозможно использовать алгоритмы восстановления тока, использующие ток на интервалах насыщения, для ТТ работающих в группах, потому что в данном случае имеет место взаимное влияние ТТ в условиях насыщения. Действительно, как следует из рисунка 52 а, при работе ТТ по схеме «звезда» с нулевым проводом при насыщении ТТ одной из фаз, через ее нагрузку и ветвь намагничивания могут протекать токи других фаз ввиду наличия сопротивления нейтрального провода R_0 . Величина сопротивления R_0 сравнима по величине с сопротивлением нагрузки R_2 , в случае подключения микропроцессорных терминалов защиты.



а)



б)

Рисунок 52 – Схемы замещения вторичных цепей ТТ

а – «звезда» с нейтральным проводом; б – с индивидуальными контурами

Включение каждой фазы на индивидуальный контур (рисунок 52 б) требует дополнительных жил контрольного кабеля и практически не применяется. Таким образом, область применения алгоритмов адаптивного и неадаптивного восстановления, использующих наблюдаемый вторичный ток на интервалах насыщения ограничена одиночно работающими ТТ, т.е. без соединения в группы, например, по схеме «звезда» с нейтральным проводом. В то время как алгоритм с экстраполяцией участка правильной трансформации отмеченным ограничением не обладает.

Однако группа алгоритмов, использующих информацию на искаженном участке насыщения ТТ, все же имеет перспективы на внедрение в устройствах РЗА. Последнее десятилетие наблюдается постепенное внедрение цифровых подстанций. Одна из особенностей цифровой подстанции в том, что данное решение позволяет существенно сократить длину и количество традиционных медных кабельных связей на подстанции (в некоторых случаях до 80 %). Помимо использования оптических электронных первичных преобразователей тока и напряжения, существующие ТТ и ТН могут быть подключены к измерительным объединительным устройствам (MU), которые преобразуют аналоговые измерения в цифровой формат для передачи по шине процессе. Устройства MU могут располагаться на территории открытого распределительного устройства (ОРУ) подстанции вблизи высоковольтных ТТ, т.е. не требуется подводить контрольный кабель к зданию со шкафами релейной защиты. Длина медного кабеля в таком случае значительно сокращается. Следовательно, выполнение вторичных цепей ТТ до устройства MU тремя индивидуальными контурами с тем, чтобы обеспечить работоспособность алгоритмов восстановления при насыщении ТТ, может быть оправданным.

4.5 Выводы

1. Коррекция нелинейно искаженного тока принадлежит к числу задач теоретических основ релейной защиты. Общая задача разделяется на ряд взаимосвязанных, но, тем не менее, автономных задач: сегментацию, алгоритмическое моделирование как основу восстановления искаженной части

тока, экстраполяцию не только участка правильной трансформации, но и восстановленной части тока, спектральный анализ откорректированного тока.

2. Разработаны способы сегментации с применением опорных сигналов и с применением фильтра аperiodической составляющей, обеспечивающие надежное выделение участков правильной трансформации тока при насыщении ТТ. Помимо сегментации опорный сигнал выполняет ещё и функцию экстраполяции участка правильной трансформации.

3. Разработаны алгоритмы восстановления тока при насыщении ТТ с использованием алгоритмической модели. Адаптивное восстановление предполагает экстраполяцию участка правильной трансформации с последующим синтезом модели ТТ, неадаптивное строится на базе априорной информации о трансформаторе в режиме насыщения.

4. Разработан алгоритм восстановления тока при насыщении ТТ путем экстраполяции участка правильной трансформации с предварительной обработкой для исключения аperiodической составляющей тока КЗ.

5. Предложенные алгоритмы восстановления тока при насыщении ТТ функционируют в темпе протекания процесса КЗ, минимально необходимая продолжительность участка правильной трансформации составляет 3 мс. Обеспечивается приемлемая погрешность восстановления тока, в том числе и при наличии остаточной намагниченности сердечника ТТ.

ГЛАВА 5 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ

В заключительной главе рассматривается применение приведенных в диссертации теоретических положений, алгоритмов при разработке микропроцессорных устройств защиты трансформаторов производства ООО «Релематика» (г. Чебоксары).

5.1 Адаптивная дифференциальная защита трансформатора

Адаптивная дифференциальная защита реализована в микропроцессорном терминале защит трансформаторов «ТОР 300 ДЗТ 512» производства компании Релематика (рисунок 53). Терминал содержит комплекс основных и резервных защит двухобмоточного трансформатора 110-220 кВ, предназначен для защиты объекта от внутренних повреждений, а также от длительного протекания токов внешнего КЗ.



Рисунок 53 – Терминал защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512»

Разработанная адаптивная дифференциальная защита (на основе замера с адаптивным преобразованием) реализована в терминале в качестве опции, дополняющей традиционную дифференциальную защиту с процентным торможением. Она обладает повышенной чувствительностью к витковым замыканиям в обмотках трансформатора, там, где традиционная дифференциальная защита оказывается нечувствительна из-за значительного начального уровня срабатывания по дифференциальному току.

Защита подключается к фазным токам сторон ВН и НН трансформатора. Работа чувствительного адаптивного дифференциального органа в соответствии с его предназначением разрешается при величинах сквозного тока через защищаемый трансформатор от 0,1 до 1,5 от базисного. Контроль величины фазных токов выполнен по схеме «И» для сторон ВН и НН.

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.

Отстройка от небалансов, вызванных устройством РПН, погрешностями ТТ, цифровым выравниванием в термине защиты, ветвью намагничивания силового трансформатора, выполняется путем выбора соответствующей области блокирования на плоскости замера защиты с помощью имитационной модели защищаемого объекта, воспроизводящей множество альтернативных режимов.

5.2 Корректор тока при насыщении ТТ

В условиях переходного режима КЗ с апериодической составляющей или при остаточной намагниченности в сердечнике погрешность ТТ может существенно превышать расчетную погрешность для установившегося режима. При тяжелых внутренних КЗ с насыщением ТТ возможна блокировка защиты, в результате время срабатывания возрастает до десятых долей секунды, тогда как в отсутствие насыщения оно составляет не более 30 мс. Насыщение ТТ при внешних КЗ приводит к появлению небаланса, и как показывает практика, ложные срабатывания при внешних КЗ, несмотря на наличие блокировок, не исключены. Корректор тока, выполняющий восстановление кривой тока на искаженных участках в темпе реального времени, обеспечивает изначально высокое быстродействие основной защиты при внутренних повреждениях, повышает устойчивость защиты в режимах внешних КЗ.

Корректор нелинейно искаженного тока при насыщении ТТ реализован в терминале защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512». Разработанный корректор тока включает в себя модули сегментации и восстановления. Реализован предложенный в пункте 4.3.3 алгоритм сегментации с использованием фильтра аperiodической составляющей. Основной алгоритм сегментации дополнен модулем типа «детектор насыщения», используемым в дифференциальных защитах для отстройки от внешних КЗ с насыщением ТТ. Принцип заключается в отслеживании отставания во времени дифференциального тока $I_{\text{диф}}$ от тормозного $I_{\text{торм}}$, соответственно предполагает двустороннее наблюдение, в то время как основной алгоритм работоспособен и при одностороннем (неполном) наблюдении. Обеспечивается корректная работа сегментатора при наличии аperiodической 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.

5.2.1 Функциональные испытания корректора тока

Проведены функциональные испытания корректора тока в режимах, смоделированных в комплексах Matlab Simulink, RTDS, и на реальных осциллограммах, полученных в энергосистемах. В заключительной части проведены испытания дифференциальной защиты трансформатора в связке с корректором тока в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

Для испытаний корректора тока была разработана имитационная модель ТТ в среде моделирования Simulink. Моделировался ТТ типа ТПШФА-10, параметры [33] которого: $I_{1\text{ном}} = 3000$ А, $I_{2\text{ном}} = 5$ А, $z_{\text{ном}} = 1,2$ Ом, $K_{10\text{ном}} = 40$,

$$Q = 19,1 \times 10^{-4} \text{ м}^2, \quad l_{\text{ср}} = 1,02 \text{ м}, \quad w_2 = 599, \quad R_{2\text{в}} = 0,98 \text{ Ом}, \quad X_{2\text{в}} = 0 \text{ Ом}.$$

ТТ одиночный, подключен на номинальную нагрузку, имеющую активный характер. На ТТ подавался модельный ток КЗ (70). Множество осциллограмм с насыщением ТТ получено путем варьирования параметров тока КЗ и величины остаточной намагниченности магнитопровода ТТ.

Результат работы корректора тока на модельной осциллограмме Simulink с глубоким насыщением ТТ приведен на рисунке 54 а. Вычислены исходная полная погрешность $\varepsilon_{\text{исх}}$ и после восстановления $\varepsilon_{\text{вос}}$, на рисунке 54 б показана динамика их изменения. На рисунках 54 б, в показаны результат выделения амплитуды и фазы основной гармонической составляющей исходного тока ($I_{m2\text{исх}}, \varphi_{\text{исх}}$) и после восстановления ($I_{m2\text{вос}}, \varphi_{\text{вос}}$) с помощью однопериодного фильтра Фурье. Надлежащее качество выполненной процедуры восстановления тока подтверждается как визуально, так и снижением величины полной погрешности до уровня 10 %. Восстановление тока позволило более точно выделить ортогональные составляющие тока КЗ в переходном режиме с помощью распространенного в цифровой релейной защите фильтра Фурье.

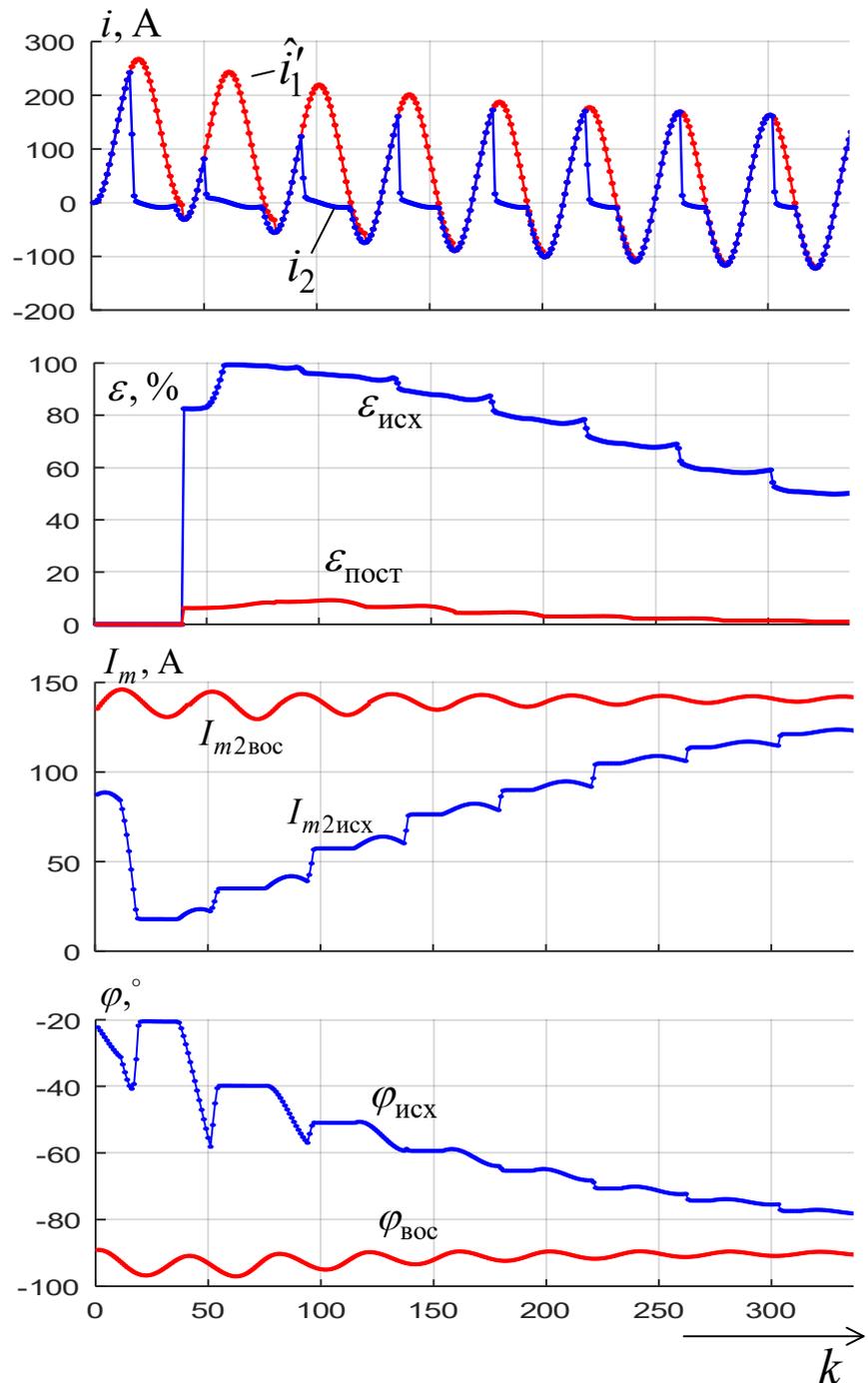


Рисунок 54 – Испытания корректора тока (Simulink осциллограмма)

Испытания проводились на осциллограммах, наиболее приближенных к реальным, полученных с помощью специализированного программно-технического комплекса RTDS. Комплекс предназначен для изучения стационарных режимов и электромагнитных переходных процессов в ЭЭС в реальном масштабе времени. Осциллограммы RTDS представляют собой результат моделирования близких КЗ (к месту установки измерительных ТТ) на

линиях электропередачи в реальных ЭЭС, включающих Костромскую ГРЭС, Саяно-Шушенскую ГЭС, Калининскую АЭС и др. Вторичные цепи ТТ включены по схеме «звезды» с нейтральным проводом.

Работа корректора тока на одной из RTDS осциллограмм показана на рисунке 55. Моменты срабатывания сегментатора отмечены квадратными точками на рисунке 55 а, как видно из рисунка, сегментатор продемонстрировал правильную работу без пропусков. На рисунке 55 б отмечены восстановленный ток \hat{i}'_1 , а также модельный первичный ток $\hat{i}'_{1\text{мод}}$ (113). Ток $\hat{i}'_{1\text{мод}}$ синтезирован по участкам правильной трансформации, иллюстрация приведена на рисунке 55 г. В случае RTDS осциллограмм, реальных осциллограмм для расчета параметра ε использовался ток $\hat{i}'_{1\text{мод}}$, поскольку информация о реальном первичном токе КЗ была недоступна. Результат работы корректора определенно можно охарактеризовать как положительный. Исходную полную погрешность в начальный момент превышающую 80 % после восстановления тока удалось снизить до менее чем 40 %, а затем и до 20%. Как видно из осциллограммы при постепенном снижении $\varepsilon_{\text{исх}}$ с течением времени до уровня 20% чувствительности сегментатора становится недостаточно для срабатывания, восстановление тока на этом прекращается.

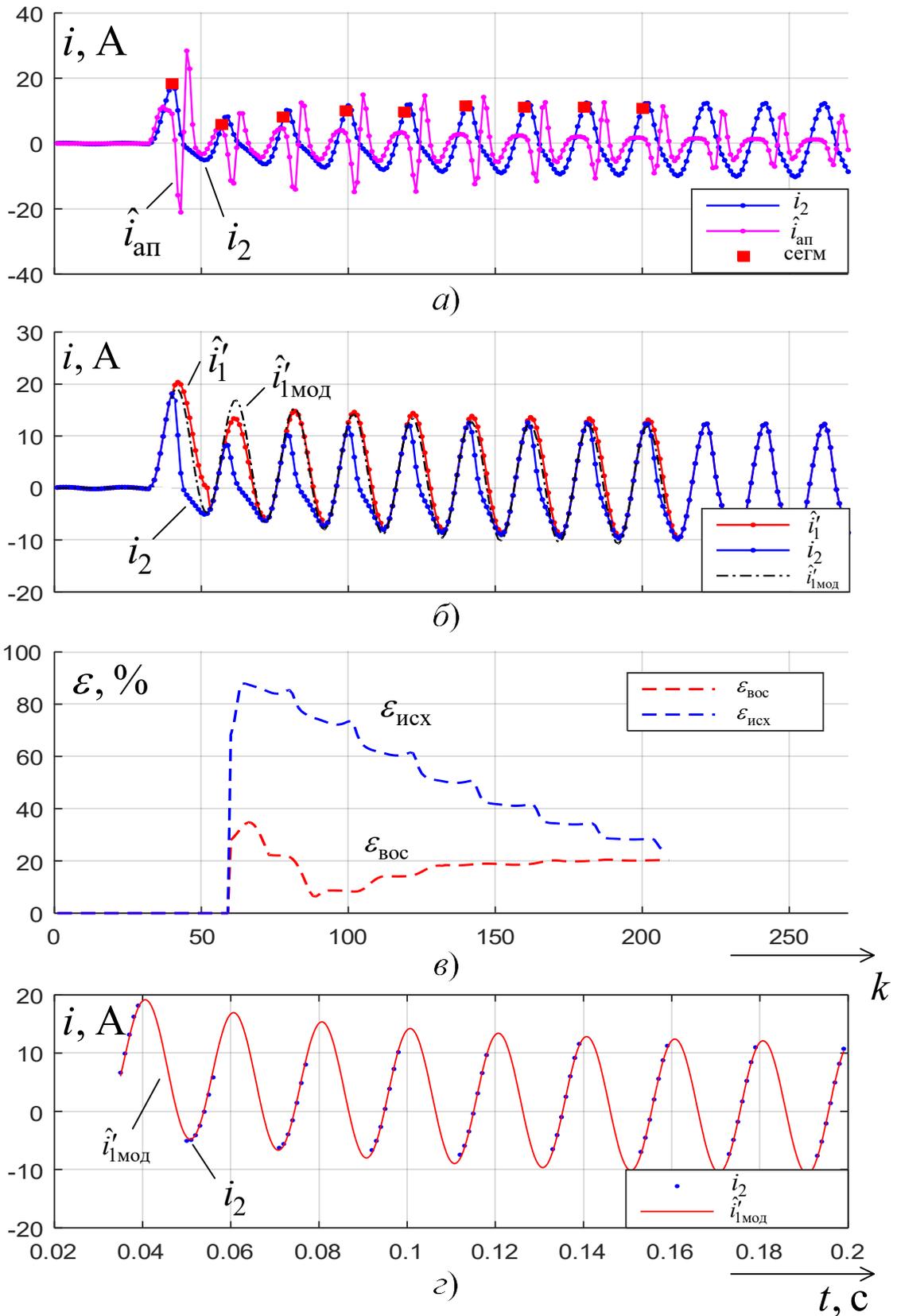


Рисунок 55 – Испытания корректора тока (RTDS осциллограмма)

Пример работы корректора тока на реальной осциллограмме с Кировской ТЭЦ приведен на рисунке 56.

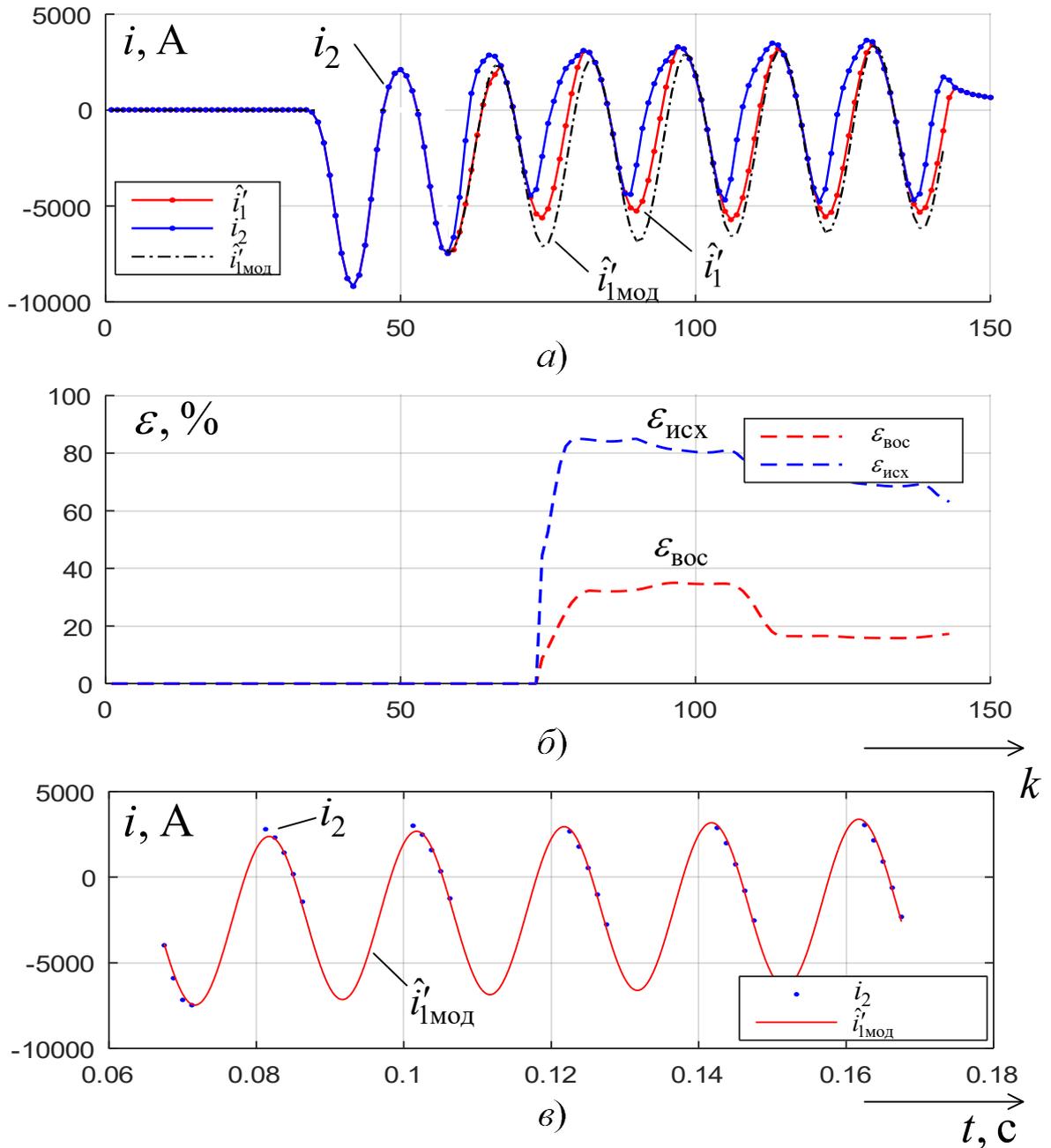


Рисунок 56 – Испытания корректора тока (реальная осциллограмма)

Функционирование корректора тока было испытано на более чем 200 осциллограммах с насыщением ТТ. Некоторые из осциллограмм с насыщением ТТ и результатом восстановления тока с помощью корректора приведены в приложении А.

Проведены испытания дифференциальной защиты с модулем корректора тока в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ. На рисунке 57 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.

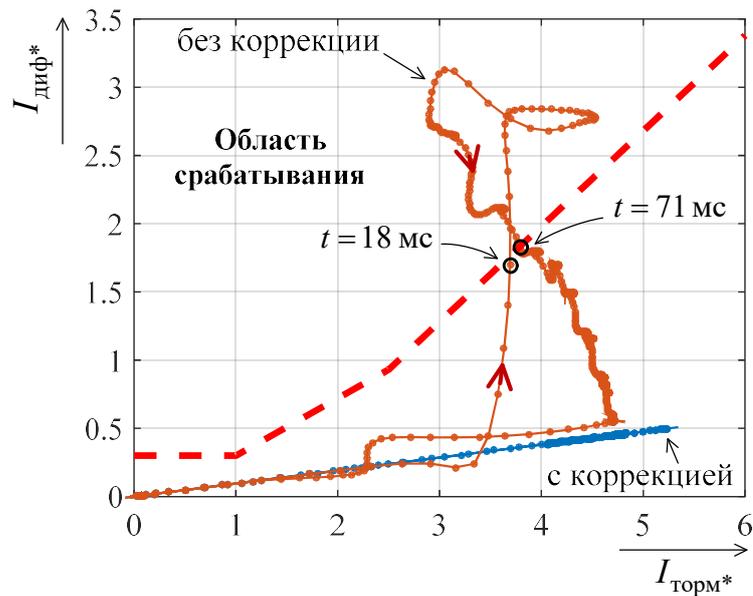


Рисунок 57 – Поведение дифференциальной защиты трансформатора в условиях насыщения ТТ

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.

5.3 Выводы

1. Разработаны и применены в терминале защиты трансформатора «ТОР 300 ДЗТ 512» адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора. Адаптивным дифференциальным модулем дополнен традиционный дифференциальный орган, тем самым обеспечена высокая

чувствительность к витковым замыканиям в обмотках и своевременное предотвращение развития виткового замыкания в аварию с тяжелыми последствиями.

2. 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, повышает надежность несрабатывания при внешних КЗ.

Заключение

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 $Y0/\Delta-11$. 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 модулем, 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 сокращений и условных обозначений

АТ	автотрансформатор
БНТ	бросок намагничивающего тока
ВАХ	вольт-амперная характеристика
ВН	высшее напряжение
ДЗАТ	дифференциальная защита автотрансформатора
ДЗТ	дифференциальная защита трансформатора
ДЗШ	дифференциальная защита шин
ИО	измерительный орган
КЗ	короткое замыкание
МНК	метод наименьших квадратов
МЭК	международная электротехническая комиссия
НН	низшее напряжение
ОО	общая обмотка
ОРУ	открытое распределительное устройство
ПО	последовательная обмотка
ПУЭ	правила устройства электроустановок
ПХН	прямоугольная характеристика намагничивания
РД	руководящий документ
РЗА	релейная защита и автоматика
РПН	устройство регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой
СН	среднее напряжение
СТО	стандарт организации
СХН	спрямленная характеристика намагничивания
ТОРЗ	теоретические основы релейной защиты
ТОЭ	теоретические основы электротехники
ТН	трансформатор напряжения
ТТ	трансформатор тока
ЭЭС	электроэнергетическая система

CIGRE международный совет по большим электрическим системам
IEEE институт инженеров по электротехнике и электронике
MU объединительное устройство

Список литературы

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей / Г. И. Атабеков. М.: Госэнергоиздат, 1957. – 344 с.
2. 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.
3. 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.
4. Афанасенко, А. С. Сравнительный анализ технических характеристик силовых трансформаторов и их влияние на бросок тока намагничивания / А. С. Афанасенко, Г. С. Кудряшев // Вестник ИргТУ. – 2016. – № 6. – С. 114-121.
5. Афанасьев, В. В. Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.
6. Баглейбтер, О. Трансформатор тока в сетях релейной защиты. Противодействие насыщению ТТ апериодической составляющей тока [Электронный ресурс] / О. Баглейбтер // Новости электротехники. – 2008. – № 5. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/53/08.php>.
7. Баглейбтер, О. Реализация модели трансформатора тока в Simulink® на основе теории гистерезиса Джилса-Атертона (Jiles-Atherton) / О. Баглейбтер // Релейщик. – 2014. – № 01(17). – С. 10-15.
8. Бартли У. Обзор повреждений трансформаторов / У. Бартли // Энергетика и менеджмент. – 2011. – № 1(58). – С. 40-45.
9. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем: пер. с польск. / С. Бернас, З. Цек. М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
10. Бычков, Ю. В. Алгоритмические модели в релейной защите / Ю. В. Бычков, Д. С. Васильев, А. О. Павлов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 26-31.

11. Ванин, В. К. Повышение эффективности дифференциальных защит энергетического оборудования / В. К. Ванин, М. Г. Попов, С. О. Попов // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 3(130). – С. 27-31.

12. Воробьев, В. С. Особенности работы трансформаторов тока в переходных режимах, влияющие на работу устройств релейной защиты и автоматики / В. С. Воробьев, А. И. Расщепляев // Релейщик. – 2015. – № 4. – С. 34-36.

13. Голанцов, Е. Б. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23) / Е. Б. Голанцов, В. В. Молчанов. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 88 с.

14. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия. – М.: Стандартиформ, 2016. – 38 с.

15. ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015. Трансформаторы измерительные. Часть 2: Дополнительные требования к трансформаторам тока. – М.: Стандартиформ, 2016. – 53 с.

16. Демирчян, К. С. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: Учеб. пособие для электр. и энергоэнерг. спец. вузов / К. С. Демирчян, П. А. Бутырин. – М.: Высш. шк., 1988. – 335 с.

17. Дифференциальная защита SIPROTEC 7UT6 : руководство по эксплуатации / Siemens AG. – 498 с.

18. Дмитренко, А. М. Дифференциальная защита трансформаторов ДЗТ-21 / А. М. Дмитренко, М. Г. Линт // Электротехническая промышленность, Сер. аппараты низкого напряжения. – 1979. – вып. 3 (79). – С. 7-10.

19. Дмитренко, А. М. Об использовании пауз для отстройки дифференциальных защит от переходных токов небаланса / А. М. Дмитренко // Электричество. – 1979. – № 1. – С. 55-58.

20. Дмитренко, А. М. Учет переходных процессов при выборе параметров времяимпульсных дифференциальных защит трансформаторов (автотрансформаторов) / А. М. Дмитренко // Электричество. – 1995. – № 1. – С. 28-33.

21. Дмитренко, А. М. О выборе уставок микропроцессорных дифференциальных защит «АББ Автоматизация» / А. М. Дмитренко, А. П. Арсентьев // Энергетик. – 2003. – № 4. – С. 37-39.

22. Дмитренко, А. М. Анализ переходных процессов дифференциальных защит трансформаторов с мощной двигательной нагрузкой / А. М. Дмитренко, Е. Ю. Казакова, М. Н. Атаманов // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 38-41.

23. Дмитренко, А. М. О требованиях к трансформаторам тока в схемах дифференциальных защит трансформаторов электрических станций / А. М. Дмитренко, Д. П. Журавлев // Электрические станции. – 2016. – № 10. – С. 13-19.

24. Дмитренко, А. М. О методе повышения качества функционирования дифференциальных защит трансформаторов при использовании электромагнитных трансформаторов тока / А. М. Дмитренко, В. А. Наумов, А. В. Солдатов, Д. П. Журавлев // Релейная защита и автоматизация. – 2018. – № 1. – С. 46-51.

25. Добродеев, К. М. Расчет защитных трансформаторов тока и их вторичных цепей (взгляд проектировщика) / К. М. Добродеев, М. К. Добродеев, Д. В. Рыбин // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 2. – С. 16-27.

26. Доронин, А. В. Исследование характеристик срабатывания цифровой защиты трансформатора / А. В. Доронин, В. М. Шевцов // ИТЭЭ: матер. IV науч.-техн. конф. – Чебоксары, изд-во Чуваш. ун-та. – 2002. – С. 289-292.

27. Дроздов, А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А. Д. Дроздов. М. – Л. : Энергия, 1965. – 240 с.

28. Ефремов, В. А. Адаптивная дистанционная защита линии электропередачи / В. А. Ефремов [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – № 4. – С. 26-30.

29. Засыпкин, А. С. Релейная защита трансформаторов / А. С. Засыпкин. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

30. Засыпкин, А. С. Анализ работоспособности релейных защит при коротком замыкании в последовательной обмотке автотрансформаторов / А. С. Засыпкин, А. В. Жуков // Электричество. – 2006. – № 4. – С. 19-26.

31. Казанский, В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты / В. Е. Казанский. М.: Энергия, 1969. – 184 с.

32. Каштенни, Б. Усовершенствованный алгоритм отстройки от бросков тока намагничивания / Б. Каштенни, Л. Севов // Релейщик. – 2009. – № 1. – С. 30-41.

33. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. М.: Энергия, 1980. – 208 с.

34. Кужеков, С. Л. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока / С. Л. Кужеков, Г. С. Нудельман // Изв. вузов. Электромеханика. – 2009. – № 4. – С. 12-18.

35. Кужеков, С. Л. О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 29-31.

36. Кужеков, С. Л. Области применения дифференциальных защит сборных шин / С. Л. Кужеков // Изв. вузов. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 127-130.

37. Кужеков, С. Л. Математическое моделирование трансформаторов тока в режимах с глубоким насыщением магнитопроводов / С. Л. Кужеков [и др.] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сб. докл. 5-й Междунар. науч.-техн. конф., 1 – 5 июня 2015 г., Сочи. – Сочи: СО ЕЭС, 2015. – С. 34-41.

38. Кужеков, С. Л. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, В. С. Воробьев, В. В. Москаленко // Электрические станции. – 2017. – № 1. – С. 42-47.

39. Кужеков, С. Л. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника /

С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв, Б. Б. Сербиновский // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3. – С. 43-51.

40. Кужеков, С. Л. Обеспечение правильного функционирования дифференциальных защит сборных шин в условиях насыщения трансформаторов тока / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, Б. Б. Сербиновский // Изв. вузов. Электромеханика. – 2017. – № 4. – С. 76-84.

41. Кужеков, С. Л. О координации функционирования трансформаторов тока и устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем в переходных режимах коротких замыканий / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев // Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 65-72.

42. Купарев, М. А. Гармонический анализ токов внутренних коротких замыканий дифференциальной защиты трансформатора / М. А. Купарев // Электро. – 2007. – № 3. – С. 15-18.

43. Лачугин, В. Ф. Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей / В. Ф. Лачугин, Д. И. Панфилов, А. Л. Куликов, А. А. Рывкин, М. Д. Обалин // Известия РАН. Энергетика. – 2015. – № 4. – С. 28-37.

44. Лямец, Ю. Я. Цифровые имитационные и алгоритмические модели в релейной защите и автоматике электрических систем / Ю. Я. Лямец, А. А. Ильин, Г. С. Нудельман // Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 1996. – С. 106-108.

45. Лямец, Ю. Я. Алгоритмические модели электрических систем / Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, А. О. Павлов // Труды академии электротехн. наук Чуваш. респ. – 1999. – № 1-2. – С. 10-21.

46. Лямец, Ю. Я. Принцип информационного совершенства релейной защиты / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электротехника. – 2001. – № 2. – С. 30-34.

47. Лямец, Ю. Я. Оптимизационный подход к восстановлению нелинейно искаженного тока / Ю. Я. Лямец, А. В. Шевелев // РЗАУЭ: матер. науч.-техн. конф, посвящ. 40-летию ОАО «ВНИИР». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2001. – С. 52–54.

48. Лямец, Ю. Я. Мониторинг процессов в электрической системе, Ч.1. Преобразование, сегментация и фильтрация / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, Д. В. Зиновьев // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 2-10.

49. Лямец, Ю. Я. Мониторинг процессов в электрической системе Ч.2. Цифровая обработка осциллограмм токов короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, Д. В. Зиновьев // Электричество. – 2006. – № 11. – С. 2-10.

50. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч. 1. Теоретические предпосылки / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2009. – № 10. – С. 17-25.

51. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч. 2. Анализ распознающей способности реле / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2009. – № 11. – С. 9-15.

52. Лямец, Ю. Я. Многомерная релейная защита. Ч. 3. Эквивалентирование моделей / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2010. – № 1. – С. 9-15.

53. Лямец, Ю. Я. Обучаемая релейная защита. Ч. 1. Методы условных отображений / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2012. – № 2. – С. 15-19.

54. Лямец, Ю. Я. Обучаемая релейная защита. Ч.2. Информационный портрет многомодульной распознающей структуры / Ю. Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 12-18.

55. Лямец, Ю. Я. Быстрое оценивание периодической составляющей тока короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, М. Ю. Широкин // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 9-13.

56. Лямец, Ю. Я. Граничная задача релейной защиты / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 16-22.

57. Лямец, Ю. Я. Описание линий 6-35 кВ при распознавании замыкания на землю в распределительной сети / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 2-7.

58. Лямец, Ю. Я. Адекватность или неадекватность модели как критерии состояния объекта / Ю. Я. Лямец [и др.] // Информ. технологии в электротехнике и электроэнергетике: матер. 10-ой Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары: изд-во Чуваш. ун-та. – 2016. – С. 244-246.

59. Лямец, Ю. Я. Дискретная форма представления информации о защищаемом объекте в приложении к адаптивному реле / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, М. В. Мартынов // Электричество. – 2016. – № 9. – С. 29-34.

60. Лямец, Ю. Я. Составляющие токов короткого замыкания в наблюдаемой электрической сети / Ю. Я. Лямец, А. А. Белянин // Электротехника. – 2016. – № 10. – С. 40-44.

61. Лямец, Ю. Я. Локализация альтернативных режимов как метод алгоритмизации и обучения релейной защиты / Ю. Я. Лямец [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехн. и электрон. систем: матер. 12-й Всеросс. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 2017. – С. 237-240.

62. Лямец Ю.Я. Модель неповрежденного энергообъекта как индикатор повреждения / Ю.Я. Лямец [и др.] // Электротехника. – 2017. – № 7. – С. 60-65.

63. Лямец, Ю. Я. Обучение релейной защиты на малом окне наблюдения / Ю.Я. Лямец [и др.] // Электричество. – 2017. – № 3. – С. 28-33.

64. Лямец, Ю. Я. Метод алгоритмических моделей / Ю. Я. Лямец, М. В. Мартынов, А. Н. Маслов // Релейщик. – 2017. – № 3. – С. 16-19.

65. Наумов, В. А. Анализ и совершенствование продольных дифференциальных защит генераторов и блоков генератор-трансформатор: автореф. дис. ... к-та техн. наук, Москва, 2005. – 20 с.

66. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: справочн. материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. М. : Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

67. Новожилов, Т. А. Развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от витковых замыканий: автореф. дис. ... к-та техн. наук, Омск, 2014. – 22 с.

68. Нудельман, Г. С. Задача противодействия насыщению ТТ значительно шире [Электронный ресурс] / Г. С. Нудельман, С. Л. Кужеков // Новости электротехники. – 2009. – № 1. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/55/07.php>.

69. Онисова, О. А. Анализ влияния соединения вторичных обмоток трансформаторов тока по схеме «звезда с нейтральным проводом» на функционирование релейной защиты / О. А. Онисова, А. А. Яковлева // Труды академии электротехн. наук Чуваш. респ. – 2018. – № 1. – С. 19-22.

70. Петров, Г. Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. Учебник для вузов / Г. Н. Петров. М.: Энергия, 1974. – 240 с.

71. Подгорный, Э. В. Сравнение принципов отстройки дифференциальных реле от токов включения силовых трансформаторов / Э. В. Подгорный, Е. М. Ульяницкий // Электричество. – 1969. – № 10. – С. 26-32.

72. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1987.

73. Прокат холоднокатаный тонколистовой из электротехнической анизотропной стали [Электронный ресурс] : каталог продукции / Новолипецкий металлургический комбинат. – Липецк.

74. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ. Схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.

75. Рыбалкин, А. Д. Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока / А. Д. Рыбалкин, А. А. Шурупов, И. А. Ермолкин // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сборник научных трудов НПП «ЭКРА». – 2016. – Выпуск V. – С. 55-65.

76. Серяков, А. А. Трансформаторы тока в переходных режимах / А. А. Серяков // Электротехнический рынок. – 2014. – № 3 (57). – С. 18-21.

77. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.

78. СТО 56947007-29.120.70.241-2017 Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – М.: ПАО «ФСК ЕЭС», 2017. – 223 с.

79. Терминал защиты трансформатора 110-220 кВ типа «ТОР 300 ДЗТ 5ХХ» [Электронный ресурс] : рекомендации по расчету уставок АИПБ.656122.011-002 РРУ v16.2 / Релематика. – Чебоксары, 2016. – 122 с.

80. Терминал защиты шин 35-750 кВ и устройства резервирования при отказе выключателя типа «ТОР 300 ДЗШ 51Х» [Электронный ресурс] : рекомендации по расчету уставок АИПБ. 656122.011-010 РРУ v17.1 / Релематика. – Чебоксары, 2017. – 33 с.

81. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1986. – 528 с.

82. Ульянов, С. А. Электромагнитные переходные процессы: учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов / С. А. Ульянов. М.: Энергия, 1970. – 520 с.

83. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: учебник для вузов / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

84. Хренников, А. Ю. О повреждениях обмоток силовых трансформаторов и диагностике их геометрии методом низковольтных импульсов / А. Ю. Хренников [и др.] // Электро. – 2004. – № 5. – С. 13-18.

85. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принцип и область применения. – Перевод с англ. / под ред. Дьякова А. Ф. – М.: Энергоиздат. 2005. – 322 с.

86. Циглер, Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – Перевод с англ. / под ред. Дьякова А. Ф. – М.: Знак. 2008. – 216 с.

87. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.

88. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

89. Шабад, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 296 с.

90. Шалимов, А. С. Динамическое тестирование релейной защиты с учетом переходных процессов в трансформаторах тока [Электронный ресурс] / А. С. Шалимов. – 2017. – Режим доступа: <http://dynamics.com.ru/pages/article-28>.

91. Шевелев, А. В. Развитие методов моделирования и разработка микропроцессорных защит трансформаторов и шин: автореф. дис. ... к-та техн. наук Чуваш. гос. университет, Чебоксары, 2012. – 24 с.

92. Шкаф защиты автотрансформатора типа ШЭ2607 042 [Электронный ресурс] : руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.032 РЭ. Редакция от 30.11.2016 / ЭКРА. – Чебоксары, 2016.

93. Шкаф защиты сборных шин напряжением 330-750 кВ типа ШЭ2710 561 [Электронный ресурс] : руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.042 РЭ. Редакция от 16.05.2016 / ЭКРА. – Чебоксары, 2016.

94. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

95. Bastard, P. A Transformer Model for Winding Fault Studies / P. Bastard, P. Bertrand, M. Meunier // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9. – Issue 2. – P. 690-699.

96. Brncic, I Transformer Differential Protection Improved by Implementation of Negative-Sequence Currents / I. Brncic, Z. Gajic, T. Einarsson // ABB Power Technologies. – Sweden, 2006.

97. Gajic, Z. Differential protection solution for arbitrary phase shifting transformer / Z. Gajic // International Conference on Relay Protection and Substation Automation of Modern EHV Power Systems. – Moscow-Cheboksary, Russia. – 2007.

98. Gajic, Z. Differential protection for arbitrary three-phase power transformers: Doctoral Dissertation. – Lund University, 2008. – 212 pp.

99. IEC 61869-2 Instrument Transformers. Part 2: Current Transformers.

100. IEEE Guide for the Application of Current Transformers Used for Protective Relaying Purposes: IEEE Std C37.110-2007. – 67 pp.

101. Hajipour, E. Current-Transformer Saturation Compensation for Transformer Differential Relays / E. Hajipour, M. Vakilian, M. Sanaye-Pasand // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30 (5). – P. 2293-2302. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2411736

102. Jiles, D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis / D. C. Jiles, D. L. Atherton // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – № 61. – P. 48-60.

103. Kasztenny, B. Operate and Restraint Signals of a Transformer Differential Relay / B. Kasztenny, A. Kulidjian, B. Campbell, M. Pozzuoli // 54th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference. – Atlanta. – 2000.

104. Kasztenny, B. Negative-Sequence Differential Protection – Principles, Sensitivity, and Security / B. Kasztenny, N. Fischer, H. J. Altuve // 69th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference. – Atlanta, Georgia. – 2015.

105. Kezunovic, M. Hierarchically coordinated protection: an integrated concept of corrective, predictive, and inherently adaptive protection / M. Kezunovic, P.-C. Chen, A. Esmailian, M. Tasdighi // 5th Int. Conf. Actual trends in development of Power System Protection and Automation. – Sochi, Russia. – 2015. – P. 1-9.

106. Lin, X. Electromagnetic transient analysis and novel protective relaying techniques for power transformer / X. Lin, J. Ma, Q. Tian, H. Weng. John Wiley & Sons Singapore, 2015. – 326 pp. ISBN 978-1-118-65382-1

107. Mekic, F. Power transformer characteristics and their effect on protective relays / F. Mekic, R. Girgis, Z. Gajic, E. teNyenhuis // 33rd Western Protective Relay Conference. – 2006.

108. Pan, J. An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects / J. Pan, K. Vu, Y. Hu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – Vol. 19 (4). – P. 1623-1628.

109. Sachdev, M. S. A digital relaying algorithm for detecting transformer winding faults / M. S. Sachdev, T. S. Sidhu, H. C. Wood // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1989. – Vol. 4 (3). – P. 1638-1648.

110. Sungyun, C. Setting-less transformer protection for ensuring security and dependability / C. Sungyun, A. P. Meliopoulos // Elec. Eng. – 2016. – Vol. 3(98). – P. 283-297.

111. Transformer Differential Relay SEL-487E. Three-Phase Transformer Protection, Automation, and Control System : data sheet / Schweitzer Engineering Laboratories, 2012.

112. Transformer Protection RET 670 ANSI : technical reference manual / ABB, 2012.

113. Wiszniewski, A. Correction of current transformer transient performance / A. Wiszniewski, W. Rebizant, L. Schiel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23(2). – P. 624-632. doi: 10.1109/TPWRD.2008.915832

114. Wu, Q. H. Protective Relaying of Power Systems Using Mathematical Morphology / Q. H. Wu, Z. Lu, T. Y. Ji. Springer, 2009. – 207 pp.

Патенты

115. Устройство для защиты высоковольтных линий передачи от замыканий между фазами [Текст] : авт. свид. 66343 СССР / Бреслер А.М. ; заявитель и патентообладатель Бреслер А. М. – заявл. 23.12.1944. – 3 с.

116. Способ определения интервалов однородности электрической величины [Текст] : пат. 2308137 Российская Федерация : МПК H02H3/28 / Лямец Ю. Я., Зиновьев Д. В., Романов Ю. В. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2006122571/09 ; заявл. 23.06.2006 ; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 28. – 7 с.

117. Способ определения интервалов однородности электрической величины [Текст] : пат. 2316870 Российская Федерация : МПК H02H3/38, G01R31/02 / Лямец Ю. Я., Зиновьев Д. В., Романов Ю. В. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2006123893/09 ; заявл. 03.07.2006 ; опубл. 10.02.2008, Бюл. № 4. – 7с.

118. Способ определения интервалов однородности электрической величины [Текст] : пат. 2418268 Российская Федерация : МПК G01D1/06,

G01R31/02 / Куликов А. Л. ; заявитель и патентообладатель Куликов А. Л. – № 2010108840/28 ; заявл. 09.03.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13. – 7 с.

119. Оценка вектора при насыщении трансформатора тока [Текст] : пат. 2457495 Российская Федерация : МПК G01R15/18 / Акке М., Вестман Б., Осхувуд Х. ; заявитель и патентообладатель АББ ТЕКНОЛОДЖИ АГ (СН). – № 2010144023/028 ; заявл. 28.03.2008 ; опубл. 27.07.2012, Бюл. № 21. – 17 с.

120. Способ компенсации погрешности трансформатора тока [Текст] : пат. 2526834 Российская Федерация : МПК H01F27/42, H01F38/28 / Ванин В. К., Попов М. Г., Попов С. О. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СПбГПУ». – № 2012154956/07 ; заявл. 18.12.2012 ; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 12 с.

121. Способ определения синусоидальной составляющей тока короткого замыкания [Текст] : пат. 2591051 Российская Федерация : МПК H01H83/22 / Лямец Ю. Я., Мартынов М. В., Нестерин А. А. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2015147848/07 ; заявл. 06.11.2015 ; опубл. 10.07.2016, Бюл. № 19. – 14 с.

122. Устройство адаптивной дистанционной защиты линии электропередачи [Текст] : пат. 166909 Российская Федерация : МПК H02H7/26, G01R31/08 / Ефремов В. А., Мартынов М. В., Гайдаш А. А. ; заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер», Тюменьэнерго. – № 2015156569/07 ; заявл. 28.12.2015 ; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34. – 2 с.

123. Способ релейной защиты энергообъекта [Текст] : пат. 2612325 Российская Федерация : МПК H02H3/40 / Лямец Ю. Я. [и др.] : заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2016104503 ; заявл. 10.02.2016 ; опубл. 07.03.2017, Бюл. № 7. – 9 с.

124. Способ определения места замыкания в электрической системе [Текст] : пат. 2613158 Российская Федерация : МПК G01R31/08, H02H3/40 / Лямец Ю. Я. [и др.] : заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2016106879 ; заявл. 25.02.2016 ; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 8. – 11 с.

125. Способ релейной защиты трансформатора [Текст] : пат. 2617714 Российская Федерация : МПК H02H7/045 / Лямец Ю. Я. [и др.] : заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2016113206 ; заявл. 06.04.2016 ; опубл. 26.04.2017, Бюл. № 12. – 15 с.

126. Способ дистанционной защиты линии электропередачи [Текст] : пат. 2622895 Российская Федерация : МПК H02H3/40 / Лямец Ю. Я. [и др.] : заявитель и патентообладатель Исслед. центр «Бреслер». – № 2015136614 ; заявл. 27.08.2015 ; опубл. 21.06.2017, Бюл. № 18. – 15 с.

Приложение А. Осциллограммы испытаний корректора тока

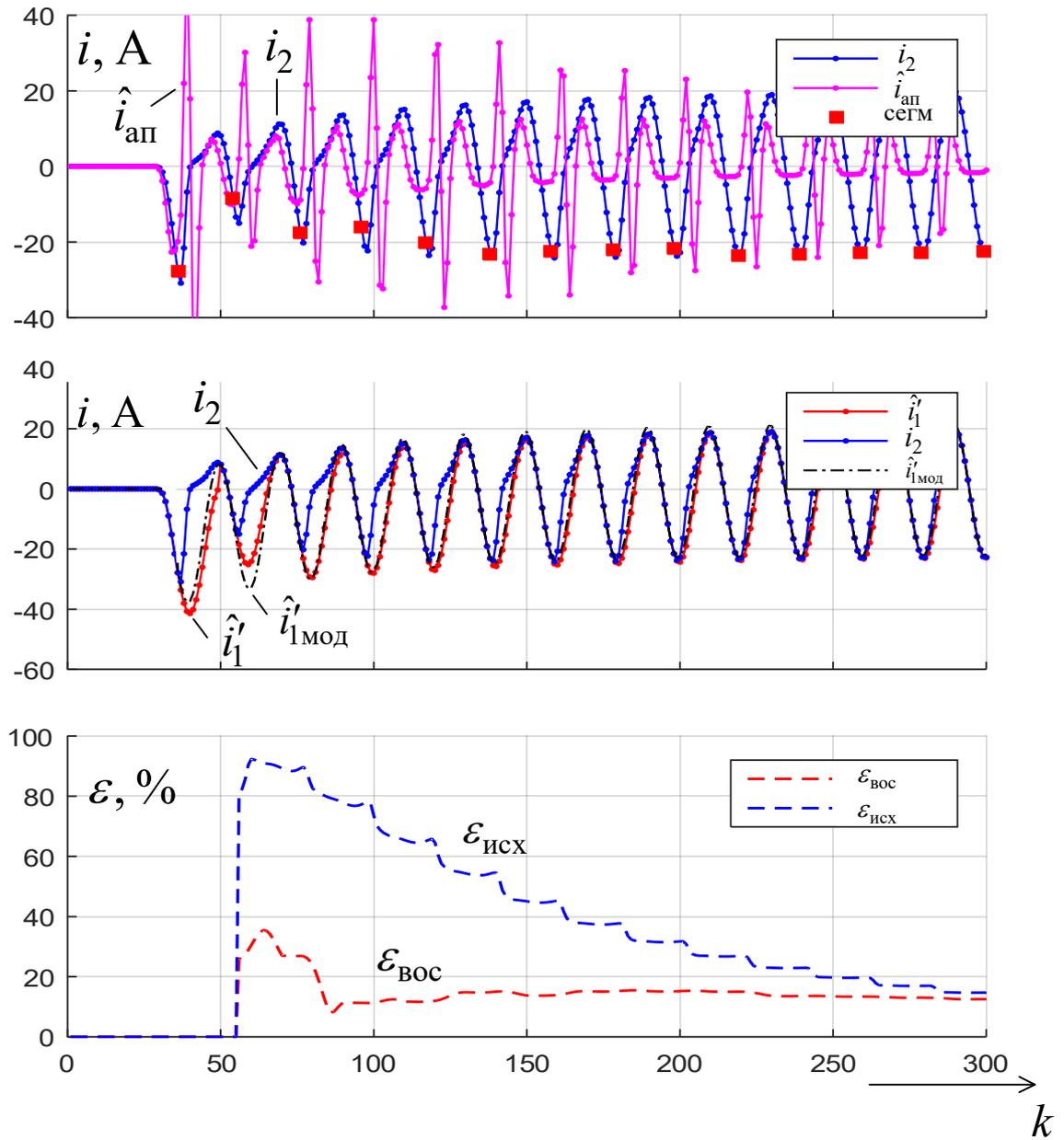


Рисунок А.1 – Испытания корректора тока

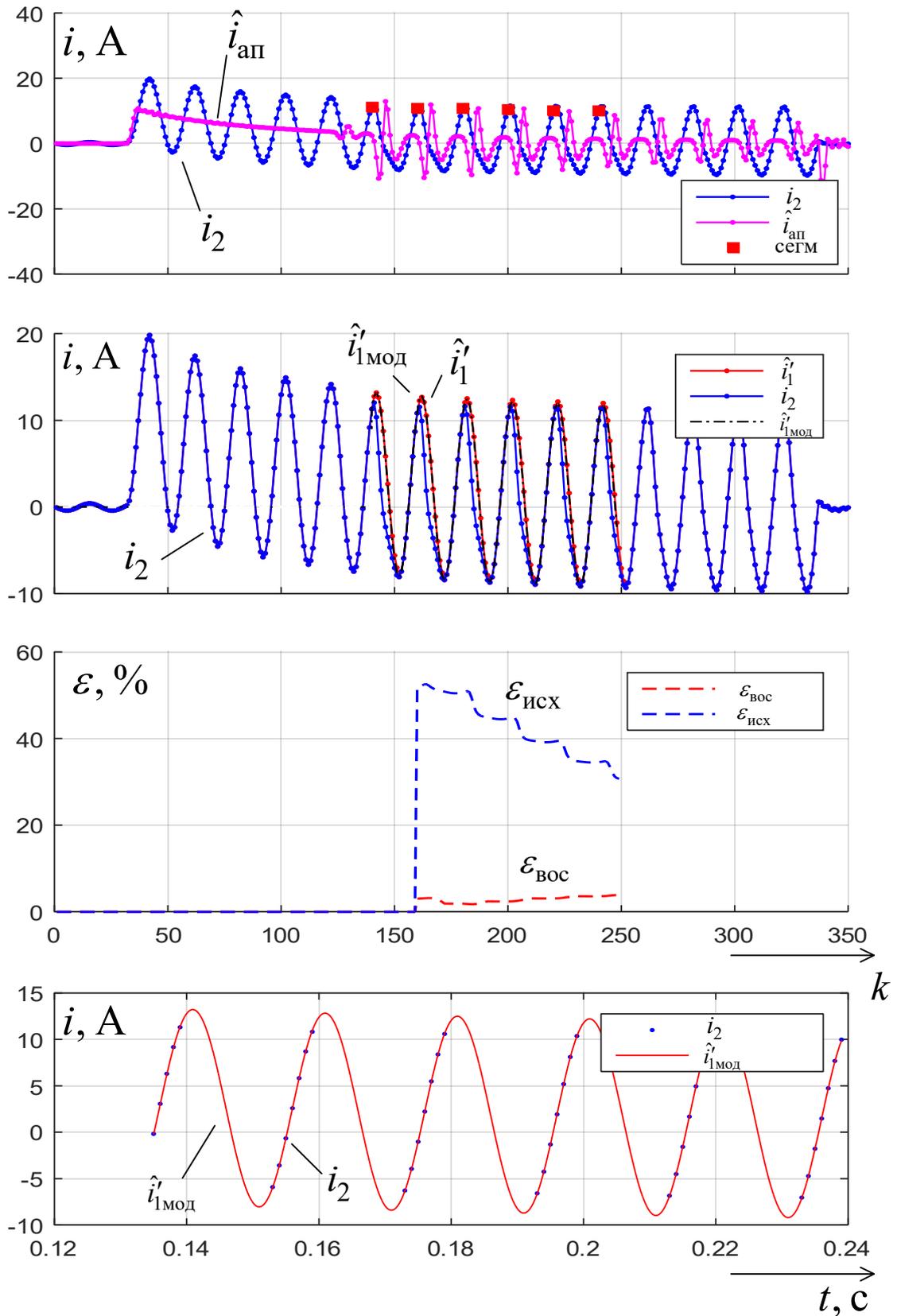


Рисунок А.2 – Испытания корректора тока

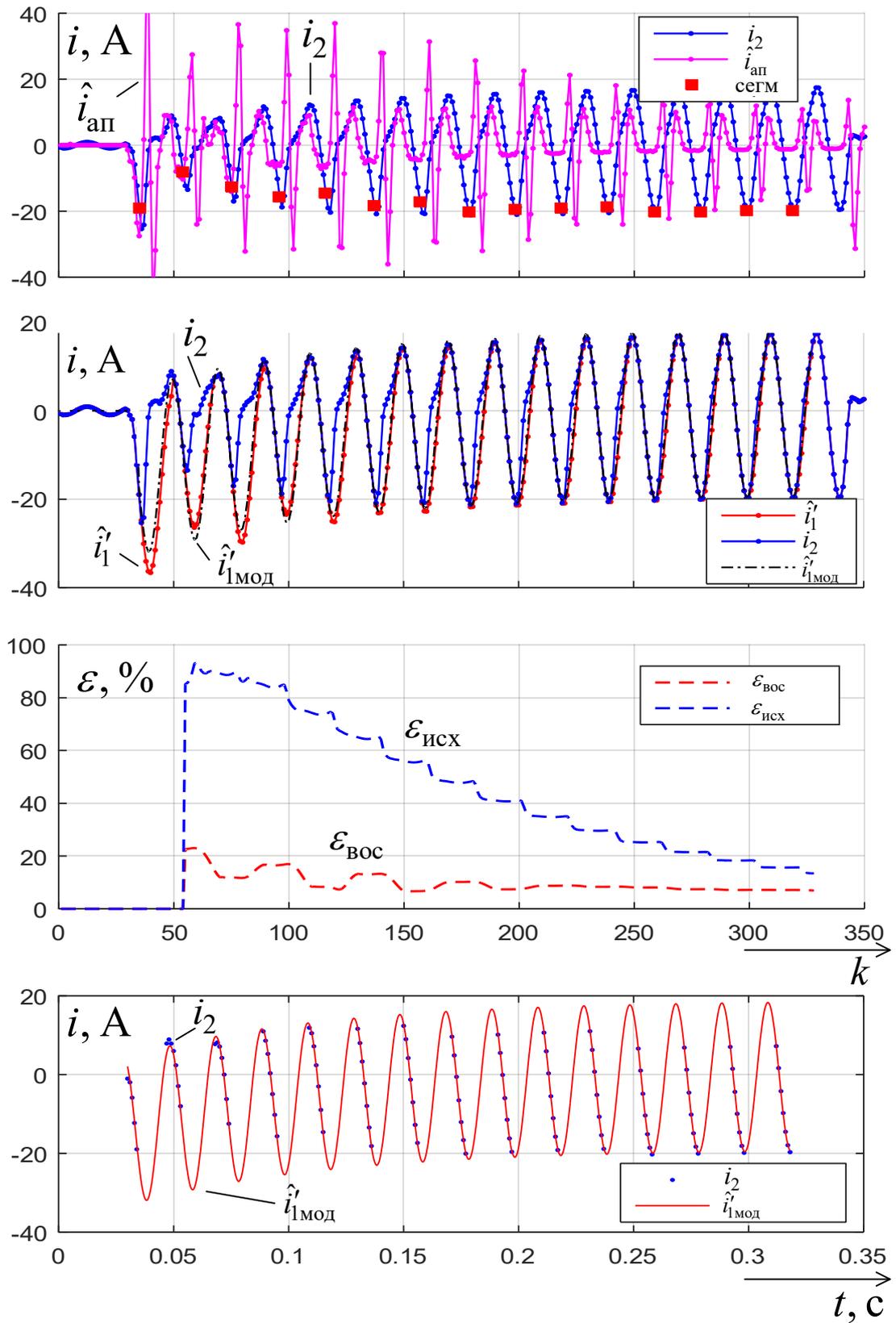


Рисунок А.3 – Испытания корректора тока