

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЛИТВИНОВ ИЛЬЯ ИГОРЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Глазырин Владимир Евлампиевич

Новосибирск – 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	14
1.1 Определение требований к дифференциальной защите силового трансформатора .....	14
1.2 Основы построения дифференциальной защиты .....	18
1.3 Особенности дифференциальной защиты силового трансформатора. Способы повышения устойчивости функционирования защит .....	22
1.3.1 Обеспечение правильности функционирования дифференциальной защиты при внешних коротких замыканиях .....	26
1.3.2 Обеспечение правильности функционирования дифференциальной защиты при броске тока намагничивания .....	39
1.3.3 Способы компенсации погрешностей трансформаторов тока в переходных процессах .....	47
1.3.4 Работа дифференциальной защиты силового трансформатора при перевозбуждении сердечника и работа дифференциальной отсечки .....	53
Выводы .....	55
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА .....	57
2.1 Модель броска тока намагничивания однофазного трансформатора .....	59
2.2 Моделирование броска тока намагничивания трёхфазных силовых трансформаторов .....	67
2.3 Моделирование внешних и внутренних коротких замыканий.....	75
2.4 Модель группы трансформаторов тока .....	76
2.5 Расчёт численных параметров моделей.....	78
2.6 Оценка адекватности разработанных моделей броска тока намагничивания..	78
2.6.1 Оценка адекватности воспроизведения броска тока намагничивания в однофазном трансформаторе .....	79

2.6.2 Оценка адекватности моделирования броска тока намагничивания трёхфазного трансформатора.....	80
Выводы .....	87
<b>3 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....</b>	<b>89</b>
3.1 Алгоритм чувствительной защиты от внутренних повреждений.....	89
3.1.1 Алгоритм быстрого распознавания внешних и внутренних коротких замыканий .....	89
3.1.2 Алгоритм выявления витковых замыканий в режиме перевозбуждения сердечника силового трансформатора .....	100
3.1.3 Поведение дифференциальной защиты при коротких замыканиях вне зоны защиты.....	105
3.2 Алгоритм чувствительной защиты, распознающий бросок тока намагничивания и внутренние короткие замыкания.....	116
3.2.1 Исследование последовательных бросков тока намагничивания.....	117
3.2.2 Исследование броска тока намагничивания нагруженного трансформатора .....	130
3.2.3 Новые количественные признаки бросков тока намагничивания и коротких замыканий.....	136
3.2.4 Погрешности измерения длительностей полуволн .....	144
3.3 Алгоритм функционирования дифференциальной отсечки .....	148
Выводы .....	152
<b>4 ТЕХНИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТЫ .....</b>	<b>156</b>
4.1 Аппаратная и программная часть защиты.....	156
4.2 Структура алгоритмов защиты .....	157
Выводы .....	168
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>169</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....</b>	<b>173</b>
<b>СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....</b>	<b>174</b>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ А Моделирование режима включения трёхфазного трансформатора при наличии нагрузки .....	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчёт численных параметров модели силового трансформатора при его включении под напряжение .....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ В Описание программного комплекса имитационного моделирования.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Работа усовершенствованного дифференциально-фазного алгоритма при внешних и внутренних повреждениях .....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Реализация алгоритмов защиты на базе микропроцессорного терминала противоаварийной автоматики КПА-М.....	221
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Справки о внедрении результатов научной работы.....	239

## ВВЕДЕНИЕ

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

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

В последние годы в Российской Федерации и во всем мире наблюдается развитие ЭЭС, что выражается в увеличении мощности электрических нагрузок,

строительстве новых тепловых, атомных и гидравлических электростанций, а также создании дополнительных линий межсистемных связей переменного и постоянного тока. Развитие энергосистемы требует установку силовых трансформаторов (СТ) и автотрансформаторов большей единичной мощности и более высоких классов напряжения (здесь и далее термин «силовой трансформатор» распространяется и на силовые автотрансформаторы, если в тексте не делается специальной оговорки). Повреждения СТ способны привести к существенному разрушению как самих СТ, так и создать угрозу устойчивой работе ЭЭС в целом, поэтому СТ в обязательном порядке должны иметь надёжные и эффективные средства РЗ.

Основной защитой мощных СТ является продольная дифференциальная защита (ДЗ), обладающая абсолютной селективностью и не требующая для своей работы выдержек времени. В соответствии с ПУЭ, продольная ДЗ устанавливается на СТ мощностью 6,3 МВА и выше, а также на СТ мощностью 4 МВА в случае их параллельной работы с целью селективного отключения повреждённого СТ. Продольная ДЗ может быть предусмотрена на СТ меньшей мощности, но не менее 1 МВА, если такой СТ установлен в районе, подверженном землетрясениям, или если токовая отсечка не удовлетворяет требованиям чувствительности, а максимальная токовая защита имеет выдержку времени более 0,5 с.

К аномальным режимам работы СТ относятся броски тока намагничивания (БТН), повышение напряжения, перевозбуждение (ПВ), перегрузки и внешние короткие замыкания (КЗ). Релейная защита СТ должна надёжно распознавать аномальные режимы и выявлять внутренние повреждения.

Высокий уровень токов КЗ в максимальных режимах и большие постоянные времени первичных цепей являются причиной насыщения измерительных трансформаторов тока (ТТ), что приводит к существенным искажениям входных токов основных защит СТ в ПП. Известные на сегодняшний день способы отстройки ДЗ от БТН не обеспечивают в достаточной степени устойчивое функционирование средств РЗ, что приводит к замедлению её действия из-за

искажений вторичных токов при внутренних КЗ, когда токи внутреннего повреждения и БТН очень часто практически «неразличимы» для защитного алгоритма. Насыщение измерительных ТТ в режиме внешних КЗ и появление значительных переходных токов небаланса вынуждают производителей средств ДЗ вводить динамическое торможение или блокировку защиты в этих режимах, что замедляет ликвидацию аварии при возможном переходе внешнего КЗ во внутреннее повреждение. Применение измерительных ТТ, не подверженных насыщению, не всегда технически и экономически оправдано. Несовершенство существующих средств ДЗ проявляется также в снижении их чувствительности к внутренним повреждениям с малым током в режиме перевозбуждения СТ.

Таким образом, ДЗ СТ ещё далека от технического совершенства и не всегда способна устойчиво функционировать при всём многообразии режимов работы защищаемого объекта. В целях повышения устойчивости функционирования защиты необходимо по возможности совершенствовать старые и разрабатывать принципиально новые алгоритмы РЗ, использующие неоспоримые преимущества программной обработки информации.

Совершенствование ДЗ СТ обеспечивает экономический эффект по следующим составляющим:

- уменьшение затрат на восстановление повреждённого оборудования благодаря ограничению объёма разрушения защищаемого СТ;
- уменьшение затрат на транспортировку повреждённого оборудования к месту ремонта и обратно благодаря возможности во многих случаях выполнить ремонт не на заводе-изготовителе, а на местных ремонтных предприятиях;
- уменьшение совокупного ущерба в энергосистеме за счёт сокращения времени ремонта СТ и, следовательно, времени отклонения режима работы энергосистемы от оптимального;
- повышение максимальной мощности, передаваемой по ЛЭП, или снижения объёма разгрузки, необходимой для обеспечения динамической устойчивости при КЗ, благодаря повышению скорости срабатывания РЗ.

Таким образом, совершенствование ДЗ СТ является актуальной и важной народнохозяйственной задачей.

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

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

1. Анализ существующих способов отстройки современных ДЗ СТ от режимов внешних коротких замыканий, бросков токов намагничивания и

перевозбуждения сердечника с целью определения путей совершенствования защиты.

2. Разработка адекватных математических моделей силовых трансформаторов и трансформаторов тока для изучения качественных и количественных характеристик переходных процессов в защищаемом силовом трансформаторе и измерительных цепях дифференциальной защиты.

3. Исследование характера переходных процессов в первичных и вторичных цепях в следующих режимах: БТН нагруженного СТ; БТН, возникающий при одновременном замыкании фаз силового выключателя, связывающего СТ с энергосистемой (так называемый «последовательный БТН»); внешние и внутренние КЗ, сопровождающихся глубоким насыщением ТТ. Оценка устойчивости функционирования ДЗ СТ в перечисленных режимах.

4. Исследование влияния режима перевозбуждения СТ на чувствительность ДЗ к ВЗ.

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

6. Реализация предложенных алгоритмов защиты на базе микропроцессорного терминала с целью подтверждения их технической реализации.

**Объектом** исследования является дифференциальная токовая защита силового трансформатора.

**Предметом** исследования являются характерные особенности переходных и установившихся режимов в первичных и вторичных цепях дифференциальной защиты.

#### **Научная новизна работы.**

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

использована модель группы однофазных трансформаторов вместо трёхфазного трёхстержневого СТ.

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

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

4. Средствами математического моделирования исследован БТН нагруженного СТ, возникающий при восстановлении питающего напряжения после его кратковременной потери, а также БТН, возникающий при одновременном замыкании контактов силового выключателя. Впервые оценена эффективность применения ранее разработанных способов идентификации режима БТН и внутренних КЗ в указанных режимах. Предложены новые способы распознавания БТН и внутреннего КЗ.

5. Предложен способ адаптивного изменения уставок дифференциальной отсечки для повышения её чувствительности.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

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

2. Математические модели СТ и ТТ интегрированы в специальный программный интерфейс, обеспечивающий интерактивную настройку моделей и удобное получение результатов компьютерного моделирования. Разработанные программные средства могут быть использованы как в проектных институтах и научно-исследовательских центрах, так и в вузах для решения задач изучения

характера ПП в цепях ДЗ СТ, а также для проведения разносторонних исследований поведения ДЗ в различных режимах работы силового и измерительного оборудования. Разработанные средства могут быть полезны проектным организациям, осуществляющим расчёт уставок защит СТ.

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

4. Экспериментальным путём подтверждена возможность технической реализации предложенных способов защиты с повышенной устойчивостью функционирования.

5. Результаты теоретических исследований включены в учебный процесс кафедры Электрических станций НГТУ: ключевые положения диссертационного исследования включены курс лекций по современным средствам релейной защиты и автоматики, получен официальный акт внедрения в учебный процесс. Экспериментальное подтверждение работоспособности разработанных алгоритмов послужило основой для внедрения разработки в АО «ИАЭС». Основные положения диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры электрических станций НГТУ.

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

#### **Методология и методы исследования.**

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

**Положения, выносимые на защиту.**

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

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

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

4. Алгоритм чувствительной защиты для определения ВЗ в обмотках СТ в режиме ПВ.

5. Алгоритм адаптивной ДО, учитывающей положение выключателей, связывающих СТ с нагрузкой и энергосистемой.

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

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

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

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

# 1 ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

## 1.1 Определение требований к дифференциальной защите силового трансформатора

*Ток срабатывания.* Минимальный ток срабатывания основной защиты СТ, необходимый для успешного выявления ВЗ, определяется уровнем аварийных токов, протекающих по дифференциальной цепи при возникновении ВЗ. Газовая защита, которая должна реагировать на развивающиеся ВЗ, имеет значительное время срабатывания (например, при медленном газообразовании или повышенной вязкости масла) или вообще действует на сигнал (например, в районах с высокой сейсмической активностью). В некоторых случаях она недостаточно чувствительна, о чём свидетельствуют значительные повреждения обмоток при ВЗ [1]. Для надёжного выявления ВЗ быстродействующие защиты СТ должны иметь ток срабатывания не более  $(0,1 \div 0,3)I_{nm}$  [2], где  $I_{nm}$  – номинальный ток СТ. При таком токе срабатывания ДЗ СТ чувствительна ко всем видам междуфазных КЗ. Столь низкий уровень тока срабатывания ДЗ усложняет выполнение требований по обеспечению несрабатывания защиты при КЗ вне зоны действия: защита должна надёжно не срабатывать при максимальных значениях тока небаланса в установившихся и переходных режимах, например, при неуспешном автоматическом повторном включении (АПВ) линии на КЗ, когда остаточная индукция в сердечниках ТТ близка к индукции насыщения, а значение апериодической составляющей в токе КЗ максимально. Кроме того, поскольку ток срабатывания защиты должен быть меньше номинального тока СТ, в целях предотвращения ложной работы РЗ рекомендуется предусматривать средства контроля исправности измерительных цепей тока [2].

*Время срабатывания защиты.* Предельно допустимые времена отключения внутренних КЗ во многом определяются условием сохранения устойчивой работы ЭЭС. В современных энергосистемах требуется весьма малое время отключения КЗ для сохранения устойчивости. Так, например, в сетях 330 ÷ 500 кВ необходимо

отключать повреждение за  $0,1 \div 0,12$  с после его возникновения, а в сетях  $110 \div 220$  кВ за  $0,15 \div 0,3$  с. В распределительных сетях 6 и 10 кВ короткие замыкания, отдалённые от источников питания большим сопротивлением, допустимо отключать со временем примерно  $1,5 \div 3$  с, поскольку такие повреждения не приводят к нарушению устойчивости ЭЭС [3].

Указанные времена отключения складываются как из времени действия РЗ, так и времени действия выключателя, разрывающего ток КЗ. С учётом реальных характеристик выключателей, время действия РЗ не должно превышать  $30 \div 40$  мс для СТ общего назначения и  $5 \div 10$  мс для СТ сверхвысокого напряжения [2]. При экстремальных токах КЗ, сопровождающихся максимальной апериодической составляющей, насыщение электромагнитных ТТ может произойти за время менее полупериода после возникновения аварии. В результате насыщения ТТ ток в их вторичных обмотках может оказаться значительно искажён, что приводит к задержке в срабатывании защиты (причины этой задержки рассмотрены далее). Срабатывание происходит лишь тогда, когда в значительной степени завершится ПП во вторичных цепях измерительных ТТ, то есть спустя время, сопоставимое с  $T_a$ , что для сетей высших классов напряжения составляет  $0,1 \div 0,3$  с [4]. Следовательно, для обеспечения устойчивости ЭЭС необходимо стремиться распознавать аварийный режим за очень короткий временной промежуток – порядка  $4 \div 5$  мс, поскольку в течение этого времени ТТ работают на интервале идеальной трансформации, что создаёт благоприятные условия для достоверной идентификации места повреждения и принятия решения о срабатывании защиты в течение первого периода ПП, вызванного КЗ [1, 2, 5]. Время срабатывания РЗ СТ при возникновении ВЗ не должно превышать  $40 \div 50$  мс [2].

В процессе развития аварии при появлении КЗ вне зоны защиты возможно возникновение внутреннего повреждения, например, в результате перемещения электрической дуги вдоль проводников, разрушения изоляционных поддерживающих конструкций под действием электродинамических усилий, пробоя защитных ограничителей перенапряжения в результате аварийных ПП и

т.п. Такие случаи имеют место на практике. В нормативной литературе отсутствуют требования по времени срабатывания ДЗ в таких режимах, однако представляется целесообразным, чтобы ДЗ могла без задержки по времени распознавать повреждение в зоне защиты, образовавшееся в ходе развития аварии, оставаясь нечувствительной к повреждениям вне зоны защиты. Выполнение требования быстрого отключения такого рода повреждений повышает общую эффективность функционирования защиты объектов энергосистемы, поскольку существует вероятность отказа защит смежных элементов не только из-за технического несовершенства, но и вследствие ошибочных действий оперативного персонала (например, вследствие неверного задания уставок).

*Учёт вытекающих токов нагрузки и фазового сдвига между энергосистемами.* Существенным фактором, влияющим на устойчивость функционирования ДЗ при внутреннем КЗ, являются сопровождающие токи нагрузки, протекающие через защищаемый СТ. Анализ этого явления, проведённый в [1], позволяет сформулировать следующее требование к разрабатываемой защите: ДЗ СТ должна устойчиво срабатывать при внутренних КЗ, сопровождающихся вытекающими токами нагрузки, достигающими по величине  $(2,0 \div 2,5)I_{нм}$  и сдвига по фазе  $118 \div 148^\circ$  относительно токов КЗ от системы. Также защиты СТ должны быть чувствительными к внутренним КЗ с 2-сторонним питанием, сопровождающихся значительным фазовым сдвигом между векторами ЭДС одноимённых фаз энергосистем, подпитывающих точку КЗ.

*Особенности реализации защит микропроцессорными средствами.* Разрабатываемые алгоритмы должны реализовываться на базе микропроцессорных устройств РЗ. Микропроцессорные устройства РЗ при прочих равных условиях могут срабатывать медленнее их статических или электромеханических аналогов [6], что связано, прежде всего, с особенностями обработки информации микропроцессором и обмена информацией между исполнительными частями комплекса защиты. Если действие статических и

электромеханических реле обусловлено происходящими в них физическими процессами, то действие микропроцессорного терминала РЗ определяется результатами вычислений, выполняемых в режиме реального времени. Микропроцессорные устройства обладают высоким быстродействием, однако, как правило, в терминалы РЗ закладывается множество функций, как основных (алгоритмы релейной защиты и противоаварийной автоматики), так и сервисных (осциллографирование, учёт ресурса выключателей, связь с АСУ ТП и управляющим персоналом по сети и т.п.). По сути дела, вычислительные средства микропроцессорного терминала должны работать в многозадачном режиме, что может отрицательно сказываться на устойчивости его работы. На практике возникают ситуации, в которых микропроцессорное устройство в силу большого объёма вычислений и реализуемых функций не успевает выполнить за установленное время все требуемые операции, что обуславливает задержку в действии РЗ, а в некоторых случаях может приводить к прекращению работы (зависанию) всего программного обеспечения (ПО) и, как следствие, к аварийной перезагрузке терминала (например, вследствие срабатывания сторожевого таймера). Применение технических средств повышения быстродействия микропроцессорного терминала (установка дополнительного процессора, средств охлаждения и т.п.) не только удорожает производство, но и приводит к снижению эксплуатационной надёжности, так как отказ одного из таких элементов может в конечном итоге привести к отказу всего терминала. Также разрабатываемые защитные алгоритмы по возможности не должны зависеть от таких параметров, как частота дискретизации аналого-цифровых преобразователей (АЦП), число обмоток СТ, конфигурация внешней сети и т.п. В противном случае для обеспечения селективной работы алгоритма потребуется тонкая настройка устройства РЗ при его установке на каждый новый объект ЭЭС или в ходе модернизации РЗ при развитии энергосистемы. Известно, что большая часть неправильных действий РЗ связана с вмешательством обслуживающего персонала в работу устройств защиты. По этой причине необходимость сложной настройки устройства РЗ повышает вероятность его ложного действия вследствие

человеческого фактора, а также значительно усложняет и удорожает производство и эксплуатацию РЗА. В то же время корректно разработанный и понятный защитный алгоритм позволяет свести к минимуму необходимость вмешательства в его работу в процессе эксплуатации.

В заключение важно также отметить, что при разработке усовершенствованных алгоритмов защиты СТ должно уделяться особое внимание обеспечению недействия ДЗ при внешних повреждениях, так как поток повреждений элементов, смежных с СТ, существенно превышает поток повреждений самого СТ.

## 1.2 Основы построения дифференциальной защиты

Принцип действия продольных дифференциальных защит основан на проверке выполнения 1-го закон Кирхгофа (или закона полного тока) для защищаемого объекта. Чаще всего при реализации ДЗ используется сравнение величины и фазы токов в начале и конце защищаемого объекта. Рассмотрим принципы построения схем этих защит на примере двухконцевого объекта.

Как видно из рисунка 1.1, *а*, в простейшем случае при внешнем КЗ токи  $I_1$  и  $I_2$  на концах *A* и *B* объекта защиты направлены в одну сторону и равны по величине, а при КЗ в пределах зоны защиты они направлены в разные стороны и, как правило, не равны друг другу (на рисунке 1.1 и далее защищаемый объект обозначен как ЗО). Следовательно, сопоставляя величину и фазу токов, можно определить, где возникло КЗ – внутри объекта защиты или за его пределами.

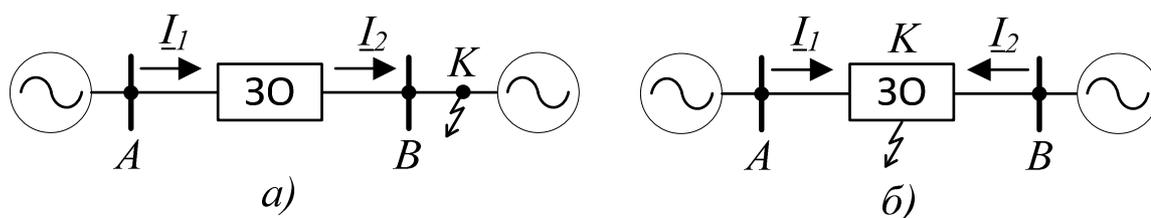


Рисунок 1.1 – Токи по концам объекта защиты:

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

Имеются две принципиально различные схемы дифференциальных защит – с циркулирующими токами и на равновесии ЭДС [7].

В схеме с циркулирующими токами (рисунок 1.2, а, б) вторичные обмотки ТТ соединяются так, чтобы при внешнем КЗ их ЭДС, наведённые первичными токами  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$  были направлены последовательно, а токи в соединительных проводах имели одинаковое направление. Дифференциальное реле включается параллельно вторичным обмоткам ТТ, образуя цепь для замыкания вторичных токов  $\underline{I}_{\text{см}1}$  и  $\underline{I}_{\text{см}2}$ . В этом режиме ток в дифференциальном реле равен геометрической разности вторичных токов:

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{\text{см}1} - \underline{I}_{\text{см}2}. \quad (1.1)$$

При равенстве коэффициентов трансформации ТТ и отсутствии их погрешностей ток в дифференциальной цепи равен нулю. На практике же из-за погрешностей ТТ в дифференциальной цепи протекает ток небаланса, от действия которого дифференциальное реле должно быть отстроено. Определим, чему равен ток небаланса  $\underline{I}_{\text{нб}}$  в схеме, представленной на рисунке 1.2. Для этого в равенстве (1.1) выражаем вторичные токи ТТ через первичные с учётом погрешности измерительных трансформаторов:

$$\underline{I}_{\text{нб}} = (\underline{I}_1 / n_T - \underline{I}_{1\text{нам}}) - (\underline{I}_2 / n_T - \underline{I}_{2\text{нам}}), \quad (1.2)$$

где  $\underline{I}_{1\text{нам}}$  и  $\underline{I}_{2\text{нам}}$  – токи намагничивания, приведённые ко вторичным обмоткам ТТ;  
 $n_T$  – коэффициент трансформации измерительных ТТ.

Поскольку при внешнем КЗ и при сквозном нагрузочном режиме первичные токи  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$  равны по модулю и по фазе, то при равенстве коэффициентов трансформации обоих ТТ

$$\underline{I}_{\text{нб}} = \underline{I}_{2\text{нам}} - \underline{I}_{1\text{нам}}. \quad (1.3)$$

Таким образом, выражение (1.3) показывает, что ток небаланса в простейшем случае, соответствующем изображённому на рисунке 1.2, обусловлен неодинаковостью токов намагничивания ТТ, что является следствием неидентичности характеристик намагничивания ТТ, различием сопротивлений их вторичных цепей и неодновременностью входа ТТ в насыщение во время ПП в энергосистеме. В случае выполнения защит более сложных объектов энергосистемы также возможно увеличение небаланса за счёт влияния факторов иной природы, что подробнее излагается далее в п.1.3 на примере выполнения ДЗ СТ.

Для обеспечения правильного функционирования (недействия при внешних повреждениях) ДЗ, выполненной по рассматриваемой схеме, ток срабатывания реле тока  $I_{cp}$  должен с запасом отстраиваться от максимальных расчётных токов небаланса.

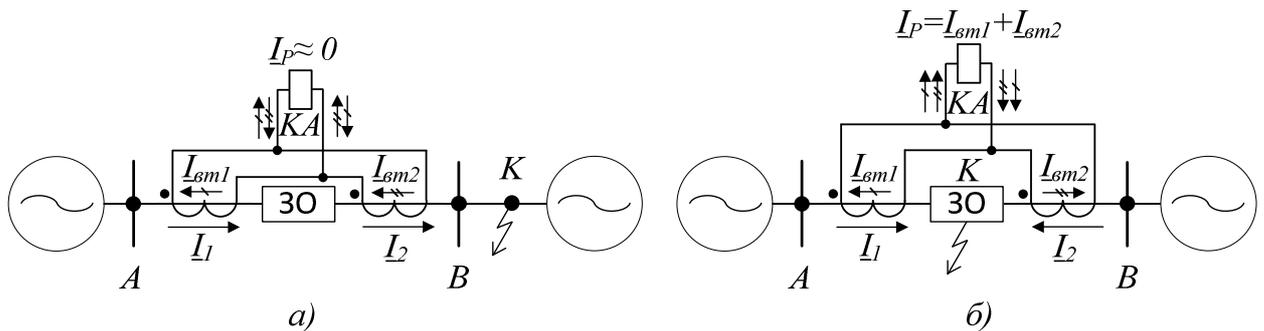


Рисунок 1.2 – Выполнение ДЗ по схеме с циркулирующими токами:

*a* – режим внешнего КЗ, *б* – режим внутреннего КЗ

Из показанного на рисунке 1.2, *б* токораспределения видно, что в случае внутреннего повреждения защищаемого объекта в дифференциальной цепи в одном направлении протекают токи  $I_{sm1}$  и  $I_{sm2}$ , поэтому ток в дифференциальном органе:

$$I_p = I_{sm1} + I_{sm2}, \quad (1.4)$$

Под действием этого тока защита должна надёжно срабатывать.

В схеме, использующей принцип равновесия ЭДС (рисунок 1.3, а, б), вторичные обмотки ТТ соединяются так, чтобы при внешнем КЗ их ЭДС были направлены встречно, а реагирующий орган включается последовательно в цепь соединительных проводов. При внешних КЗ, а также при прохождении токов нагрузки (рисунок 1.3, а) вторичные ЭДС трансформаторов тока  $\underline{E}_{\delta 1}$  и  $\underline{E}_{\delta 2}$  равны и совпадают по фазе, а следовательно, ток в реагирующем органе  $\underline{I}_p$  также равен нулю. Погрешности ТТ нарушают равновесие ЭДС и вызывают появление ЭДС небаланса, под действием которой в реагирующем органе протекает ток небаланса. Как и в схеме с циркулирующими токами, реле не должно срабатывать под действием этого тока.

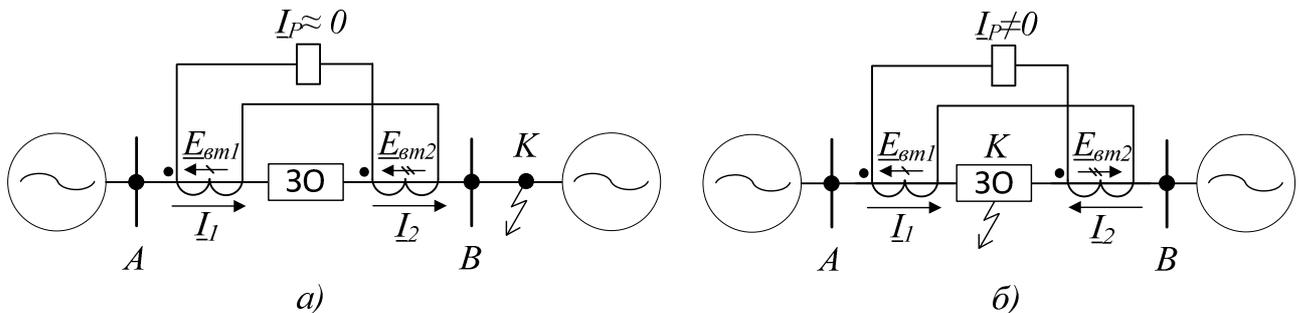


Рисунок 1.3 – Выполнение ДЗ по схеме на равновесии ЭДС:

а – режим внешнего КЗ, б – режим внутреннего КЗ

При КЗ в зоне защиты (рисунок 1.3, б) вторичные ЭДС  $\underline{E}_{\delta 1}$  и  $\underline{E}_{\delta 2}$  суммируются и вызывают в реагирующем органе ток, под действием которого реле должно срабатывать:

$$\underline{I}_p = (\underline{E}_{\delta 1} + \underline{E}_{\delta 2}) / \underline{Z}, \quad (1.5)$$

где  $\underline{Z}$  – полное сопротивление контура «трансформаторы тока-реле».

Схема ДЗ на равновесии ЭДС не нашла широкого применения, поскольку в сквозных режимах, в том числе и при внешних КЗ, ТТ работают в режиме, близком к холостому ходу, что вызывает недопустимый перегрев их сердечников

и во вторичных цепях создаются опасные для изоляции и обслуживающего персонала напряжения [8]. Поэтому повсеместное распространение получили защиты, выполненные по схеме с циркулирующими токами.

Главной особенностью схемы, представленной на рисунке 1.2, является общая нагрузка ТТ – дифференциальная цепь, в которой устанавливается реагирующий орган защиты. В большинстве современных ДЗ, выполненных на микропроцессорной элементной базе, дифференциальный ток  $I_d$  физически не формируется, а определяется алгоритмически как геометрическая сумма токов плеч. Поэтому группы ТТ, образующие плечи защиты, не имеют общей нагрузки. Дифференциальный ток вычисляется, исходя из измеренных значений токов  $I_1 \dots I_n$  в плечах защиты [9, 10].

### **1.3 Особенности дифференциальной защиты силового трансформатора. Способы повышения устойчивости функционирования защит**

Основными видами повреждений в СТ являются: замыкания между фазами внутри кожуха СТ и на наружных выводах обмоток; замыкания в обмотках между витками одной фазы; замыкания на землю обмоток или их наружных выводов; повреждения магнитопровода, приводящие к местному нагреву и «пожару стали»; снижение уровня масла ниже уровня обмоток, что может привести к электрическому пробое и их повреждению. Опыт эксплуатации показывает, что КЗ на выводах и ВЗ в обмотках происходят наиболее часто. Междофазные повреждения внутри бака СТ возникают значительно реже.

Применение ДЗ в качестве защиты СТ позволяет обеспечить высокую чувствительность к большинству из перечисленных повреждений. Так как ДЗ по принципу действия не реагирует на повреждения вне зоны защиты, то отсутствует необходимость согласования времени действия ДЗ с защитами смежных элементов. Это приводит к тому, что при достаточной чувствительности ДЗ внутренние повреждения выявляются и устраняются с минимально возможными задержками по времени, обусловленными лишь временем действия промежуточных реле и коммутационной аппаратуры. Это преимущество ДЗ перед

защитами с относительной селективностью обусловило её применение в качестве основной защиты мощных СТ. На менее мощных СТ в качестве основных устанавливаются токовые защиты, однако они могут быть заменены ДЗ в том случае, когда не удаётся обеспечить требуемую чувствительность токовой отсечки при КЗ на выводах низшего напряжения, а выдержка времени МТЗ при этом недопустимо велика [11].

Возможны два основных способа выполнения продольной защиты СТ: применение самостоятельных защит для каждой обмотки или общей для всех обмоток [3]. Недостатками первого варианта являются следующие: защита не реагирует на относительно частый вид повреждения – ВЗ; необходимо устанавливать дополнительные ТТ на выводах фаз в нейтрали СТ и в цепях обмоток, соединённых в «треугольник», и большее число комплектов реле, если речь идёт о защитах, выполненных на электромеханической или микроэлектронной элементной базе. Поэтому на практике повсеместно применяется второй вариант – общая защита для всех обмоток. В том случае, если одна из обмоток СТ, соединённая в «звезду», имеет заземлённую нейтраль, то в некоторых случаях может выполняться отдельная дифференциальная защита нулевой последовательности этой обмотки [12]. Этот вариант подробнее рассмотрен ниже. При выполнении общих защит необходимо учитывать ряд дополнительных условий. Возникающие в связи с ними затруднения являются вполне преодолимыми [7].

*Первичные токи обмоток разных сторон трансформатора не равны по величине и, в общем случае, не совпадают по фазе.* В режиме нагрузки и внешнего КЗ ток трансформатора на стороне низшего напряжения (НН) всегда больше тока на стороне высшего напряжения (ВН). Их соотношение определяется коэффициентом трансформации СТ, а фазовый сдвиг – группой соединения обмоток СТ. Поэтому для обеспечения селективности необходимы специальные меры по выравниванию вторичных токов как по величине, так и по фазе. Компенсация сдвига токов по фазе (для наиболее распространённых трансформаторов с группой соединений «11») осуществляется соединением в

«треугольник» вторичных обмоток ТТ, установленных на стороне «звезды» СТ. Соединение в «треугольник» обмоток ТТ должно точно соответствовать соединению в «треугольник» обмотки низшего напряжения СТ. Трансформаторы тока, расположенные на стороне «треугольника» СТ, соединяются в «звезду». Компенсация неравенства первичных токов достигается выбором коэффициентов трансформации ТТ дифференциальной защиты СТ и параметров специально для этой цели установленных уравнивающих автотрансформаторов или трансформаторов. В современных цифровых устройствах ДЗ компенсация неравенства вторичных токов по модулю и фазе осуществляется программно, что позволяет иметь одинаковое соединение групп ТТ со стороны всех обмоток СТ [10]. Как правило, группы ТТ соединяются по схеме «звезда», так как в этом случае ТТ работают с меньшей нагрузкой, кроме того, такая схема подключения позволяет исключить ложное срабатывание ДЗ СТ при внешнем 2-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением одного из ТТ, работающем в «треугольнике» [5].

*На формирование тока небаланса в дифференциальной цепи оказывает влияние множество факторов:* погрешности ТТ, изменение коэффициента трансформации СТ  $K_{СТ}$  при регулировании напряжения, неточная компенсация неравенства вторичных токов в плечах защиты, наличие намагничивающих токов СТ.

Небаланс в ДЗ СТ, вызванный погрешностью измерительных ТТ, существенно превышает таковой для ДЗ сосредоточенных элементов, имеющих одинаковые номинальные токи плеч, так как ТТ на сторонах разного напряжения СТ не однотипны. Как и для ДЗ других элементов, для ДЗ СТ характерен значительный рост тока небаланса  $i_{нб}$  при насыщении ТТ в ходе ПП, вызванного КЗ вне зоны действия защиты.

Небаланс, вызванный изменением коэффициента трансформации  $K_{СТ}$  СТ за счёт действия устройства РПН (или ПБВ), обусловлен практической невозможностью (и нецелесообразностью) изменять коэффициент трансформации ТТ при изменении такового у СТ. Отметим, что современные микропроцессорные

защиты обладают возможностью компенсировать эту составляющую погрешности за счёт приведения значения уставки в соответствие с рабочей отпайкой устройства РПН. Для защит, выполненных на микроэлектронной и электромеханической элементной базе, реализация такого мероприятия в известной мере затруднительна.

Небаланс, возникающий при неточной компенсации неравенства токов плеч, проявляется в тех случаях, когда возможности выравнивающих устройств не позволяют подобрать расчётные значения витков уравнительных обмоток или коэффициентов трансформации автотрансформаторов тока, необходимых для полной компенсации неравенства токов плеч. Применение программных средств выравнивания абсолютных значений токов плеч практически сводит на нет эту составляющую погрешности, однако при расчёте небаланса необходимо учитывать погрешность аналого-цифровых преобразователей, используемых в микропроцессорном терминале ДЗ СТ.

Ток намагничивания СТ потребляется внутри зоны защиты. Это нарушает соотношение между токами сторон СТ, в результате чего сумма приведённых токов сторон защищаемого СТ не равна нулю. Поскольку в нормальном режиме ток намагничивания СТ не превышает 1% от номинального тока СТ  $I_{нт}$ , с этим ложным сигналом можно не считаться, поскольку КЗ сопровождаются снижением напряжения и, соответственно, тока намагничивания. Но при неустановившемся режиме, связанном с внезапным изменением напряжения на СТ, вызывающим значительное увеличение магнитного потока в сердечнике СТ, ток намагничивания – и соответствующий ему ток дифференциальной цепи – существенно возрастает. Это имеет место при: включении СТ на холостой ход; после отключения внешнего КЗ, вызвавшего значительное снижение напряжения на шинах, к которым подключен защищаемый СТ; в случае подключения другого СТ на параллельную работу, когда токи ПП распределяются по обмоткам обоих СТ [13]. Возникающий при этом БТН вызывает существенное увеличение дифференциального тока и может вызвать ложное срабатывание ДЗ, поэтому необходимо обеспечить надёжную отстройку ДЗ от таких ПП.

Существенное увеличение дифференциального тока в переходных и установившихся режимах, вызванных внешними КЗ, ПВ или БТН, может, без принятия соответствующих мер, привести к ложному срабатыванию ДЗ. Повышение тока срабатывания защиты в целях отстройки от максимального значения дифференциального тока в указанных режимах приводит к недопустимому снижению чувствительности ДЗ, поэтому в целях повышения чувствительности ДЗ и обеспечения её недействия в указанных режимах применяются различные методы.

При разработке усовершенствованных алгоритмов ДЗ СТ прежде всего необходимо рассмотреть наиболее распространённые способы обеспечения правильного действия ДЗ во время ПП, возникающих при внешних КЗ и в режиме БТН. Кроме того, необходимо рассмотреть особенности обеспечения правильности функционирования ДЗ при ПВ, определить присущие им достоинства и недостатки, а также установить допустимость их применения в соответствии с предъявленными в п.1.1 требованиями. Также необходимо рассмотреть вопрос совершенствования качества функционирования грубого органа ДЗ – дифференциальной отсечки.

### **1.3.1 Обеспечение правильности функционирования дифференциальной защиты при внешних коротких замыканиях**

*Замедление действия ДЗ* на время существования экстремальных переходных токов небаланса является наиболее простым методом отстройки от токов небаланса, вызванных внешними КЗ с максимальной апериодической составляющей. Однако при таком замедлении снижается быстрота срабатывания ДЗ: необходимое время замедления защиты имеет тот же порядок, что и  $T_a$ , то есть может достигать  $0,1 \div 0,3$  с [3], что неприемлемо по сформулированным ранее требованиям к скорости срабатывания ДЗ СТ (см. п.1.1).

*Подача входного сигнала на обмотку реле тока через фильтр основной частоты* позволяет повысить степень отстройки защиты от токов небаланса, содержащих высшие гармоники и апериодическую составляющую [3]. В

настоящее время этот метод находит применение в микропроцессорных терминалах РЗ, где рабочий сигнал (действующее значение дифференциального тока основной гармоники)  $I_d$  от  $n$  плеч ДЗ рассчитывается по выражению:

$$I_d = |\sum I_n|, \quad (1.6)$$

где  $I_n$  – вектор действующего значения тока рабочей частоты  $n$ -го плеча ДЗ.

В формировании дифференциального тока участвуют только первые гармоники входных сигналов, выделяемые цифровыми фильтрами. Такой способ определения  $I_d$  реализован в терминалах защит многих фирм-производителей средств РЗ [12, 14-18].

Недостатком метода является отсутствие отстройки от периодических  $i_{нб}$  в установившемся режиме: токи КЗ, как правило, на порядок превосходят токи нормального режима, поэтому даже при условии работы ТТ в зоне допустимой погрешности, не превышающей 10% [19], отстройка ДЗ по току срабатывания от периодических  $i_{нб}$  требует значительного загробления защиты (до значений порядка  $I_{нт}$ ), что делает её нечувствительной к токам ВЗ. Необходимо также отметить, что использование фильтров гармонических составляющих принципиально не позволяет иметь время срабатывания ДЗ меньше длительности периода промышленной частоты. Указанное обстоятельство может приводить к задержке в срабатывании ДЗ при внутренних КЗ, сопровождающихся глубоким насыщением ТТ в первом периоде ПП, когда полезный сигнал существенно искажается.

Использование для отстройки *апериодической слагающей переходного тока небаланса* обеспечивает загробление ДЗ при однополярных токах небаланса. Однако этот способ малоэффективен при разнополярном  $i_{нб}$ , а при возникновении в зоне защиты КЗ, токи которых содержат значительную апериодическую составляющую, применение этого метода вызывает замедление действия защиты [3, 5].

*Дифференциальная защита с торможением* (ДЗТ) сравнивает дифференциальный ток  $I_d$  с током срабатывания  $I_{cp}$ , величина которого зависит от комбинации токов плеч, используемой для формирования тормозного тока  $I_T$ . Принцип торможения использует то обстоятельство, что величина тока небаланса возрастает пропорционально величине сквозного тока [5]. Торможение придаёт защите свойство увеличивать ток срабатывания при увеличении сквозного тока, что может быть следствием внешних КЗ, асинхронного хода или иных неблагоприятных режимов, вызывающих повышение тока небаланса. Выбирая надлежащим образом метод торможения (что включает в себя: выбор используемых для торможения входных сигналов, задание закона формирования тормозного сигнала, выражаемого в виде тормозной характеристики  $I_{cp}=f(I_T)$ ), можно исключить неселективную работу при внешних повреждениях и в то же время иметь достаточно малый ток срабатывания при внутренних повреждениях.

Тормозные характеристики ДЗТ, устанавливающие зависимость между током срабатывания защит и тормозным сигналом, в большинстве случаев подобны и строятся по рассмотренному ниже принципу [5, 15]. Поскольку при малых токах насыщение ТТ отсутствует, и соответственно мал ток небаланса, начальную часть характеристики (линия 1 на рисунке 1.4) выполняют не зависящей от тока торможения: коэффициент торможения на этом участке равен нулю  $K_{T1} = 0$ . Уставка минимального тока срабатывания ДЗ при малых токах торможения  $I_{d_{ycm}}$  определяется лишь небалансом токов в нагрузочных режимах. Это позволяет обеспечить высокую чувствительность защиты при малых токах КЗ или ВЗ в обмотках СТ, при которых вытекающие из зоны защиты токи нагрузки могли бы снизить чувствительность ДЗ к этим повреждениям. Участок 2 характеристики обеспечивает отстройку от токов небаланса при сравнительно небольшом насыщении ТТ, и поэтому имеет небольшой наклон  $K_{T2} = \Delta I_{cp} / \Delta I_T$ . Введение наклона тормозной характеристики на этом участке также позволяет компенсировать увеличение тока небаланса, возникающее в рабочем режиме при переключении отпаек РПН трансформатора и из-за неточности выравнивания токов плеч. Участок 3 обеспечивает отстройку от токов небаланса при

значительном насыщении ТТ при больших сквозных токах, и поэтому имеет большой наклон  $K_{T3}$ . Вертикальная ветвь характеристики (вариант *a*) обычно используется в случаях, когда ДЗ выполнена в виде двух каналов: ДЗТ и дифференциальной отсечки (ДО,  $I_d \gg$  на рисунке 1.4), причем ДО представляет собой ДЗ без торможения. Благодаря этому при токах внутренних КЗ, на которые уверенно реагирует ДО, канал ДЗТ может быть выведен из действия (блокирован), чтобы не отстраивать ДЗТ от максимальных токов небаланса. Тормозная характеристика при таких токах имеет вид вертикальной прямой. Если защищаемый объект обладает собственным сопротивлением, которое существенно ограничивает величину максимального тока внешнего повреждения, то нет смысла увеличивать ток срабатывания ДЗТ при превышении величины такого тока КЗ в защищаемом объекте. В самом деле, если ток повреждения, например ток КЗ, превышает максимально возможное значение тока КЗ за сопротивлением защищаемого объекта, то КЗ находится либо в самом защищаемом объекте, либо до него, то есть в зоне действия защиты. Поэтому целесообразно при токе, равном максимальному току КЗ за защищаемым объектом, ограничить действие торможения, но не прекращать его. В этом случае тормозная характеристика имеет горизонтальный участок при соответствующих токах (вариант *b*). В некоторых случаях целесообразно не изменять наклон участка 3, но продолжать торможение по мере увеличения тормозного сигнала.

В современных микропроцессорных защитах [14, 15] дифференциальный ток формируется по выражению (1.6). Тормозной сигнал (тормозной ток  $I_T$ ) может формироваться как сумма абсолютных значений  $n$  сравниваемых токов (токов в  $n$  плечах ДЗ):

$$I_T = \sum |I_n|. \quad (1.7)$$

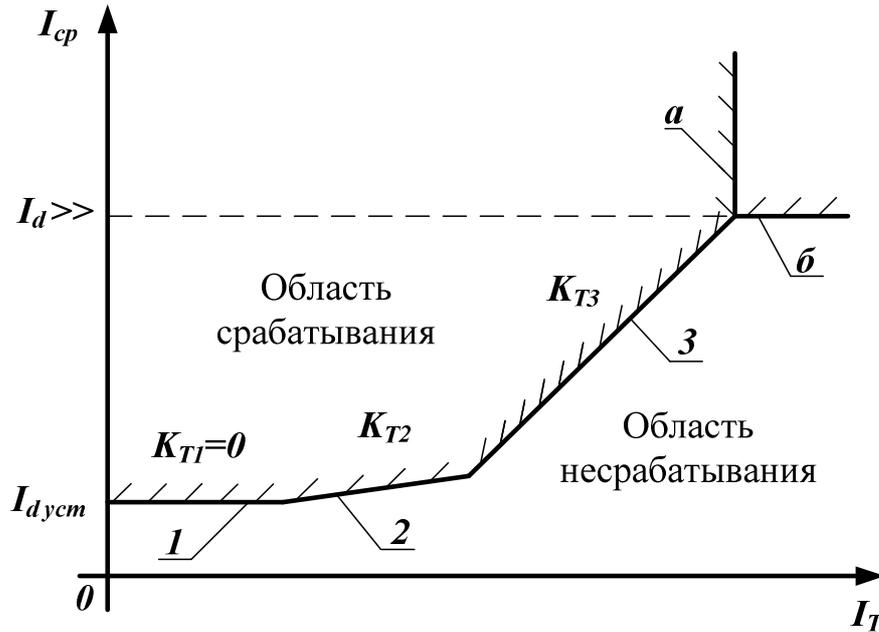


Рисунок 1.4 – Общий вид тормозной характеристики  $I_{cp}=f(I_T)$  дифференциальной защиты с торможением

В простейшем случае, в котором тормозная характеристика представляет собой прямую линию и ток срабатывания не становится меньше значения  $I_{dуст}$ , условие срабатывания при коэффициенте торможения  $K_T = \Delta I_{cp} / \Delta I_T$  описывается соотношением:

$$I_d \geq I_{cp} = I_{dуст} + K_T I_T, \quad (1.8)$$

а для многоконцевого объекта, аналогично,

$$|\Sigma \underline{I}_n| \geq I_{dуст} + K_T \cdot \Sigma |\underline{I}_n|. \quad (1.9)$$

Рассмотренный способ формирования тормозного сигнала применяется фирмой Siemens. Отметим, что при формировании тормозного сигнала могут быть задействованы как первые гармоники токов плеч защиты, так и сигналы, не подвергшиеся фильтрации. В последнем случае торможение усиливается за счёт наличия в токе повреждения апериодической составляющей.

В цифровых терминалах защиты фирм АВВ и Areva в качестве тормозного тока используется ток плеча, имеющий максимальное значение модуля первой гармоники, то есть

$$I_T = \max(|\underline{I}_1|, |\underline{I}_2|, \dots, |\underline{I}_n|), \quad (1.10)$$

причем в терминале REG670 фирмы АВВ сформированный по такому закону тормозной сигнал затухает с постоянной времени  $T=250$  мс, чтобы обеспечить эффективное динамическое торможение, когда вследствие насыщения измерительных ТТ тормозной сигнал может уменьшиться.

В устройстве БМРЗ-ТД-2х (продукция поставляется компанией ООО «Прибор»), предназначенном для защиты 2-обмоточных СТ, используется торможение полусуммой действующих значений первых гармонических составляющих токов плеч с учетом среднего за период значения дифференциального тока [20]. Торможение полусуммой модулей токов плеч используется в ДЗ СТ производителя ООО НТЦ «Механотроника» [21].

В отечественных микропроцессорных РЗ производства НПП «ЭКРА» применяется способ формирования тормозного сигнала из основной гармоники токов плеч, известный как способ «направленного торможения» [22]:

$$I_T = \sqrt{|\underline{I}_1| \cdot |\underline{I}_2| \cos \alpha}, \quad (1.11)$$

где  $\underline{I}_1 = \max(\underline{I}_1, \underline{I}_2, \dots, \underline{I}_n)$  – наибольший по модулю ток из  $n$  плеч ДЗ;

$\underline{I}_2 = \sum_{k=1}^n \underline{I}_k - \underline{I}_1$  – векторная сумма токов  $n$  плеч за вычетом  $\underline{I}_1$ ;

$\alpha$  – угол между векторами токов  $\underline{I}_1$  и  $\underline{I}_2$ .

При значении  $\cos \alpha < 0$  принимается тормозной ток  $I_T = 0$ . Свойства направленного торможения иллюстрируются работой в следующих режимах. При работе защищаемого объекта в ЭЭС внутреннее КЗ сопровождается поступлением

токов в зону защиты со всех сторон, на которых имеются источники питания. При этом  $\alpha \geq 90^\circ$ ,  $I_T = 0$ . При внутреннем КЗ в режиме опробования  $I_2 = 0$  и, следовательно,  $I_T = 0$ . При несимметричном внутреннем КЗ с односторонним питанием через зону защиты протекает сопровождающий ток нагрузки. В этом случае  $\underline{I}_1$ ,  $\underline{I}_2$ , как правило, существенно не совпадают по фазе и  $\cos\alpha < 1$ , то есть тормозной ток может быть существенно снижен. При двухстороннем питании несимметричного внутреннего КЗ, как правило, величина  $\alpha$  зависит, в основном, от составляющих тока КЗ, а значит  $\cos\alpha < 0$ . Так как рассматриваемый принцип использует исключительно выделенные составляющие основной частоты, влияние аperiodической составляющей (в случае, если ТТ работают без погрешностей, вызванных насыщением) на поведение защиты отсутствует.

Все существующие способы формирования тормозного сигнала имеют недостаток, заключающийся в снижении величины тормозного сигнала при насыщении ТТ защиты при внешних КЗ, то есть именно тогда, когда возрастает ток небаланса [23]. Применяемый фирмой АВВ способ динамического торможения, призванный сохранить тормозной сигнал на достаточно высоком уровне при насыщении ТТ, может оказаться неэффективным, если насыщение ТТ имеет место в первом периоде ПП: в этом случае запоминаемый тормозной сигнал всё равно может оказаться недостаточным, и чувствительная к ВЗ защита с малой уставкой (ниже  $I_{nm}$ ) может сработать неселективно.

При применении направленного торможения насыщение ТТ, вызывающее искажение вторичных токов, кроме уменьшения величины основной гармоники во вторичном токе, приводит к неверному вычислению абсолютного значения  $\underline{I}_1$ , но и его фазы, что также приводит к снижению эффективности торможения вплоть до полного исчезновения тормозного сигнала при внешних КЗ [5, 9]. Кроме того, действие направленного торможения при внутренних КЗ может сохраняться при наличии вытекающих токов нагрузки, так как в этом случае тормозной ток не равен нулю. Описанные особенности поведения ДЗТ в переходных режимах вынуждают производителей применять ряд корректирующих мер, обеспечивающих селективное действие защиты при

внешних КЗ с сохранением достаточной чувствительности при внутренних повреждениях. Описание этих мер приведено ниже в этом разделе.

Кроме того, в [15, 24] показано, что при внутреннем КЗ с двусторонним питанием, когда сдвиг фаз источников питания достаточно велик, соотношение  $I_d$  и  $I_T$  может быть таково, что при определённых видах функции торможения ДЗТ может оказаться заблокированной. Избежать подобного отказа ДЗТ возможно только в тех случаях, когда параметры участка энергосистемы и защищаемого объекта позволяют подобрать адекватные параметры тормозной характеристики.

*Использование сравнения фаз* применяется в дифференциально-фазных защитах (ДФЗ). Сущность способа заключается в том, что при принятых положительных направлениях первичных токов плеч ДЗ внутрь защищаемой зоны при внешних КЗ они сдвинуты по фазе на угол  $180^\circ$ , а при внутренних КЗ – на угол, не превосходящий нескольких десятков градусов. Рабочий сигнал ДФЗ определяется длительностью интервалов времени, на которых не совпадают полуволны противоположной полярности токов плеч. Эта длительность сравнивается с уставкой по времени, определяющей условие срабатывания защиты [7]. ДФЗ более чувствительна к внутренним КЗ с двухсторонним питанием, сопровождающимся насыщением ТТ, а также ДФЗ лучше отстроена от внешних КЗ, сопровождающихся значительной апериодической составляющей, приводящей к насыщению измерительных ТТ: неодинаковое насыщение ТТ при внешних КЗ не может обусловить изменение угла между вторичными токами со  $180^\circ$  до значений, приближающихся к значениям, характеризующим внутреннее КЗ. Недостатком ДФЗ является недостаточная чувствительность к внутренним повреждениям, сопровождающимся токами нагрузки [24]. К повреждениям такого вида относятся, прежде всего, ВЗ, поэтому ДФЗ не может непосредственно применяться для защиты СТ, однако дифференциально-фазный принцип успешно используется совместно с другими способами повышения качества функционирования ДЗ, что рассмотрено далее.

Одним из методов реализации средств отстройки от переходных токов небаланса является использование *качественных признаков внешних и внутренних*

*КЗ*. Принцип распознавания режимов по качественным признакам основан на том факте, что в первые моменты ПП, возникшего вследствие *КЗ*, измерительный ТТ работает с малой погрешностью и лишь по истечении некоторого интервала времени насыщается [10]. Выполняя распознавание режима во время работы ТТ без насыщения (в период «идеальной трансформации»), можно однозначно судить о наличии или отсутствии повреждения внутри зоны защиты. Такой подход был предложен в начале 70-х годов XX века [24].

Рассмотрим природу качественных признаков на примере ДЗ двухконцевого объекта, см. рисунок 1.5 [10]. На рисунке 1.5 введены следующие обозначения:  $i_1$ ,  $i_2$  – токи плеч ДЗ;  $i_T$  – тормозной ток;  $i_d$  – дифференциальный ток; ЗО – защищаемый объект, ДЗ – дифференциальная защита. Схема рассматриваемого объекта защиты приведена на рисунке 1.1, при этом для простоты предполагается, что защищаемый объект не имеет внутреннего сопротивления, фазовый сдвиг между векторами ЭДС двух энергосистем отсутствует, а их мощности *КЗ* одинаковы.

В случае внешнего *КЗ*, дифференциальный ток  $i_d$  остается практически равным нулю до насыщения одного из ТТ (по крайней мере в течение нескольких миллисекунд), в то время как тормозной ток  $i_T$  (определяемый как сумма модулей токов плеч ДЗ  $i_1$  и  $i_2$ ) появляется сразу же и быстро увеличивается (см. соответствующие эпюры токов на рисунке 1.5, *а*). В случае возникновения внутреннего *КЗ*, оба тока ( $i_d$  и  $i_T$ ) появляются и увеличиваются одновременно (рисунок 1.5, *б*).

Указанная задержка в увеличении дифференциального тока чётко указывает на то, что возникший дифференциальный ток обусловлен насыщением ТТ в режиме внешнего *КЗ*, и может использоваться для обнаружения факта насыщения в этом режиме. Напротив, если зафиксировано внутреннее *КЗ*, то ДЗ фиксирует наличие повреждения внутри зоны защиты и срабатывает, отключая повреждённый объект от сети. Такое ускоренное определение места повреждения в том или ином исполнении нашло применение в современных цифровых защитах, например в ДЗ фирмы Siemens [15], в защите СТ фирмы «ЭКРА» [22].

Применение такого метода определения места повреждения позволяет практически полностью исключить задержки срабатывания из-за влияния насыщения ТТ в ходе ПП, а саму ДЗ сделать максимально быстродействующей и чувствительной. Так, в [10] указывается, что применение описанного признака внешних и внутренних повреждений способно уменьшить время действия ДЗ до  $3 \div 5$  мс, то есть обеспечить распознавание места повреждения в течение времени, пока ТТ работают без насыщения, при этом к параметрам ТТ предъявляются особые требования, с целью обеспечения их работы в режиме идеальной трансформации в течение заданного времени [15].

Несмотря на преимущества метода, признак может быть корректно использован только в первом периоде ПП. Поэтому вследствие насыщения измерительных ТТ и резкого роста их погрешности использовать этот признак для определения перехода внешнего КЗ во внутреннее в ходе развития аварии невозможно. Кроме того, такой метод не позволяет отличить БТН от внутреннего КЗ. Поэтому для применения рассмотренного признака в защитах СТ необходимо проведение дополнительных исследований, которые представлены ниже.

Как указывалось выше, торможение токами плеч при внешних КЗ может быть малоэффективно в переходном режиме при насыщении ТТ. Поэтому современные производители средств ДЗ применяют различные управляющие воздействия на цепи торможения ДЗТ в случае выявления внешнего КЗ по рассмотренному признаку.

Для обеспечения корректной работы ДЗ в условиях насыщения ТТ в режиме внешнего КЗ в [15] предлагается следующий алгоритм: если после резкого увеличения тормозного тока  $di_T/dt$ , дифференциальный ток  $i_d$  не появляется в течение 3 мс, то фиксируется внешнее КЗ, и при этом на 150 мс блокируется возможность принятия решения о срабатывании на основании оценки данных за один полупериод. При таком блокировании защита может сработать только тогда, когда условия срабатывания выполняются в течение двух полупериодов. Время блокирования 150 мс превышает время, за которое должно быть отключено внешнее КЗ (максимум 100 мс при самых неблагоприятных условиях) с запасом в

50 мс. Однако блокировка защиты на большее время не представляется целесообразной, поскольку приводит к недопустимой задержке распознавания повреждения в зоне защиты в ходе развития аварии. Аналогичные проблемы возникают при повышении уровня тормозного сигнала при фиксации внешнего повреждения [8], поскольку, как указывалось выше, при определённом фазовом сдвиге токов плеч возникает блокировка ДЗТ при внутреннем КЗ.

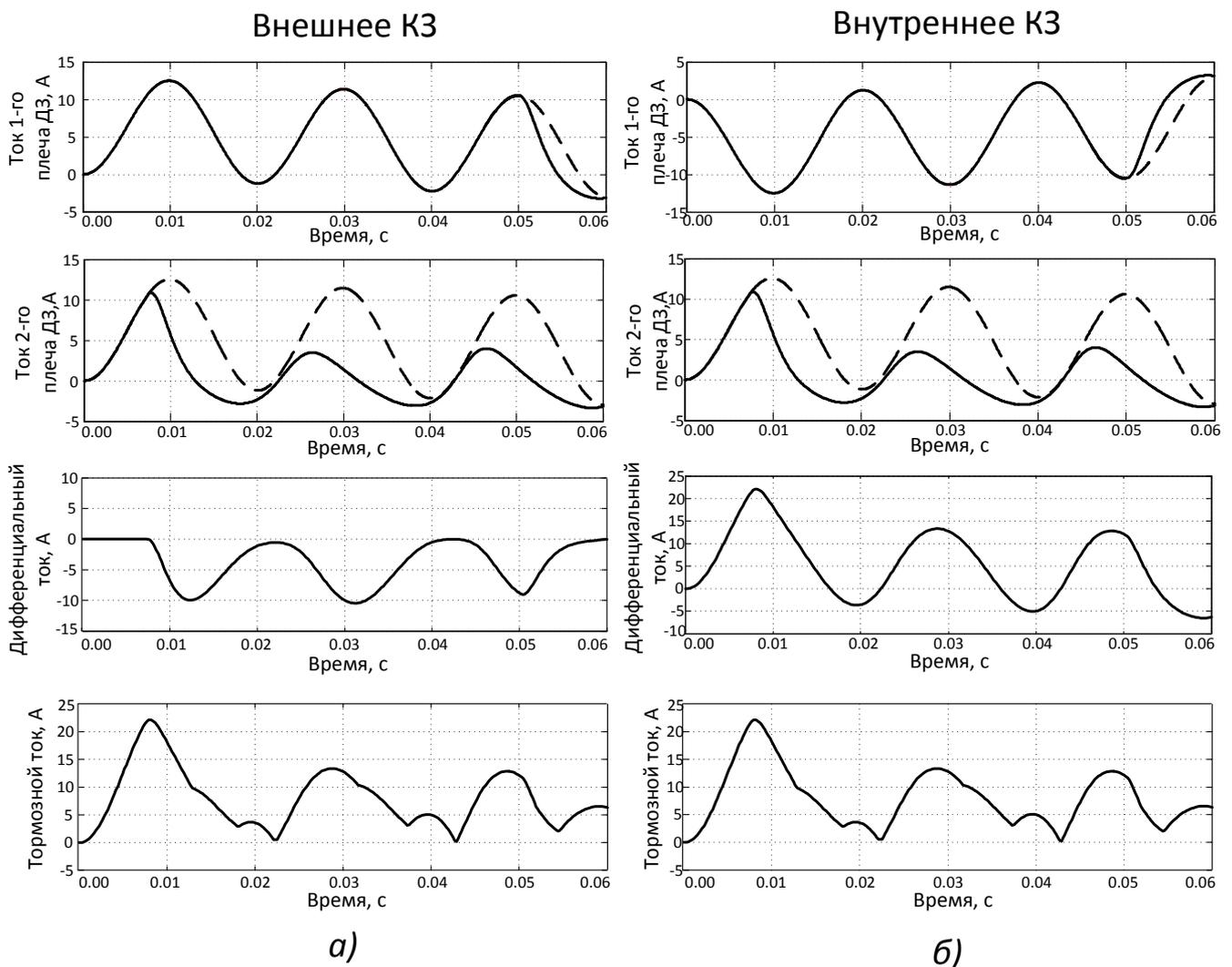


Рисунок 1.5 – Рабочий и тормозной токи при внешних и внутренних КЗ: а) случай внешнего КЗ; б) случай внутреннего КЗ

Некоторые производители ДЗ предусматривают функцию отключения КЗ в том случае, когда внешнее КЗ переходит во внутреннее повреждение спустя некоторое время после возникновения. Например, характеристика срабатывания

ДЗ фирмы Siemens имеет участок, при попадании рабочей точки в который происходит срабатывание защиты, даже если было зафиксировано внешнее КЗ и в связи с этим было введено дополнительное торможение [9]. Однако попадание рабочей точки в указанную область и её длительное нахождение в ней возможно только при отсутствии вытекающего тока нагрузки и отсутствии подпитки со стороны смежной энергосистемы [12], что делает этот алгоритм неуниверсальным.

В защитах REG670, серийно выпускаемых фирмой АВВ, применяется гармоническое торможение, суть которого заключается в том, что при фиксации внешнего повреждения дополнительное загроуление ДЗ производится только в случае наличия высших гармоник в дифференциальном токе, так как их появление является признаком насыщения ТТ, а при отсутствии насыщения ТТ дифференциальный ток остаётся синусоидальным. Данная защита применяется на синхронных генераторах [9]. В большинстве защит СТ эта функция также используется, поскольку гармоническое торможение позволяет отстроиться от БТН, и в то же время эта функция обеспечивает недействие ДЗ при внешних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ. Однако данный способ не позволяет защите быстро сработать при переходе внешнего КЗ во внутреннее повреждение при насыщении ТТ в этом режиме. Это возможно, если защищаемый объект связывает несколько энергосистем, эквивалентные постоянные времени которых достаточно велики. Кроме того, этот вид торможения может приводить к замедлению действия ДЗ при внутренних КЗ в СТ, что рассмотрено ниже.

Защита фирмы General Electric в случае фиксации внешнего повреждения активирует функцию сравнения фаз основных гармоник токов плеч ДЗ [14]. Использование сочетания дифференциального принципа при малых сквозных токах и дифференциально-фазного принципа при больших позволяет сделать ДЗ наиболее устойчивой к переходным и установившимся токам небаланса при внешних КЗ [24-27], а значит, снимает необходимость иметь большое значение коэффициента торможения, повышает устойчивость функционирования ДЗ в режиме глубоко насыщения ТТ токами КЗ, в том числе позволяет эффективно

отследить переход внешнего КЗ во внутреннее. Ввиду сложности использования качественного признака внутренних КЗ для защит СТ из-за возможности БТН, применение дифференциально-фазного принципа также может быть эффективно использовано для защиты СТ от повреждений, изначально возникающих в зоне защиты. Однако глубокое насыщение ТТ приводит к существенным погрешностям замера амплитудных и фазовых значений гармоник [9, 19], что приводит к необходимости задавать значительную по величине уставку по углу блокировки. Фазовая погрешность ТТ в режиме насыщения достигает, в зависимости от нагрузки и эквивалентной  $T_a$ ,  $46 \div 60$  электрических градусов [9, 19]. Значение этой погрешности может возрасти при выполнении защит СТ, в которых ток плеча ДЗ формируется за счёт получения информации от двух ТТ. Это, в свою очередь, снижает вероятность корректной работы алгоритма, и при некоторых возможных сочетаниях угла блокировки и сдвига углов токов плеч (указанных в п.1.1) ДЗ может оказаться заблокированной при внутреннем КЗ [24]. Тем не менее, использование принципа сравнения фаз является наиболее перспективным методом обеспечения правильной работы ДЗ при экстремальных ПП [9, 24] из всех ранее рассмотренных. В [24] отмечается, что эффективная работа дифференциально-фазного принципа может быть достигнута при использовании информации, получаемой на интервалах идеальной трансформации ТТ. Применение средств микропроцессорной обработки данных позволяет более полно использовать информацию о первичных токах ТТ в течение этих интервалов, а значит, предоставляет возможность повысить качество работы устройств защиты, использующих этот принцип действия.

Таким образом, в качестве одной из задач настоящего исследования необходимо поставить совершенствование дифференциально-фазного принципа за счёт более полного использования интервалов точной работы измерительных ТТ. При этом разрабатываемый алгоритм должен оперировать не интегральными, а мгновенными значениями токов плеч ДЗ.

### 1.3.2 Обеспечение правильности функционирования дифференциальной защиты при броске тока намагничивания

Практическая реализация ДЗ СТ с током срабатывания на уровне  $(0,1 \div 0,3)I_{нт}$  осложняется за счёт необходимости отстройки от БТН, ток которого воспринимается ДЗ, охватывающей обмотки разных напряжений, но не должен приводить к срабатыванию защиты. Возникает противоречие: защита, с одной стороны, должна быть нечувствительна к БТН, способным достигать до  $(6 \div 8)I_{нт}$  [11], с другой стороны – защита должна реагировать на весьма малые по величине токи внутренних повреждений. Разработчиками ДЗ предложено множество способов для выполнения этих противоречивых требований.

Простейшими способами отстройки от БТН являются отстройка по току и по времени [11]. Однако использование этих способов приводит к неприемлемой для защит СТ потере чувствительности и быстродействия [28].

Существует множество вариантов блокировок, использующих реле напряжения [28]. Все они оказались неэффективными, в том числе из-за нечёткости работы при БТН, возникающих после отключения внешних КЗ [11].

В конце 30-х годов в Германии была предложена схема с включением измерительного токового органа через промежуточный быстронасыщающийся трансформатор тока (НТТ), в котором резко ухудшается трансформация при наличии апериодической составляющей в токе БТН или переходном токе небаланса внешнего КЗ. В отечественной практике идея применения НТТ получила широкое распространение и успешно реализована в серийных, используемых до настоящего времени, реле РНТ-565, ДЗТ-11, ДЗТ-13, ДЗТ-14. Основными достоинствами реле с НТТ являются простота и достаточно высокая степень отстроенности от однополярных дифференциальных токов. Недостаток всех реле с НТТ заключается в задержке срабатывания при внутренних повреждениях, сопровождающихся значительной апериодической составляющей тока в дифференциальной цепи (время срабатывания может значительно превышать 20 мс). Кроме того, при БТН в одной из фаз трансформатора может протекать несинусоидальный разнополярный ток, не содержащий постоянной

составляющей. Это приводит к необходимости иметь ток срабатывания защит с НТТ на уровне  $(1,0 \div 1,5)I_{нм}$  [3], что делает защиту малочувствительной к развивающимся ВЗ.

Торможение токами плеч, вызывая загробление защиты, может также несколько улучшать отстройку от переходных токов небаланса при КЗ вне зоны защиты и при БТН. В эксплуатируемых электромеханических и аналоговых защитах наибольшее распространение получили следующие способы торможения, использующие особенности изменения токов при БТН:

- торможение апериодической слагающей дифференциального тока [29];
- торможение разностью амплитуд абсолютных значений положительной и отрицательной полуволн дифференциального тока [30];
- торможение суммой абсолютных значений первой и второй гармоник выпрямленного тока в реле [31];
- торможение второй гармоникой дифференциального тока [32].

Однако все перечисленные признаки в значительной степени проявляются в дифференциальном токе и при внутренних КЗ, сопровождающихся значительной апериодической слагающей (а некоторые и без неё при кратности тока, значительно превосходящей расчётную). Это объясняется насыщением ТТ при внутреннем КЗ. Сходство физических явлений при БТН и насыщении ТТ при КЗ неизбежно приводит к идентичности признаков этих процессов. Поэтому их использование для отстройки от БТН вызывает задержку в срабатывании защиты при внутренних КЗ.

Использование апериодической слагающей для отстройки от БТН не позволяет получить ток срабатывания защит меньше номинального. Это связано с тем, что апериодическая слагающая в переходном процессе БТН полностью поглощается ТТ, и при малых токах срабатывания защита может действовать неселективно. Кроме того, использование апериодической слагающей может приводить к значительным задержкам в срабатывании защиты при внутренних КЗ. Кроме того, как указывалось ранее, минимальная уставка срабатывания такой

защиты не может быть мала вследствие необходимости отстройки от периодического БТН.

Способ, основанный на выделении разности амплитуд положительной и отрицательной полуволн тока, не позволяет отстроиться от периодического БТН. Блокирование же этой фазы двумя другими может привести к неоправданным задержкам в срабатывании при трёхфазных КЗ в зоне защиты, когда ток одной из фаз не содержит апериодической составляющей. Ток срабатывания защиты трансформаторов с использованием этого способа отстройки от БТН составляет  $(0,6 \div 0,7)I_{нт}$  [30], что значительно выше требуемого значения (см.п.1.1).

Ток в режиме БТН носит резко несинусоидальный характер. Если предположить, что ток в первичной цепи трансформируется в цепи ДЗ без искажений, то содержание в дифференциальном токе высших гармоник свидетельствовало бы о наличии БТН в цепях СТ. Метод распознавания БТН по содержанию в дифференциальном токе высших гармоник реализуется в большинстве терминалов цифровых РЗ, поставляемых на российский рынок [9]. Так как токи КЗ в своём спектре имеют преимущественно постоянную слагающую и 1-ую гармонику, для выявления БТН целесообразно использовать гармонические слагающие частотой 100 Гц и выше. Исследования по определению гармонического состава токов при БТН, проведённые в [33], показывают, что амплитуда 2-й гармонической составляющей лежит в весьма широком диапазоне – от 17 до 102% относительно амплитуды 1-й гармоники. У слагающих 150 Гц и выше этот показатель не так высок, поэтому для формирования тормозного сигнала преимущественно используется лишь 2-ая гармоника дифференциального тока.

Применение торможения высшими гармониками позволяет получить наименьший по сравнению с другими методами начальный ток срабатывания. Начальный ток срабатывания у современных цифровых ДЗ различных производителей, в которых реализовано торможение высшими гармониками, лежит в пределах  $(0,3 \div 0,5)I_{нт}$  [16-18].

Основным недостатком метода торможения высшими гармониками для отстройки от БТН является задержка в срабатывании защиты при насыщении ТТ под действием апериодических составляющих токов внутреннего КЗ. В этом случае вторичный ток, попадающий в дифференциальное реле, сильно искажён, а значит, в его спектре присутствуют высшие гармоники, обуславливающие загромождение защиты. В [32] указывается, что диапазоны величин относительных гармонических составляющих, характерных внутренним КЗ и режиму БТН, в значительной степени пересекаются. Величины коэффициента второй гармоники, появляющейся при внутренних КЗ, могут в несколько раз превышать принятые уставки современных дифференциальных защит, по которым они идентифицируют БТН. Например, в современной цифровой защите фирмы «ЭКРА» уставка по 2-й гармонике принята на уровне 10-20 % [22], тогда как коэффициент второй гармоники дифференциального тока при внутреннем КЗ может превышать 40% в первом периоде. Защита с торможением ложно воспринимает такой сигнал как режим БТН, из-за чего срабатывание происходит только после восстановления синусоидальности вторичного тока. И наоборот, в случае апериодического БТН, при отсутствии искажений в дифференциальном токе во время первого и второго периодов, коэффициент второй гармоники может быть на уровне 14-15%, что может оказаться на уровне или даже ниже уставки. Коэффициенты третьей и четвертой гармоник при БТН оказываются несколько большими, чем при внутренних КЗ, но провести четкую границу по их значениям между этими двумя режимами также достаточно сложно. Коэффициенты пятой и шестой гармоник как при внутренних КЗ, так и при БТН составляют единицы процентов, поэтому они также не предоставляют возможностей для отстройки от БТН. Время срабатывания защит с использованием двух последних признаков идентификации БТН может достигать  $2,6T_a$  [34], что недопустимо велико (см.п.1.1).

В начале 40-х годов прошлого века в Германии и Швейцарии были разработаны первые защиты, использующие факт того, что максимумы тока при бросках возникают 1 раз за период, а тока короткого замыкания – 2 раза, то есть

бестоковые паузы на определённом уровне измерения при БТН имеют длительность значительно большую, чем при внутренних КЗ. Отечественной промышленностью реализованы реле ДЗТ-21 (ДЗТ-23), в которых использован этот принцип. В этих реле бестоковая пауза измеряется в производной дифференциального тока [11]. Эта защита является более быстродействующей, чем описанные выше, но и её задержка срабатывания может превышать  $1,4T_a$ . Это обусловлено тем, что при внутреннем КЗ и насыщении ТТ апериодической слагающей во вторичном токе возникают бестоковые паузы, и реле может воспринять внутреннее КЗ как БТН. Сопутствующим фактором, замедляющим действие защиты при насыщении измерительных ТТ, является повышение уровня замера паузы при увеличении содержания второй гармоники в дифференциальном токе.

В [35] предлагается распознавать режим включения СТ, используя следующее выражение:

$$\underline{I}_{21} = \frac{|\underline{I}_2|}{|\underline{I}_1|} e^{j(\arg(\underline{I}_2) - 2\arg(\underline{I}_1))}, \quad (1.12)$$

где  $\underline{I}_2$  – вектор тока второй гармоники, вращающийся с частотой  $2\omega$  ( $\omega$  – частота системы в радианах в секунду),

$\underline{I}_1$  – вектор тока основной гармоники, вращающийся с частотой  $\omega$ ;

$j$  – мнимая единица.

Величина  $\underline{I}_{21}$  из (1.12) приведена к фазе и скорости вращения вектора второй гармоники путём вычитания удвоенной фазы первой гармоники. В зависимости от значения модуля и фазы величины (1.12) формируется решение о блокировании дифференциальной защиты. В [35] указывается, что при БТН значение аргумента вектора  $\underline{I}_{21}$  оказывается близкой либо  $+90$ , либо к  $-90$  электрических градусов (эл. град.), что предлагается использовать как качественный признак БТН. Защита блокируется при попадании фазы вектора  $\underline{I}_{21}$  в область данных углов. Дальнейшее поведение ДЗ определяется изменением

положения угла вектора  $I_{21}$ . Если фаза  $I_{21}$  близка к 0 или к 180 эл. град., блокировка снимается немедленно вне зависимости от доли содержания второй гармоники в дифференциальном токе. Если же фаза  $I_{21}$  близка к 90 или -90 эл. град., то значение выдержки времени зависит от относительного содержания второй гармоники в дифференциальном токе: если характерно малое относительное содержание второй гармоники, значение выдержки времени оказывается незначительным; если относительное содержание второй гармоники в дифференциальном токе составляет приблизительно 20%, то значение выдержки времени принимается равным 5-6 периодам промышленной частоты; этого достаточно для предотвращения неправильной работы защиты при БТН, в котором относительное содержание второй гармоники составляет менее 20%. Однако применение данного принципа действия вызывает некоторые сомнения в стабильности проявления используемого признака, так как в [35] не приведено физического объяснения указанного явления. Кроме того, предложенный принцип действия не позволяет во всех случаях эффективно выявлять внутреннее КЗ, о чём свидетельствуют данные, приведённые там же в [35]: в некоторых случаях вследствие ПП в измерительных цепях фаза вектора  $I_{21}$  оказывается вблизи 90 или -90 эл. град. при внутреннем КЗ, что вызывает задержку срабатывания защиты. Попытка учесть эту особенность приводит к значительному усложнению алгоритма и необходимости динамически (в ходе развития ПП) изменять некоторые его параметры. Таким образом, можно говорить лишь о частичном решении проблемы.

Имеются и другие способы отстройки ДЗ от БТН. Например, в [36] предлагается блокировка, реагирующая непосредственно на мгновенное состояние сердечника СТ с помощью специальных датчиков, размещённых в магнитопроводе. Этот способ позволяет следить за изменением магнитной индукции в сердечнике СТ, но он не нашёл применения из-за сложности реализации.

Наибольший интерес для отстройки ДЗ от БТН представляет предложение, описанное в [37], поскольку предлагаемый способ отстройки не требует

повышения значения минимального тока срабатывания для отстройки от режима БТН, а время, необходимое для распознавания режиме, не превышает периода промышленной частоты даже при глубоком насыщении измерительных ТТ. Этот способ предполагает определение знака разности длительностей переднего (время  $t_1$  на рисунке 1.6) и заднего (время  $t_2$  на рисунке 1.6) фронтов четной (с момента начала ПП) полуволны дифференциального тока. Отрицательное значение разности свидетельствует о протекании в первичной обмотке БТН, в противном случае (при  $t_1 = t_2$  или  $t_1 > t_2$ ) фиксируется КЗ в зоне действия защиты. Длительность переднего фронта определяется от начала полуволны до максимума тока, а заднего фронта – от максимума тока до начала нечетной полуволны (включая бестоковую паузу). Этот признак подробно описан в [38], где был применён при создании алгоритма ДЗ СТ, поскольку показал свою устойчивость даже в случае насыщения измерительных ТТ в ходе ПП: время распознавания режима даже в этих условиях не превышает периода промышленной частоты. Однако в [38] не рассмотрены особенности поведения защиты, распознающей режим по этому признаку, при БТН, возникающем при подаче напряжения на СТ с подключенной нагрузкой, или в случае одновременного включения фаз силового выключателя, при котором может возникнуть так называемый «последовательный» БТН [2]. Вероятность возникновения БТН в таких условиях высока, поэтому для доказательства эффективности защит, использующих этот метод, необходимы специальные исследования. Проведение соответствующих исследования – одна из задач настоящей работы.

В настоящее время разработчики начали использовать в алгоритмах РЗ методы локализации повреждений путём анализа изменения во времени мгновенных значений тормозного и дифференциального сигналов или путём использования специально составленного словаря признаков внешних и внутренних повреждений, элементы («слова») которого формируются как матрицы состояний (срабатывание или несрабатывание) отдельных блоков сложного устройства РЗ в течение ПП [15, 38, 39]. Формирование и использование словаря признаков внешних и внутренних повреждений по методу

[38, 39] представляется перспективным направлением развития РЗ, однако при этом необходимо учитывать ряд факторов, усложняющих разработку защиты.

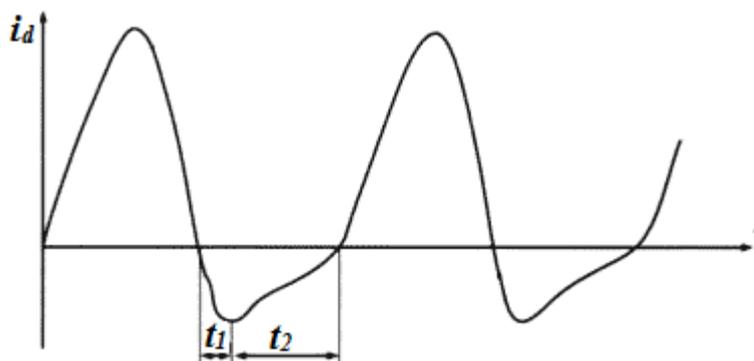


Рисунок 1.6 – Сравнение длительностей переднего и заднего фронтов дифференциального тока в режиме БТН, сопровождающегося насыщением магнитопроводов ТТ

Во-первых, словарь признаков внешних и внутренних повреждений при прочих равных условиях оказывается различным при использовании отличающихся частот дискретизации АЦП [38]. По мере совершенствования аппаратных средств производственные стандарты требуют увеличения частоты дискретизации входных аналоговых сигналов, что делает необходимым адаптировать словари признаков к новым частотам дискретизации.

Во-вторых, поскольку каждый элемент словаря признаков формируется как матрица состояния пороговых элементов сложной РЗ, то словарь признаков зависит от выбранных значений уставок срабатывания соответствующих пороговых элементов, которые сами зависят от параметров защищаемого объекта и прилегающей сети. Учёт этой особенности на практике требует создания уникального словаря признаков для каждого защищаемого объекта, что является трудоёмкой задачей, требующей сложных расчётов с привлечением ЭВМ и специализированных программных продуктов. Не исключены изменения словаря признаков в ходе эксплуатации защищаемого объекта в связи с развитием прилегающей энергосистемы, изменения нагрузки ТТ, используемых для ДЗ, и

т.п. Это обстоятельство существенно затрудняет настройку ДЗ, схожие трудности могут возникнуть при использовании нейронных сетей для распознавания режима [40].

В-третьих, словарь признаков может содержать большие объёмы данных, что может вызывать задержки в работе микропроцессорного устройства РЗ в процессе идентификации режима. Повышение производительности аппаратной части защиты может устранить этот недостаток, однако такое мероприятие может приводить к увеличению стоимости аппаратных средств защиты.

Принимая во внимание перечисленные факторы, алгоритм распознавания БТН и различных видов КЗ, а также идентификацию режимов целесообразно осуществлять с использованием параметров, *не зависящих от уставок пороговых элементов защиты и частоты дискретизации АЦП* (например, распознавать режим путём сравнения длительностей возрастания и убывания полуволн дифференциального тока, как это описано в [15]).

### **1.3.3 Способы компенсации погрешностей трансформаторов тока в переходных процессах**

Как было показано выше, современные средства ДЗ СТ, использующие торможение высшими гармоническими составляющими, способны обеспечить достаточно высокую чувствительность к токам ВЗ и необходимое быстроедействие защиты, однако в случае насыщения измерительных ТТ при экстремальных внутренних КЗ защита срабатывает с недопустимой задержкой вследствие появления в дифференциальном сигнале высших гармоник. Использование дифференциально-фазного принципа действия для обеспечения корректной работы защиты при внешних КЗ и выявлении перехода внешнего КЗ во внутреннее повреждение осложняется ввиду длительного существования амплитудных и фазовых погрешностей при насыщении ТТ. Поскольку погрешности ТТ в ПП – основной источник нарушения устойчивой работы ДЗ, то одним из возможных путей обеспечения корректной работы защиты является

устранение погрешностей измерительного оборудования. Тем не менее, такой подход связан с определёнными трудностями.

Как показано в [19], обеспечить работу электромагнитных ТТ на линейном участке кривой намагничивания при экстремальных ПП на практике невозможно, поскольку это требует снижения нагрузки, выбранной по кривым предельной кратности, более чем в десятки раз. При этом измерительные ТТ, обладающие высоким внутренним сопротивлением рассеяния (например, ТТ звеньевой конструкции типа ТФНД), могут насыщаться даже при закороченных вторичных обмотках. Это делает неизбежными большие погрешности ТТ со стальным магнитопроводом в экстремальных ПП. Существенное уменьшение погрешности возможно только при значительном изменении конструкции ТТ, выполнение которых технически сложно и требует экономического обоснования.

Одним из путей повышения эффективности функционирования ДЗ является применение ТТ без стального сердечника, в которых исключена нелинейность, обусловленная насыщением. Этот путь связан с разработкой и освоением производства специальных измерительных преобразователей тока. Исключение насыщения ТТ может быть достигнуто путём применения ТТ специальной конструкции, использования поясов Роговского, применения оптоэлектронных преобразователей и т.д. Однако повсеместная замена ТТ, имеющих стальной сердечник, на действующих электростанциях и подстанциях проблематична, поскольку является серьёзной технико-экономической задачей. Кроме того, для массового перехода на использование измерительных преобразователей другого типа необходимо накопление достаточного опыта эксплуатации соответствующих устройств. По этой причине, по крайней мере в ближайшие годы, должны разрабатываться и использоваться ДЗ, обеспечивающие высокую эффективность функционирования при экстремальных погрешностях обычных ТТ в переходных режимах [41].

Тем не менее, в настоящее время на рынке всё большую известность приобретают такие измерительные преобразователи тока, как оптические ТТ, использующие эффект Фарадея [42], и пояса (катушки) Роговского.

Несмотря на то, что разработки по созданию оптических трансформаторов ведутся более 40 лет [30], первые промышленные образцы, появившиеся в последние годы, слишком дороги и их широкое применение может быть экономически оправдано только на высоких и сверхвысоких напряжениях (220 кВ и выше). Оптические ТТ содержат оптоволоконный преобразователь в виде катушки с оптическим волокном, надетой на токопровод. При протекании тока по проводнику вокруг него возникает магнитное поле, которое оказывает влияние на поляризацию двух поляризованных световых сигналов с противоположным направлением вращения, проходящих по волокну. Изменение поляризации вернувшихся световых сигналов позволяет вычислить угол Фарадея, который прямо пропорционален току в первичной цепи. Одним из ключевых и, соответственно, неотъемлемых элементов системы измерения является электронный блок, который производит формирование световых сигналов, их приём после прохождения через оптоволоконную катушку, определение угла изменения поляризации и вычисление мгновенного значения тока. Такой ТТ становится активным элементом системы вторичной коммутации, поскольку не может функционировать без электронного блока, требующего надежного электропитания. Основное преимущество оптических ТТ перед традиционными – отсутствие явлений гистерезиса, магнитного насыщения и остаточного намагничивания. Однако данный принцип измерения не лишен недостатков. Интенсивность проявления эффекта Фарадея зависит от свойств среды, по которой проходит используемый световой луч, и это приводит к погрешности, обусловленной изменением температуры, механических напряжений и вибрации оптического волокна. Собственная стоимость оптических ТТ в несколько раз превышает стоимость традиционных электромагнитных, в том числе за счет использования дополнительных электронных блоков. Сложность конструкции оптического ТТ обуславливает, при прочих равных условиях, пониженную надежность по сравнению с традиционными электромагнитными ТТ [42]. Следует отметить, что к настоящему времени опыт эксплуатации таких преобразователей крайне мал. Также следует отметить, что выходной сигнал оптических ТТ может

непосредственно использоваться только специальными защитами, а при использовании электромеханических, микроэлектронных и широко внедряемых цифровых защит требуются специальные преобразователи, что дополнительно усложняет задачу повсеместного внедрения данных устройств.

Поясом или катушкой Роговского называют электромагнитный измерительный трансформатор без стального сердечника. Он создается в виде длинного соленоида с равномерной намоткой, охватывающего токопровод с контролируемым током. Один из выводов катушки приводится к другому по линии намотки соленоида. Необработанные выходные сигналы пропорциональны производной тока в контролируемой первичной цепи. Для получения сигналов, пропорциональных току, необходимо использовать интеграторы и фильтры низших частот.

В связи с небольшим выходным напряжением пояса Роговского, как правило, катушка должна экранироваться для защиты от электромагнитных помех. Экраны при этом не должны образовывать короткозамкнутых контуров. Выводы катушки также экранируются, при этом один из выводов должен соединяться с экраном и заземляться. Сложность конструкции и использования катушки Роговского до недавнего времени не позволяла применять её в целях РЗ, поскольку несовершенство технологии существенно сказывалось на погрешности измерений. В настоящее время ТТ, выполненные в виде катушки Роговского, находят применение в сетях 6 ÷ 35 кВ (одной из фирм, применяющих данный вид ТТ при построении ДЗ СТ, является НПП «ЭСТРА», г. Новосибирск), однако слабая помехозащищённость, обусловленная наличием близлежащих цепей с большими токами, ограничивает их применение в сетях высших классов напряжений [43, 44].

Таким образом, можно заключить, что использование оборудования нового типа для исключения погрешностей, создаваемых электромагнитными ТТ не во всех случаях оправдано как технически, так и экономически. Совершенствование защитных алгоритмов, учитывающих характер погрешностей электромагнитных ТТ при насыщении магнитопроводов, сопряжено с существенно меньшими

затратами, чем создание нового электрооборудования и замена на него действующего, а потому является важным направлением научных исследований по совершенствованию устройств РЗА.

Имеются предложения по использованию программной компенсации погрешностей насыщенного ТТ [41]. Сущность метода заключается в вычислении по выборкам вторичного тока дискретных значений намагничивающего тока и, соответственно, восстановлению приведённого ко вторичной цепи ТТ первичного тока. Так, аппроксимируя зависимость  $B=f(H)$  сердечника ТТ спрямлённой характеристикой намагничивания (СХН), значение вторичного тока в интервале времени  $t_S^n < t < t_B^n$ , когда ТТ насыщен, можно находить по формуле

$$i_2 = \frac{\omega L_{0S}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{0S}^2}} \cdot I'_{m1} \left( \sin \omega t + \arctg \frac{1}{\omega T_2} \right) + A_2 \exp \left( -\frac{t - t_S^n}{T_2} \right), \quad (1.13)$$

а значение намагничивающего тока определять аналогично:

$$i_0 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_{0S}^2}} \cdot I'_{m1} (\sin \omega t + \arctg \omega T_2) - A_2 \exp \left( -\frac{t - t_S^n}{T_2} \right), \quad (1.14)$$

где  $A_2$  – амплитуда экспоненциальной составляющей намагничивающего тока, возникающей вследствие насыщения сердечника;

$T_2$  – постоянная времени вторичной цепи;

$R_2$  – активное сопротивление вторичной цепи;

$L_{0S}$  – индуктивность ветви намагничивания на насыщенном участке СХН;

$t_S^n$  – время  $n$ -го входа ТТ в насыщение;

$t_B^n$  – время  $n$ -го выхода ТТ из насыщения.

Эта формула получена в предположении, что нагрузка во вторичной цепи ТТ носит чисто активный характер. Однако данный подход имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, возможность достаточно точной компенсации погрешностей ТТ для целей ДЗ определяется по принятому критерию применимости СХН, а именно

$$\frac{z_2}{x_{0s}} \leq 20, \quad (1.15)$$

где  $z_2$  и  $x_{0s}$  – соответственно полное сопротивление вторичной цепи и индуктивное сопротивление ветви намагничивания трансформатора тока для насыщенной части характеристики.

Во-вторых, рассматриваемые методы имеют и иные недостатки, поскольку не учитывают взаимное влияние ТТ, работающих в группе, в методике не указывается, как определить насыщенное состояние ТТ, возможность восстановления сигнала предусматривается лишь для тока синусоидальной формы с аperiodической составляющей, и, таким образом, методика не учитывает возможное изменение первичного тока в ходе развития аварии, а также непригодна для восстановления формы тока в режиме БТН для дальнейшей идентификации режима и обеспечения селективного действия защит СТ.

В-третьих, необходимость использования сложных математических моделей ТТ и их работа в режиме реального времени значительно увеличивает загрузку вычислительных средств цифровой ДЗ, что может приводить к сбоям в работе именно в те моменты времени, когда важно быстрое действие.

Наиболее целесообразным средством учёта погрешностей ТТ представляется отыскание и использование для идентификации режимов участков идеальной трансформации, на которых даже в режиме насыщения погрешность ТТ минимальна. Решение этой задачи рассмотрено далее в работе.

### 1.3.4 Работа дифференциальной защиты силового трансформатора при перевозбуждении сердечника и работа дифференциальной отсечки

Современные производители ДЗ СТ предусматривают в своих продуктах защиту СТ от ПВ [16, 17, 22], при этом такая защита реагирует на кратность ПВ  $M$ , которая выражается как

$$M = \frac{U \cdot f_{ном}}{U_{ном} \cdot f}, \quad (1.16)$$

где  $U, U_{ном}$  – соответственно текущее и номинальное напряжение, подведённое к обмотке СТ;

$f, f_{ном}$  – соответственно текущая и номинальная частота напряжения сети.

Такая защита имеет обратную зависимость от  $M$  выдержку времени на отключение СТ. В этом режиме ДЗ должна блокироваться или загрубляться, так как с ростом  $M$  увеличивается ток намагничивания, что может привести к срабатыванию защиты с малым значением уставки. Часто используется блокировка чувствительной ДЗ по наличию в дифференциальном токе нечётных гармоник (преимущественно пятой), что является характерным признаком ПВ: этот режим является симметричным и насыщение магнитопровода СТ происходит в оба полупериода [2]. Однако в режиме ПВ значительно увеличиваются активные потери в стали сердечника, увеличивается нагрев конструктивных элементов СТ, что приводит к ускоренному старению изоляции. В этих режимах повышается вероятность возникновения ВЗ, вызывающих протекание малых токов в реагирующем органе ДЗ, на которые защита не реагирует из-за блокировки. Защита от ПВ, реагирующая на  $M$ , не способна почувствовать ВЗ по принципу действия. Как указывалось ранее (п.1.1), при возникновении ВЗ защиты СТ должны сформировать управляющее воздействие на отключение защищаемого объекта без выдержки времени. Защита от ПВ, реагирующая на  $M$ , быстро отключает СТ только при значительных кратностях ПВ, однако

существует вероятность возникновения ВЗ при существенно меньших кратностях. Это может привести к недопустимо длительной работе повреждённого СТ и дальнейшему развитию аварии. По этой причине в настоящей работе целесообразно разработать меры по повышению чувствительности ДЗ к ВЗ в режиме перевозбуждения.

Для обеспечения тока срабатывания ДЗ СТ меньше  $I_{нт}$  необходимо применение специальных мер для повышения селективности, что требует применения усовершенствованных реле, полупроводниковых схем или усложнённых алгоритмов для ЭВМ. Как показано ранее, принятие таких мер может привести к значительным задержкам в срабатывании при внутренних КЗ. Поэтому в широкой практике используется разбиение зоны срабатывания ДЗ на поддиапазоны. Этим обосновано применение дифференциальных токовых отсеков (ДО). Чувствительность ДО обычно невелика, однако ввиду простоты исполнения этот дополнительный блок защиты способен подействовать без задержки при значительных токах внутреннего повреждения. Таким образом, грубая ДО резервирует чувствительную, но значительно более сложную часть ДЗ [3]. Однако часто ток срабатывания ДО может оказаться слишком большим, так как традиционно уставка ДО выбирается такой, чтобы обеспечить несрабатывание ДО во всех возможных режимах работы защищаемого оборудования, не связанных с внутренним повреждением, что приводит к снижению качества выполнения функции резервирования. Одновременно с этим нельзя гарантировать, что новый этап совершенствования алгоритма чувствительной защиты обеспечит устойчивое функционирование ДЗ во всех без исключения ситуациях. Поэтому желательно по возможности повышать чувствительность ДО, при этом, в соответствии с назначением ДО, её блокирование в переходных режимах не должно использоваться. Разработка методов и средств повышения чувствительности ДО – одна из важных задач настоящей работы.

## Выводы

1. Как показал анализ литературы, современные цифровые средства ДЗ СТ обладают вполне удовлетворительной чувствительностью и быстротой срабатывания только в определённых условиях работы силового и измерительного оборудования. Методы, за счёт которых достигаются высокие чувствительность и быстрота срабатывания в одних режимах, могут приводить к недопустимым задержкам в срабатывании при насыщении измерительных ТТ в режимах внутренних КЗ, а также к снижению чувствительности и быстродействия в режиме перевозбуждения. Применение ТТ специальной конструкции, не подверженных насыщению, пока не имеет достаточных технических и экономических обоснований его целесообразности. Применение современных средств цифровой обработки информации и привлечение их для распознавания режима позволяет реализовать ДЗ, способную сохранять свойства быстродействия и чувствительности при ПВ и при насыщении ТТ.

2. В рамках настоящей работы необходимо решить следующие задачи, направленные на устранение наиболее важных недостатков ДЗ, выявленных в ходе анализа литературы:

– необходимо повысить точность работы дифференциально-фазного алгоритма путём использования участков идеальной трансформации измерительных ТТ. Использование участков идеальной трансформации может предоставить возможность повышения устойчивости работы ДЗ при насыщении ТТ токами внешних и внутренних КЗ, что в свою очередь может позволить с большей чувствительностью и быстродействием выявлять внутренние КЗ, сопровождающиеся токами нагрузки, а также распознавать переход внешнего КЗ во внутреннее в ходе развития аварии;

– разработать эффективный алгоритм распознавания БТН и внутреннего КЗ, позволяющий без существенной задержки, вызванной насыщением ТТ, выявлять внутреннее повреждение, для чего следует уточнить набор характерных признаков этого режима в условиях последовательного БТН и БТН нагруженного СТ;

- повысить чувствительность защиты к ВЗ, возникающим при ПВ;
- повысить чувствительность ДО.

3. Решение поставленных задач требует наличия достоверной информации о ПП в первичных и вторичных цепях ДЗ. Для получения этой информации целесообразно использовать математическое моделирование. Поэтому первоочередной задачей является создание адекватной математической модели объекта защиты и используемых измерительных преобразователей.

## **2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ И ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА**

Одна из первоочередных задач на пути повышения эффективности работы ДЗ СТ – получение достоверной информации о характере ПП в токовых цепях СТ и в цепях РЗ.

Наиболее достоверные результаты можно получить путём проведения производственных испытаний электрооборудования. Однако для большинства технических систем электроэнергетики осуществить полноценные натурные эксперименты невозможно из-за опасности повреждения оборудования и необходимости больших затрат, а также большой вероятности значительного недоотпуска электроэнергии потребителям. Любые испытания сопровождаются возникновением возмущений в энергосистеме, что в ряде случаев может привести к нарушению её устойчивой работы. Вместе с тем, проведение реальных экспериментов является малоэффективным мероприятием, так как условия, определяющие протекание ПП (остаточная индукция в сердечниках силовых и измерительных трансформаторов, различие характеристик намагничивания их сердечников, разновременность включения фаз выключателя и т.д.), носят вероятностный характер. Это приводит к тому, что при ограниченном числе опытов и невозможности повлиять на все параметры эксперимента наиболее опасные ПП могут быть не выявлены. Проведение исследований путем обобщения осциллограмм, полученных на действующих объектах энергосистемы в реальных аварийных ситуациях, также затруднительно: доступ к записям в большинстве случаев является закрытым, а также из-за того, что объём собираемой информации штатными средствами регистрации аварийных событий, чаще всего, недостаточен для полноценного анализа.

Аналитическое исследование поведения средств РЗ в ПП является чрезвычайно сложным даже при внесении ряда допущений. Наиболее результативным подходом к решению поставленной задачи является сочетание упрощенного аналитического исследования и последующего моделирования ПП.

Аналитическое исследование предоставляет возможность выявить области неблагоприятных режимов с точки зрения устойчивой работы средств РЗ; все выявленные неблагоприятные режимы в дальнейшем следует подробно рассмотреть, используя средства численного эксперимента на математических моделях.

Моделирование представляет собой процесс замещения объекта исследования некоторой его моделью и проведение исследований на модели с целью получения необходимой информации об объекте. Модель – это физический или абстрактный образ реального объекта, удобный для проведения исследований и позволяющий адекватно отображать интересующие исследователя физические свойства и характеристики объекта [45]. Математическая модель – это совокупность математических объектов и отношений между ними, адекватно отображающая физические свойства создаваемого технологического объекта. Использование математических моделей позволяет проводить контролируемые эксперименты, то есть так воздействовать на параметры модели, чтобы получать экстремальные ПП или, напротив, определить, при каких условиях ПП представляют наименьшую опасность для нарушения устойчивости функционирования.

Математической моделью рассматриваемой реальной системы является представление группы объектов (СТ, энергосистема, ТТ) в форме совокупностей математических уравнений, описывающих исследуемые объекты с учётом принятых допущений. При создании математических моделей необходимо использовать такие программные пакеты для ЭВМ, которые обладают достаточной гибкостью и предоставляют большие возможности для анализа и обработки результатов. Такими программными продуктами, удовлетворяющими вышеуказанным требованиям, являются MATLAB, Simulink, Power System CAD, Electromagnetic Transients Program и др. В настоящей работе математическое моделирование всех объектов выполняется средствами программного пакета MATLAB.

В большинстве инженерных программных пакетах (включая вышеперечисленные), предназначенных для моделирования электроэнергетических систем, имеются модели СТ, в которых учитывается нелинейность характеристики намагничивания и, при необходимости, может быть учтено явление гистерезиса и тип магнитопровода. Однако в указанных программных продуктах реализованы модели лишь наиболее массовых конструкций СТ и не представлены модели мощных трансформаторов и автотрансформаторов со сложной конфигурацией магнитной и электрической цепей (например, таких как трансформатор ОДЦ-417000/500/24 [46]). Более того, разработчики инженерных программных пакетов в целях сохранения коммерческой тайны не в полной мере публикуют некоторые особенности моделирования тех или иных объектов электроэнергетики, что может повлиять на корректность результатов исследований. В связи с этим необходима разработка адекватных средств, позволяющих с достаточной точностью моделировать ПП в цепях СТ различной сложности.

В настоящей работе принят следующий подход к составлению математических моделей. Вначале рассматривается модель однофазного трансформатора, при разработке которой устанавливаются базовые принципы моделирования и основные допущения. Далее путём усложнения моделируемых систем формируются модели трёхфазных СТ различной конфигурации, а также используются модели групп ТТ [47].

## **2.1 Модель броска тока намагничивания однофазного трансформатора**

Задача расчета переходных режимов трансформатора заключается в определении электрических параметров режима его работы на основе заданных параметров установленного оборудования и начальных условий, влияющих на динамику ПП. Для всех рассматриваемых моделируемых режимов исходными данными являются параметры электрической и магнитной цепи, а также начальные значения параметров режима. В результате расчёта необходимо

определить изменение во времени токов в обмотках и магнитных потоков в сердечнике.

Принципиальная схема моделируемого однофазного трансформатора, в соответствии с данными в [48] рекомендациями, представлена на рисунке 2.1.

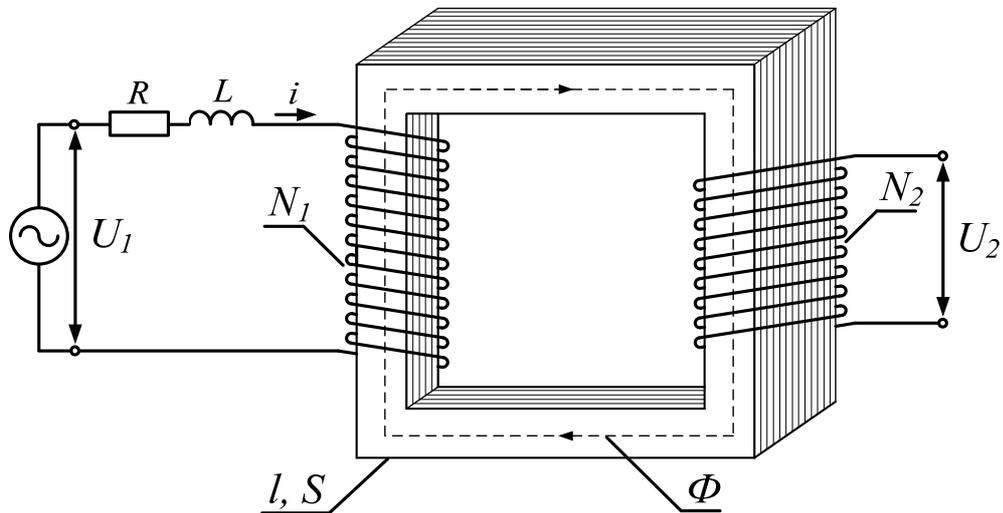


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема однофазного трансформатора на холостом ходу (вторичная обмотка разомкнута)

Обозначения, принятые на представленной схеме:  $U_1$  – напряжение на источнике переменной ЭДС;  $U_2$  – напряжение на вторичной обмотке;  $R$  – эквивалентное активное сопротивление системы и питающей линии;  $L$  – эквивалентная индуктивность системы, питающей линии и индуктивности, обусловленной потоком рассеяния моделируемого трансформатора;  $l$  – длина средней магнитной линии;  $S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода;  $N_1$  – число витков первичной обмотки;  $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  $i$  – ток намагничивания;  $\Phi$  – магнитный поток, замыкающийся внутри магнитопровода.

Процесс перемагничивания магнитопровода происходит по динамической петле гистерезиса, которая зависит не только от материала сердечника и конструктивного исполнения, но и от его предшествующего состояния. Поэтому строгое математическое описание процесса перемагничивания затруднительно. Учёт влияния явления гистерезиса при моделировании процессов, при которых

имеет место глубокое насыщение сердечников, не выполняется, а используется основная кривая намагничивания: при рассматриваемых глубоких насыщениях сердечника (максимальная напряжённость магнитного поля  $H_{\max}$  достигает более  $100H_c$ , где  $H_c$  – коэрцитивная сила материала сердечника) динамическая петля гистерезиса столь узка, что ею можно пренебречь. В этом случае зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля  $B=f(H)$  принимается однозначной, то есть расчёты допустимо выполнять, используя не петлю гистерезиса, а основную кривую намагничивания. В [48] указано, что при включении СТ на холостой ход максимальная напряжённость магнитного поля в магнитопроводе достигает 100000 А/м. Поскольку коэрцитивная сила современных электротехнических сталей составляет около 10 А/м, максимальные погрешности от неучёта явления гистерезиса значительно меньше 1 %. Это является достаточным основанием, чтобы при составлении математической модели СТ для исследования процессов при БТН пренебречь неоднозначностью кривой намагничивания. Ввиду малой продолжительности ПП при включении СТ также допустимо пренебречь активными потерями в стали сердечника. Ёмкостные токи между элементами обмоток (витки и катушки) и между обмотками и сердечником трансформатора в обычных условиях работы (при частотах  $f < 1000 \div 5000$  Гц) весьма малы, и ими также можно пренебречь [49]. Применяя второй закон Кирхгофа и закон полного тока для трансформатора, представленного на рисунке 2.1, получаем систему уравнений, описывающую процессы в однофазном трансформаторе:

$$\begin{cases} U_1 = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{dt}; \\ \frac{d\Psi}{dt} = \frac{dB}{dt} N_1 S; \\ \oint Hdl = N_1 i; \\ B = f(H), \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $U_1$  – напряжение источника питания;

$i$  – ток намагничивания;

$R$  – эквивалентное активное сопротивление системы и питающей линии;

$L$  – эквивалентная индуктивность системы, питающей линии и индуктивности, обусловленной потоком рассеяния;

$\Psi$  – потокосцепление первичной обмотки;

$H$  – напряжённость магнитного поля;

$dl$  – элемент длины средней магнитной линии сердечника, по которому берётся круговой интеграл;

$N_1$  – число витков первичной обмотки;

$B$  – магнитная индукция в магнитопроводе;

$S$  – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Для рассматриваемого магнитного сердечника второе уравнение в системе (2.1) можно записать так:

$$\oint Hdl = Hl = iN_1, \quad (2.2)$$

где  $l$  – длина средней магнитной линии магнитопровода.

Представим скорость изменения потокосцепления  $d\Psi/dt$  в следующем виде:

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (2.3)$$

где величина  $d\Psi/di$  является дифференциальной индуктивностью  $L_o$  [50].

Поскольку характеристика намагничивания стали обычно представляется как зависимость магнитной индукции  $B$  в магнитопроводе от напряжённости магнитного поля  $H$ , то, принимая во внимание, что  $\Psi = N_1BS$ , и учитывая уравнение (2.2), формулу для определения дифференциальной индуктивности можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\Psi}{di} = \frac{N_1^2 S}{l} \cdot \frac{dB}{dH}, \quad (2.4)$$

Вычисление дифференциальной индуктивности на каждом отдельном шаге расчёта производится путём численного дифференцирования характеристики намагничивания.

Поскольку при использовании пакета MATLAB, в котором решение дифференциальных уравнений осуществляется методами численного интегрирования, система уравнений должна быть представлена в форме Коши, то необходимо привести систему уравнений (2.1) в форму Коши с учётом зависимости (2.4).

В первом уравнении системы (2.1) переносим в левую часть слагаемое  $iR$ , характеризующее падение напряжения на активном сопротивлении, а скорость изменения магнитного потока в сердечнике представляем в форме дифференциальной индуктивности (2.4):

$$U - iR = L \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt} = (L + L_\sigma) \frac{di}{dt}; \quad (2.5)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - iR}{L + L_\sigma}. \quad (2.6)$$

Заменяя в первом уравнении системы (2.1) множитель  $\frac{di}{dt}$  на  $\frac{di}{dt} = \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt}$ ,

получаем скорость изменения во времени магнитной индукции:

$$U - iR = L \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi}{di} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{LSN}{L_\sigma} \cdot \frac{dB}{dt} + SN \frac{dB}{dt} = \left( \frac{LSN}{L_\sigma} + SN \right) \frac{dB}{dt}; \quad (2.7)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{U - iR}{\frac{LSN}{L_\sigma} + SN}. \quad (2.8)$$

Уравнения (2.6) и (2.8) являются искомой математической моделью 1-фазного трансформатора, и решение этих уравнений осуществляется численным интегрированием. В теоретических основах электротехники расчёт ПП посредством решения соответствующих дифференциальных уравнений путём их численного интегрирования известен как «метод последовательных интервалов» [50], при котором дифференциальные уравнения заменяются алгебраическими уравнениями, содержащими приращения исследуемых величин за соответствующие интервалы времени. В современных ЭВМ для интегрирования дифференциальных уравнений применяют методы Рунге-Кутты, поскольку они обладают достаточной вычислительной мощностью для нахождения решения с необходимой точностью.

При выполнении расчётов для достижения необходимой точности рекомендуется использовать характеристики намагничивания, полученные экспериментально. При моделировании принято, что магнитный сердечник выполнен из трансформаторной стали Э330А, характеристика намагничивания которой, полученная по экспериментальным данным [51, 52], приведена в таблице 2.1.

Для воспроизведения ПП в СТ необходима информация о значениях  $B$  для любого значения  $H$ . Для получения значений основной кривой намагничивания в каждой точке использована Эрмитова кусочно-линейная интерполяция, приемлемые результаты также даёт интерполяция кубическими сплайнами.

Таблица 2.1 – Характеристики основной кривой намагничивания электротехнической стали Э330А

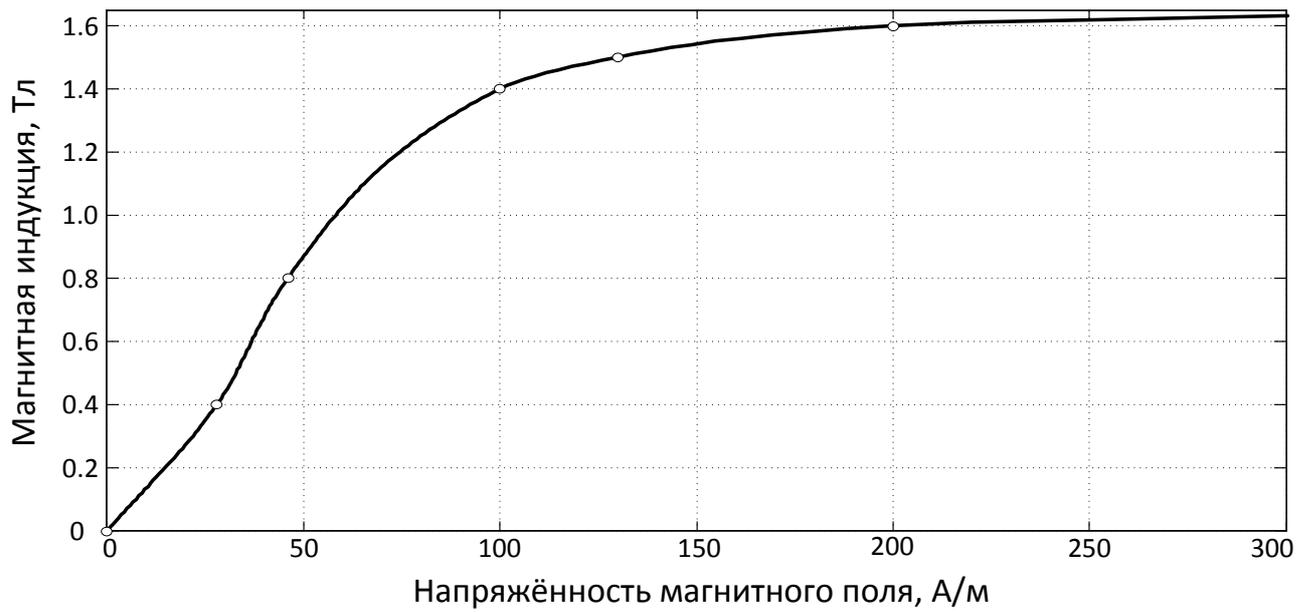
Магнитная индукция $B$ , Тл	0,0	0,4	0,8	1,4	1,5	1,6	1,7
Напряжённость магнитного поля $H$ , А/м	0	28	46	100	130	200	800

Магнитная индукция $B$ , Тл	1,85	1,9	1,95	2,0
Напряжённость магнитного поля $H$ , А/м	2500	5000	10000	30000

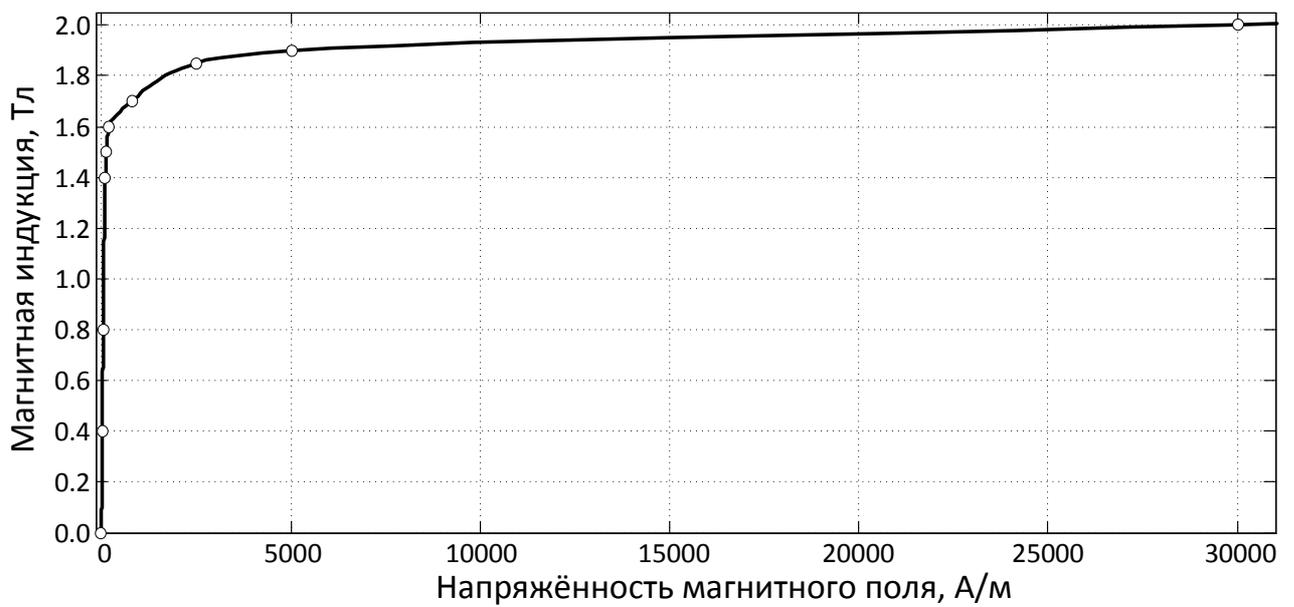
Для выполнения интерполяции использовались возможности программного пакета MATLAB. Имея определённые значения  $B$  для любого значения  $H$ , программа-расчётчик получает значение  $dB/dH$  и  $L_{\partial}$  на каждом шаге расчёта ПП. Используя большее количество экспериментальных точек  $B(H)$ , можно повысить точность интерполяции.

Использование дифференциальной индуктивности, пренебрежение неоднозначностью характеристики намагничивания (гистерезисной петлём) и совместное решение уравнений (2.6) и (2.8) позволяет в качестве начального условия задавать остаточную намагниченность сердечника  $B_r$ . Это связано с тем, что программа, входящая в пакет MATLAB и выполняющая решение дифференциальных уравнений, «припасовывает» приращения магнитной индукции и тока, полученные на текущем этапе вычисления, к их начальным значениям (в момент времени  $t = 0$ ). При этом, как следует из уравнений (2.6) и (2.8), величина приращения на каждом этапе расчётов зависит от величины дифференциальной индуктивности  $L_{\partial}$ , которая в свою очередь зависит только от производной характеристики намагничивания при текущем значении магнитной индукции  $B$ . Это позволяет задавать ненулевую индукцию при нулевом значении тока, что позволяет исследовать процессы при различных значениях остаточной индукции в сердечниках.

Учёт остаточной индукции возможен только *при совместном решении уравнений* (2.6) и (2.8). Так, например, возможно, отдельно решая уравнение (2.8), найти зависимость изменения во времени магнитной индукции в магнитопроводе, а затем по кривой намагничивания найти соответствующие токи намагничивания для каждого отдельного значения индукции (пример такого решения приведён в [50]).



а)



б)

Рисунок 2.2 – Основная кривая намагничивания стали Э330А, полученная в результате интерполяции: а) на интервале изменения напряжённости магнитного поля от 0 до 300 А/м; б) на интервале изменения напряжённости магнитного поля от 0 до 30000 А/м

Но в таком случае, если использовать обычную основную характеристику намагничивания, нулевое значение тока всегда соответствует нулевому значению

индукции, а ненулевое значение  $B$  в момент времени  $t = 0$  означает, что в цепи протекал ток до включения выключателя.

Возможен также учёт остаточной индукции путём использования спрямлённой характеристики намагничивания, однако это приводит к возникновению погрешностей в установившихся режимах [48].

## 2.2 Моделирование броска тока намагничивания трёхфазных силовых трансформаторов

На базе рассмотренных понятий и методов моделирования однофазных трансформаторов выполняется моделирование более сложных систем 3-фазных СТ. В энергосистемах применяются как трёхфазные трёхстержневые СТ, так и группы однофазных СТ, имеющие различное исполнение магнитопроводов. Поэтому задачу математического моделирования для каждого вида указанных СТ необходимо рассматривать отдельно.

Особенностью моделирования трёхстержневого трансформатора является сложность учёта магнитных потоков  $\Phi_3$ , создаваемых третьими гармоническими составляющими токов намагничивания. В трёхстержневых трансформаторах магнитные потоки нулевой последовательности не могут замыкаться внутри магнитопровода. Магнитные потоки  $\Phi_3$  замыкаются от одного ярма к другому через неферромагнитную среду (трансформаторное масло или воздух), а также через крепёжные детали и стенки бака трансформатора, что приводит к уменьшению величины потоков  $\Phi_3$  по сравнению с трансформаторами других типов (рисунок 2.3, в). В трёхфазной же группе однофазных трансформаторов или трёхфазных трансформаторах с сердечником броневое типа потоки  $\Phi_3$  замыкаются по замкнутому ферромагнитному сердечнику (рисунок 2.3, а, б) [50].

При моделировании эта особенность трёхстержневых трансформаторов учитывается введением дополнительного магнитного сопротивления в схему замещения магнитной цепи (рисунок 2.4) [48, 53]. На рисунке 2.4 приняты следующие обозначения:  $F_A, F_B, F_C$  – магнитодвижущие силы в стержнях фаз А, В и С соответственно;  $\Phi_A, \Phi_B, \Phi_C, \Phi_0$  – магнитные потоки в стержнях фаз А, В, С и

вне сердечника соответственно;  $R_{mA}$ ,  $R_{mB}$ ,  $R_{mC}$ ,  $R_{m0}$  – магнитные сопротивления стержней фаз  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и вне сердечника соответственно.



Рисунок 2.3 – Пути замыкания третьих гармоник магнитного потока в 3-фазных трансформаторах: *а)* в группе однофазных трансформаторах; *б)* в трехфазном трансформаторе броневого типа; *в)* в трехстержневом трансформаторе

Моделирование групп однофазных трансформаторов является более простой задачей, поскольку магнитные потоки разных фаз магнитной системы не влияют друг на друга.

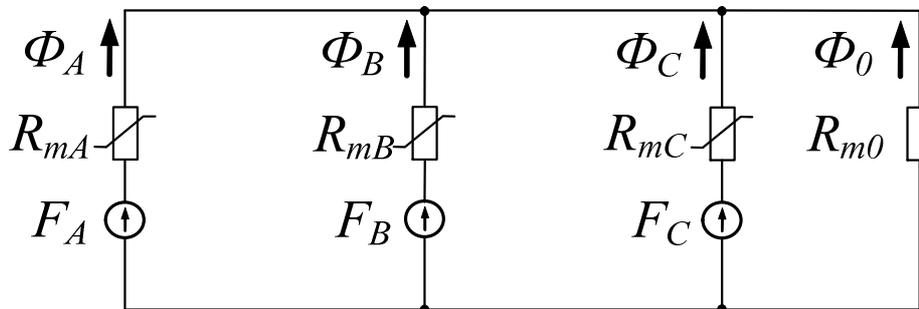


Рисунок 2.4 – Схема замещения магнитной цепи трёхстержневого трансформатора, в которой учтено прохождение магнитного потока вне магнитопровода

Для удобства рассмотрения вместо дифференциальной индуктивности для решения данной задачи вводим другую величину. Принимаем в выражении для магнитного сопротивления участка цепи  $R_m = \frac{l}{\mu\mu_0 S}$  абсолютную магнитную проницаемость  $\mu\mu_0$  равной для каждого текущего значения производной от магнитной индукции  $B$  по напряжённости магнитного поля в стержне

$\mu\mu_0 = dB / dH$ . Таким образом, вводится *дифференциальная абсолютная магнитная проницаемость* [50], связанная с дифференциальной индуктивностью и отличающаяся от неё постоянным коэффициентом (см. уравнение (2.3)).

Для определения магнитного сопротивления потоку рассеяния  $\Phi_0$  в необходимо использовать такие параметры, как средняя длина магнитной линии  $l$  и площадь поперечного сечения магнитопровода  $S$ , непосредственное определение которых не всегда возможно. Поэтому величина  $R_{m0}$  с целью упрощения расчётов целесообразно задаваться такой постоянной величиной, при которой расчёты на модели наиболее точно соответствуют результатам натуральных экспериментов [53].

Для численного решения составленных систем уравнений с использованием пакета *MATLAB* их необходимо представить в форме Коши. Это можно осуществить, полагая неизвестными величины, стоящие под знаком производной. Тогда одним из методов исключения неизвестных (например, методом Жордана-Гаусса) можно представить все интересующие нас переменные, описывающие процессы в исследуемом трансформаторе, в форме Коши (поскольку для системы дифференциальных уравнений, содержащей большое число неизвестных, ручной счёт слишком трудоёмок, то для решения задачи приведения системы к форме Коши целесообразно использовать символьный процессор, имеющийся в составе пакета *MATLAB*) [54]. Получаемый результат этого представления оказывается слишком громоздок, и потому не приводится в тексте работы.

Типичный пример включения СТ на холостой ход – это включение высоковольтной линии с ненагруженным СТ на противоположном конце. При этом, как правило, необходимо учитывать не только взаимную индуктивность между фазами линии, но и то, что обмотка стороны низшего напряжения СТ соединена по схеме «треугольник». Даже при отключенной вторичной нагрузке цепь «треугольника» не размыкается, что обеспечивает компенсацию магнитных потоков третьей гармоники. Благодаря этому магнитные потоки, ЭДС и напряжения фаз подвергаются меньшему искажению [49].

При составлении модели считаем, что стержням магнитопровода  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответствуют одноимённые фазы линии; числа витков обмоток на всех стержнях стороны ВН одинаковы и равны  $W_y$ , а на стороне НН соответственно числа витков равны  $W_d$ . На рисунке 2.5 приведена схема рассматриваемого трансформатора, на которой приняты следующие обозначения:  $e_A, e_B, e_C$  – эквивалентные фазные ЭДС;  $R$  – эквивалентное активное сопротивление системы, питающей линии и обмоток трансформатора;  $R_d$  – активное сопротивление вторичной обмотки, соединённой в «треугольник»;  $L$  – суммарная эквивалентная индуктивность рассеяния системы, питающей линии и СТ;  $M_c$  – взаимная индуктивность фаз прилегающей сети;  $R_N$  – активное сопротивление заземления;  $W_y$  – число витков первичной обмотки, соединённой в «звезду»;  $W_d$  – число витков вторичной обмотки, соединённой в «треугольник».

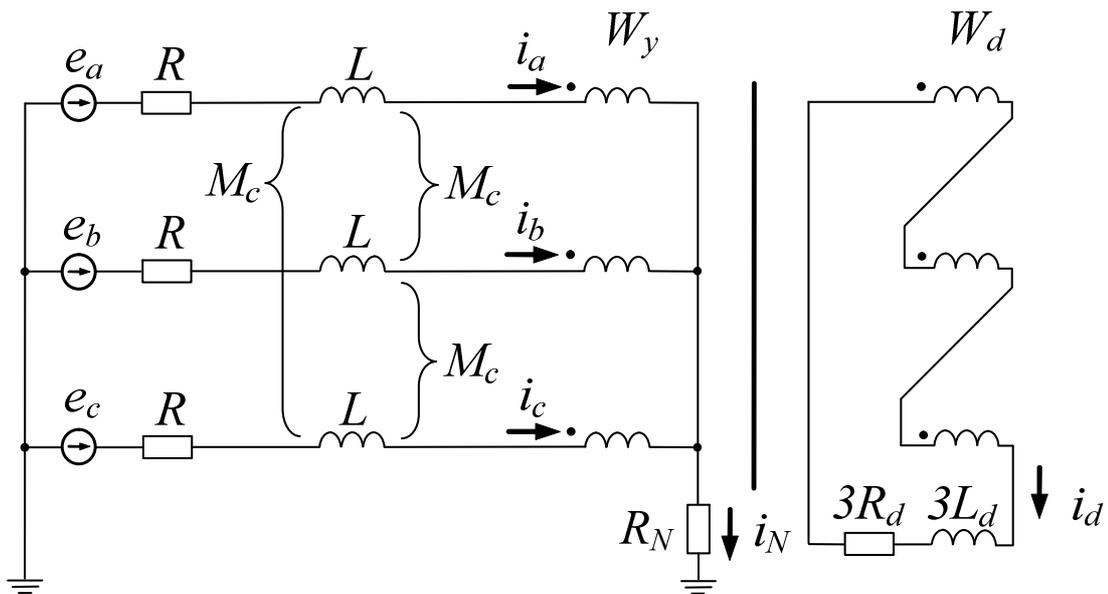


Рисунок 2.5 – Схема замещения электрических цепей СТ

Составляем математическую модель для группы однофазных трансформаторов. Система уравнений электрической цепи одинакова для любых видов рассматриваемых СТ (группы однофазных и трёхфазного трёхстержневого) [48]:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y \frac{d\Phi_A}{dt} + i_N R_N; \\ e_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + S W_y \frac{d\Phi_B}{dt} + i_N R_N; \\ e_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + S W_y \frac{d\Phi_C}{dt} + i_N R_N; \\ W_d \left( \frac{d\Phi_A}{dt} + \frac{d\Phi_B}{dt} + \frac{d\Phi_C}{dt} \right) + 3 \cdot i_d R_d + 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt} = 0; \\ i_N = i_a + i_b + i_c. \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Перепишем систему (2.9), выражая магнитные потоки в фазах  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (соответственно  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_C$ ) через соответствующие значения магнитной индукции ( $B_A$ ,  $B_B$ ,  $B_C$ ) в магнитопроводах трансформаторной группы:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_a = i_a R + L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_A}{dt} + i_N R_N; \\ e_b = i_b R + L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_B}{dt} + i_N R_N; \\ e_c = i_c R + L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + W_y S \frac{dB_C}{dt} + i_N R_N; \\ W_d S \frac{dB_A}{dt} + W_d S \frac{dB_B}{dt} + W_d S \frac{dB_C}{dt} + 3 \cdot i_d R_d + 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt} = 0; \\ i_N = i_a + i_b + i_c. \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Для удобства записи переносим в правую часть все слагаемые, не стоящие под знаком производной и выражаем ток в нейтрали как сумму фазных токов:

$$\begin{cases} e_a - i_a R - (i_a + i_b + i_c)R_N = L \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_A}{dt}; \\ e_b - i_b R - (i_a + i_b + i_c)R_N = L \frac{di_b}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_c}{dt} + W_y S \frac{dB_B}{dt}; \\ e_c - i_c R - (i_a + i_b + i_c)R_N = L \frac{di_c}{dt} + M_c \frac{di_a}{dt} + M_c \frac{di_b}{dt} + W_y S \frac{dB_C}{dt}; \\ 3 \cdot i_d R_d = -W_d S \frac{dB_A}{dt} - W_d S \frac{dB_B}{dt} - W_d S \frac{dB_C}{dt} - 3 \cdot L_d \frac{di_d}{dt}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Система уравнений для магнитной цепи усложняется за счёт наличия токов в обмотке, соединённой в «треугольник». Применяя законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей [50], выражаем связь между токами на разных сторонах трансформатора и магнитными потоками в каждом из трёх магнитопроводов. Согласно принятым на рисунке 2.5 обозначениям, магнитные потоки, создаваемые токами на стороне ВН и в «треугольнике», суммируются, поэтому

$$\begin{cases} W_y S \frac{dB_A}{dt} = W_y S \frac{dB_A}{dH_A} \frac{dH_A}{dt} = \mu_{\partial A} W_y S \frac{dH_A}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_B}{dt} = W_y S \frac{dB_B}{dH_B} \frac{dH_B}{dt} = \mu_{\partial B} W_y S \frac{dH_B}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_C}{dt} = W_y S \frac{dB_C}{dH_C} \frac{dH_C}{dt} = \mu_{\partial C} W_y S \frac{dH_C}{dt}, \end{cases} \quad (2.12)$$

где  $\mu_{\partial A}$ ,  $\mu_{\partial B}$ ,  $\mu_{\partial C}$  – дифференциальная магнитная проницаемость магнитопроводов фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ ;

$H_A$ ,  $H_B$ ,  $H_C$  – напряжённость магнитного поля в магнитопроводах фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

Применяя закон полного тока и дифференцируя полученный результат, получаем связь между  $dH_A$ ,  $dH_B$ ,  $dH_C$  и  $di_A$ ,  $di_B$ ,  $di_C$ ,  $di_d$ . Согласно принятым на рисунке 2.5 обозначениям и в соответствии с особенностью конструкции магнитопровода (см. схему замещения магнитной цепи на рисунке 2.6,  $a$ ), магнитные потоки, создаваемые токами на стороне ВН и в «треугольнике», суммируются, поэтому:

$$\left\{ \begin{array}{l} dH_A = \frac{di_a W_y + di_d W_d}{l_A}; \\ dH_B = \frac{di_b W_y + di_d W_d}{l_B}; \\ dH_C = \frac{di_c W_y + di_d W_d}{l_C}, \end{array} \right. \quad (2.13)$$

где  $l_A, l_B, l_C$  – длина магнитопровода одноимённой фазы.

Подставляя (2.13) в (2.12), получаем

$$\left\{ \begin{array}{l} W_y S \frac{dB_A}{dt} = \frac{\mu_{oA} W_y S}{l_A} \cdot \frac{di_a W_y + di_d W_d}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_B}{dt} = \frac{\mu_{oB} W_y S}{l_B} \cdot \frac{di_b W_y + di_d W_d}{dt}; \\ W_y S \frac{dB_C}{dt} = \frac{\mu_{oC} W_y S}{l_C} \cdot \frac{di_c W_y + di_d W_d}{dt}. \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Системы уравнений (2.11) и (2.14) полностью описывают ПП в группе однофазных трансформаторов. Покажем, что уравнение (2.14) можно получить, применяя законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей [50], заменяя токи, магнитные потоки и индукции их производными по времени, а абсолютную магнитную проницаемость – дифференциальной абсолютной магнитной проницаемостью. Для этого выразим связь между токами на разных сторонах трансформатора и магнитными индукциями в каждом из трёх магнитопроводов. Согласно принятым на рисунке 2.5 обозначениям, магнитные потоки, создаваемые токами на стороне ВН и в «треугольнике», должны суммироваться, поэтому

$$\left\{ \begin{array}{l} W_y \frac{di_a}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A} S} \frac{d\Phi_A}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt}; \\ W_y \frac{di_b}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B} S} \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt}; \\ W_y \frac{di_c}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C} S} \frac{d\Phi_C}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt}. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Значения  $dB/dt$  для разных фаз после элементарных преобразований получаются такими же, как в (2.14), поэтому в дальнейшем используются законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей при определении связей между токами и магнитными индукциями в магнитопроводах.

Рассмотрим модель для трёхстержневого СТ. Как говорилось выше, система уравнений электрической цепи одинакова для любых исполнений магнитопроводов СТ (см. систему уравнений (2.11)). Схема замещения магнитной цепи трёхстержневого трансформатора приведена на рисунке 2.6, б. Система уравнений, описывающая магнитную цепь трёхстержневого трансформатора [48]:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_y \frac{di_a}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_b}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_c}{dt} + W_d \frac{di_d}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ S \frac{dB_A}{dt} + S \frac{dB_B}{dt} + S \frac{dB_C}{dt} + \frac{d\Phi_0}{dt} = 0. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Системы (2.11) и (2.16) позволяют исследовать переходные процессы в трёхфазном трёхстержневом СТ.

Аналогичным образом составляется модель СТ для исследования БТН при подключенной нагрузке. Описание этой математической модели приведено в приложении А.

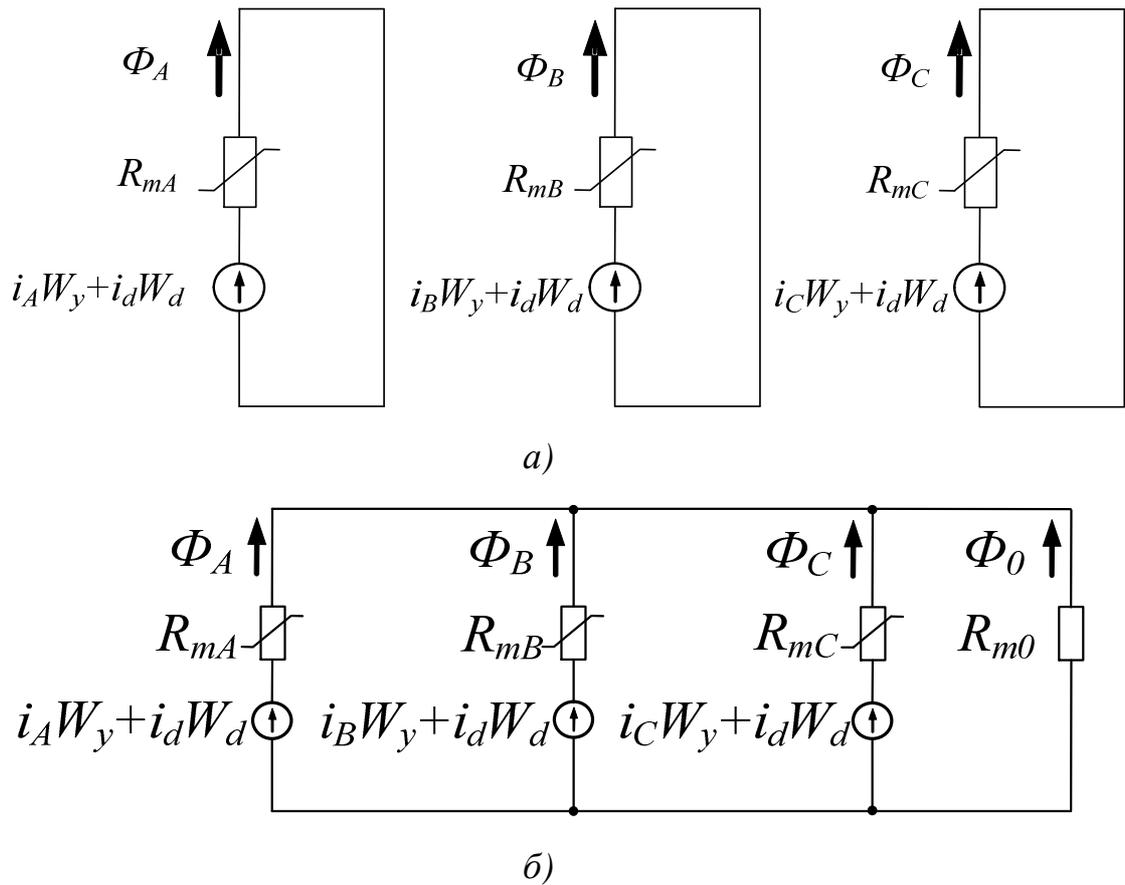


Рисунок 2.6 – Схема замещения магнитной системы трёхфазного трансформатора при наличии обмотки, соединённой в «треугольник»: а) группы однофазных трансформаторов; б) трёхстержневого трансформатора

### 2.3 Моделирование внешних и внутренних коротких замыканий

При моделировании внешних и внутренних КЗ допустимо пренебрегать нелинейностью ветви намагничивания в схеме замещения СТ. Поэтому задача моделирования ПП в этих режимах существенно облегается. В связи с этим целесообразно использовать средства моделирования, доступные в большинстве инженерных программных пакетов. Моделирование внешних и внутренних КЗ выполнено в программном пакете Simulink [54], структурная схема модели представлена на рисунке 2.7. Модель трансформатора с 11-й группой соединения обмоток выполнена с помощью элемента Three-Phase Transformer (Two Windings), синхронный генератор и энергосистема – с помощью элементов Three-Phase

Source. При моделировании внешних КЗ вне зоны защиты СТ использованы блоки «Авария1» и «Авария4», для моделирования КЗ внутри зоны – блоки «Авария2» и «Авария3» (элементы «Three-Phase Fault»), определение токов, протекающих от энергосистемы и от генератора, производится соответственно с помощью измерительных блоков «M1» и «M2» (элементы «Three-Phase VI Measurement»), подключенных к элементам типа Scope.

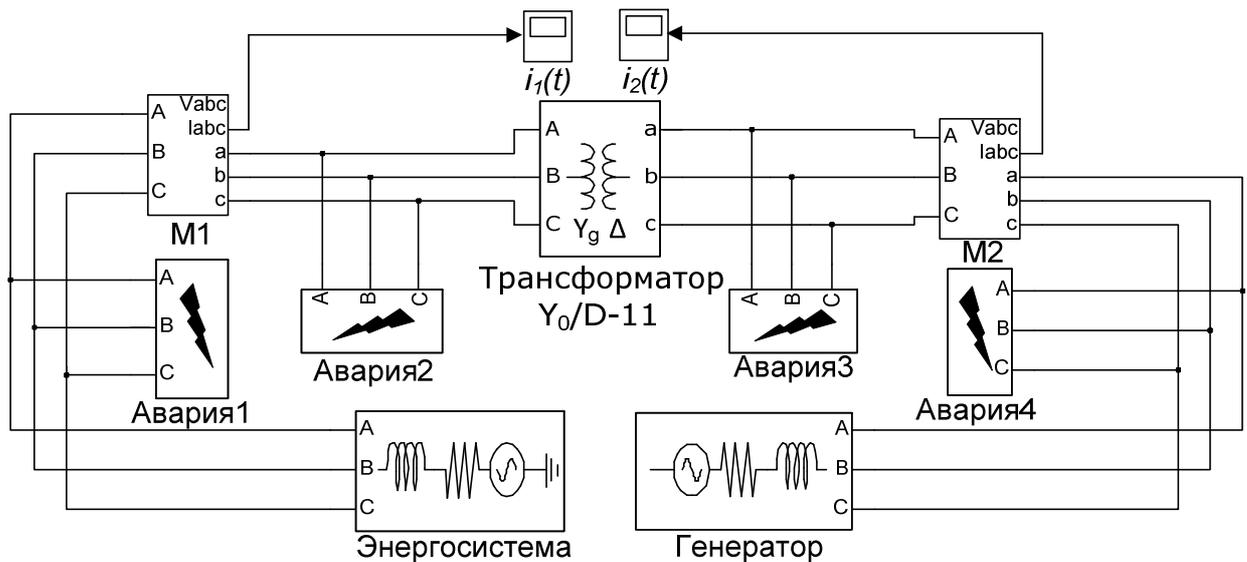


Рисунок 2.7 – Структурная схема математической модели в программном пакете Simulink для задания режимов внешних и внутренних КЗ

## 2.4 Модель группы трансформаторов тока

Одной из особенностей выполнения ДЗ на микропроцессорной элементной базе является отсутствие общей нагрузки на группы ТТ, формирующие плечи защиты. Измерительные ТТ, расположенные на сторонах смежных напряжений СТ (независимо от группы соединений обмоток последнего), могут быть соединены по одинаковой схеме, а дифференциальный ток, компенсация  $3I_0$  и фазового сдвига сигналов при этом осуществляются программным путём в устройстве защиты [15]. На практике применяют включение ТТ как по схеме «полной звезды», так и по схеме «треугольника» [14]. Указанные особенности необходимо учитывать при составлении математической модели групп ТТ. Для

анализа ПП в цепях ДЗ используется математическая модель группы ТТ, разработанная на кафедре «Электрические станции» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Полное описание модели приведено в [47]. На рисунках 2.8 и 2.9 приведены электрические схемы замещения группы ТТ, соединённых соответственно по схеме «полная звезда» и «треугольник», с указанием положительных направлений токов. Характеристики намагничивания стали магнитопроводов учтены с помощью нелинейных индуктивных сопротивлений ветвей намагничивания.

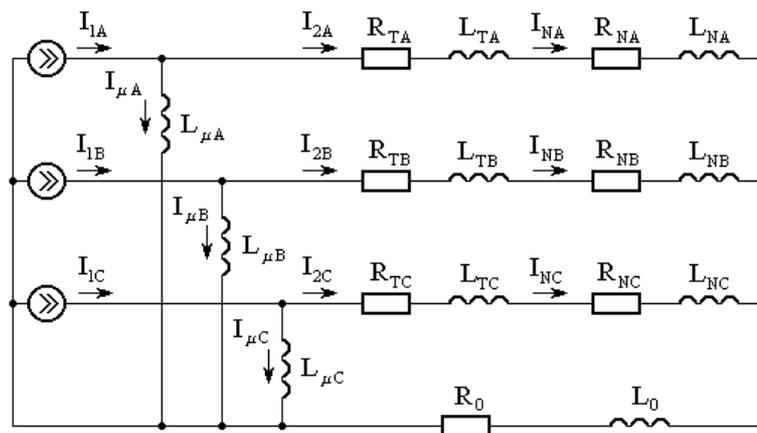


Рисунок 2.8 – Схема замещения электрической цепи группы ТТ, соединённой по схеме «полная звезда»

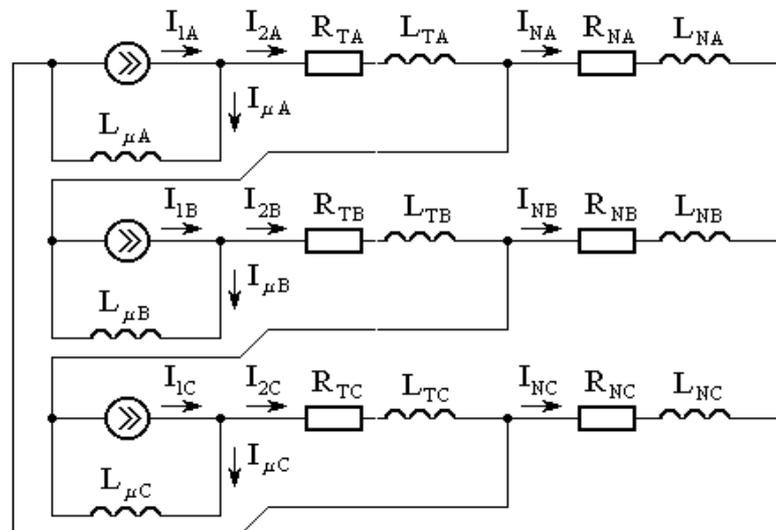


Рисунок 2.9 – Схема замещения электрической цепи группы ТТ, соединённой по схеме «треугольник»

Обозначения, принятые на обеих схемах:  $I_{1j}$  – первичный ток ТТ, приведенный ко вторичной стороне;  $I_{\mu j}$  – ток намагничивания ТТ;  $I_{2j}$  – вторичный ток ТТ;  $R_{Tj}$  – активное сопротивление вторичной обмотки ТТ;  $L_{Tj}$  – индуктивность вторичной обмотки ТТ;  $R_{Nj}$  – активное сопротивление нагрузки фазы;  $L_{Nj}$  – индуктивность нагрузки фазы;  $R_0$  – активное сопротивление в нулевом проводе;  $L_0$  – индуктивность в нулевом проводе;  $j = A, B, C$ .

## 2.5 Расчёт численных параметров моделей

Следующим важным этапом моделирования является определение численных значений параметров электрических и магнитных цепей составленных моделей.

Определение численных значений параметров некоторых моделей не вызывает затруднений. Так, численные значения параметров модели группы ТТ определены по справочным данным [19]. При моделировании КЗ параметры СТ и иных элементов энергосистемы определены по справочным данным [55]. Характеристика намагничивания стали магнитопроводов силовых и измерительных трансформаторов принята соответствующей одноимённой характеристике, приведенной на рисунке 2.2.

В справочной литературе отсутствуют данные по электрическим параметрам обмоток ВН и НН трёхфазных СТ, которые необходимы для определения параметров, необходимых для моделирования БТН, поэтому следует определять их непосредственно по доступным справочным или паспортным данным моделируемого оборудования [51]. Расчёт численных значений параметров модели СТ приведён в приложении Б.

## 2.6 Оценка адекватности разработанных моделей броска тока намагничивания

Математические модели СТ в режиме БТН отличаются большой сложностью вследствие необходимости учитывать нелинейные характеристики намагничивания стержней магнитопровода, поэтому проверке корректности

воспроизведения ПП необходимо уделить достаточное внимание. Корректность описания процессов, происходящих в реальном СТ, с помощью составленных моделей можно оценить, сравнивая осциллограммы токов включения, полученные опытным путём при включении реальных трансформаторов и в результате моделирования. Характерные кривые токов включения реальных СТ приводятся в работах [2, 7, 11, 33, 56] и представлены ниже.

### 2.6.1 Оценка адекватности воспроизведения броска тока намагничивания в однофазном трансформаторе

На рисунке 2.10 изображена осциллограмма токов включения однофазного трансформатора [11, 56]. На рисунке 2.11 приведена осциллограмма тока включения однофазного трансформатора, полученная в результате решения уравнений ПП численными методами.

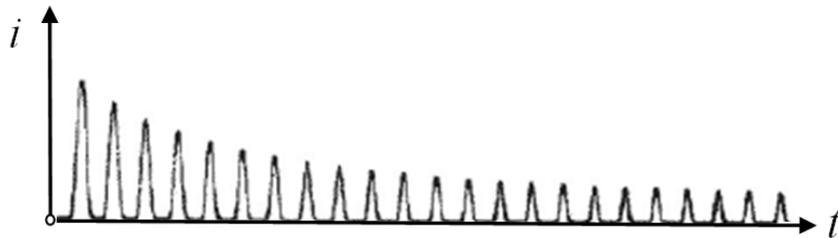


Рисунок 2.10 – Осциллограмма тока при БТН в однофазном трансформаторе

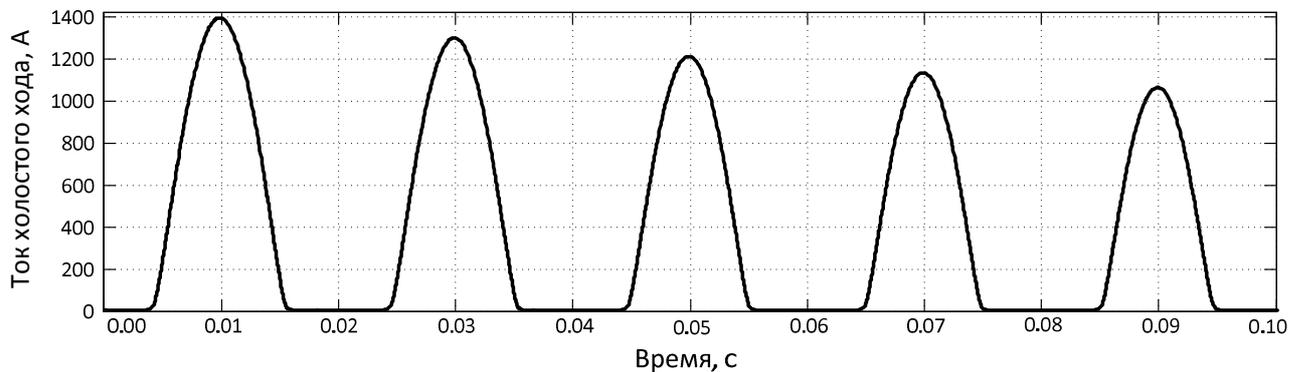


Рисунок 2.11 – Осциллограмма тока включения однофазного трансформатора, полученная в результате численного интегрирования системы уравнений ПП в однофазном трансформаторе

Порядок определения численных значений параметров модели описан в приложении Б. Как видно из рисунка, полученный ток включения совпадает по форме с характерным током включения однофазного трансформатора, приведенным на рисунке 2.10.

### **2.6.2 Оценка адекватности моделирования броска тока намагничивания трёхфазного трансформатора**

На рисунках 2.12, *а* и 2.12, *б* изображены осциллограммы соответственно БТН I и II типа (по классификации [2]), возникающих при включении трёхфазного СТ [2, 7], на рисунке 2.13 показана осциллограмма трёхфазного БТН, полученная при включении под напряжение реального СТ [33].

Результаты моделирования приведены на рисунках 2.14, 2.15, 2.16. При моделировании БТН в трёхфазном СТ использовались рассчитанные в приложении Б параметры СТ типа ТРДН-25000/110. Решение системы дифференциальных уравнений в программной среде MATLAB осуществляется с помощью функции ode23t (метод трапеций с интерполяцией).

Оценим максимальную амплитуду БТН для рассматриваемого трёхфазного СТ и сравним её со значением, полученным в результате моделирования. В соответствии с [2, 7], максимальную амплитуду тока включения трёхфазного СТ можно найти по формуле:

$$i_{\text{макс}^*} = \frac{U_*}{k_n x_*} (1 + A_m), \quad (2.17)$$

где значение слагаемого  $A_m$  рекомендуется принимать равным 0,39 [57];

$k_n > 1$  – коэффициент «помогающего эффекта»;

$U_*$ ,  $x_*$  – соответственно расчётные напряжение и индуктивное сопротивление, приведённые к номинальным параметрам СТ.

В соответствии с [57], различаются трёхфазное и однофазное включение СТ. В первом случае подразумевается, что замыкание контактов всех фаз

выключателя, посредством которого СТ связывается с питающей энергосистемой, происходит одновременно. Во втором случае подразумевается, что включается только одна из трёх фаз, при этом контакты остальных фаз ещё не успели замкнуться и образовать электрическую цепь. В соответствии с рекомендациями [2] и данными [57], минимальное значение  $x_*$  при трёхфазном включении СТ со стороны 110 кВ и выше можно принимать равным 0,25. Значение  $k_n$  численно равно отношению эквивалентных индуктивных сопротивлений однофазного  $x^{(1)}$  и трехфазного  $x^{(3)}$  включения СТ [58]:

$$k_n = \frac{x^{(3)}}{x^{(1)}}. \quad (2.18)$$

Таким образом, коэффициент  $k_n$  показывает, во сколько раз максимальное значение  $i_{БТН}$  при трёхфазном включении меньше, чем при однофазном, а формула (2.26) без этого коэффициента применяется для оценки пикового значения тока включения однофазного трансформатора или в случае однофазного включения трёхфазного СТ. На основании данных о  $x^{(3)}$  и  $x^{(1)}$ , приведённых в [57], принимаем среднее значение  $k_n$  равным 1,3 для СТ с ВН 110 кВ. При значении номинального напряжения стороны ВН рассматриваемого СТ 115 кВ и мощности 25 МВА получаем в именованных единицах при подаче номинального напряжения

$$x = x_* \frac{U_{номВН}^2}{S_T} = 0,25 \frac{115^2}{25} = 132,25 \text{ Ом}, \quad (2.19)$$

отсюда

$$i_{\max} = \frac{\sqrt{2}U_{номВН}}{k_n \sqrt{3}x} (1 + A_m) = \frac{\sqrt{2} \cdot 115 \cdot 10^3}{1,3\sqrt{3} \cdot 132,25} (1 + 0,39) = 756,91 \text{ А}. \quad (2.20)$$

При моделировании 3-фазных БТН принимаем нулевые значения параметров  $R_c$ ,  $L_c$ ,  $R_N = 0,05$  Ом, значение остаточной индукции в стержнях магнитопровода –  $B_r = 1,4$  Тл. Допущение о столь большом значении  $B_r$  позволяет получить предельные значения отношений пикового значения тока включения к номинальному току трансформатора  $i_{БТН} / \sqrt{2} I_{номВН}$ . На практике остаточная индукция обычно имеет меньшее значение за счёт размагничивания сердечника СТ в ходе ПП, возникающих при отключении СТ от источника питания [2]. Линейное напряжение питающей сети принято равным 115 кВ (то есть амплитудные значения фазных ЭДС равны  $e_A = e_B = e_C = 115\sqrt{2} / \sqrt{3}$  кВ). Для упрощения расчётов здесь и далее принято равным нулю значение параметра  $M_c$ , характеризующего индуктивную связь между проводниками ЛЭП.

Ввиду отсутствия точного значения параметра  $R_{m0}$  первоначальное моделирование целесообразно выполнить для группы однофазных СТ. Для этого предположим, что магнитопровод рассмотренного выше СТ типа ТРДН-25000/110, для которого известны численные параметры, выполнен в виде группы однофазных СТ (длина средней магнитной линии магнитопроводов всех фаз принята одинаковой). Качественные отличия в характере БТН в СТ различной конструкции магнитопровода рассмотрены ниже.

Осциллограммы трёхфазных БТН, полученные при моделировании СТ типа ТРДН-25000/110, совпадают по форме с приведёнными в [2, 7, 33], а максимальное значение тока включения при БТН II типа в особой фазе составляет около 788 А (рисунок 2.15), то есть амплитудная погрешность воспроизведения БТН составила около 4% (см. выражение (2.20)). Однако в целях настоящего исследования большее внимание следует уделить форме осциллограммы БТН, так как именно характер изменения мгновенных значений тока позволяет идентифицировать режим работы силового оборудования. В соответствии с [2], амплитудное значение  $i_{БТН}$  БТН I типа в особой фазе составляет приблизительно от одной трети до половины значения  $i_{БТН}$  в других фазах (большие значения  $i_{БТН}$  в особой фазе получаются при меньшем значении  $R_{HH}$ ,  $L_d$ ), что согласуется с

экспериментальными данными. Наименьшая бестоковая пауза БТН составляет порядка 5,3 мс [2], что также согласуется с результатами эксперимента. Большие значения бестоковых пауз, наблюдаемые в реальных условиях в результате размагничивания сердечника СТ [2], можно получить, уменьшая модуль значения остаточной намагниченности стержней сердечника СТ, см. далее рис.3.14-3.16 (в опытах, представленных в настоящей главе, остаточная намагниченность принята несколько выше этих значений).

Совпадение опытных данных и теоретических расчётов с результатами моделирования свидетельствует о достаточной точности воспроизведения ПП в СТ, а также о применимости разработанных моделей для изучения БТН в цепях других СТ, имеющих подобную конфигурацию магнитной и электрической цепей.

Рассмотрим отличия в характере БТН в трёхфазных СТ различной конструкции. При моделировании БТН в трёхстержневых СТ необходимо учитывать значение  $R_{m0}$ . В [49] указано, что для 3-фазных 3-стержневых трансформаторов, как правило, сопротивление намагничивания нулевой последовательности в 7-15 раз превосходит значение сопротивления короткого замыкания  $Z_K$ .

Для определения магнитного сопротивления нулевой последовательности трансформатора ТРДН-25000/110 обмотка НН, соединённая по схеме «треугольник», переводится в разомкнутое состояние (в математической модели это условие обеспечивается увеличением значения параметра  $R_d$  на несколько порядков), а значения  $L_c$  и  $R_c$ , также как  $L_{p.ВН}$ ,  $R_{ВН}$  и  $R_N$  принимаются равными нулю. Таким образом, с Т-образной схеме замещения СТ сопротивление намагничивания остаётся единственным параметром. После этого на СТ в режиме холостого хода подаётся система напряжений нулевой последовательности (амплитудные значения напряжений принимаются такими, чтобы не вызывать насыщения стержней магнитопровода).

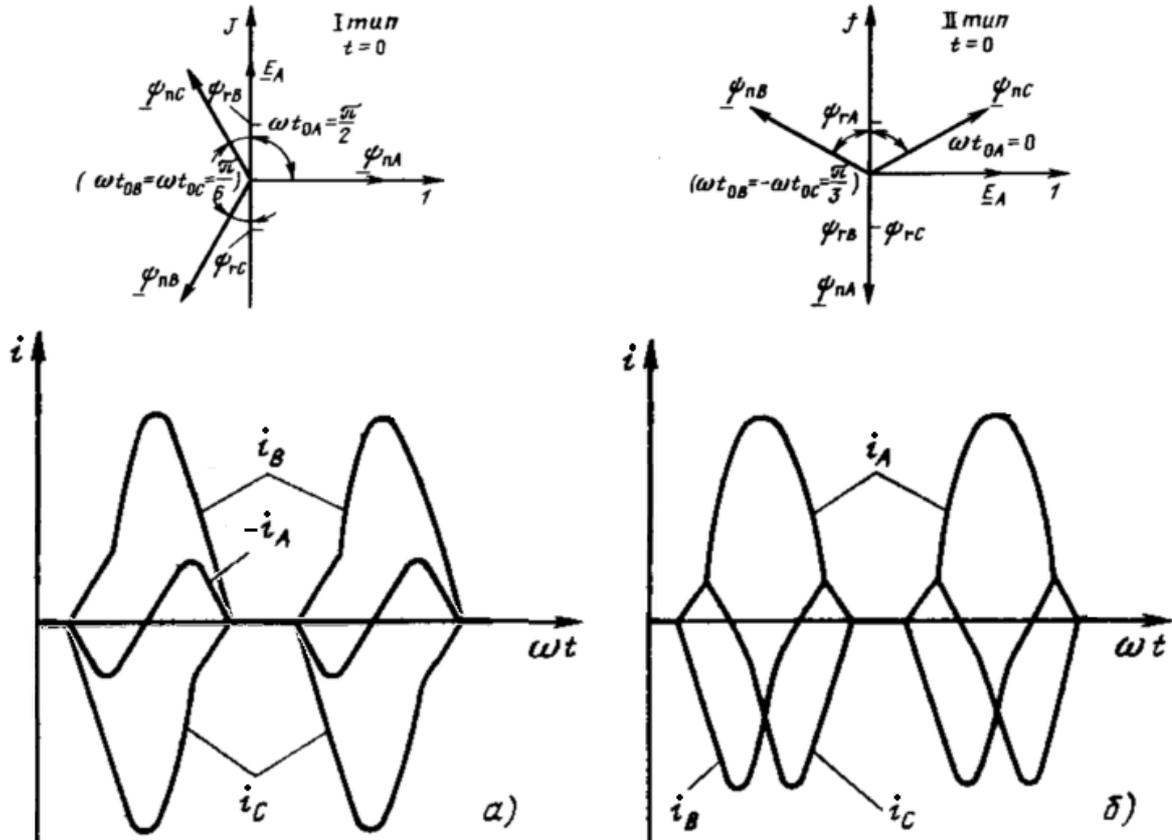


Рисунок 2.12 – Типовые БТН при включении трансформатора на холостой ход (схема соединения обмоток – «звезда-треугольник») и условия их возникновения.

На рисунке обозначены  $i_a, i_b, i_c$  – токи в фазах  $A, B, C$ ;  $E_A$  – вектор ЭДС фазы  $A$ ;  $\Psi_{rA}, \Psi_{rB}, \Psi_{rC}$  – остаточные потокосцепления в стержнях фаз магнитопровода;  $\underline{\Psi}_{nA}, \underline{\Psi}_{nB}, \underline{\Psi}_{nC}$  – векторы периодических составляющих потокосцепления в соответствующих стержнях магнитопровода

При значении  $R_{m0}$ , равном 190 кА/Вб, значение тока нулевой последовательности в установившемся режиме оказывается приблизительно в 8 раз меньше значения тока при том же напряжении прямой последовательности и сопротивлении СТ, равном  $Z_k \approx X_T = 56$  Ом, поэтому такое значение  $R_{m0}$  может использоваться при расчётах ПП.

Длина магнитной линии для средней фазы магнитопровода, не имеющей ярма, меньше длины магнитной линии для боковых фаз. Это приводит к тому, что ток холостого хода боковых фаз оказывается больше тока холостого хода средней

фазы приблизительно в  $1,2 \div 1,5$  раза [59]. В режиме нагрузки это влияние практически незаметно, однако становится заметным в переходном режиме БТН и приводит к увеличению пикового значения  $i_{БТН}$  для боковых фаз.

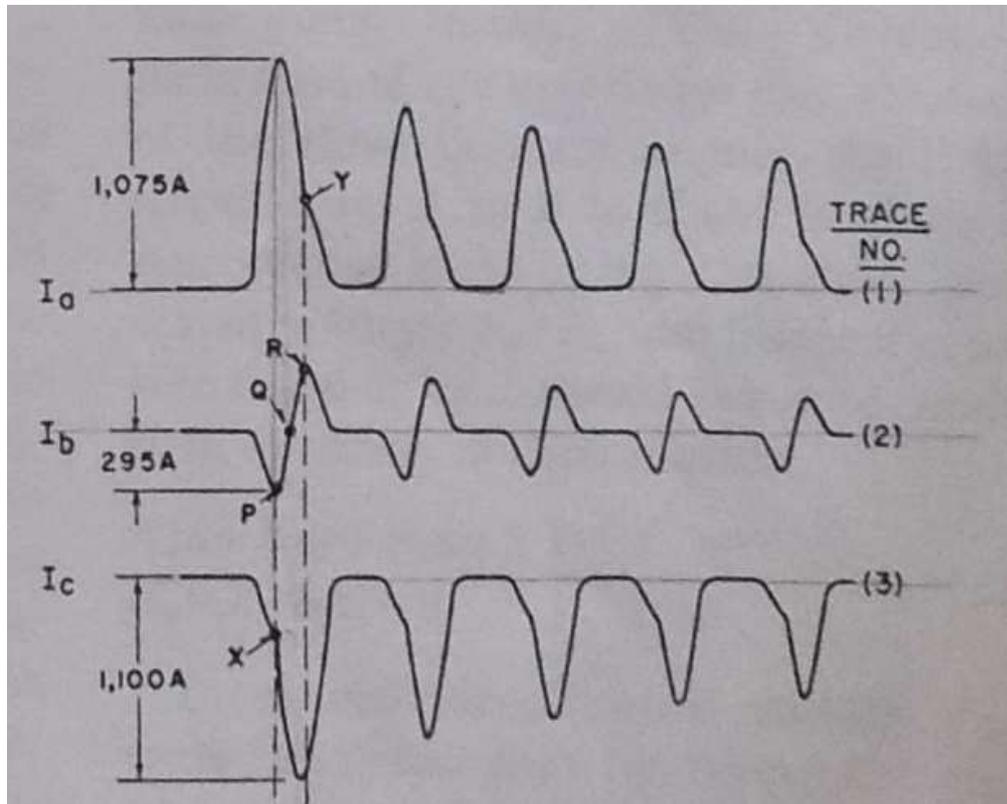


Рисунок 2.13 – Осциллограмма токов при БТН в трёхфазном СТ

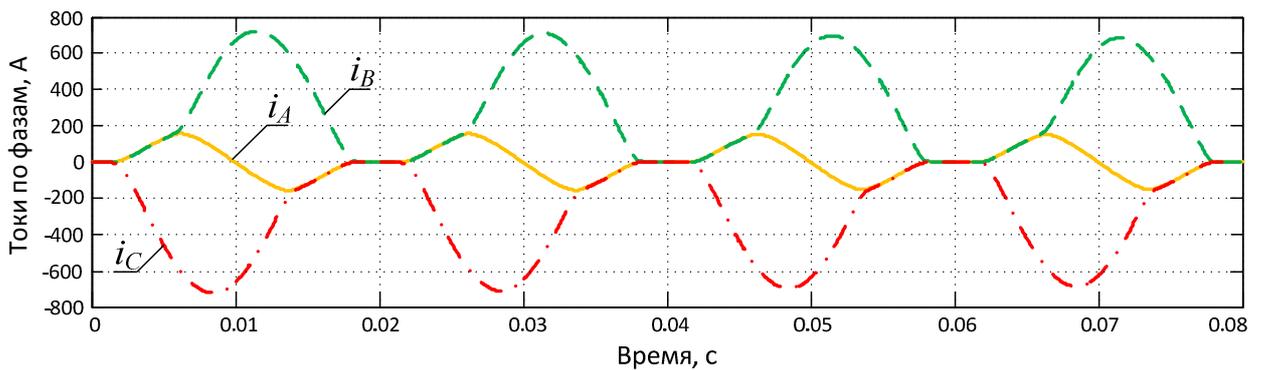


Рисунок 2.14 – Осциллограмма БТН, полученная с помощью математической модели (БТН I типа). Показана зависимость мгновенного значения тока (амперы) в фазе *A* (сплошная линия), *B* (штриховая линия) и *C* (штрихпунктирная линия) от времени (секунды)

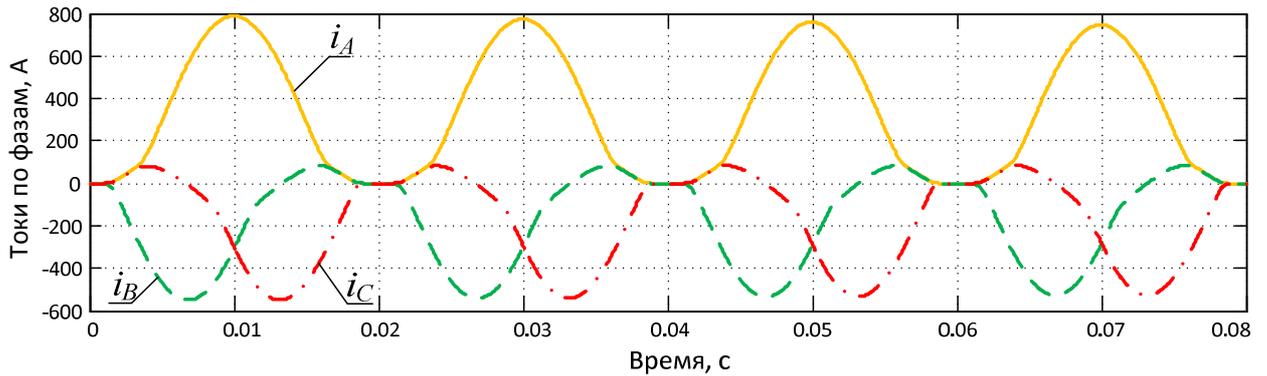


Рисунок 2.15 – Осциллограмма БТН, полученная с помощью математической модели (БТН II типа). Показана зависимость мгновенного значения тока (амперы) в фазе А (сплошная линия), В (штриховая линия) и С (штрихпунктирная линия) от времени (секунды)

Рассмотрим режим включения под напряжение 3-стержневого трансформатора ТРДН-25000/110, который подключен к сборным шинам электростанции через воздушную одноцепную ЛЭП длиной  $L_{ЛЭП}$ , проводники которой выполнены проводом марки АС-150/24 (удельные индуктивное и активное сопротивления равны соответственно  $X_0 = 0,42$  Ом/км,  $R_0 = 0,2$  Ом/км). Параметры источника питания:  $X_c = 2,25$  Ом,  $T_a = 0,3$  с. Примем также  $L_{ЛЭП} = 30$  км. При начальных условиях, соответствующих БТН II типа с особой фазой В (обмотка данной фазы размещена на среднем стержне магнитопровода), амплитуда  $i_{БТН}$  не превышает 700 А в первом периоде, а амплитуды БТН в других фазах одинаковы (при включении группы однофазных СТ в этих же условиях амплитуда БТН II типа в первом периоде составляет 698 А). При БТН II типа и особой фазе А или С амплитуда  $i_{БТН}$  оказывается выше, чем в предыдущем случае (приблизительно 770 А, см. рисунок 2.16), а амплитуды БТН в соседних фазах неодинаковы, причём ток намагничивания больше в боковых фазах (в фазах А и С). Так, на рисунке 2.16 значение тока в фазе С превышает значение тока в фазе В.

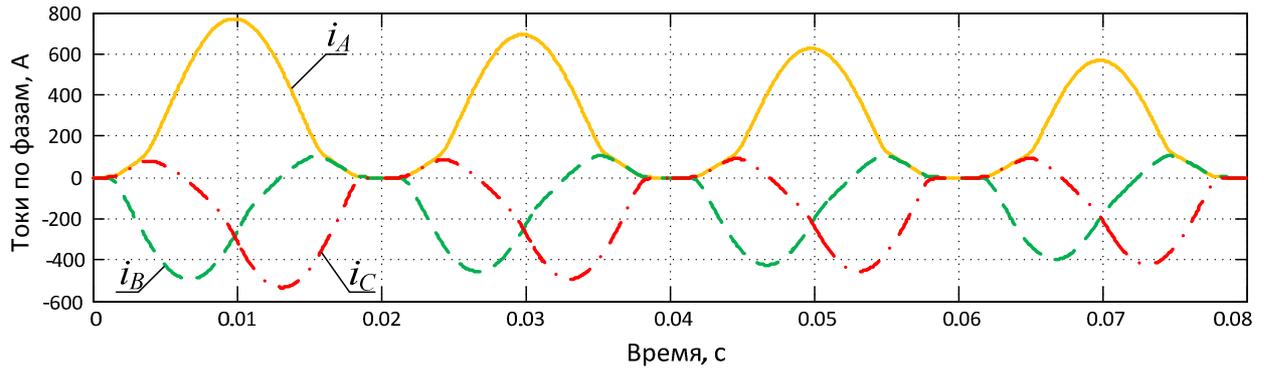


Рисунок 2.16 – Осциллограмма БТН II типа в трёхстержневом СТ

Учёт данной особенности может оказаться полезным при расчёте уставок РЗ для отстройки от БТН, однако в целях исследования характера ПП в СТ для распознавания режима эту особенность можно не учитывать, поскольку особенности исполнения магнитопровода влияют только на амплитуду БТН, но не влияют существенно на его форму.

Отметим также, что для удобства работы пользователя с разработанными математическими моделями первичного и вторичного оборудования реализован специальный программный интерфейс, описание которого приведено в приложении В. Использование интерфейса позволяет упростить и автоматизировать процесс расчёта. Также интерфейс позволяет переводить результаты моделирования в формат COMTRADE [60], что в дальнейшем можно использовать для проведения проверки разработанных алгоритмов защиты с помощью программно-испытательного комплекса «РЕТОМ-61(51)» [61].

## Выводы

1. Разработана математическая модель трёхфазных СТ, учитывающая особенности конструкции их магнитной системы и обеспечивающая возможность моделирования БТН и КЗ, выполнен расчёт численных параметров модели. Показано, что модель с высокой точностью воспроизводит ПП при включении СТ под напряжение. Это, в свою очередь, позволяет использовать разработанную модель в целях определения уставок РЗ и углубленного исследования ПП в токовых цепях релейной защиты. Особый интерес представляет возможность

исследования поведения защит в режиме БТН при различных начальных условиях: в условиях неодновременного замыкания фаз выключателя при включении СТ под напряжение, при разных значениях остаточной магнитной индукции в стержнях магнитопровода и т.п.

2. Разработана математическая модель СТ для исследования его работы в режимах внешних и внутренних КЗ. Ввиду простоты математического описания СТ в данных режимах модель выполнена с помощью универсальных блоков распространённых инженерных программных пакетов.

3. Численные эксперименты показывают, что в трёхстержневых СТ амплитуда БТН в боковых фазах выше, чем амплитуда БТН в одноимённых фазах, рассчитанная для группы однофазных СТ. Это обстоятельство следует учитывать при расчёте уставок защит СТ. В дальнейших исследованиях допустимо использовать более простую модель группы однофазных СТ, так как качественных отличий формы БТН в группах однофазных трансформаторов и трёхфазных трёхстержневых трансформаторов не выявлено.

### **3 РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

При разработке защиты в качестве основы используется один из алгоритмов ДЗ с торможением токами плеч и высшими гармоническими составляющими дифференциального тока. С целью улучшения характеристик по сравнению с принятой за основу защитой, *она должна быть дополнена рядом специфических алгоритмов*, призванных эффективно выявлять внутренние повреждения и обеспечивать недействие ДЗ в случае появления ложных сигналов при отсутствии внутреннего повреждения.

#### **3.1 Алгоритм чувствительной защиты от внутренних повреждений**

##### **3.1.1 Алгоритм быстрого распознавания внешних и внутренних коротких замыканий**

Как указывалось ранее, выполнять идентификацию режима необходимо в течение  $3 \div 5$  мс после начала ПП, вызванного КЗ, поскольку ТТ в течение этого времени гарантированно работают в режиме идеальной трансформации. Для быстрого и достоверного распознавания режимов внешнего или внутреннего КЗ, сопровождающихся большими аварийными токами, предлагается использовать алгоритм, основанный на рассмотренных ранее качественных признаках внешних и внутренних КЗ [15] (см. рисунок 1.5). Описанный в [15] метод распознавания места повреждения в случае применения его для защиты СТ позволяет *безошибочно и быстро распознать внешнее КЗ*, однако он *неспособен отличить внутреннее КЗ от БТН*.

Таким образом, выявление *внешнего* повреждения по [15] *необходимо реализовывать в ДЗ СТ с целью фиксации факта внешнего КЗ*, чтобы в дальнейшем заблокировать защиту или перевести её в дифференциально-фазный режим работы (п.3.1.3) во избежание ложного срабатывания при возросших переходных токах небаланса.

Для того, чтобы безошибочно различать БТН и *внутренние* КЗ, необходима некоторая модификация указанного алгоритма. Для выявления внутреннего КЗ можно воспользоваться качественным признаком [15], только в том случае, если предшествующим режимом работы защищаемого СТ является *нормальный нагрузочный режим*. При этом подействовать на отключение ДЗ может *только при превышении модуля мгновенного значения дифференциального тока некоторого порогового значения  $i_{пор}$* . Рассмотрим варианты выполнения алгоритма выявления внутренних КЗ и докажем необходимость выдвинутых условий.

Для начала укажем, что можно предложить два способа реализации качественно признака [15] – по интегральному или мгновенному значению сигнала, когда с целью распознавания внешнего или внутреннего повреждения контролируется заряд или мгновенные значения тока соответственно. Рассмотрим указанные способы определения места повреждения в порядке упоминания.

Если хотя бы в одном плече ДЗ фазы *A, B* или *C* мгновенное значение тока в момент времени  $t_0$  превышает с некоторым запасом мгновенное значение тока, соответствующее нормальному режиму работы СТ с учётом его перегрузочной способности, то в этот момент для соответствующей фазы осуществляется запуск функции определения места повреждения, физическая суть работы которой заключается в определении суммарного электрического заряда, прошедшего через плечи ДЗ защищаемого СТ:

$$Q_d = \sum_{t_0 - n/fs}^{t_0 + m/fs} \sum_{j=1}^N K_j i_j(t) \Delta t, \quad (3.1)$$

где  $Q_d$  – суммарный электрический заряд, прошедший через плечи ДЗ фазы за время интегрирования;

$K_j$  – коэффициент выравнивания тока  $j$ -го плеча ДЗ в фазе. Эти коэффициенты позволяют учесть неравенство токов плеч ДЗ, обусловленное

неравенством номинальных первичных токов СТ и ТТ, и обеспечивают приведение токов всех плеч к единому базису для сравнения по дифференциальному принципу;

$m, n$  – контролируемое число выборок после момента  $t_0$  и до него соответственно;

$i_j$  – ток  $j$ -го плеча ДЗ фазы;

$N$  – число плеч ДЗ в фазе;

$f_s$  – частота дискретизации АЦП;

$\Delta t$  – шаг дискретизации.

В случае внешнего повреждения значение рассчитанной величины  $Q_d$  оказывается не выше значения заряда небаланса  $Q_{нб}$ , и действие ДЗ по указанному признаку блокируется на определённое время до устранения повреждения, так как в результате насыщения ТТ отследить переход внешнего КЗ во внутреннее по этому методу практически невозможно (способы определения перехода внешнего КЗ во внутреннее описаны ниже, п.3.1.3).

Значение параметра  $m$  следует выбирать таким, чтобы верхний предел интегрирования не превышал  $3 \div 5$  мс после возникновения аварии. Значение параметра  $n$  следует выбирать меньшим или равным значению параметра  $m$ . Принимать значение  $n$  слишком малым нецелесообразно, поскольку это означает пренебрежение некоторой долей информации о переходном режиме, вызванном появлением повреждения в энергосистеме. Принятие значения  $n$  слишком большим приводит к увеличению времени расчёта конечного значения  $Q_d$ , что препятствует быстрому распознаванию режима.

Ввиду наличия тока небаланса необходимо однозначно определить такой минимальный уровень  $Q_{нб}$ , при превышении которого ДЗ должна срабатывать, а в противном случае – фиксировать возникновение повреждения вне зоны защиты. Значение тока небаланса для ДЗ СТ определяется по формуле [3, 22]:

$$I_{нб} = (K_{пер} K_{одн} \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ}) I_{расч}, \quad (3.2)$$

где  $K_{пер}$  – коэффициент, учитывающий ПП, может быть принят равным 1, поскольку предполагается, что за время, необходимое для определения места повреждения, измерительные ТТ не успевают насытиться;

$K_{одн}$  – коэффициент однотипности ТТ, для ДЗ СТ следует принимать его значение равным 1;

$\varepsilon$  – относительное значение полной погрешности ТТ в расчётом режиме, принимается равным 0,1;

$\Delta U_{РПН}$  – относительная погрешность, обусловленная регулированием защищаемого СТ;

$\Delta f_{выр}$  – относительная погрешность выравнивания токов плеч ДЗ входными устройствами терминала РЗ;

$\Delta f_{ПТТ}$  – дополнительная относительная погрешность выравнивания токов, возникающая при использовании промежуточных ТТ;

$I_{расч}$  – расчётное значение тока (например, максимальное значение из всех токов плеч ДЗ).

Переходя от действующих значений тока небаланса и расчётного тока к их мгновенным значениям ( $i_{нб}(t)$  и  $i_{расч}(t)$  соответственно), переписываем выражение (3.2):

$$i_{нб}(t) = (K_{пер} K_{одн} \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{выр} + \Delta f_{ПТТ}) i_{расч}(t). \quad (3.3)$$

Расчёт  $Q_{нб}$  производится путём интегрирования значения  $i_{нб}$  за время от  $t_0 - n/f_s$  до  $t_0 + m/f_s$ , в качестве  $i_{расч}$  принимается *наибольшее из мгновенных значений токов во всех плечах ДЗ*. Если рассчитанное по формуле (3.1) значение  $Q_d$  оказывается больше  $Q_{нб}$ , то ДЗ воспринимает выполнение этого условия как признак возникновения КЗ в зоне защиты. В противном случае защита фиксирует повреждение вне зоны защиты. Защита, как видно из выражения (3.3), отстраивается не от максимально возможного небаланса, а от небаланса в

*текущем аварийном режиме*, что позволяет иметь повышенную чувствительность к внутренним повреждениям.

Реализовать действие ДЗ по данному принципу также возможно, если, начиная с момента  $t_0$ , производить не интегрирование токов по времени, а прибегнуть к непосредственному сравнению суммы токов в плечах ДЗ с расчётным током небаланса. Таким образом, вместо формулы (3.1) можно использовать:

$$i_d(t) = \sum_{j=1}^N K_j i_j(t), \quad (3.4)$$

где  $i_d(t)$  – значение дифференциального тока в момент времени  $t$ , А.

Для фиксации повреждения в зоне защиты вычисленные значения  $i_d(t)$  должны быть больше расчётного тока небаланса  $i_{нб}(t)$  для того же момента времени в течение 3-5 мс или менее после момента  $t_0$ . Ток небаланса определяется по (3.3).

Предложенные алгоритмы определения места КЗ корректно работают только до 1-го насыщения защитных ТТ, после насыщения определение места повреждения по формулам (3.1) или (3.4) может привести к ошибке. Следовательно, необходимо определить режимы, в которых указанные алгоритмы срабатывают безошибочно, *и вводить их в действие только в соответствующих режимах работы СТ.*

Рассмотрим ДЗ, выполняющую функцию защиты всех обмоток СТ. Блокировка срабатывания ДЗ по предлагаемому признаку производится в случае выявления внешнего КЗ, а повторный ввод в действие алгоритма быстрого выявления места повреждения, в первом приближении, должен осуществляться *только после достоверной фиксации перехода защищаемого СТ в установившийся режим холостого хода или в нормальный нагрузочный режим*, когда заканчиваются вызванные возникновением повреждения ПП в энергосистеме и во вторичных цепях ДЗ. Однако в силу того, что при переходе в

режим холостого хода возможно появление значительных по величине БТН (например, при повторном включении ненагруженного СТ), а потому возможно ложное срабатывание ДЗ по этому признаку, то алгоритм быстрого определения места КЗ необходимо вводить в действие *только после фиксации перехода СТ в нагрузочный режим*, в котором появление БТН с большим током невозможно.

Рассмотрим ДЗ, выполняющую функцию защиты одной из обмоток СТ. Если обмотка СТ имеет соединение «звезда» с заземлённой нейтралью, то возможно выполнение дополнительной защиты этой обмотки [10, 12], что иногда применяется на практике. Для этой цели могут быть использованы ТТ, установленные на линейных выводах обмотки СТ и на выводе нейтрали, что позволяет выполнить ДЗ нулевой последовательности этой обмотки СТ, повышая эффективность комплекса защит СТ. Блокировка алгоритма быстрого определения места повреждения с большим током также должна выполняться в случае выявления внешнего КЗ. Такая ДЗ не срабатывает ложно в первые моменты БТН до первого насыщения измерительных ТТ, поэтому повторный ввод в работу алгоритма можно производить *как по факту перехода СТ в установившийся режим холостого хода, так и в нормальный нагрузочный режим* (отметим, что формально для такой защиты БТН неотличим от внешнего КЗ или внутреннего КЗ без участия земли).

Также необходимо отметить, что в реальных энергосистемах бывают случаи перехода одного вида КЗ в другой, например переход двухфазного КЗ в трёхфазное и т.п. Если ток одного или нескольких плеч ДЗ формируется как результат математических операций над сигналами ТТ, установленных на разных фазах, то при переходе одного вида КЗ в другой и при насыщении одного из ТТ в ранее повреждённых фазах алгоритм определения места повреждения может сработать ложно и опознать внешнее КЗ как внутреннее в силу возросшей погрешности насыщенных ТТ. По этой причине алгоритм быстрого определения места повреждения должен быть выведен из работы *во всех фазах защищаемого оборудования в случае фиксации внешнего КЗ до восстановления нормального режима*. Если ток плеча ДЗ является непосредственно током в обмотке ТТ, то

блокировка алгоритма распознавания места повреждения *во всех фазах в случае внешнего КЗ не является необходимой*, например, если речь идёт о защите СТ с 12-й группой соединения обмоток, защите сборных шин или генераторов.

Переход СТ в нормальный нагрузочный режим можно проконтролировать, используя следующие условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 \geq I_{1устНР}; \\ I_1 \leq I_{нагр.мах}; \\ I_2 / I_1 < \delta_2; \\ I_0 / I_1 < \delta_0; \\ I_{обр} / I_{пр} < \delta_{обр}; \\ I_{нул} / I_{пр} < \delta_{нул}; \\ t \geq t_{устНР}, \end{array} \right. \quad (3.5)$$

где  $I_1$  – измеренное действующее значение тока основной гармоники в контролируемом плече ДЗ;

$I_{1устНР}$  – значение уставки по току основной гармоники, определяющее переход СТ в нормальный нагрузочный режим работы;

$I_{нагр.мах}$  – значение максимального тока нагрузки;

$I_2$  – измеренное действующее значение тока второй гармоники в дифференциальной цепи;

$I_0$  – измеренное значение постоянной составляющей тока в контролируемом плече ДЗ;

$I_{обр}$  – измеренное действующее значение тока обратной последовательности в контролируемом плече ДЗ;

$I_{нул}$  – измеренное действующее значение тока нулевой последовательности в контролируемом плече ДЗ;

$I_{пр}$  – измеренное действующее значение тока прямой последовательности в контролируемом плече ДЗ;

$t$  – время, в течение которого выполняется условие  $I_1 \geq I_{1устНР}$ ;

$t_{устНР}$  – уставка по времени, определяющая переход СТ в нормальный нагрузочный режим работы;

$\delta_2$  – коэффициент, определяющий уровень относительного содержания второй гармоники;

$\delta_0$  – коэффициент, определяющий уровень относительного содержания постоянной составляющей;

$\delta_{обр}$  – коэффициент, определяющий уровень относительного содержания токов обратной последовательности;

$\delta_{нул}$  – коэффициент, определяющий уровень относительного содержания токов нулевой последовательности.

Значение коэффициента  $\delta_2$  в соответствии с [34] следует принимать на уровне  $0,1 \div 0,2$ , так как превышение содержания тока второй гармоники выше этого уровня означает, что СТ находится в режиме БТН, или что ТТ работают с большой погрешностью вследствие насыщения, вызванного токами аварийного режима. Необходимость контроля  $I_0$  обусловлена тем, что длительное протекание  $I_0$  по первичной обмотке ТТ (например, вследствие затянувшегося самозапуска большого числа асинхронных двигателей [62]) способно вызвать их насыщение, вследствие чего алгоритм определения места повреждения может подействовать ложно и без необходимости отключить защищаемый неповреждённый СТ. Значение  $\delta_0$  может быть принято меньшим или равным  $\delta_2$ . Контроль составляющих тока всех последовательностей необходим для выявления несимметричных КЗ вблизи защищаемого СТ: после устранения таких КЗ возможно появление БТН, при которых алгоритм быстрого выявления КЗ не должен срабатывать. Значения коэффициентов  $\delta_{обр}$  и  $\delta_{нул}$  определяются, исходя из характера нагрузки защищаемого СТ.

Переход СТ в нагрузочный режим выявляется путём контроля выполнения условия (3.5) для хотя бы двух плеч ДЗ любой фазы, поскольку только таким образом можно удостовериться, что потребитель на стороне смежного напряжения получает питание от СТ (то есть СТ не находится в режиме холостого

хода). Значение уставки  $t_{ycmHP}$  может быть принято  $2 \div 3$  периода промышленной частоты. Значение  $I_{1ycmHP}$  задаётся с запасом, превышающим значение тока холостого хода защищаемого СТ.

Переход защищаемого СТ в режим холостого хода выявляется по следующим условиям:

$$\begin{cases} I < I_{ycmXX}; \\ t \geq t_{ycmXX}, \end{cases} \quad (3.6)$$

где  $I$  – измеренное действующее значение тока в контролируемом плече ДЗ;

$I_{ycmXX}$  – значение уставки по току, по которому определяется переход СТ в режим холостого хода;

$t$  – время, в течение которого выполняется условие  $I \geq I_{ycmXX}$ ;

$t_{ycmXX}$  – уставка по времени, при превышении которой фиксируется переход СТ в режим холостого хода.

Трансформатор считается перешедшим в режим холостого хода в том случае, если условие (3.6) выполняется для всех фаз и для  $N$  или  $N-1$  плеч ДЗ, поскольку наличие тока со стороны всего лишь одного плеча ДЗ не может свидетельствовать о передаче мощности через СТ, равно как и отсутствие тока во всех плечах. Значение уставки  $t_{ycmXX}$  может быть принято  $2 \div 3$  периода промышленной частоты или более, но не больше времени минимально возможного действия РЗ смежных элементов и полного времени отключения выключателя этих элементов. Значение уставки  $I_{ycmXX}$  принимается превышающим ток холостого хода защищаемого СТ и в общем случае оно может быть равным  $I_{1ycmHP}$ .

При выборе значения  $i_{nop}$  следует рассмотреть все случаи, когда в СТ возникает БТН. Если контроль выполнения условий (3.5) или (3.6) оказывается недостаточным, чтобы обеспечить несрабатывание защиты, её корректное

действие достигается заданием  $i_{пор}$  выше амплитудного значения БТН в рассматриваемом режиме. Рассмотрим такие режимы.

Рассмотрим сначала ДЗ, выполняющую защиту всех обмоток СТ. При параллельной работе двух и более СТ и включении одного из них под напряжение возникает БТН, ток которого распределяется между всеми СТ, работающими параллельно [13, 35]. Это означает, что в результате ПП ложный сигнал возникает в дифференциальной цепи ДЗ всех СТ. При этом алгоритм определения места повреждения должен оставаться нечувствительным к такому режиму. В [13] указывается, что наибольшее значение БТН имеет место только в том СТ, который включается под напряжение, в то время как уже находящиеся в работе СТ испытывают значительно меньший БТН, максимальное значение которого может достигать  $I_{нт}$ . Очевидно, что включение параллельно работающего СТ не может быть отслежено с использованием условия (3.5) или (3.6), поэтому с целью обеспечения несрабатывания ДЗ СТ в этом режиме необходимо выбирать  $i_{пор}$  с запасом большим амплитудного значения  $I_{нт}$ , то есть

$$i_{пор} = K_n \sqrt{2} I_{нт}, \quad (3.7)$$

где  $K_{зан} > 1$  – коэффициент запаса.

Явление БТН также возникает при устранении внешнего КЗ на приёмной стороне [13], при этом максимальный ток такого БТН может быть в 2-3 раза меньше БТН, возникающего при включении холостого СТ под напряжение. Однако алгоритм быстрого выявления КЗ не должен ложно срабатывать в этом режиме, поскольку в случае фиксации внешнего КЗ происходит его блокировка до момента выполнения условия (3.5). Таким образом, данный режим не определяет значение  $i_{пор}$ .

Более сложным режимом с точки зрения обеспечения правильной работы алгоритма ДЗ является внешнее КЗ со стороны источника питания при включенной нагрузке СТ, так как возникающий после отключения внешнего

повреждения БТН может иметь существенно большее значение, чем в предыдущем случае. Включение под напряжение понижающих СТ, несущих нагрузку, приблизительно равную номинальной, как показывают опыты (см. п. 3.2.2), приводит к появлению БТН, максимальные значения которых оказываются такого же порядка, как и при включении ненагруженного СТ. Однако и это обстоятельство не должно приводить к ложной работе ДЗ, так как максимальные БТН возникают после потери питания со стороны ВН, что сопровождается снижением тока во всех фазах или появлением несимметрии токов (в случае несимметричных КЗ с питающей стороны), что приводит к нарушению условия (3.5). Таким образом, данный режим не также определяет значение  $i_{\text{пор}}$ . Именно это обстоятельство позволяет эффективно использовать алгоритм быстрого выявления внутреннего КЗ: значение  $i_{\text{пор}}$  не превышает максимального амплитудного значения при БТН, что позволяет защите, реализующей данный алгоритм, обладать большей чувствительностью, чем дифференциальная отсечка, отключающая СТ при появлении мгновенных значений токов выше максимально возможных БТН. Данное свойство достигается за счёт контроля условий работы СТ в реальном времени.

Так как для ДЗ, выполняющей защиту обмотки с заземлённой нейтралью, режим БТН определяется как внешнее повреждение, то значение  $i_{\text{пор}}$  может быть принято равным нулю для такой защиты.

Таким образом, корректный выбор  $i_{\text{пор}}$  вместе с контролем текущего режима работы СТ обеспечивают быстрое действующее отключение внутреннего КЗ (в течение первого полупериода промышленной частоты), при этом ложного действия при БТН не происходит.

Чувствительность разработанной защитной функции может быть определена как отношение мгновенного значения тока аварийного режима к  $i_{\text{пор}}$ . Очевидно, данное мероприятие неэффективно во всех возможных режимах работы СТ ввиду большого значения  $i_{\text{пор}}$ , также оно не позволяет распознать режим включения холостого СТ или возникновения КЗ при условии отсутствия передачи мощности через СТ, связывающий несколько энергосистем (не

выполняется условие (3.5) ввиду отсутствия тока нагрузки), а потому необходимы дополнительные признаки распознавания режима, рассматриваемые ниже. Применение рассматриваемой функции как *дополнение* к основной защите оправдано, так как оно не приводит к усложнению аппаратной части микропроцессорной защиты и в то же время позволяет селективно и быстро выявлять наиболее тяжёлые внутренние КЗ.

### 3.1.2 Алгоритм выявления витковых замыканий в режиме перевозбуждения сердечника силового трансформатора

Выявление ВЗ, характеризующихся малыми токами повреждения, осуществляется в соответствии основным принципом работы ДЗ: при увеличении действующего значения основной гармоники дифференциального тока  $I_d$  выше значения тока срабатывания ДЗ должна отключить повреждённый СТ. Поскольку ток повреждения при ВЗ мал, он не вызывает насыщения измерительных ТТ, поэтому для выявления ВЗ нет необходимости пользоваться описанным выше быстродействующим алгоритмом, обеспечивающим распознавание внутреннего повреждения в течение первых миллисекунд ПП.

Однако, как указывалось выше, выявление ВЗ во время перевозбуждения защищаемого СТ для ДЗ с малым значением уставки затруднено из-за действия средств отстройки от этого режима. Рассмотрим способ сохранения чувствительности ДЗ к этому виду повреждения в режиме ПВ.

Количественно величина перевозбуждения характеризуется его кратностью  $M$ , определяемой по формуле [2]:

$$M = B_{m^*} = \Psi_{m^*} = \frac{U \cdot f_{ном}}{f \cdot U_{ном}} \quad (3.8)$$

где  $B_{m^*}$  и  $\Psi_{m^*}$  – максимальная индукция в магнитопроводе и потокосцепление в обмотке соответственно;

$U, U_{ном}$  – соответственно текущее и номинальное напряжение, подведённое к обмотке СТ;

$f, f_{ном}$  – соответственно текущая и номинальная частота напряжения сети.

При повышении индукции в магнитопроводе начинается прогрессирующий рост намагничивающего тока СТ и возрастает деформация магнитного поля вне магнитопровода. При этом резко увеличиваются добавочные потери, вызывающие повышенный нагрев сплошных стальных элементов конструкции СТ. Повышенный нагрев приводит к ускоренному износу изоляции, прилегающей к нагревающимся деталям [2]. Во многих ДЗ используется блокировка или торможение 5-й гармоникой для отстройки от режима перевозбуждения СТ [10, 12]. Также имеются предложения увеличивать уставку срабатывания ДЗ при фиксации перехода СТ в режим ПВ [2]. Однако наличие специальных средств для загробления или обеспечения недействия ДЗ при ПВ нежелательно, поскольку вероятность возникновения ВЗ вследствие повреждения изоляции возрастает именно в этом режиме. Специальные защиты, непосредственно реагирующие на значение  $B_{m*}$  и имеющие обратно-зависимую выдержку времени [58], не способны выявить и отключить ВЗ за время, не превышающее  $40 \div 50$  мс (п.1.1) в условиях, когда повреждение возникает при относительно небольшой кратности ПВ, так как в этом случае специальная защита допускает работу СТ в течение длительного времени.

Обеспечить чувствительность защиты к ВЗ возможно, используя времяимпульсный принцип [2]. Однако ДЗ СТ, выполненные на времяимпульсном принципе (например, ДЗТ-21, ДЗТ-23), имеют существенный недостаток, заключающийся в задержке срабатывания при насыщении измерительных ТТ при внутренних КЗ, а также в снижении чувствительности к ВЗ при протекании через СТ значительных токов нагрузки (п.1.3).

Поэтому целесообразно в разрабатываемой ДЗ для выявления внутренних повреждений, сопровождаемых большим аварийным током, способным привести к насыщению измерительных ТТ, использовать более надёжный и быстродействующий принцип (описанный в пп.3.1.1 и 3.2), а для выявления ВЗ,

возникших при ПВ, использовать времяимпульсный принцип. Таким образом, для выявления ВЗ при ПВ защита *работает независимо от основной ДЗ СТ и вводится в работу только в случае фиксации перехода СТ в режим холостого хода* в соответствии с условиями (3.6). Для обеспечения несрабатывания основной защиты СТ в режиме ПВ должна быть введена блокировка или торможение от нечётных гармоник.

Во избежание неоправданного усложнения алгоритма защиты, работа независимого органа выявления ВЗ при ПВ, кроме того, должна быть разрешена *только в тех режимах, в которых невозможна его ложная работа*. Рассмотрим установившейся режим ПВ. Действующее значение тока намагничивания СТ в этом режиме, как правило, достаточно мало и, согласно [2], ДЗ, имеющая  $I_{cp} < I_{номСТ}$  отстроена от тока намагничивания, вызванного насыщением стали магнитопровода СТ при значениях  $B_m^*$ , превышающих 1,5. Подобные высокие значения индукции допустимы в течение весьма малого времени (десятки или единицы секунд), после чего СТ должен быть отключен [22]. Столь малые токи не приводят к насыщению измерительных ТТ, следовательно, возникновение значительного ложного сигнала *в этом режиме невозможно* и отстройка специальной защиты от его влияния не требуется.

Рассматриваемый орган предназначен для работы в условиях, при которых СТ *находится в режиме холостого хода*, так как в противном случае может существовать значительный синусоидальный ток небаланса, не имеющий бестоковых пауз. С другой стороны, возможны ситуации, когда ПВ возникает после включения СТ под напряжение, когда ещё не завершился БТН. В этом случае СТ находится на холостом ходу, но при больших кратностях БТН в ПП возможно насыщение ТТ и исчезновение бестоковых пауз. В этом случае срабатывание независимого органа должно происходить только в том случае, если процентное содержание *чётных гармоник* в дифференциальном токе во всех фазах оказывается ниже фиксированного значения. Так как в режимах ПВ и ВЗ чётные гармоники отсутствуют, требование выполнения данного условия не приводит к снижению чувствительности защиты. В разрабатываемой защите от

ВЗ контролируется процентное содержание 2-й гармоники в дифференциальном токе, формирование сигнала на отключение СТ разрешено, если содержание 2-й гармоники *не превышает 10%* (по рекомендациям [35]) *во всех фазах*.

Уровень замера бестоковой паузы должен приниматься не выше амплитудного значения тока холостого хода СТ в нормальном режиме. Угол бестоковой паузы  $\theta_n$  для случая, когда измерительные ТТ со стороны СТ, подключенной к источнику питания, соединены по схеме «звезда», может быть рассчитан по формуле [2]:

$$\theta_n = 2 \arcsin \left( \frac{\Psi_s}{\Psi_m} \right), \quad (3.9)$$

где  $\Psi_s$ ,  $\Psi_m$  – потокосцепление насыщения, ниже которого ток намагничивания условно принимается равным нулю, и максимальное потокосцепление СТ соответственно.

Выражая аргумент арксинуса в формуле (3.9) через относительные значения потокосцеплений, получаем:

$$\theta_n = 2 \arcsin \left( \frac{\Psi_{s^*}}{\Psi_{m^*}} \right). \quad (3.10)$$

Значение  $\Psi_{s^*}$  зависит от марки стали и конструкции сердечника СТ. Согласно [2], значение  $\Psi_{s^*}$  для СТ из горячекатаной стали и магнитопроводов с отверстиями для стяжных шпилек может быть принято 1,38. Для СТ из холоднокатаной стали можно принять  $\Psi_{s^*}$  равным 1,21.

В случае, если измерительные ТТ со стороны СТ, подключенной к источнику питания, соединены по схеме «треугольник»,  $\theta_n$  может быть рассчитан по формуле:

$$\theta_n = 2 \arcsin \left( \frac{\Psi_{s^*}}{\Psi_{m^*}} \right) - \frac{\pi}{3}. \quad (3.11)$$

Исходя из полученного угла  $\theta_n$ , получаем время бестоковой паузы  $t_n$

$$t_n = \theta_n / \omega_c, \quad (3.12)$$

где  $\omega_c$  – круговая частота сети, рад/с.

В случае, если СТ не имеет специальной защиты от ПВ, значение уставки  $t_n$  выбирается исходя из значения  $\Psi_{m^*}$ , допустимого в течение 20 с [2], то есть рассчитывается для  $\Psi_{m^*} = 1,25$  [22]. При превышении  $\Psi_{m^*}$  указанного значения ДЗ может сработать, обеспечивая тем самым защиту СТ от ПВ.

В том случае, если СТ имеет специальную защиту от ПВ, контролирующую текущее значение  $\Psi_{m^*}$ , то расчёт  $t_n$  следует производить в режиме реального времени по формулам (3.10), (3.11) и (3.12). Это позволяет повысить чувствительность ДЗ к ВЗ, так как рассматриваемые повреждения сопровождаются малыми токами на выводах СТ, что не исключает появления бестоковых пауз в дифференциальном токе при возникновении дугового ВЗ в изоляционной среде, которой является трансформаторное масло [2, 63].

В случае, если действующее значение дифференциального тока превышает определённый порог (по условию отстройки от помех и от тока намагничивания в нормальном режиме), и бестоковая пауза в нём меньше рассчитанного значения  $t_n$ , умноженного на некоторый коэффициент надёжности  $K_n < 1$ , и все остальные условия соблюдены (СТ находится в режиме холостого хода, относительное содержание токов второй гармоники мало), то необходимо отключение СТ.

Поскольку предлагаемый алгоритм защиты подразумевает контроль значения  $\Psi_{m^*}$ , то необходимо рассмотреть поведение защиты при выявлении неисправности в измерительных цепях напряжения, поскольку информация о режиме напряжения необходима для вычисления  $\Psi_{m^*}$ . При выявлении

неисправности в цепях напряжения (алгоритм контроля целостности этих цепей не приводится в тексте работы) возможна как блокировка дополнительного органа, так и изменение значения  $t_{n,расч}$ , которое должно соответствовать бестоковой паузе при кратности ПВ, допустимой в течение непродолжительного времени (не требующей немедленного отключения СТ). По данным [2], это значение  $t_{n,расч}$  должно рассчитываться при кратности ПВ, допустимой в течение 2,5 секунд, однако может быть использовано другое значение, рекомендуемое производителем СТ.

Таким образом, предложенный способ позволяет сохранить чувствительность защит к ВЗ в режиме ПВ, адаптируя уставку по бестоковой паузе к текущей кратности перевозбуждения. Информация о кратности ПВ может быть получена от измерительных трансформаторов напряжения. Действующее значение тока срабатывания ДЗ при этом остаётся на уровне, достаточном для эффективного выявления ВЗ (на уровне  $0,3I_{нм}$ ). Время, требуемое для идентификации режима ВЗ в режиме ПВ, не превышает периода промышленной частоты.

### **3.1.3 Поведение дифференциальной защиты при коротких замыканиях вне зоны защиты**

При выявлении внешнего КЗ некоторые производители осуществляют блокировку чувствительного органа ДЗ на заданное время [5]. Такое блокирование является нежелательным, поскольку оно исключает быстрое срабатывание защиты при переходе близкого внешнего КЗ во внутреннее повреждение. То же в равной степени относится и к загрублению защиты при выявлении внешнего КЗ. Чтобы сохранить чувствительность ДЗ в режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, целесообразным является применение *сочетания* дифференциального и дифференциально-фазного принципов (переход в дифференциально-фазный режим осуществляется при значительном превышении сквозным током уровня токов нагрузочного режима) действия как обеспечивающего высокую чувствительность к внутренним повреждениям и

устойчивость функционирования при повышенных погрешностях ТТ в ходе ПП. Представляется целесообразным для повышения эффективности функционирования защиты в дифференциально-фазном режиме работы осуществлять сравнение фаз в периоды идеальной трансформации ТТ. Для обеспечения качественной работы предлагаемого алгоритма необходимо выполнение соединения вторичных токовых цепей, предусматривающее соединение всех групп ТТ по схеме «звезда», поскольку необходим непосредственный контроль токов в обмотках ТТ.

Предлагается следующий принцип выделения участков идеальной трансформации при насыщении ТТ. Экстремальные насыщения ТТ обусловлены значительным содержанием апериодической составляющей в аварийном токе, в то время как в симметричном режиме при КЗ за защищаемым СТ погрешность ТТ не превышает 10% в соответствии с требованиями, предъявляемыми к выбору ТТ для ДЗ [19]. На рисунке 3.1, *a* приведены осциллограммы первичного и вторичного токов в обмотках измерительного ТТ в условиях быстрого насыщения его сердечника током, содержащим апериодическую составляющую, при насыщении магнитопровода ТТ, происходящем в течение первой полуволны тока КЗ.

Насыщение ТТ наступает в моменты времени  $t_1$ ,  $t_3$ ,  $t_5$ . Даже в условиях глубокого насыщения измерительный ТТ имеет участки идеальной трансформации, которая начинается приблизительно в моменты времени  $t_2$ ,  $t_4$ , то есть тогда, когда первая производная первичного (и вторичного) тока изменяет знак. При насыщении ТТ интервалы времени между моментами смены знака первой производной тока неодинаковы. Условимся обозначать больший из этих интервалов как  $\Delta t_2$ , а меньший – как  $\Delta t_1$ . Для рассматриваемого примера  $\Delta t_1 = t_3 - t_2$ ,  $\Delta t_2 = t_2 - t_1$  в первом периоде и  $\Delta t_1 = t_5 - t_4$ ,  $\Delta t_2 = t_4 - t_3$  во втором периоде. Из примера на рисунке 3.1, *a* видно, что участкам идеальной трансформации соответствуют интервалы  $\Delta t_1$ , а участкам работы ТТ со значительной погрешностью – интервалы  $\Delta t_2$ .

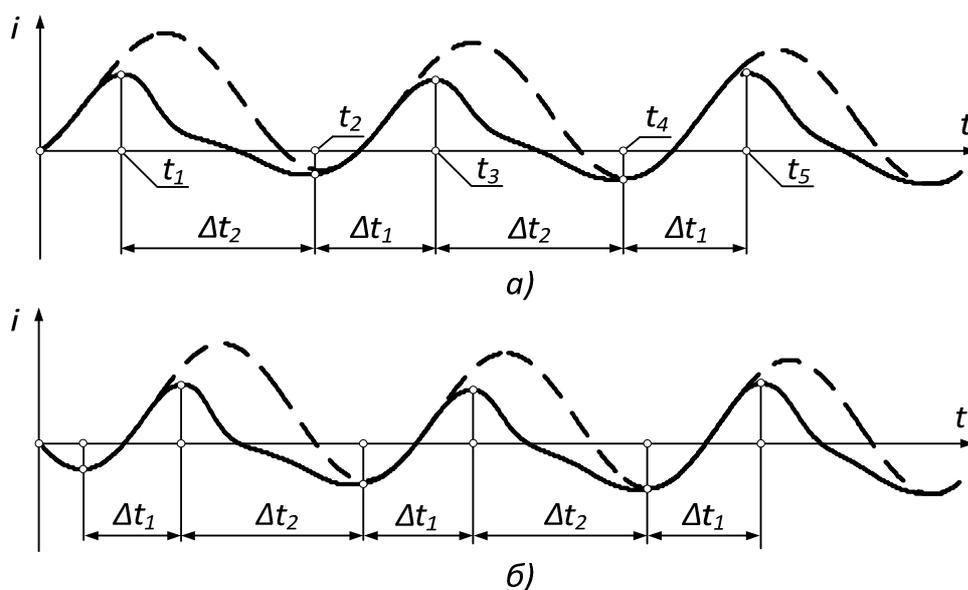


Рисунок 3.1 – Первичный (штриховая линия) и вторичный токи (сплошная линия) в обмотках ТТ при глубоком насыщении магнитопровода. Насыщение ТТ происходит в первой полуволне с момента начала ПП (а) или во второй полуволне (б)

Аналогичные явления наблюдаются и в случае, если насыщение ТТ происходит во время второй полуволны тока, см. рисунок 3.1, б. Отличительной чертой этого режима является лишь то, что с момента начала ПП интервал  $\Delta t_1$  фиксируется раньше интервала  $\Delta t_2$  (в примере на рисунке 3.1 первым фиксируется интервал  $\Delta t_2$ ). Во всех рассмотренных случаях идеальная трансформация наступает практически в момент начала интервала  $\Delta t_1$  и длится практически до конца этого интервала.

Выявив участки идеальной трансформации, определим алгоритм сравнения фаз с учётом глубокого насыщения ТТ. Сравнение фаз двух синусоидальных сигналов удобно производить по моментам их перехода через нулевое значение или по моментам смены знака их первых производных. Ввиду наличия апериодической составляющей в аварийном токе метод замера фаз по переходу через нулевое значение приводит к значительным погрешностям, так как степень содержания апериодической составляющей и скорость её затухания в контролируемых сигналах в общем случае различна. По этой причине замер

разности фаз необходимо осуществлять в моменты достижения синусоидальным сигналом своего амплитудного значения, то есть именно *в начале интервала  $\Delta t_1$* . Даже в условиях глубокого насыщения ТТ *начало интервала  $\Delta t_1$  достаточно хорошо совпадает с пиковым значением синусоидальной составляющей первичного тока*.

В течение периода промышленной частоты интервалы  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  фиксируются для всех сигналов, подлежащих сравнению, затем для каждого сигнала в блоке памяти цифрового устройства ДЗ фиксируется момент времени, соответствующий началу интервала  $\Delta t_1$ , а также *знак вторичного тока* в этот момент. Фаза одного из сигналов условно принимается равной нулю (опорный сигнал), отсчёт времени ведётся с момента выявления внешнего КЗ (перехода ДЗ в дифференциально-фазный режим).

Если условие  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  выполняется для опорного сигнала и для сигнала, сдвиг по фазе которого нужно определить (то есть оба ТТ насыщаются в ходе ПП), и два сравниваемых сигнала имеют *один и тот же знак вторичного тока*, то цифровое устройство рассчитывает фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  по формуле:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta T, \quad (3.13)$$

где  $\omega$  – круговая частота основной гармоники, рад/с;

$\Delta T$  – разница по времени между началом интервалов  $\Delta t_1$  двух сравниваемых сигналов, с.

Если два сравниваемых сигнала имеют *различную полярность тока в моменты начала интервала  $\Delta t_1$* , то к рассчитанному по формуле (3.13) значению  $\Delta\varphi$  прибавляется 180 электрических градусов.

Если условие  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  выполняется только для одного из сравниваемых сигналов, а для другого сигнала значения  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  равны (то есть насыщается только один из ТТ), то  $\Delta\varphi$  также определяется по формуле (3.13), однако множитель  $\Delta T$  в этом случае показывает разницу во времени между началом интервала  $\Delta t_1$  сигнала, для которого выполняется условие  $\Delta t_1 < \Delta t_2$ , и между

пиковым значением второго сигнала того же знака, что и знак первого сигнала в момент начала  $\Delta t_1$ .

В случае, когда ТТ работают без насыщения в течение периода, значения  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  для обоих сравниваемых сигналов равны. Значение  $\Delta\varphi$  в этом случае определяется по формуле (3.13), однако множитель  $\Delta T$  рассчитывается как интервал времени между двумя пиковыми значениями одной полярности сравниваемых сигналов.

В качестве примера использования предложенного алгоритма рассмотрен блок «генератор-трансформатор», работающий на сборные шины. В состав блока входит СТ типа ТДЦ-400000/220, на стороне низшего напряжения (НН) которого подключен синхронный генератор (СГ) ТВВ-320-2, на стороне высшего напряжения (ВН) СТ связан с энергосистемой. На стороне НН установлены измерительные ТТ типа ТШ-20-12000/5, а на стороне ВН – ТТ типа ТФНД-220-IV-2000/1. Номинальные параметры СГ следующие: номинальная полная мощность  $S_{номG} = 375$  МВ·А, номинальная активная мощность  $P_{номG} = 320$  МВт, номинальное напряжение  $U_{номG} = 20$  кВ, номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{ном} = 0,85$ , номинальный КПД  $\eta_{номG} = 98,7\%$ , сверхпереходное реактивное сопротивление по продольной оси  $X_d'' = 0,173$  о.е., сопротивление обратной последовательности  $x_2 = 0,211$  о.е., постоянная времени затухания аperiodической составляющей при симметричном трёхфазном КЗ  $T_a^{(3)} = 0,388$  с. Исходя из значений  $x_2$  и  $T_a^{(3)}$  [64], активное сопротивление СГ составляет  $R_G = 1,84 \cdot 10^{-3}$  Ом; значение  $X_d''$  в пересчёте в именованные единицы равно 0,185 Ом.

Номинальные параметры СТ следующие: номинальная мощность  $S_{номT} = 400$  МВ·А, номинальное напряжение обмотки ВН  $U_{ВНном} = 242$  кВ, номинальное напряжение обмотки НН  $U_{ННном} = 20$  кВ, напряжение КЗ  $u_k = 11\%$ , мощность потерь КЗ  $P_k = 880$  кВт. Активное и реактивное сопротивления СТ, приведённые к стороне ВН, равны соответственно  $R_T = 0,32$  Ом и  $X_T = 16,11$  Ом. Поскольку трансформатор собственных нужд блока имеет мощность на порядок

меньшую по сравнению с блочным СТ, его влияние на аварийные режимы КЗ незначительны, и этим влиянием допустимо пренебречь.

Параметры измерительных ТТ определены по данным [19] и [65].  
 Параметры ТШ-20-12000/5: номинальная нагрузка  $Z_{ном} = 1,2 \text{ Ом}$ , площадь поперечного сечения сердечника  $Q = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , длина средней магнитной линии  $l_{cp} = 2,59 \text{ м}$ , число витков вторичной обмотки  $w_2 = 2400$ , активное сопротивление вторичной обмотки  $R_2 = 1,9 \text{ Ом}$ . Точное значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки  $X_2$  для данного ТТ не приводится в указанных выше источниках. По данным [19], для шинных ТТ класса напряжения 10 кВ, конструкция которых аналогичная шинного ТТ класса напряжения 20 кВ, сопротивление  $X_2$  одного порядка с  $R_2$  и несколько превышает его. Поэтому приближённо принимаем  $X_2 = 2,0 \text{ Ом}$ . Приближённый учёт этого параметра не приводит к существенным ошибкам в расчётах, поскольку при проведении численных экспериментов, в ходе которых анализируется устойчивость работы алгоритма, требуется или глубокое насыщение ТТ в ходе ПП (для достижения этой цели ко вторичным цепям ТТ намеренно подключается сопротивление, существенно большее  $R_2, X_2$ ), или его работа в режиме идеальной трансформации.  
 Параметры ТФНД-220-IV-2000/1:  $Z_{ном} = 50 \text{ Ом}$ ,  $Q = 30,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $l_{cp} = 1,55 \text{ м}$ ,  $w_2 = 2000$ ,  $R_2 = 11,5 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 41,0 \text{ Ом}$ .

Приняты следующие параметры энергосистемы со стороны ВН СТ: индуктивное сопротивление  $X_c = 2,1 \text{ Ом}$ , номинальное напряжение  $U_c = 220 \text{ кВ}$ , постоянная времени затухания аperiodической слагающей тока КЗ  $T_a = 0,2 \text{ с}$ .

Переходные процессы в СГ приближённо учтены использованием при расчётах сопротивления  $X_d''$  и, если в предшествующем режиме генератор осуществляется выдача мощности в энергосистему, увеличением ЭДС генератора блока в  $(1 + X_d'' \cdot \sin \varphi_{ном})$ . Расчёт значений токов КЗ выполняется с помощью модели (п. 2.3), которые используются как токи в первичных обмотках ТТ. Для получения вторичных токов ТТ, соединённых по схеме «звезда» с нулевым проводом; для получения первичных токов используется модель КЗ (п.2.3), для получения вторичных токов используется математическая модель ТТ (п.2.4).

Рассмотрим порядок расчёта фазового сдвига токов плеч в фазе  $A$ . Расчёт фазового сдвига токов плеч в остальных фазах ДЗ выполняется аналогично. Отсчёт фазового сдвига производится относительно вектора вторичного тока  $\underline{I}_{2A}$  в обмотке ТТ, установленного в фазе  $A$  на стороне ВН СТ. Значение фазы для вектора  $\underline{I}_{2A}$  принято равным нулю. Для рассматриваемого повышающего СТ с 11-й группой соединения обмоток вектор тока плеча ДЗ в фазе  $A$  со стороны ВН  $\underline{I}_{nlBH}$  формируется как разность векторов  $\underline{I}_{2A}$  и  $\underline{I}_{2B}$ , где  $\underline{I}_{2A}$  и  $\underline{I}_{2B}$  – векторы вторичных токов в обмотках ТТ, установленных в фазах  $A$  и  $B$  на стороне ВН СТ. Обозначим фазовый сдвиг между вторичными токами ТТ в фазах  $A$  и  $B$  на стороне ВН СТ как  $\Delta\varphi_{AB}$ . Также введём вектор  $\underline{I}_{nlHN}$ , имеющий значение фазы  $\Delta\varphi_{Aa}$ , где  $\Delta\varphi_{Aa}$  – фазовый сдвиг между вторичными токами в фазе  $A$  на сторонах ВН и НН СТ. Тогда разность фаз токов плеч в фазе  $A$  ДЗ  $\Delta\varphi_{dA}$  формируется как разность фаз векторов  $\underline{I}_{nlBH}$  и  $\underline{I}_{nlHN}$ . При рассмотрении ДЗ двухконцевого объекта целесообразно определять дифференциальный ток как разность токов в плечах ДЗ. Поскольку при принятом способе формирования дифференциального тока при внешнем КЗ векторы токов плеч ДЗ  $\underline{I}_{nlBH}$  и  $\underline{I}_{nlHN}$  совпадают по фазе, то  $\Delta\varphi_{dA}$  равно нулю. Модули векторов токов в обмотках ТТ следует принимать равными действующему значению тока в соответствующих фазах.

Рассмотрим поведение защиты при внешнем 2-фазном КЗ на стороне ВН СТ (замыкаются фазы  $A$  и  $B$ ) в условиях отсутствия связи с энергосистемой на стороне ВН. В этом случае первичный ток в фазе  $C$  на стороне ВН отсутствует, а токи в фазах  $A$  и  $B$  на ВН и НН совпадают по фазе. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.2. Момент возникновения КЗ выбран таким, чтобы апериодическая слагающая была максимальной. В опыте нагрузка на вторичную обмотку измерительных ТТ на сторонах ВН и НН выбрана по кривым предельной кратности: в расчётном установившемся режиме внешнего КЗ полная погрешность ТТ не превосходит 10%. При этом нагрузка, подключенная к ТТ на стороне ВН СТ, превосходит номинальную нагрузку ТТ в 7 раз. Такие условия приняты с целью получения экстремальных ПП. Нагрузка, подключенная к вторичным обмоткам ТТ стороны НН, принята равной номинальной. Для всех

групп ТТ нагрузка чисто активная, не считая индуктивных сопротивлений рассеяния вторичных обмоток. Значения сопротивлений в нулевых проводах обеих групп ТТ приняты равными сопротивлениям фазных проводов. Остаточная индукция в магнитопроводе ТТ фазы  $A$  на стороне ВН принята равной  $-1,4$  Тл, а в магнитопроводе фазы  $B$  на стороне ВН остаточная индукция принята равной  $+1,4$  Тл. Остаточные индукции в сердечниках остальных ТТ приняты равными нулю. При таком сочетании начальных условий измерительные ТТ на стороне НН работают без насыщения, а ТТ на стороне ВН насыщаются в первом периоде ПП. Полученные при описанных условиях осциллограммы приведены на рисунке 3.2, на котором первичные токи изображены штриховыми линиями, а вторичные – сплошными.

Как видно из примера, даже при значительном насыщении ТТ погрешность определения сдвига фаз между вторичными токами не превышает  $23^\circ$ . Оценим по этим данным значение  $\Delta\varphi_{dA}$ . На рисунке 3.3 приведена векторная диаграмма для расчёта  $\Delta\varphi_{dA}$ . На диаграмме условно принято, что вектор  $\underline{I}_B$  опережает вектор  $\underline{I}_A$  на произвольный угол  $\Delta\varphi_{AB}$ , а вектор  $\underline{I}_{нНН}$  отстаёт от вектора  $\underline{I}_A$  на произвольный угол  $\Delta\varphi_{Aa}$ . В конце первого периода значение  $\Delta\varphi_{AB}$  равно  $180^\circ$ , значение  $\Delta\varphi_{Aa}$  равно  $-22,5^\circ$ . Тогда модуль значения  $\Delta\varphi_{dA}$  в конце первого периода составляет  $22,5^\circ$ , в конце второго –  $18,8^\circ$ , в конце третьего –  $15,0^\circ$ .

Определение значения  $\Delta\varphi_{dA}$  для основной гармоники с помощью цифрового преобразования Фурье (преобразование Фурье считается эталоном цифровой фильтрации [32]), поэтому с ним производится сравнение результатов действия предложенного алгоритма; обработка осциллограмм, вычисление токов в плечах ДЗ и определение фазового сдвига путём дискретного преобразования Фурье проводилось в специализированной программе FastView компании НТЦ «Механотроника», рисунок 3.4) даёт существенно большую погрешность: в конце первого периода рассчитанное значение модуля  $\Delta\varphi_{dA}$  составляет приблизительно  $50^\circ$ , в конце второго периода –  $41^\circ$ , в конце третьего –  $35^\circ$ . При этом, как видно из рисунка 3.2 и рисунка 3.4, оба метода точно определяют сдвиг на  $180^\circ$  между токами в обмотках ТТ, установленных на стороне ВН в фазах  $A$  и  $B$ , что является

ожидаемым результатом. Повышенная точность предложенного алгоритма по сравнению с непосредственной цифровой фильтрацией сигналов объясняется тем, что *предложенный алгоритм использует информацию только на участках идеальной трансформации, тогда как алгоритмы цифровой фильтрации используют при обработке всю входную информацию, включая как интервалы идеальной трансформации, так и участки работы ТТ с существенной погрешностью.*

Таким образом, несмотря на глубокое насыщение ТТ, погрешность определения фазового сдвига токов плеч ДЗ невелика и обеспечено селективное действие алгоритма защиты. Как показали результаты численных экспериментов, приведённые в приложении Г, достаточно точное определение фазового сдвига токов плеч обеспечивается и при внутренних КЗ. В целом предложенный алгоритм позволяет определять фазовый сдвиг при глубоких насыщениях ТТ *практически в два раза точнее*, чем алгоритм, основанный на цифровой фильтрации Фурье, считающейся эталоном точности цифровой фильтрации [32]. Для надёжной отстройки от погрешности, по данным проведённых численных экспериментов, следует принимать угол блокировки равным приблизительно  $30^\circ$ . При превышении измеренным фазовым сдвигом значения угла блокировки в течение более периода промышленной частоты и в условиях значительного дифференциального сигнала следует разрешать действие ДЗ. Ещё лучшие результаты данный алгоритм показывает при защите СТ с 12-й группой соединения обмоток, так как отсутствуют промежуточные вычисления, необходимые для расчёта токов плеч ДЗ, благодаря чему уменьшается погрешность определения  $\Delta\varphi_d$ . Больше число опытов, иллюстрирующих работу алгоритма, приведено в приложении Г.

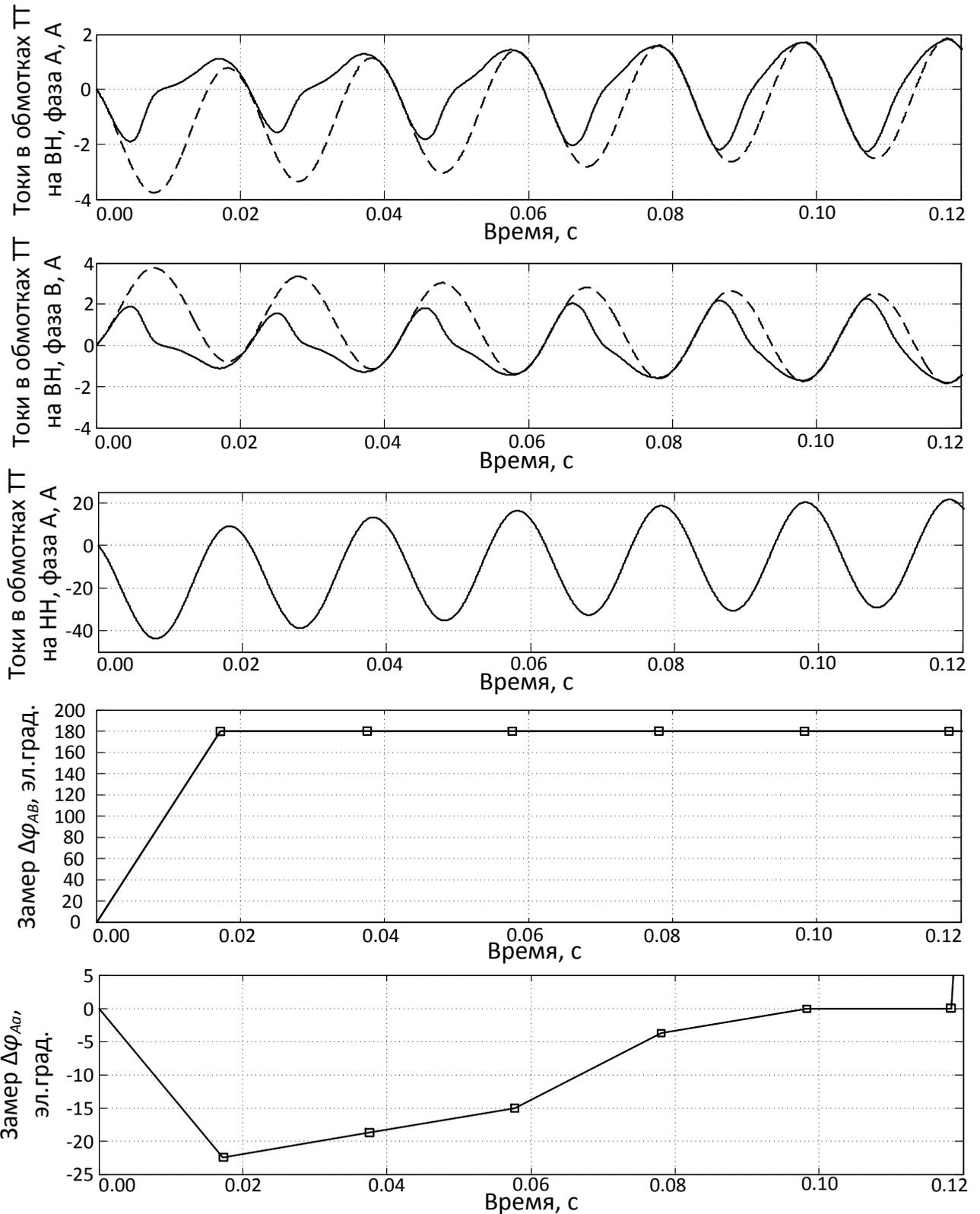


Рисунок 3.2 – Действие алгоритма определения сдвига по фазе при внешнем КЗ, использующего информацию только на интервалах идеальной трансформации

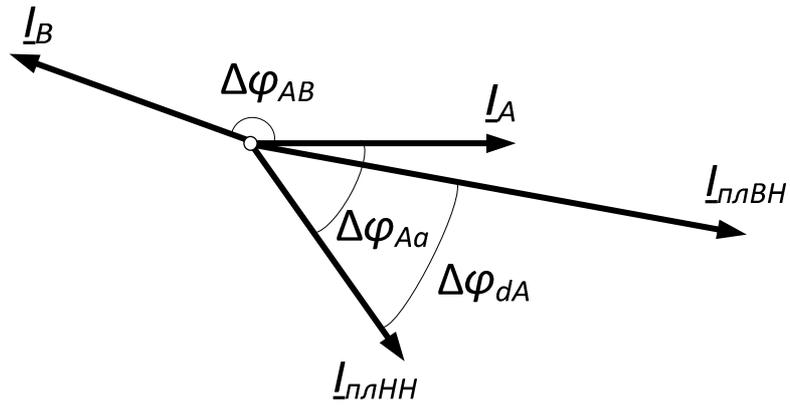


Рисунок 3.3 – Оценка значения  $\Delta\varphi_{dA}$  по измерениям  $\Delta\varphi_{AB}$  и  $\Delta\varphi_{Aa}$

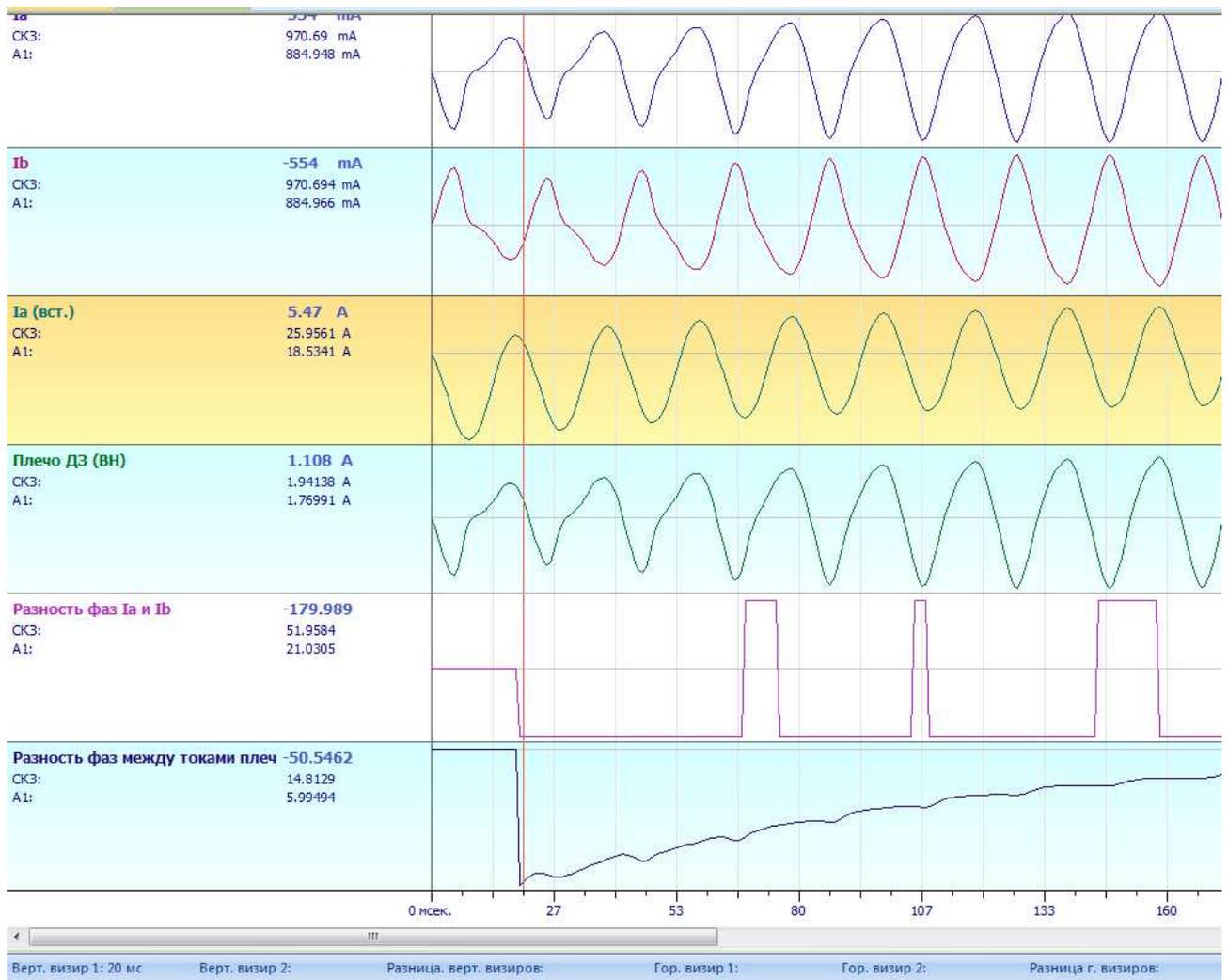


Рисунок 3.4 – Определение значения  $\Delta\varphi_{dA}$  средствами цифровой фильтрации

### 3.2 Алгоритм чувствительной защиты, распознающий бросок тока намагничивания и внутренние короткие замыкания

Для выявления внутренних КЗ при включении СТ под напряжение необходим специальный алгоритм, поскольку алгоритм, описанный в п.3.1.1, позволяет эффективно распознавать внутренние КЗ только в ограниченных режимах работы защищаемого СТ.

Наиболее простым и действенным способом распознавания КЗ в зоне защиты при включении СТ под напряжение является контроль токов на стороне ВН (в том числе в нейтрали СТ) и НН при использовании измерительных ТТ, установленных последовательно с фазными обмотками, соединёнными в «треугольник». Как описано в [33] и как показывают опыты на математической модели, для СТ со схемой соединения обмоток «звезда-треугольник» при БТН в условиях отсутствия повреждений токи в обмотках СТ, соединённых в «треугольник», равны, а сумма токов в фазах на питающей стороне равна току, протекающему в нейтрали. В то же время это не имеет места при *некоторых видах КЗ* в зоне действия защиты: при КЗ на землю на стороне сети с заземлённой нейтралью (в этом случае действует ДЗ нулевой последовательности, описанная в п.3.1.1), а также при КЗ на стороне сети с изолированной нейтралью, при которых сумма токов в обмотках «треугольника» не равна нулю. Используя этот признак, можно выявлять большинство повреждений СТ в первом периоде ПП. Однако таким образом невозможно выявлять КЗ без участия земли со стороны сети с заземлённой нейтралью, а также КЗ, возникающие после первого периода БТН. Существенным обстоятельством, усложняющим выявление КЗ на стороне НН, является то, что БТН возникают и в тех случаях, когда СТ включается под напряжение не на холостой ход, а при наличии подключенной нагрузки. Это может происходить при восстановлении напряжения на питающей стороне после устранения симметричного КЗ. Как показывают результаты моделирования (см. далее), при отсутствии повреждения токи в фазах «треугольника» в этом режиме оказываются неравными, поэтому рассматриваемый признак может быть использован только в тех случаях, когда осуществляется плановое включение СТ

на холостой ход. Если в течение первого периода внутреннее повреждение на НН не выявляется, данный *признак должен быть заблокирован и введён вновь только по команде персонала*, осуществляющего плановое включение ненагруженного СТ. Как признак отключенного положения выключателя, связывающего защищаемый СТ с нагрузкой, *можно также использовать положение блок-контактов* соответствующего выключателя, при этом должен быть предусмотрен вывод из действия защитной функции при возникновении неисправности блок-контактов, о чём сказано ниже (см. п.3.3).

Но для того чтобы иметь возможность выявлять *все виды КЗ*, которые могут возникать в начале БТН или в его процессе, необходимо найти и использовать универсальный подход. В [38] описаны качественные признаки БТН, контролируя наличие которых, можно принимать решение о необходимости срабатывания ДЗ в ходе ПП, сопровождающегося глубоким насыщением измерительных ТТ. Однако результаты исследования, представленные в [38], не учитывают весьма вероятную возможность одновременного включения фаз силового выключателя при включении СТ под напряжение, что приводит к существенному изменению формы БТН. Возникающий в этих условиях БТН принято называть «последовательным» [2]. Кроме того, в этих исследованиях не рассмотрен БТН, возникающий при включенной нагрузке СТ. Поэтому представляется необходимым уточнить приведенные в [38] качественные признаки БТН или предложить дополнительные, рассмотрев, в том числе, «последовательные» БТН и БТН при включенной нагрузке.

### **3.2.1 Исследование последовательных бросков тока намагничивания**

Алгоритм распознавания БТН и внутреннего КЗ в соответствии с [38, 66] подразумевает следующее. При появлении дифференциального тока, превышающего уровень заданной уставки, выполняется определение характера начальной полуволны первичного тока. Если длительность постоянства знака производной дифференциального тока (то есть длительность монотонного возрастания или убывания дифференциального тока) составляет менее 10 мс *во*

всех фазах, то текущим режимом является БТН, иначе – внутреннее КЗ. В последнем случае защита должна формировать сигнал на отключение защищаемого СТ и в дальнейшем контролировать устранение случившегося повреждения. Если в первом периоде выявляется режим БТН, то во втором и последующих периодах необходимо контролировать длительность интервалов времени от момента перехода через нуль производной чётной полувольты дифференциального тока до моментов окончания предыдущей ( $\Delta t_1$ ) и начала следующей ( $\Delta t_2$ ) полувольт (бестоковая пауза включается в интервал  $\Delta t_2$ ). Если во всех трёх фазах выполняется неравенство  $\Delta t_1 < \Delta t_2$ , то фиксируется, что продолжается режим БТН, иначе устанавливается, что имеет место внутреннее повреждение и защита должна формировать команду на отключение СТ.

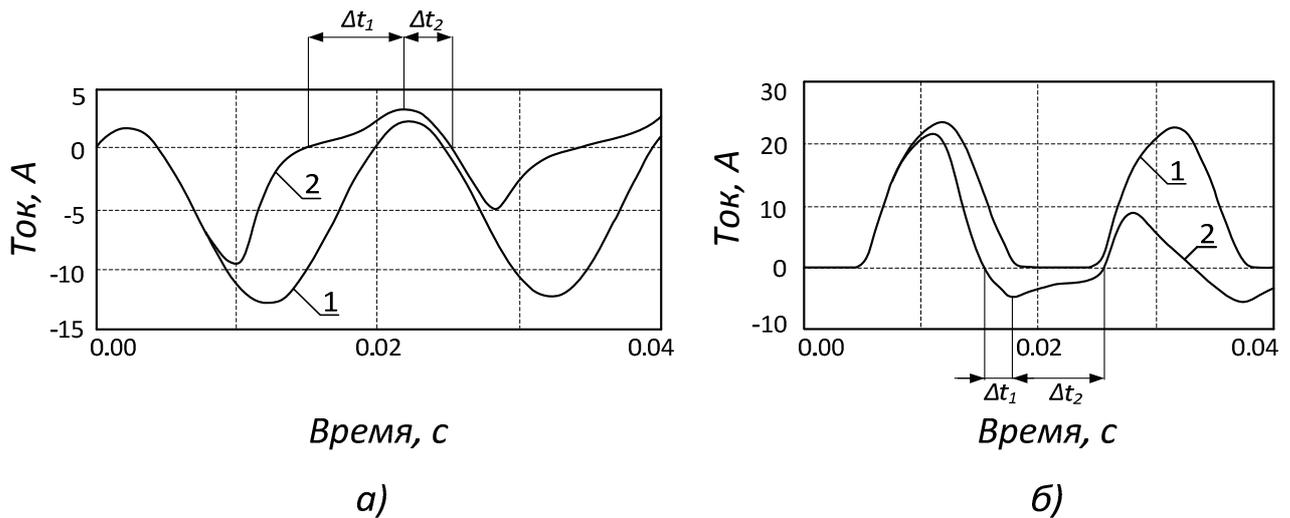


Рисунок 3.5 – Первичные и вторичные токи плеч ДЗ в условиях насыщения измерительных ТТ и интервалы  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ : а) при внутреннем КЗ; б) при БТН. Под цифрой 1 указан ток в первичной обмотке ТТ, под цифрой 2 – вторичный ток

Необходимость различать режимы внутреннего КЗ и БТН в первом периоде ПП обусловлена тем, что неравенство  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  в режиме БТН соблюдается лишь для чётных полувольт, тогда как для режима внутреннего КЗ данное неравенство может соблюдаться или только для чётных, или только для нечётных полувольт в зависимости от характера ПП. Возможны ситуации, когда ток аварийного режима

начинается с непродолжительной полуволны, которая не приводит к насыщению ТТ, тогда явление  $\Delta t_1 \geq \Delta t_2$  возникает для только нечётных полуволн дифференциального тока внутреннего КЗ (см. рисунок 3.5, а). В противном случае соотношение  $\Delta t_1 \geq \Delta t_2$  наблюдается для чётных полуволн. Если в первом периоде достоверно зафиксирован режим БТН по признаку длительности постоянства знака производной, то должна осуществляться проверка условия  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  именно для чётных полуволн дифференциального тока. В дальнейшем нарушение условия указывает на возникновение КЗ в процессе БТН.

В соответствии с предложенной в [38] методикой, чтобы отличить внутреннее КЗ от БТН необходимо осуществлять контроль формы дифференциального тока на протяжении всего периода промышленной частоты. Это является недостатком метода, так как приводит к задержке отключения внутреннего повреждения. Поэтому в разрабатываемой ДЗ целесообразно реализовать одновременную работу как упомянутых выше в данном пункте быстродействующих алгоритмов, так и выполнение контроля изменения формы дифференциального тока во времени. Эти алгоритмы определения внутреннего повреждения резервируют друг друга и снижают вероятность отказа ДЗ в срабатывании.

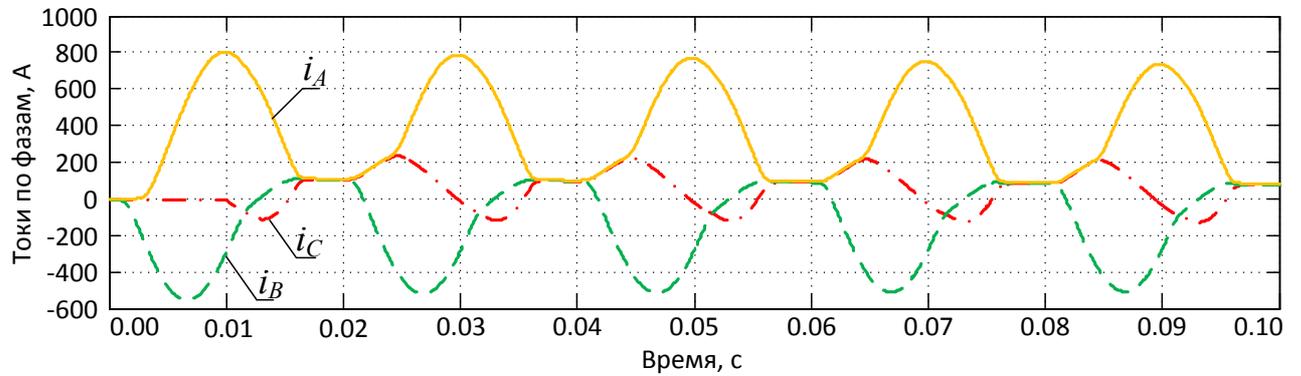
Разновременность включения фаз выключателя зависит от типа выключателя и его привода, а также качества выполнения ремонтных и пусконаладочных работ. Для выключателей с пофазным приводом разновременность замыкания фаз может составлять  $0,1 \div 0,2$  с, для выключателей с трёхфазным приводом эти времена существенно меньше [57]. Упомянутая разновременность включения фаз выключателя может быть существенно меньшей, поскольку разновременность на уровне  $0,1 \div 0,2$  с является некоторой оценочной величиной, служащей для расчёта выдержки времени чувствительных ступеней токовых защит нулевой последовательности ЛЭП.

Поскольку алгоритм распознавания режима БТН весьма чувствителен к форме кривой контролируемого тока, следует подробно рассмотреть некоторые общие случаи, когда неодновременность включения фаз выключателя способна

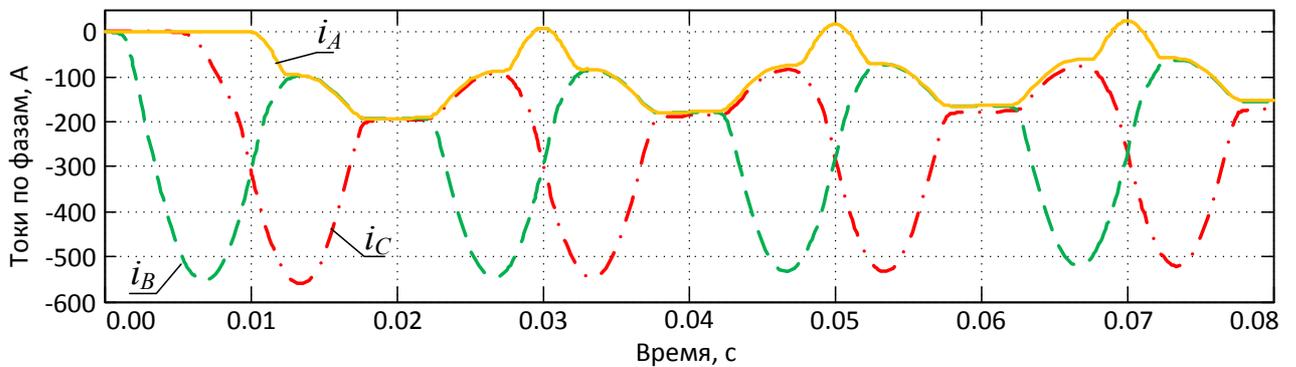
существенно изменить форму БТН. Это происходит в том случае, если включение последней из фаз происходит в тот момент, когда ток в нейтрали СТ не равен нулю [2]. Такой подход позволяет исключить ложное действие ДЗ в режиме БТН при любой разновременности замыкания фаз. Следует отметить, что исследовать явление последовательного БТН особенно важно, если защищаемый СТ подключается к сети через выключатели с пофазным приводом, поскольку для выключателей в общем приводе на все фазы разновременность включения незначительна и может не учитываться [12]. По тем же соображениям последовательный БТН может не учитываться, если защищаемый СТ имеет изолированную нейтраль, поскольку в этом случае последовательный БТН не отличается по форме от обычного.

На рисунке 3.6 приведены примеры осциллограмм последовательного БТН, полученные для СТ типа ТРДН-25000/110 при включении со стороны ВН, параметры СТ данного типа рассчитаны выше (п.2.5). На рисунке 3.6,*а* приведены осциллограммы БТН при доключении фазы *С* спустя 0,01 с после одновременного включения фаз *А* и *В* в начальный момент времени, при этом остальные начальные условия соответствуют возникновению БТН II типа, сопротивление питающей энергосистемы принято равным нулю. Результаты моделирования подтверждают указанную в [2] характерную черту последовательного БТН – смещение токов намагничивания всех фаз по оси токов за счёт появления в ПП постоянных составляющих токов определённой полярности. Как видно из рисунка 3.6, *а*, смещение тока намагничивания в конце первого периода составляет около 100 А и наблюдается во всех фазах. Со временем эта слагающая тока затухает с постоянной времени, сопоставимой с постоянной времени аperiodической слагающей тока КЗ. На рисунке 3.6, *б* приведена осциллограмма БТН, возникающего при тех же условиях, если фаза *А* доключается спустя 0,01 с. Данный режим характеризуется значительным изменением формы тока в фазе *А* по сравнению с предыдущим случаем, а также большей аperiodической слагающей в токе БТН (смещение составляет 200 А в первом периоде). На рисунке 3.6, *в* приведён пример последовательного БТН при

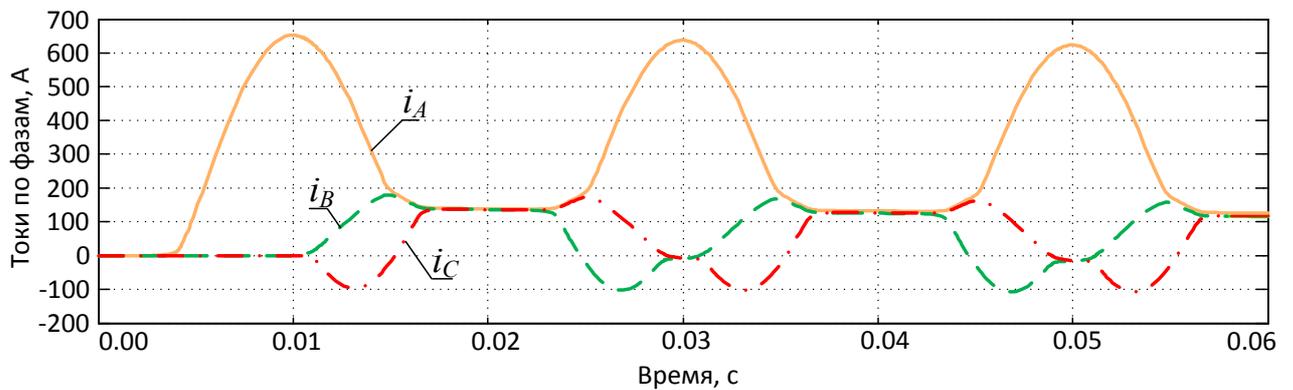
одновременном доключении фаз  $B$  и  $C$  выключателя в момент времени  $0,01$  с после включения фазы  $A$ .



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Примеры последовательного БТН:

а) при доключении фазы  $C$ ; б) при доключении фазы  $A$ ; в) при доключении фаз  $B$  и  $C$

Для проведения анализа ПП в первичных и вторичных цепях ТТ использованы математические модели СТ и ТТ, описание которых приведено в

главе 2. В качестве СТ рассмотрен ТРДН-25000/110. На стороне ВН данного СТ установлены ТТ типа ТВТ-110 со следующими номинальными параметрами [19]: номинальный первичный ток  $I_{1ТТ} = 200$  А (данный параметр ТТ выбран из предположения, что СТ может быть перегружен на 40%), номинальный вторичный ток ТТ  $I_{2ТТ} = 5$  А, длина средней магнитной линии  $l_{cp} = 1,95$  м, площадь поперечного сечения сердечника  $Q = 57,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, число витков вторичной обмотки  $w_2 = 39$ , активное сопротивление вторичной обмотки ТТ  $R_2 = 0,11$  Ом, реактивное сопротивление вторичной обмотки ТТ  $X_2 = 0,39$  Ом, номинальная вторичная нагрузка  $Z_{2ном} = 0,8$  Ом. При расчёте принято, что сопротивление нагрузки с учётом сопротивления контрольных кабелей составляет  $R_{нагр} = 0,2$  Ом, а активное сопротивление нулевого провода равно 0,1 Ом.

Предложенный в [38] алгоритм идентификации режима предназначен для использования микропроцессорным устройством ДЗ. Благодаря использованию микропроцессорных устройств защиты, измерительные ТТ на всех сторонах защищаемого СТ можно соединять по одинаковой схеме (предпочтительно обе группы ТТ соединять по схеме «звезда», что зачастую практикуется при выполнении защит СТ в настоящее время), при этом компенсация фазового сдвига осуществляется программно, а две группы ТТ не имеют общей нагрузки и не связаны между собой. При этом дифференциальный сигнал формируется алгоритмически устройством ДЗ. В большинстве современных микропроцессорных ДЗ СТ вычисление токов плеч ДЗ и дифференциального тока производится в векторной форме для чего определяются параметры основной гармоники средствами цифровой фильтрации [15], однако этот способ неприемлем для защиты, анализирующей *изменение мгновенных значений* входных токов, а также *дифференциального тока*. Поэтому если ТТ на стороне высшего напряжения СТ соединены по схеме «звезда», то для компенсации фазового сдвига токов плеч дифференциальной защиты вычисляется разность токов фаз (таким образом имитируется работа ТТ по схеме «треугольника») по следующим выражениям:

$$\begin{cases} i_{nA}(t) = i_{2A}(t) - i_{2B}(t); \\ i_{nB}(t) = i_{2B}(t) - i_{2C}(t); \\ i_{nC}(t) = i_{2C}(t) - i_{2A}(t), \end{cases} \quad (3.14)$$

где  $i_{nA}(t)$ ,  $i_{nB}(t)$ ,  $i_{nC}(t)$  – мгновенные значения токов в плече ДЗ в момент времени  $t$  по фазам  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответственно;

$i_{2A}(t)$ ,  $i_{2B}(t)$ ,  $i_{2C}(t)$  – мгновенные значения вторичных токов в обмотках ТТ в момент времени  $t$  по фазам  $A$ ,  $B$  и  $C$  соответственно.

При включении СТ на холостой ход дифференциальный ток определяется токами, протекающими по питающей стороне, то есть в этом случае, очевидно,  $i_{nA}(t)$ ,  $i_{nB}(t)$ ,  $i_{nC}(t)$  равны дифференциальным токам. Рассмотрим результаты опытов, выполненных с целью уточнения качественных признаков БТН, описанных в [38].

На рисунке 3.7 показаны фазные дифференциальные токи в режиме последовательного БТН, приведенного на рисунке 3.6, *в*, остаточная индукция ТТ, установленного в фазе  $A$ , составляет 1,2 Тл, остаточные индукции ТТ в остальных фазах равны нулю, группа ТТ соединена по схеме «звезда» (здесь и далее на рисунках показаны вторичные токи ТТ). Из рисунка 3.7 видно, что в результате насыщения ТТ в фазе  $A$  через полпериода после начала ПП длительность постоянства знака производной дифференциального тока в первом периоде составляет *приблизительно 13 мс в фазах A и C*. Такое же явление наблюдается в фазе  $A$  во вторичной обмотке насыщенного ТТ. Такое увеличение длительности постоянства знака производной при БТН обуславливается попаданием медленно затухающей постоянной составляющей последовательного БТН в дифференциальный сигнал в результате насыщения одного из ТТ, так как *при ненасыщенных ТТ эта составляющая компенсируется взаимным вычитанием сигналов*, и в таком случае форма последовательного БТН не отличается от формы простого БТН.

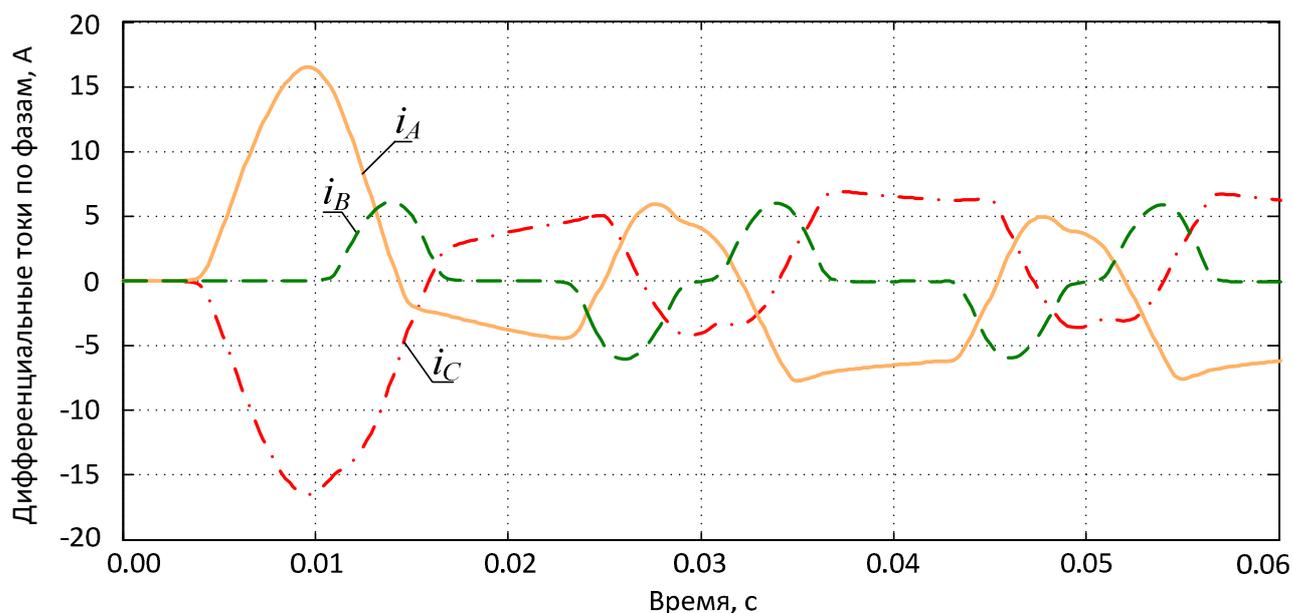


Рисунок 3.7 – Пример, иллюстрирующий продолжительность постоянства знака производной в дифференциальном токе более 10 мс при последовательном БТН

Алгоритм защиты, приведённый в [38, 66], в первом периоде ПП по этому признаку идентифицирует последовательный БТН как внутреннее двухфазное КЗ, что вызывает ложное действие защиты. Кроме того, для чётной полуволны дифференциального тока в фазах  $A$  и  $C$  в первом периоде ПП *не выполняется* свойственное БТН неравенство  $\Delta t_1 < \Delta t_2$ , однако это неравенство соблюдается для чётных полуволн в последующих периодах. Такое явление иногда наблюдается при первом и относительно неглубоком насыщении ТТ при последовательном БТН. Если насыщение ТТ происходит не в первом, а в последующих периодах БТН, то это приводит к ложному действию защиты в ходе ПП (соответствующий пример приведен ниже на рисунке 3.9). Описанное явление наблюдается, если до насыщения ТТ дифференциальный сигнал имеет *апериодический характер*, а ТТ соединены по схеме «звезда».

На рисунке 3.8, *a* рассмотрен этот же случай последовательного БТН при соединении ТТ по схеме «треугольник». Остаточные индукции в сердечниках ТТ, установленных в фазах  $A$  и  $B$ , приняты равными 1,4 Тл. Остаточная индукция в сердечнике ТТ фазы  $C$  принята равной нулю. Как видно из осциллограмм на рисунке 3.8, для чётной полуволны дифференциального тока в фазе  $B$  характерное

для БТН неравенство  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  нарушается за счёт проникновения постоянной составляющей последовательного БТН в дифференциальный сигнал. Нарушение неравенства  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  сохраняется для этой фазы в течение нескольких периодов. То же наблюдается при соединении ТТ по схеме «звезда» при аналогичных условиях (остаточные индукции в сердечниках ТТ в фазах *A* и *B* равны соответственно 1,4 Тл и 1,3 Тл, индукция в сердечнике ТТ в фазе *C* не изменена), рисунок 3.8,б. Явление длительного нарушения неравенства  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  имеет место, если до насыщения ТТ дифференциальный сигнал имеет *периодический характер*.

Отметим, что скорость изменения тока в фазе *B* на участке  $\Delta t_1$  относительно невелика (при соединении группы ТТ по схеме «треугольник» скорость изменения тока составляет приблизительно 0,15 А/мс, при соединении в «звезду» эта скорость на 20% выше), поэтому обеспечить правильное функционирование ДЗ возможно, очевидно, выбором уставки по значению скорости изменения тока, ниже значения которой медленно изменяющийся сигнал включается в интервал  $\Delta t_2$  (этим же способом можно обеспечить недействие защиты в первом периоде ПП в предыдущем примере, рисунок 3.7). Однако при этом возможно, что некоторая часть интервала  $\Delta t_1$  при внутреннем КЗ будет включена в интервал  $\Delta t_2$  в результате медленного изменения тока в аварийном режиме при насыщенных ТТ, что может привести к увеличению значения  $\Delta t_2$  и задержке срабатывания ДЗ до выполнения условия  $\Delta t_1 \geq \Delta t_2$ . Длительность постоянства знака производной в фазе *B* (рисунок 3.8, а), строго говоря, превышает 10 мс в первом периоде ПП, однако применение уставки по скорости изменения тока обеспечивает несрабатывание ДЗ при БТН (ток считается неизменным и защита не срабатывает). С другой стороны, для разных типов СТ, ТТ и их нагрузки необходимо уточнение значения этой уставки для каждого конкретного случая, что делает защиту менее универсальной и подлежащей сложной настройке с использованием специализированных средств анализа характера ПП в первичных и вторичных цепях ДЗ.

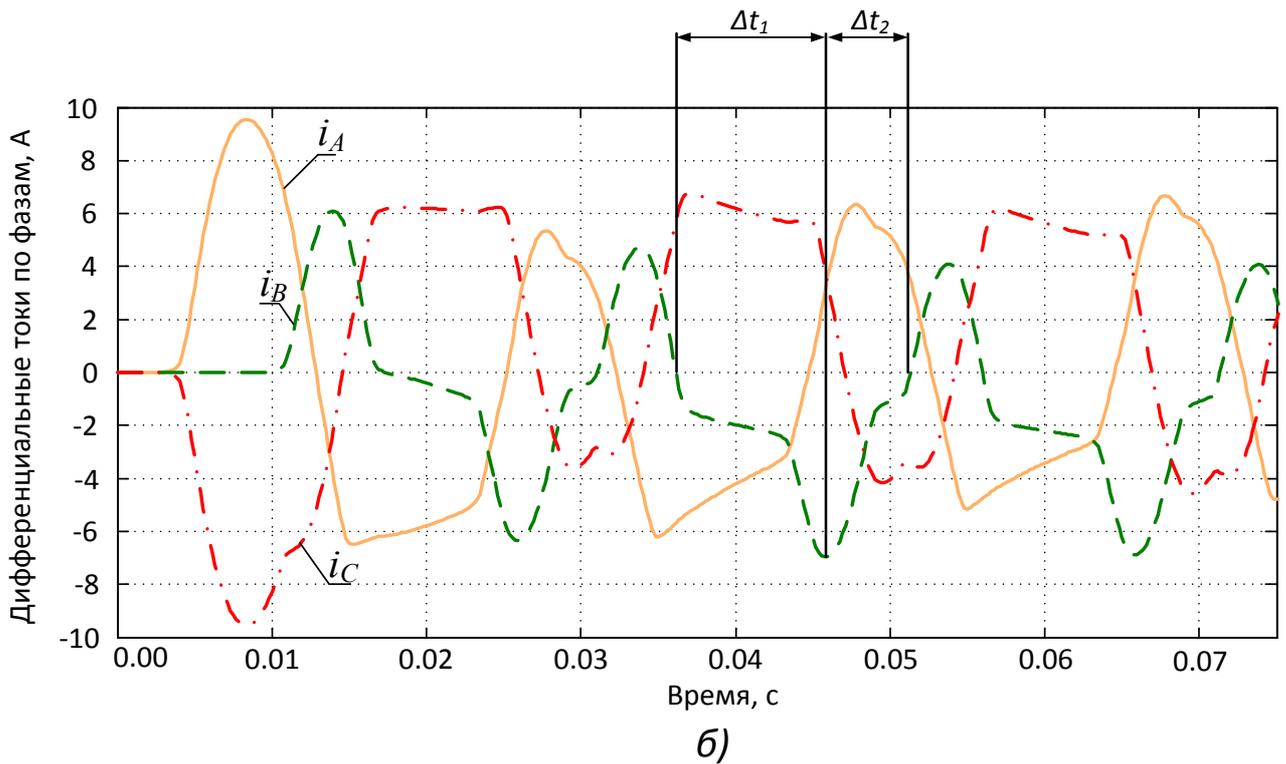
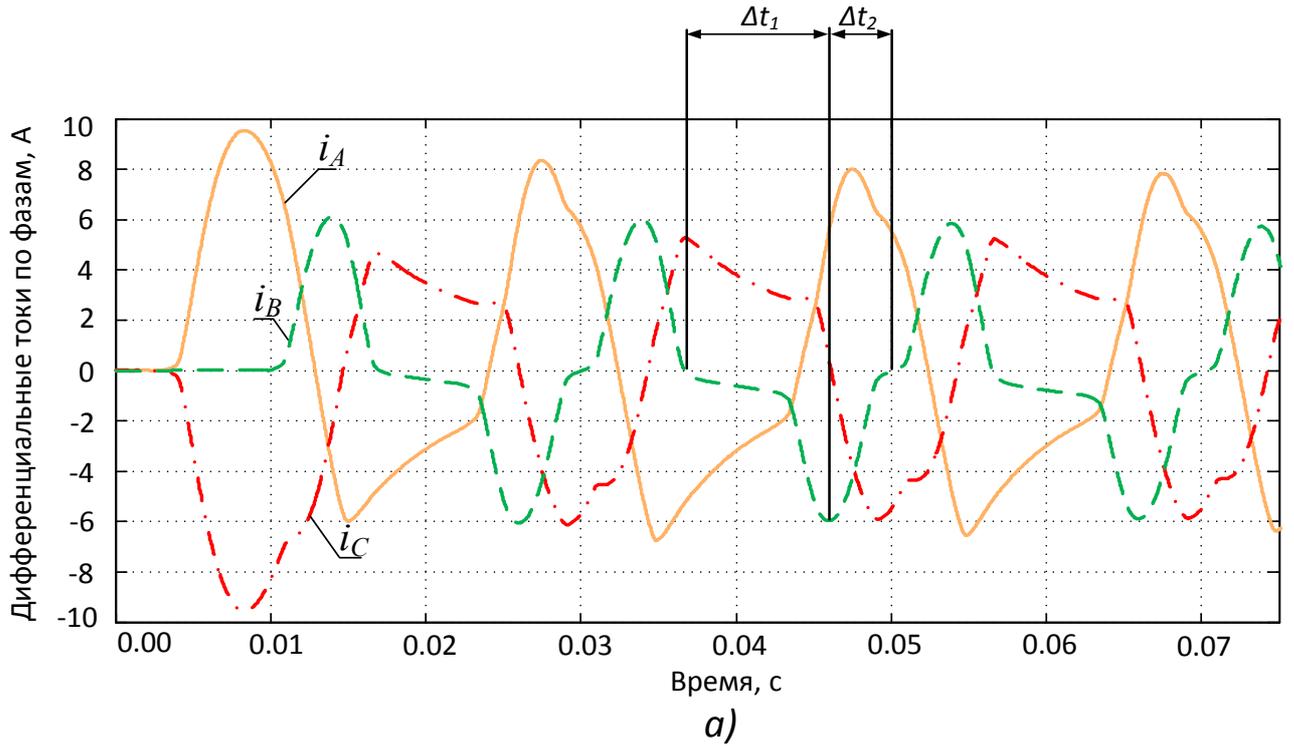


Рисунок 3.8 – Пример длительного нарушения выполнения неравенства  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  для чётных полуволн дифференциального тока при последовательном БТН: а) при соединении измерительных ТТ по схеме «треугольник»; б) при соединении измерительных ТТ по схеме «звезда»

Рассмотрим случай, в котором при включении СТ под напряжение в его обмотках возникает последовательный БТН такой же формы, как и на рисунке 3.6, б. Измерительные ТТ соединены по схеме «звезда», значения остаточных индукций в сердечниках ТТ фаз А, В и С приняты соответственно равными:  $B_{rA} = 1,4$  Тл,  $B_{rB} = B_{rC} = 0,5$  Тл. На рисунке 3.9 представлена осциллограмма дифференциального тока, протекающего в реле фазы А, а также показано действие счётчиков времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  для чётных полуолн (частота дискретизации обрабатываемого сигнала составляет 4,8 кГц). Как видно из рисунка 3.9, в результате насыщения ТТ в ходе ПП условие  $\Delta t_1 < \Delta t_2$ , свойственное БТН, кратковременно нарушается, и защита может ложно подействовать на отключение защищаемого СТ спустя время  $t_{откл} = 143,3$  мс с момента начала БТН. Обеспечить правильное функционирование ДЗ возможно, требуя выполнение условия  $\Delta t_1 \geq \Delta t_2$  два раза подряд или более.

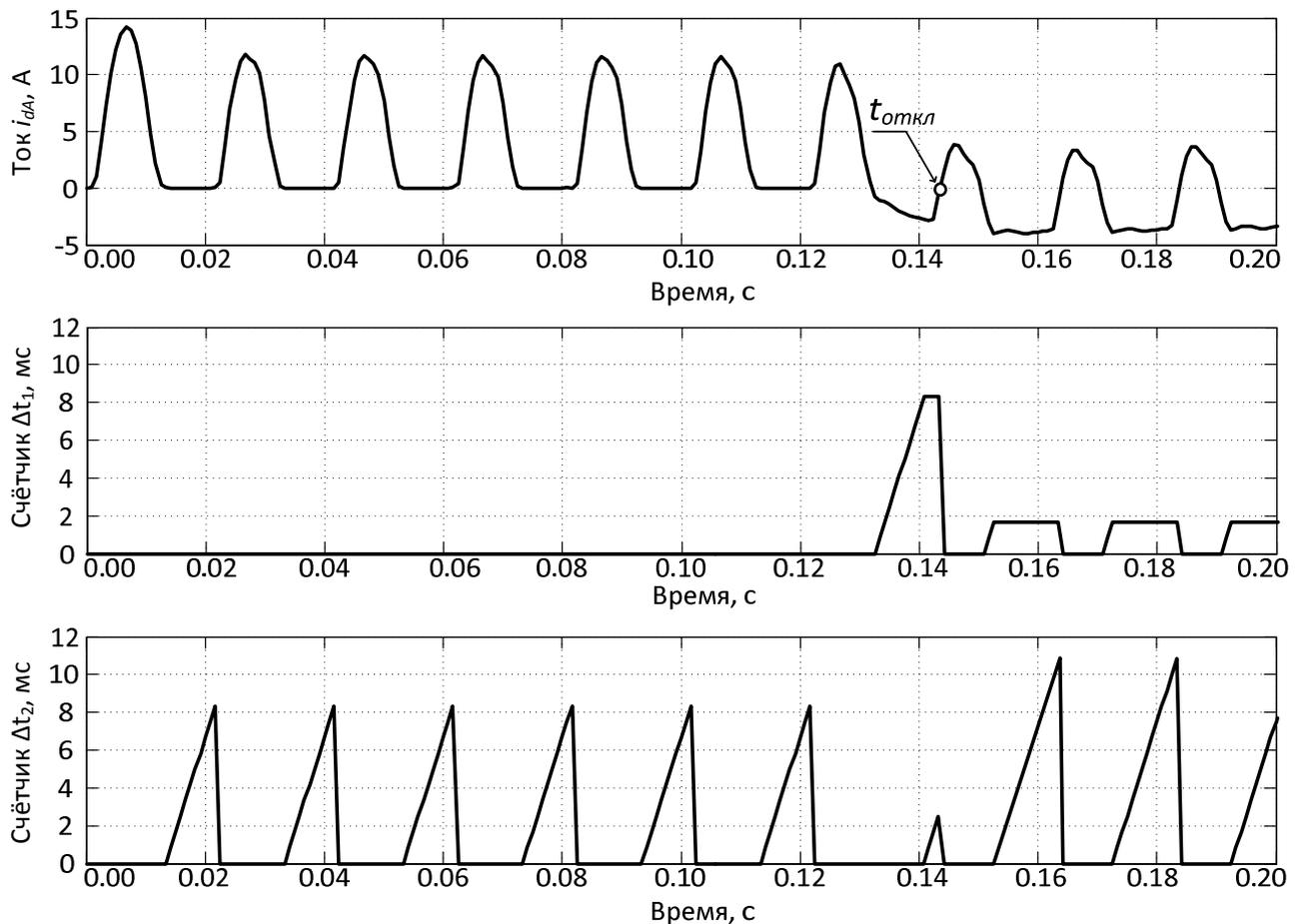


Рисунок 3.9 – Пример кратковременного нарушения условия  $\Delta t_1 < \Delta t_2$  при последовательном БТН

Рассмотрим этот же случай последовательного БТН при иных значениях остаточных индукций в сердечниках ТТ фаз  $A$ ,  $B$  и  $C$ :  $B_{rA} = -1,4$  Тл,  $B_{rB} = B_{rC} = 1,4$  Тл. Насыщение только одного из ТТ в ходе ПП (ТТ в фазе  $A$ ) приводит к появлению постоянной составляющей в дифференциальном токе, что обуславливает неизменность полярности дифференциального тока в течение длительного времени (рисунок 3.10). Это, в свою очередь, делает невозможным контроль времён  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  для чётных полуволн, так как предполагается, что чётная полуволна является или бестоковой паузой, или имеет иную полярность, чем нечётная полуволна. Контроль времён  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  оказывается возможным только спустя значительное время, по истечении которого дифференциальный ток начинает достигать нулевого значения и изменять полярность.

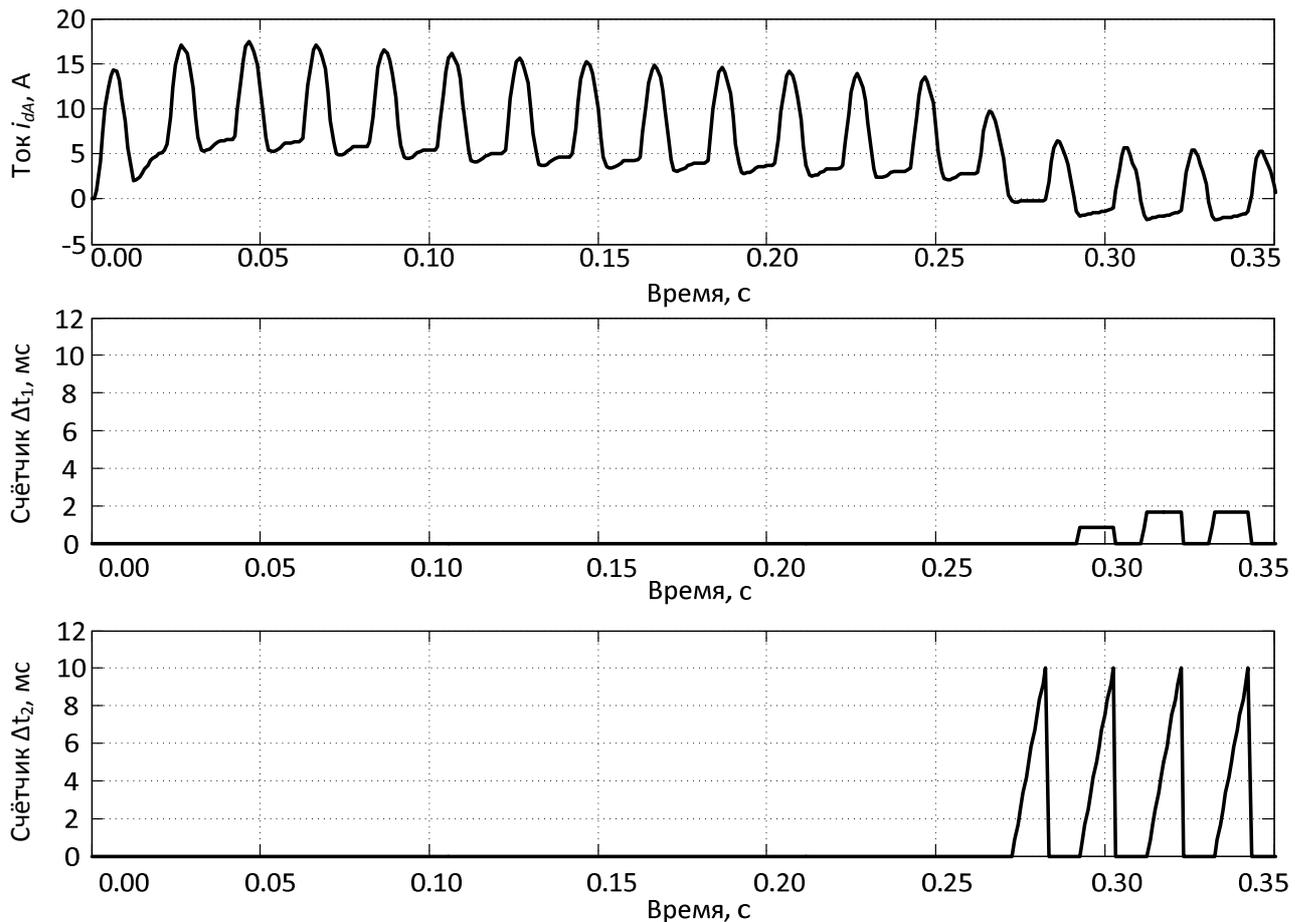


Рисунок 3.10 – Пример случая невозможности формирования значений  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  в течение длительного времени при последовательном БТН

В рассматриваемом случае действие ДЗ в течение длительного периода времени не определено, поскольку  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  не формируются. Это значит, что ДЗ *не должна использовать информацию о  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  как единственный признак наличия повреждений внутри зоны защиты*. Во избежание некорректного действия защиты в этом режиме необходимо предотвратить ложное срабатывание ДЗ иными способами, например блокировкой по 2-й гармонике дифференциального тока, до появления ненулевых значений  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ . Длительное смещение дифференциального тока относительно оси токов не наблюдается при соединении ТТ по схеме «треугольник». Отметим также, что при соединении ТТ по схеме «звезда» имеется возможность непосредственного контроля вторичного фазного тока ТТ наряду с дифференциальным током, полученным путём вычислений. Однако все описанные выше явления, наблюдаемые в дифференциальном токе при последовательном БТН, также присущи *фазному вторичному току ТТ*, поэтому использование фазных токов *не даёт преимуществ* в отстройке от последовательного БТН.

Таким образом, особенности изменения дифференциального тока при последовательном БТН таковы, что способны привести к ложному отключению СТ от действия рассматриваемой ДЗ, *так как качественные признаки внутренних КЗ, выявленные в [38], при последовательном БТН также проявляются*. Поэтому, во избежание ложного действия защиты, необходимо выполнить соответствующие корректировки, связанные, главным образом, с увеличением длительности идентификации режима и с выбором уставки по скорости изменения дифференциального тока, при превышении которой соответствующий отрезок времени должен быть включен в интервал  $\Delta t_1$ , иначе – в интервал  $\Delta t_2$ . Однако такой подход неизбежно увеличивает вероятность задержки срабатывания ДЗ при внутренних КЗ, а также существенно усложняет выбор уставок защиты (применение для защиты качественных признаков аварийных и нормальных режимов как раз направлено на *исключение необходимости расчёта её уставок*). При соединении ТТ по схеме «треугольник» оказывается возможным иметь более чувствительную и быстродействующую защиту вследствие относительно менее

выраженного искажения дифференциального тока при последовательном БТН. Тем не менее, соединение ТТ по схеме «треугольник» нежелательно, так как такая схема не только увеличивает нагрузку на ТТ, но и может обусловить неправильное действие ДЗ при внешних КЗ при насыщении ТТ, работающих в группе [5]. Кроме того, такое соединение ТТ не позволяет непосредственно контролировать токи в обмотках ТТ, а значит, нельзя использовать предложенный выше дифференциально-фазный алгоритм защиты (п.3.1.3).

Таким образом, можно заключить, что в режиме последовательных БТН предложенный ранее способ распознавания аварийных и нормальных режимов не способен безошибочно определить режим работы СТ, в связи с чем его применение для защит СТ, в которых не исключён последовательный БТН, *нежелательно*. Для повышения устойчивости функционирования ДЗ таких СТ целесообразно использовать новые количественные признаки аварийных и нормальных режимов. Предлагаемые к использованию признаки рассмотрены ниже в п.3.2.3.

### **3.2.2 Исследование броска тока намагничивания нагруженного трансформатора**

Рассмотрим влияние нагрузки СТ на форму кривой дифференциального тока при БТН. В качестве объекта исследования взят СТ типа ТРДН-25000/110 с рассчитанными параметрами эквивалентными двухобмоточному СТ (расщеплённые обмотки НН соединены параллельно), к стороне НН которого подключена нагрузка. В справочных данных [19] отсутствует информация о ТТ с номинальным напряжением 6 кВ и номинальным первичным током, соответствующим номинальному току СТ на стороне НН. Поэтому для *качественной оценки* БТН при нагруженном СТ полагаем, что на стороне ВН СТ установлены ТТ типа ТВТ-110 (параметры нагрузки остаются те же, что в предыдущих опытах), а на стороне НН установлены ТТ типа ТВ-10/50, имеющие следующие конструктивные параметры [19]: номинальный первичный ток  $I_{1ТТ} = 3000$  А, номинальный вторичный ток ТТ  $I_{2ТТ} = 5$  А, длина средней магнитной

линии  $l_{cp} = 0,78$  м, площадь поперечного сечения сердечника  $Q = 9,0 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, число витков вторичной обмотки  $w_2 = 600$ , активное сопротивление вторичной обмотки ТТ  $R_2 = 0,87$  Ом, реактивное сопротивление вторичной обмотки ТТ  $X_2 = 1,27$  Ом, номинальная вторичная нагрузка  $Z_{2ном} = 1,2$  Ом. Принимаем, что сопротивление нагрузки с учётом сопротивления контрольных кабелей составляет  $R_{нагр} = 1,2$  Ом, а активное сопротивление нулевого провода равно 1 Ом; ТТ на стороне НН соединены по схеме «звезда».

Принимаем сторону ВН за основную сторону СТ, к которой приводятся токи плеч ДЗ. Для рассматриваемого случая группы соединения обмоток СТ и места установки ТТ вторичные значения токов плеч со стороны ВН  $i_{пл.ВН2}$  и стороны НН  $i_{пл.НН2}$  приводятся к первичным токам основной стороны СТ (соответственно  $i_{пл.ВН1}$  и  $i_{пл.НН1}$ ) по формулам:

$$\begin{cases} i_{пл.ВН1}(t) = i_{пл.ВН2}(t) K_{ТТ.ВН}; \\ i_{пл.НН1}(t) = \frac{i_{пл.НН2}(t)}{K_{СТ}} K_{ТТ.НН} \sqrt{3}, \end{cases} \quad (3.15)$$

где  $K_{ТТ.ВН}$ ,  $K_{ТТ.НН}$  – соответственно коэффициенты трансформации ТТ на стороне ВН и НН СТ, определяемые как отношения первичных токов к вторичным;

$K_{СТ}$  – коэффициент трансформации СТ, определяемый как отношение номинального линейного напряжения основной стороны (ВН) к номинальному линейному напряжению неосновной стороны (НН).

Если измерительные ТТ соединены по схеме «звезда», компенсация фазового сдвига токов плеч ДЗ производится по формуле (3.14). Нагрузка СТ может изменяться в широких пределах, и в момент возникновения БТН может быть как меньше, так и больше номинальной. Для *качественной оценки характера токов при БТН* нагруженного СТ мощность нагрузки выбиралась таким образом, чтобы в установившемся нагрузочном режиме токи на сторонах ВН и НН рассматриваемого СТ были приблизительно равны номинальным

значениям, коэффициент мощности нагрузки при этом был снижен до 0,6 для имитации самозапуска электродвигателей нагрузки после перерыва питания. Изменение мощности нагрузки в ходе ПП не учитывалось из-за малой продолжительности времени моделирования. В этих условиях хорошо просматривается главная особенность БТН нагруженного СТ, а именно наложение нагрузочного синусоидального тока на несинусоидальный ток намагничивания. Рассмотрим характер ПП при включении СТ под напряжение при начальных условиях, соответствующих появлению БТН II типа.

Осциллограммы токов в ПП восстановления напряжения нагруженного СТ показаны на рисунке 3.11, на котором изображены дифференциальные токи, приведённые к стороне ВН СТ (насыщение измерительных ТТ отсутствует). Как видно из осциллограмм, при отсутствии насыщения измерительных ТТ и при идеальном выравнивании токов плеч дифференциальные токи содержат бестоковые паузы, хотя в первичных и вторичных токах ТТ они отсутствуют. Амплитудные значения БТН приблизительно соответствуют БТН при включении ненагруженного СТ. Кроме того, из-за наличия токов нагрузки фазные токи на стороне НН СТ (токи в обмотке, соединённой в «треугольник») не равны между собой.

На рисунке 3.11, *г* приведены дифференциальные токи для случая, в котором ТТ работают без погрешности, и поэтому в установившемся режиме отсутствуют токи небаланса. Однако в реальных условиях токи плеч не всегда могут быть идеально выравнены. Различия возникают из-за погрешностей ТТ, установленных на разных сторонах СТ, вследствие изменения  $K_{СТ}$  и иных факторов (см. формулу (3.2)). Предполагаем, что вследствие упомянутых факторов токи плеч со стороны НН на 15-20% меньше по модулю токов плеч ДЗ со стороны ВН (угловой погрешностью ТТ пренебрегаем) и рассматриваем особенности изменения мгновенных значений дифференциальных токов в этом режиме. Задаём начальные условия, соответствующие появлению БТН I типа. На рисунке 3.12 представлены осциллограммы токов в СТ в этих условиях. На рисунке 3.12, *в* приведены осциллограммы дифференциальных токов при

отсутствии погрешности выравнивания токов плеч ДЗ. На рисунке 3.12, *г* приведены осциллограммы дифференциальных токов, полученные при условии наличия тока небаланса в установившемся режиме (насыщение ТТ во всех случаях отсутствует). Как видно из сравнения осциллограмм дифференциальных токов, наличие синусоидального тока небаланса приводит к исчезновению бестоковой паузы в дифференциальном токе, за счёт чего длительность постоянства знака производной в начале ПП в токе фазы *B* равна 10 мс, а интервалы  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  для чётных полувольт фазы *A* равны между собой. Это является ожидаемым результатом, но в соответствии с [38], это же одновременно является признаком внутреннего повреждения и может обусловить неправильную работу защиты в рассматриваемом режиме. Отметим, что с ростом мощности нагрузки токи намагничивания уменьшаются по амплитуде, а синусоидальные токи небаланса возрастают, что приводит к более выраженному проявлению указанных особенностей дифференциальных сигналов. В особенности повышается вероятность ложного отключения СТ в том случае, когда защищаемый трансформатор в предаварийном режиме питал нагрузку, мощность которой была выше номинальной мощности СТ, а после восстановления питания начался процесс самозапуска электродвигателей нагрузки (в приведённых примерах мощность нагрузки принята несколько меньше номинальной). Отметим также, что при увеличении мощности нагрузки фазные токи на сторонах ВН и НН практически приобретают синусоидальную форму, тогда как дифференциальный ток и в этом случае по форме подобен току включения холостого СТ.

Ввиду невозможности достоверно определять режим работы СТ в первом и последующих периодах ПП данный алгоритм целесообразно выводить из действия при наличии тока нагрузки, что легко реализуется алгоритмически путём контроля наличия токов на приёмной стороне.

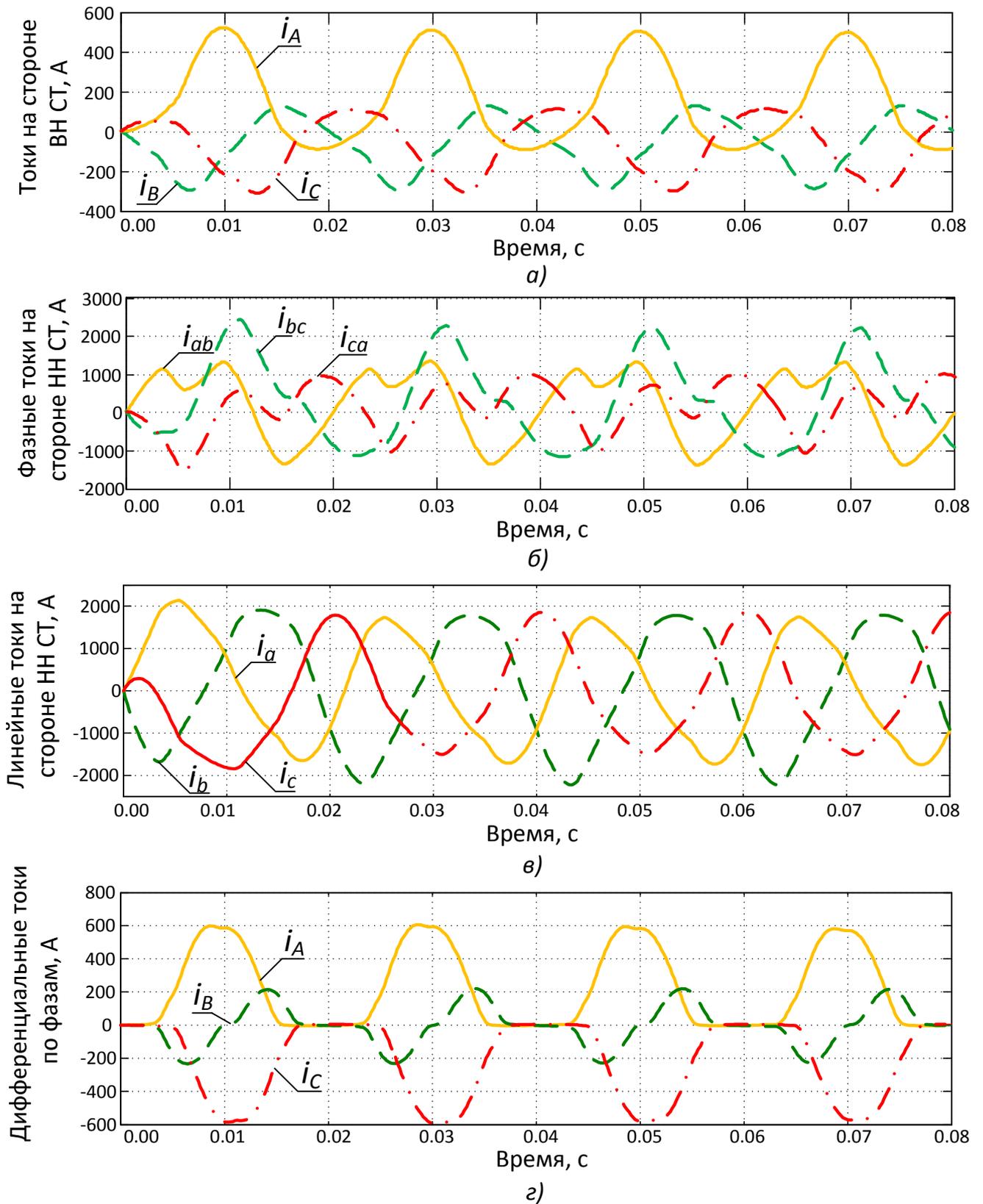


Рисунок 3.11 – Осциллограммы БТН II типа нагруженного СТ: а) токи на стороне ВН СТ; б) токи в обмотке СТ, соединённой в «треугольник»; в) токи в нагрузке на стороне НН СТ; з) дифференциальные токи

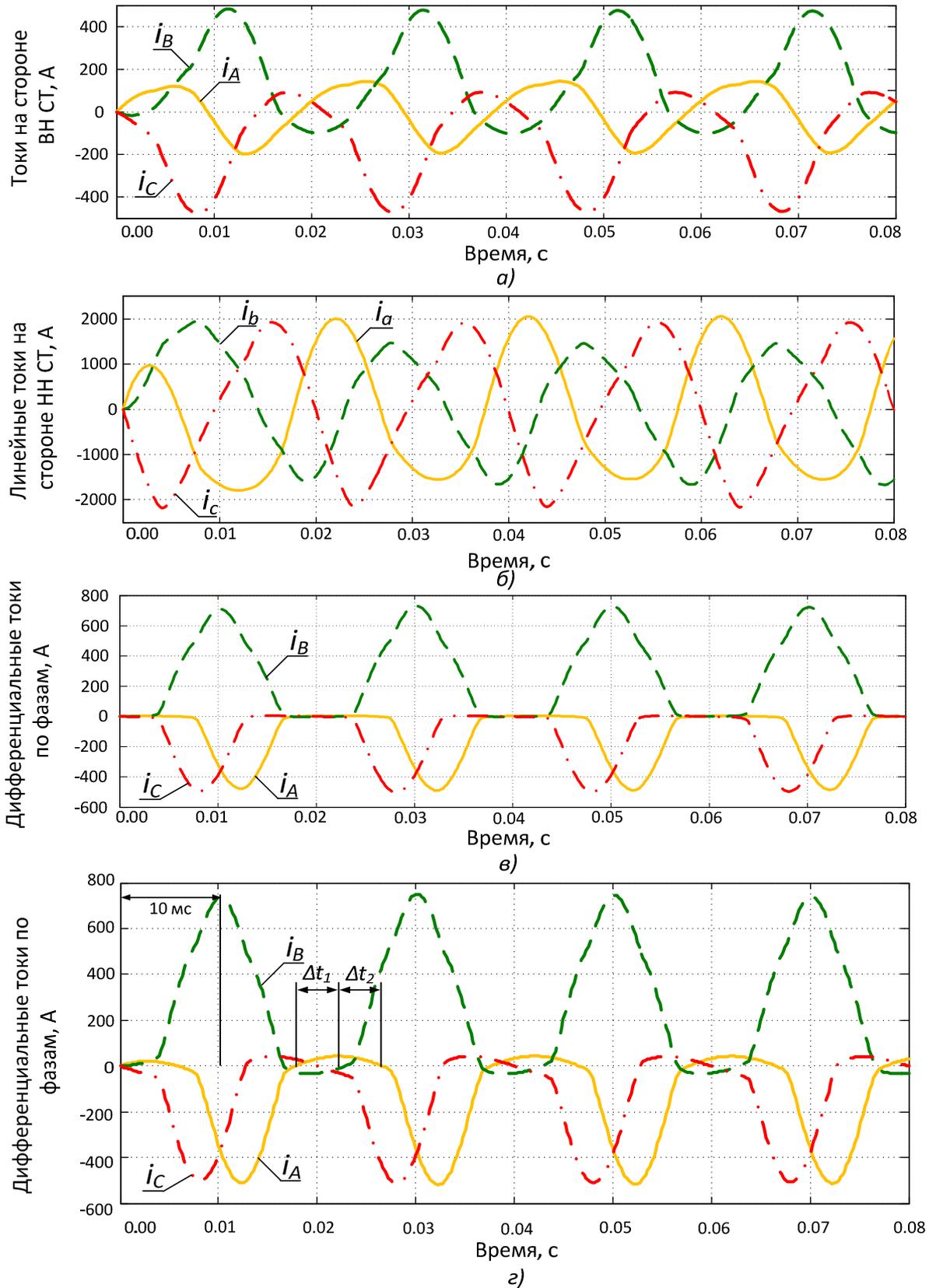


Рисунок 3.12 – Осциллограммы БТН I типа нагруженного СТ: а) токи на стороне ВН СТ; б) токи в нагрузке на стороне НН СТ; в) дифференциальные токи при отсутствии тока небаланса; г) дифференциальные токи при наличии тока небаланса

### 3.2.3 Новые количественные признаки бросков тока намагничивания и коротких замыканий

Ввиду неустойчивости проявления указанных в [38] признаков в режиме последовательного БТН и БТН нагруженного СТ необходимо определять режим работы СТ по иным критериям. Поскольку причиной нарушения устойчивости функционирования ДЗ является насыщение измерительных ТТ, необходимо, по возможности, выполнять распознавание режима до момента первого насыщения ТТ. Для достижения этой цели необходимо использовать качественные признаки БТН, проявляющиеся *до первой смены знака производной дифференциального тока*, поскольку после указанного события информация о токе в общем случае становится недостоверной: смена знака производной может быть вызвана как насыщением ТТ до момента достижения периодической составляющей тока своего пикового значения, так и естественным переходом сигнала через пиковое значение (см. рисунок 3.5). Имеется возможность использовать *два* таких признака. Эти признаки не всегда проявляются при насыщении ТТ в режиме внутреннего КЗ, однако в целом их применение позволяет повысить эффективность работы ДЗ, поскольку при любых обстоятельствах их использование не приводит к ложному действию защиты в режиме БТН. Предлагаемые признаки являются количественными, поскольку для идентификации режима используют параметр, значение которого существенно различается в режимах БТН и КЗ в защищаемом СТ.

Во-первых, укажем, что в соответствии с [2, 67], при трёхфазном БТН дифференциальный ток всегда близок по форме к неполной синусоиде с основанием до  $265^\circ$ , при однофазном броске ширина основания меньше. Аварийный ток КЗ в рассматриваемом объекте синусоидален. Следовательно, для выявления внутреннего КЗ достаточно контролировать длительность возрастания (или убывания) дифференциального тока от нулевого значения до момента смены знака первой производной. Если эта длительность превышает максимальную длительность роста (убывания) тока в режиме БТН, равную 7,36 мс (что соответствует  $132,5^\circ$  для тока особой фазы при БТН II типа), то, следовательно,

текущий режим работы СТ является режимом внутреннего КЗ. Однако столь длительный фронт тока возможен лишь в случае значительного содержания апериодической составляющей в аварийном токе. Например, на осциллограмме, приведенной на рисунке 3.13, передний фронт дифференциального тока в фазе *A* имеет длительность 8,2 мс. Следует отметить, что внутреннее КЗ по этому признаку не может быть выявлено, если ТТ насыщается в первом полупериоде ПП ранее указанного времени. Поэтому рассмотренный признак следует использовать совместно со следующим.

Во-вторых, в [57] указано, что при включении СТ со стороны ВН амплитудное значение БТН всегда меньше амплитудного значения тока КЗ за сопротивлением СТ. Следовательно, справедливо считать, что при КЗ ток в реле возрастает существенно быстрее, чем при БТН. То есть имеется принципиальная возможность идентифицировать БТН по скорости изменения дифференциального тока. Рассмотрим характер изменения дифференциального тока в режимах БТН и КЗ на примере СТ типа ТДЦ-125000/110. Рассматривается КЗ за сопротивлением СТ, поскольку внутреннее КЗ перед СТ надёжно выявляется дифференциальной токовой отсечкой (см. далее в п.3.3). При моделировании тока КЗ апериодическая слагающая в одной из фаз принята максимально возможной, так как только в этом случае возможно насыщение ТТ при правильно выбранной нагрузке их вторичных цепей. Для выбранного СТ максимально возможная амплитуда 1-фазного БТН  $i_{\text{БТНmax}(1)}$  принята в соответствии с [57] равной (в о.е.):

$$i_{\text{БТНmax}(1)^*} = \frac{U_{\text{max}^*}}{X_{T(1)^*}} (1 + A), \quad (3.16)$$

где  $U_{\text{max}^*}$  – максимальное напряжение, подведённое к СТ (о.е.);

$X_{T(1)^*}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление СТ при однофазном включении (о.е.);

$A$  – расчётный параметр, определяющий относительное смещение тока броска.

В соответствии с [57], параметр  $A$  в формуле (3.16) принят наибольшим из возможных и равным 0,39, а значение  $X_{T(1)*}$  для однофазного включения СТ выбранного типа со стороны ВН принято равным 0,237. При таких значениях параметров, принимая  $U_{\max*}$  равным 1, получаем:

$$i_{БТН \max(1)*} = \frac{U_{\max}}{X_{T(1)*}} (1 + A) = \frac{1 \cdot 1,39}{0,237} = 5,87. \quad (3.17)$$

При значении номинального тока выбранного СТ на стороне ВН  $I_{\text{номВН}} \approx 600$  А имеем

$$i_{БТН \max(1)} = i_{БТН \max(1)*} I_{\text{номВН}} \sqrt{2} \approx 5,0 \text{ кА}. \quad (3.18)$$

В то же время при трёхфазном включении максимально возможная амплитуда БТН  $i_{БТН \max(3)*}$  для этого же СТ (в о.е.) составляет:

$$i_{БТН \max(3)*} = \frac{U_{\max*}}{X_{T(3)*}} (1 + A), \quad (3.19)$$

где  $X_{T(3)*}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление СТ при трёхфазном включении (о.е.).

Значение  $X_{T(3)*}$  для трёхфазного включения СТ выбранного типа со стороны ВН равно 0,35 [57]. Тогда при тех же условиях получаем

$$i_{БТН \max(3)*} = \frac{U_{\max*}}{X_{T(3)*}} (1 + A) = \frac{1 \cdot 1,39}{0,35} \approx 4,0, \quad (3.20)$$

то есть

$$i_{БТН \max(3)} = i_{БТН \max(3)*} I_{номВН} \sqrt{2} = 3,39 \text{ кА}. \quad (3.21)$$

Действующее значение аварийного тока при симметричном КЗ за сопротивлением СТ при питании места повреждения со стороны ВН составляет (о.е.):

$$I_{КЗ(3)*} = \frac{U_{\max}}{u_{к,\%} / 100\%} = \frac{1}{0,105} = 9,52, \quad (3.22)$$

где  $u_{к,\%}$  – напряжение короткого замыкания СТ (в процентах), для выбранного СТ  $u_{к,\%} = 10,5\%$ .

Следовательно, пиковое значение аварийного тока:

$$i_{КЗ(3)} = I_{номВН} I_{КЗ(3)*} \sqrt{2} = 600 \cdot 9,52 \sqrt{2} = 8,08 \text{ кА}. \quad (3.23)$$

Индуктивное сопротивление данного СТ составляет 12,3 Ом, активное – 0,37 Ом, следовательно, постоянная времени затухания тока КЗ приблизительно равна 0,1 с, а максимальное мгновенное значение тока КЗ равно 15,43 кА.

Выполнено моделирование трёхфазных включений СТ, при которых возникают БТН I и II типа с максимальной амплитудой, равной  $i_{БТН \max(3)}$ . Результаты моделирования показывают, что максимальное значение скорости изменения дифференциального тока при БТН (рисунки 3.13-3.15) не превышает  $1,3 \cdot 10^6$  А/с (токи в реле приведены к стороне ВН СТ). В то же время в режиме КЗ (рисунок 3.16) пиковое значение производной существенно выше –  $4,3 \cdot 10^6$  А/с, и

уже в начале ПП для рассматриваемой фазы значение производной превосходит максимальное значение производной при БТН –  $2,3 \cdot 10^6$  А/с.

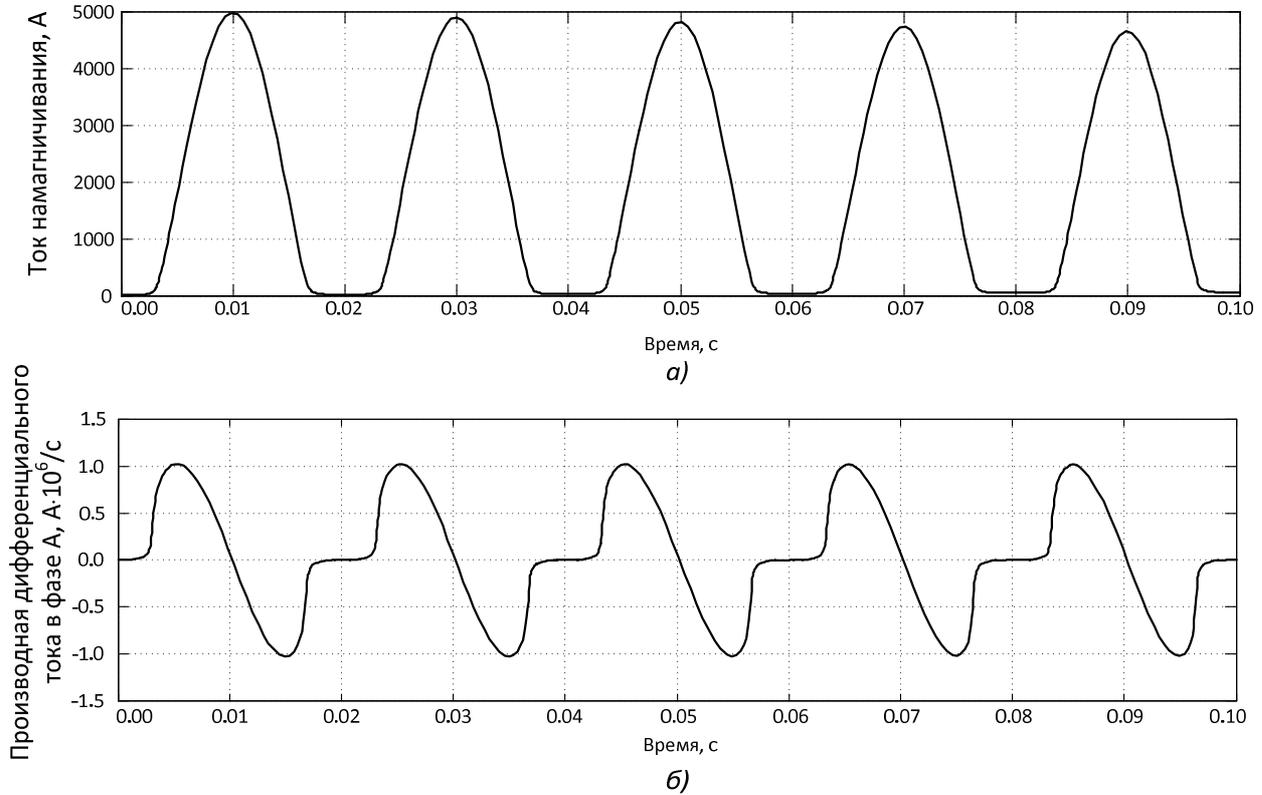


Рисунок 3.13 – Характер изменения токов в режиме однофазного БТН:  
 а) ток намагничивания (он же дифференциальный ток); б) производная дифференциального тока

Для фазы *B* пиковое значение производной имеет место в начале ПП (на рисунке не показано). Таким образом, *имеется принципиальная возможность выявления внутреннего повреждения в самом начале ПП, то есть до первого насыщения ТТ*. Для этого необходимо обеспечить отстройку защиты от пикового значения производной дифференциального тока в режиме максимальных БТН, что может быть сделано введением в алгоритм защиты соответствующей математической модели, предлагаемой в настоящей работе, и указаний по расчёту БТН, приведённых в [57].

Отметим, что предложенный способ не столь эффективен при включении СТ со стороны НН, так как амплитудное значение БТН в этом случае существенно

больше, однако это не вносит существенных сложностей, поскольку включение СТ осуществляется, как правило, именно со стороны ВН. Возможно алгоритмически блокировать срабатывание ДЗ по этому признаку в случае, если дифференциальный ток формируется за счёт сигналов от плеч защиты стороны НН СТ.

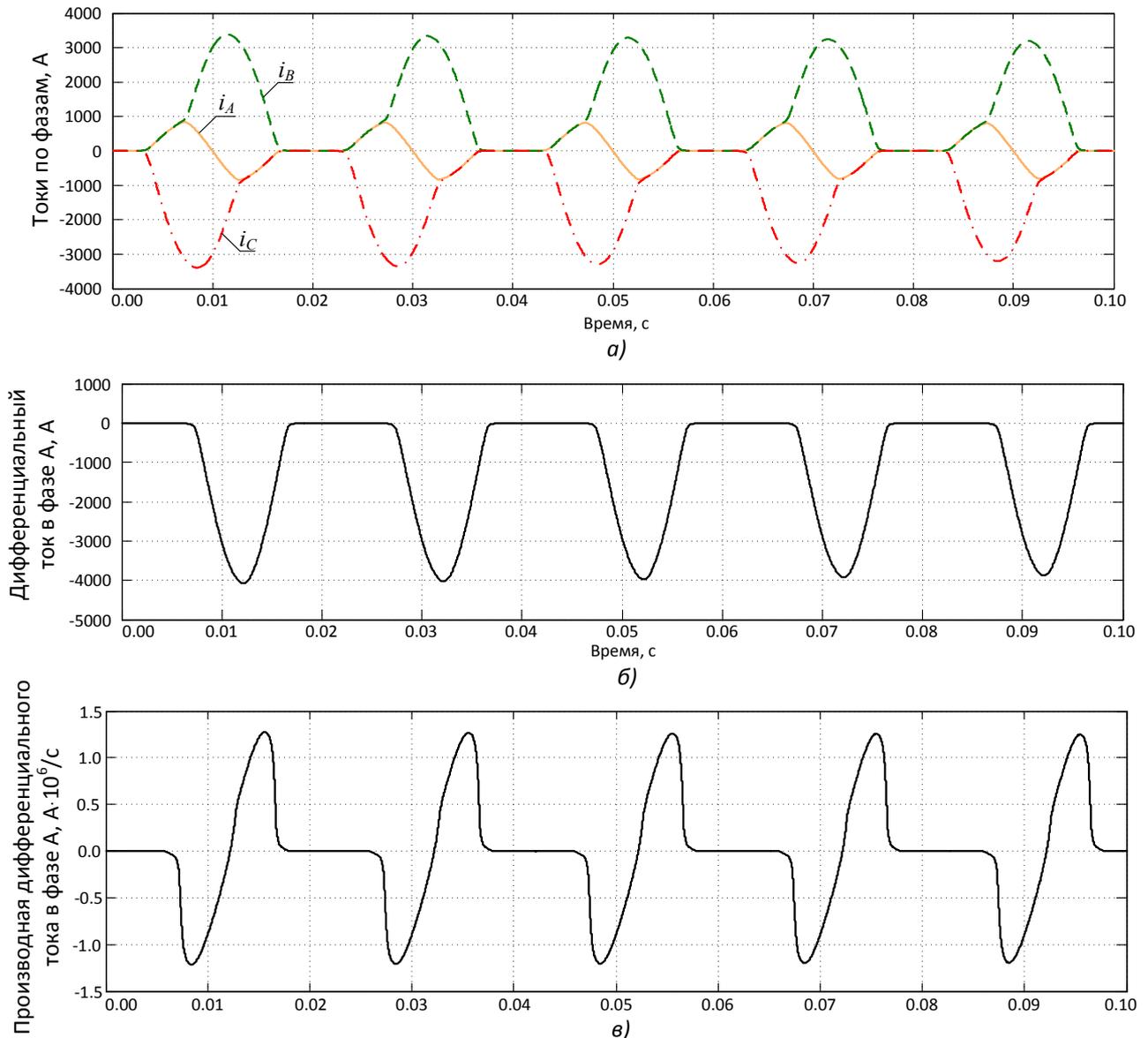


Рисунок 3.14 – Характер изменения токов в режиме БТН I типа:

а) токи намагничивания по фазам; б) дифференциальный ток в одной из фаз; в) производная дифференциального тока

Поскольку выявление данного признака не исключено при внешних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ (пиковое значение тока небаланса может в пределе достигать амплитуды внешнего КЗ [5]), то использовать предлагаемые методы идентификации режима следует только в случае, если дифференциальный ток формируется *только* токами со стороны ВН (или СН, в зависимости от того, с какой стороны производится включение СТ), что несложно реализовать алгоритмически.

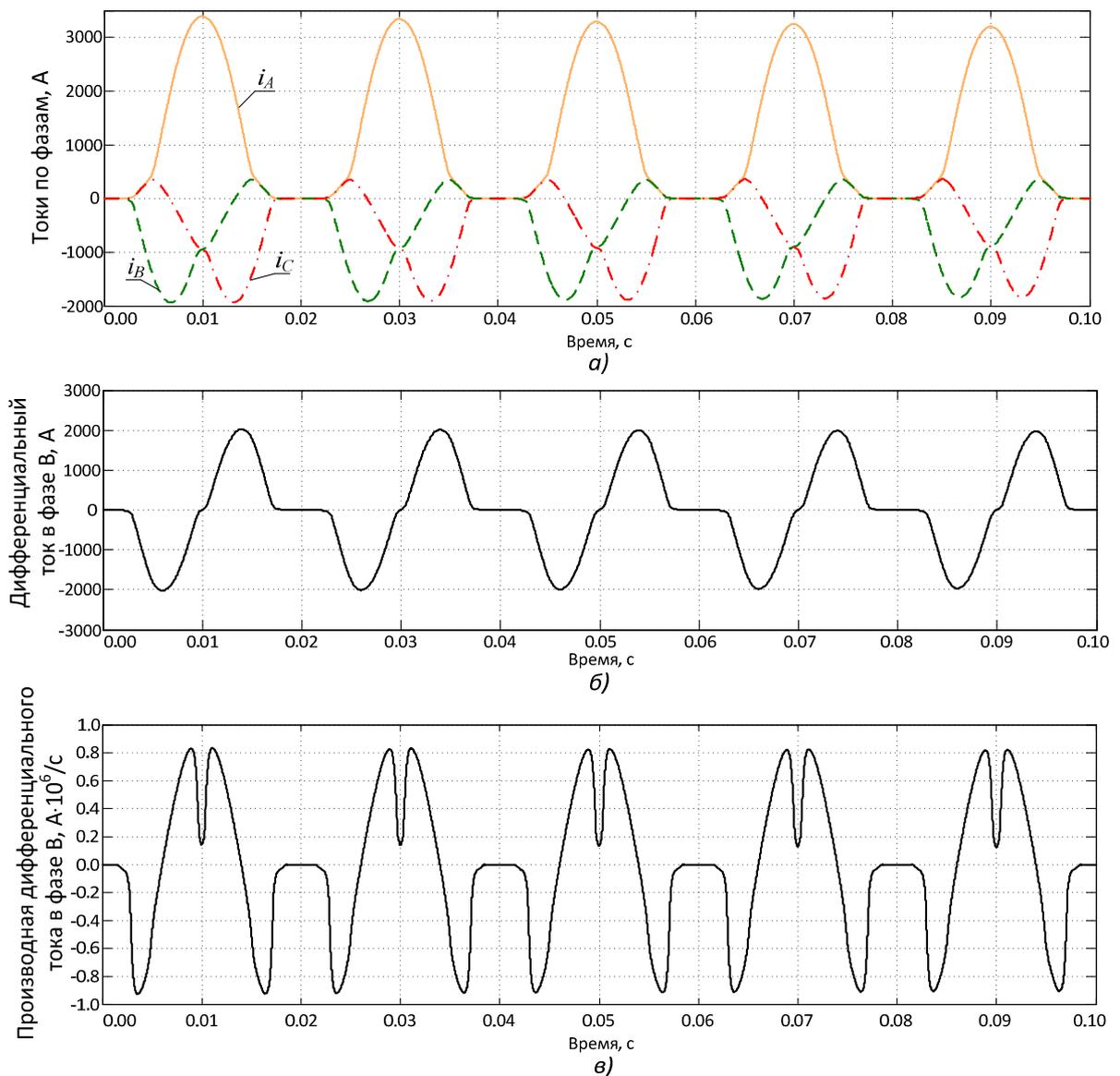


Рисунок 3.15 – Характер изменения токов в режиме БТН II типа:

- а) токи намагничивания по фазам; б) дифференциальный ток в одной из фаз;  
в) производная дифференциального тока

Это мероприятие необходимо, чтобы исключить срабатывание ложное ДЗ по первому предложенному количественному признаку в случае БТН нагруженного СТ, см. рисунок 3.12. Аналогично, можно блокировать работу ДЗ при выявлении этого признака по факту фиксации КЗ вне зоны защиты (см. п.3.1.1).

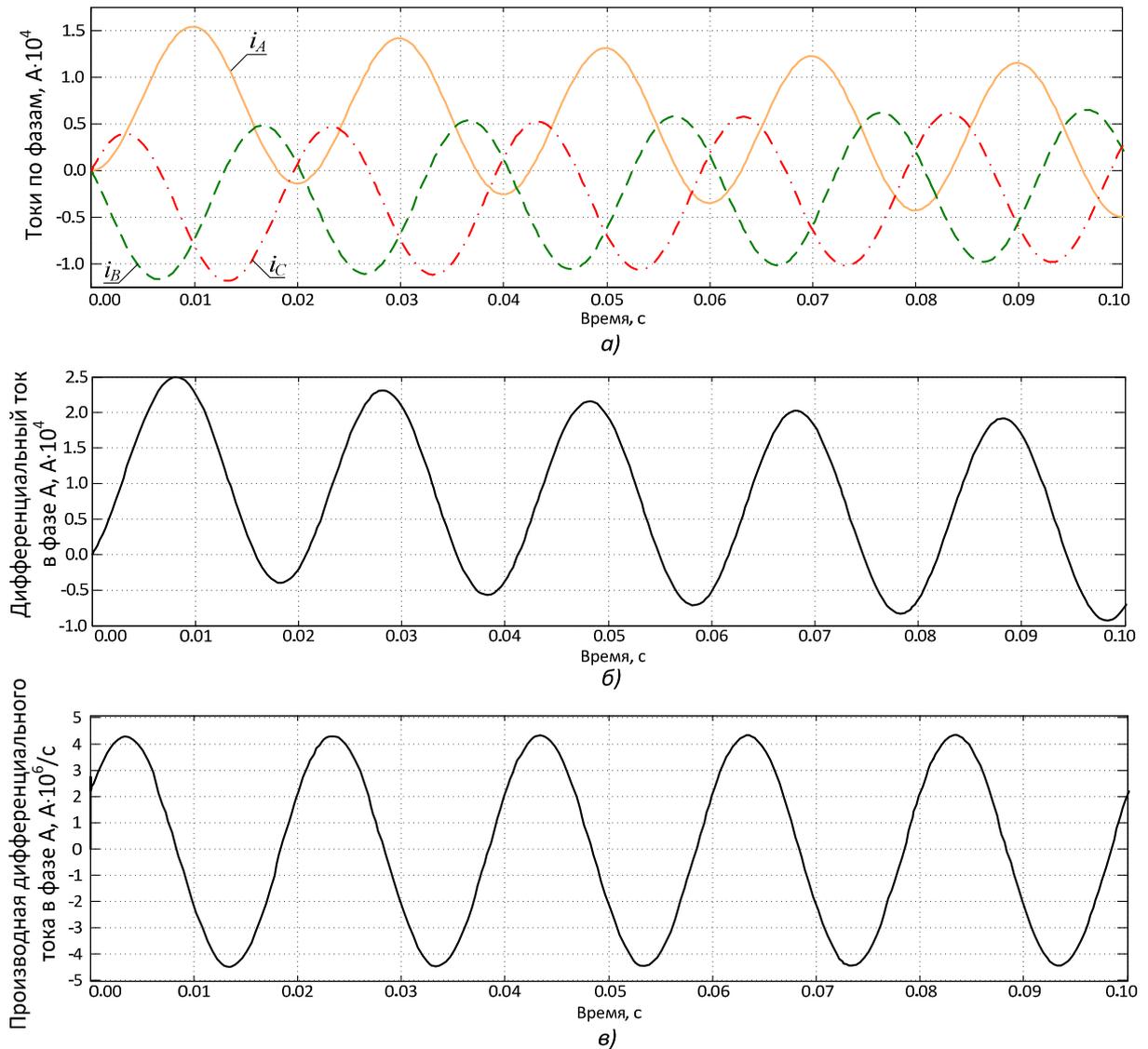


Рисунок 3.16 – Характер изменения токов в режиме КЗ:

*а)* токи аварийного режима по фазам; *б)* дифференциальный ток в одной из фаз; *в)* производная дифференциального тока

Наконец, следует отметить, что оба предложенных признака не являются вполне универсальными. Первый количественный признак, как уже отмечалось,

эффективен только при существенном содержании апериодической слагающей в токе повреждения, а эффективность второго признака уменьшается в минимальном режиме работе энергосистемы и/или в случае двухфазных КЗ и/или КЗ через сопротивление дуги, когда ток повреждения мал. С другой стороны, при уменьшении тока повреждения, равно как и при снижении апериодической составляющей, уменьшается вероятность насыщения измерительных ТТ или увеличивается время, через которое они насыщаются. Поэтому в этих условиях достаточна эффективность работы алгоритма обычной ДЗ с торможением, а применение предлагаемых количественных признаков, таким образом, может не потребоваться, так как ПП не является экстремальным, и авария эффективно выявляется традиционными методами. Время распознавания режима по предлагаемым количественным признакам не превышает половины периода промышленной частоты даже в экстремальных ПП.

### 3.2.4 Погрешности измерения длительностей полуволн

Как показывают выполненные исследования, использование предложенного в [38] метода распознавания режимов БТН и внутреннего КЗ возможно эффективно применять только для защиты тех СТ, в которых невозможен последовательный БТН. Поскольку класс таких СТ достаточно широк, то полный отказ от алгоритмов, предложенных в [38], нецелесообразен, поэтому этот алгоритм целесообразно использовать в разрабатываемой ДЗ. Однако непосредственная реализация метода [38] с использованием микропроцессорной элементной базы приводит к необходимости считаться с *погрешностью замера времён*  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ . Как показали дальнейшие эксперименты по распознаванию режимов, в некоторых случаях измеренные значения  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  оказываются равными во время БТН и неравными при чисто синусоидальном дифференциальном сигнале. Такие результаты обусловлены погрешностью определения дифференциального сигнала, вызванной дискретизацией входных сигналов. Суть этой погрешности поясняется на рисунке 3.17, а.

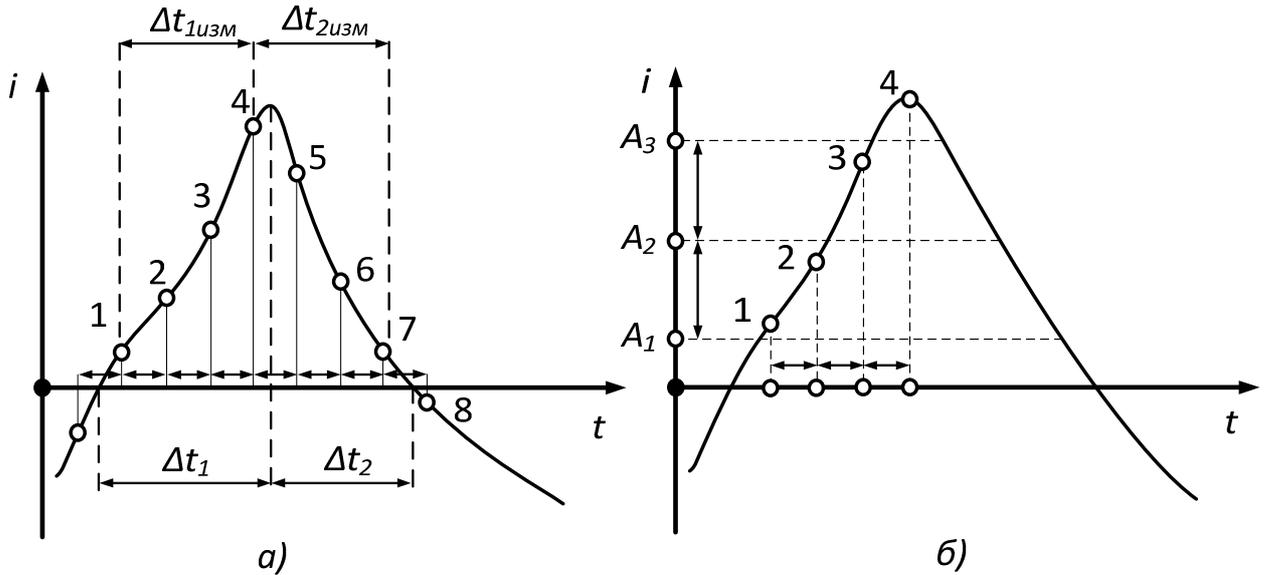


Рисунок 3.17 – Возникновение погрешности измерения времён  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  вследствие дискретизации сигнала по времени (а) и по величине (б)

Истинные значения  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  в общем случае *не равны их измеренным значениям*  $\Delta t_{1uzm}$  и  $\Delta t_{2uzm}$ , поскольку часть информации о характере изменения функции тока от времени  $i = f(t)$  оказывается потерянной, при этом измеренные значения параметров  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  могут оказаться как больше, так и меньше их истинных значений.

Принимаем, что замер  $\Delta t_1$  начинается с момента смены знака контролируемого сигнала  $i = f(t)$ , а завершение замера  $\Delta t_1$  соответствует началу замера  $\Delta t_2$  и осуществляется в момент смены знака первой производной сигнала. Аналогично, замер  $\Delta t_2$  завершается при очередной смене знака функции  $i = f(t)$ .

Если измерение  $\Delta t_1$  начинается с такой выборки «1», которая отстоит несколько дальше от начала полуволны (выше уровня нуля), то это приводит к уменьшению измеренного значения  $\Delta t_{1uzm}$  относительно истинного  $\Delta t_1$  (некоторая область роста сигнала от нуля до значения выборки не включается в замер  $\Delta t_1$ ). По той же причине, если выборка «8» значительно отстоит от нулевого уровня, то уменьшается замер  $\Delta t_2$ , так как измерение интервала времени заканчивается раньше нулевого значения сигнала на выборке «7».

Если выборка «5» происходит позже экстремума функции  $i = f(t)$  и её значение меньше значения предшествующей выборки «4», то это приводит к уменьшению  $\Delta t_{1uzm}$  относительно  $\Delta t_1$  (то есть не учтена часть участка возрастания функции) и одновременно к увеличению  $\Delta t_{2uzm}$  относительно  $\Delta t_2$  (часть участка возрастания включена в область убывания функции).

Если выборка «5» происходит позже экстремума функции  $i = f(t)$  и её значение больше значения предыдущей выборки, то это приводит к увеличению  $\Delta t_{1uzm}$  относительно  $\Delta t_1$  (участок убывания функции включён в замер  $\Delta t_{1uzm}$ ) и одновременно к уменьшению  $\Delta t_{2uzm}$  относительно  $\Delta t_2$ . Сказанное легко показать, если на рисунке 3.17, а оставить только выборки с нечётными номерами (по сути, уменьшить в два раза частоту дискретизации): в таком случае значение выборки «5» окажется больше значения выборки «3», а участок убывания сигнала включается в замер  $\Delta t_1$ . Необходимо отметить, что увеличение замера  $\Delta t_1$  в этом случае сопровождается уменьшением замера  $\Delta t_2$ .

Таким образом, в общем случае погрешность замера  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  зависит как от частоты дискретизации сигнала по времени  $f_s$ , так и от формы сигнала. Погрешность замера не должна приводить к ложному действию защиты, поэтому необходимо определить условие, при котором действие ДЗ на отключение разрешено. Первая указанная причина погрешности (во время между замерами происходит смена знака сигнала) в худшем случае не приводит к уменьшению  $\Delta t_{1uzm}$  относительно  $\Delta t_1$ , но приводит к уменьшению  $\Delta t_{2uzm}$  относительно  $\Delta t_2$ . Вторая причина погрешности (во время между замерами сигнал проходит экстремум), в зависимости от формы сигнала и/или частоты дискретизации, приводит к увеличению  $\Delta t_{1uzm}$  и одновременно с этим к уменьшению  $\Delta t_{2uzm}$ .

В предельном случае увеличение или уменьшение замера времён  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  составляет  $1/f_s$ . Таким образом, как было показано, выше, в наиболее неблагоприятном случае в результате погрешности возможно увеличение значения  $\Delta t_{1uzm}$  на  $1/f_s$  относительно значения  $\Delta t_1$ , а также уменьшение на  $\Delta t_{2uzm}$  на  $2/f_s$  относительно значения  $\Delta t_2$ .

Ложные увеличение  $\Delta t_{1uzm}$  и уменьшение  $\Delta t_{2uzm}$  повышают вероятность ложного действия ДЗ. По этой причине с учётом рассмотренных выше погрешностей замера формирование сигнала срабатывания ДЗ, контролирующей времена  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , должно иметь место только в том случае, если значение  $\Delta t_{1uzm}$  превосходит значение  $\Delta t_{2uzm}$  более чем на  $3/f_s$ , то есть

$$\Delta t_{1uzm} > \left( \frac{3}{f_s} + \Delta t_{2uzm} \right). \quad (3.24)$$

Также имеет значение погрешность измерения, связанная с дискретизацией сигнала по величине (рисунок 3.17, б). Если шаг дискретизации сигнала таков, что не позволяет различить значения двух соседних выборок «1» и «2» (выборки находятся между двумя дискретными уровнями  $A_1$  и  $A_2$ ), то алгоритм подсчёта времён  $\Delta t_{1uzm}$  и  $\Delta t_{2uzm}$  в этой ситуации завышает значение  $\Delta t_{2uzm}$  по сравнению с действительным (напомним, что бестоковая пауза, или промежуток времени, на котором уровень сигнала не изменяется, включается в интервал  $\Delta t_2$ ). Напротив, если такие выборки, как «3» и «4» различимы (находятся соответственно ниже и выше уровня  $A_3$ ), то в этом случае происходит корректное увеличение  $\Delta t_{1uzm}$ . Учёт этого вида погрешности не является определяющим, поскольку он приводит лишь к увеличению  $\Delta t_{2uzm}$ , что только снижает вероятность ложного действия ДЗ при БТН.

Следует заметить, что в соответствии с формулой (3.24) алгоритм не вызывает срабатывания защиты при чисто синусоидальном дифференциальном токе. Однако появление чисто синусоидального сигнала при внутреннем КЗ означает, что ТТ работают без насыщения, поэтому основная ДЗ в этом случае действует без замедления на отключение СТ.

Отметим, что погрешность замера контролируемых времён может быть уменьшена, например, применением аппроксимирующих полиномов. Ввиду

большого числа вариантов аппроксимации данный вопрос в настоящей работе не приводится.

### 3.3 Алгоритм функционирования дифференциальной отсечки

Как упоминалось ранее, задача ДО – отключить защищаемый СТ в случае внутреннего повреждения, когда из-за применённого способа отстройки от БТН более чувствительная защита работает с задержкой, вызванной экстремальными ПП в измерительных цепях защиты. Работа ДО тем эффективнее, чем меньше её уставка срабатывания. Большие значения дифференциального сигнала, вызванного БТН и внешними КЗ, вынуждают современных производителей ДЗ для отстройки от БТН принимать ток срабатывания грубой ступени ДЗ – ДО на уровне  $5I_{нт}$  и выше [16-18, 22]. Столь высокие значения уставки делают ДО малочувствительной в случае, когда ток внутреннего КЗ ограничивается сопротивлением дуги и сопротивлением защищаемого СТ. Такое снижение чувствительности наиболее вероятно в случае работы энергосистемы в минимальном режиме, а также в случае одностороннего питания места повреждения. И хотя в этих условиях вероятность глубокого насыщения измерительных ТТ снижается, полностью её исключить нельзя. Предложенные ранее количественные признаки распознавания БТН и внутренних КЗ могут быть выявлены нечётко из-за снижения значения аварийного тока, поэтому целесообразно принимать меры, направленные на повышение чувствительности ДО, что повысит эффективность работы защиты СТ в целом.

Увеличить чувствительность ДО возможно, *адаптируя текущее значение уставки к текущему режиму работы СТ*. Рассмотрим работу алгоритма адаптации на примере ДО двухобмоточного СТ с двусторонним питанием (рисунок 3.18).

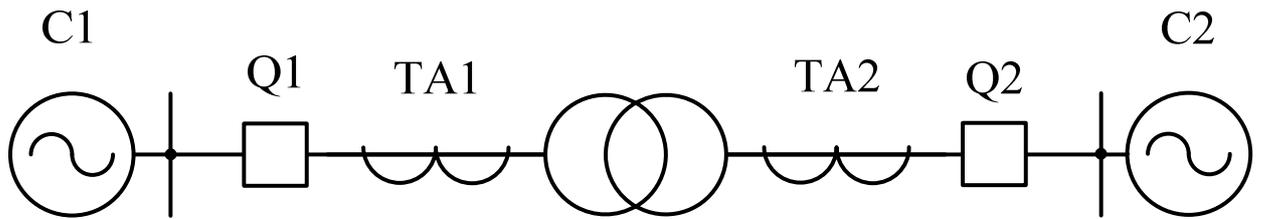


Рисунок 3.18 – Схема для анализа режимов работы дифференциальной отсечки двухобмоточного СТ

Традиционно ток срабатывания ДО выбирается как, чтобы отсечка не срабатывала в режиме БТН и от действия тока небаланса в режимах внешних КЗ и асинхронного хода (АХ) двух связываемых энергосистем С1 и С2 [68]. Однако в режиме, в котором выключатель Q1 (Q2) отключен, невозможен режим АХ, также как и режим внешнего КЗ, в которых сквозной ток протекает через СТ. Внешнее КЗ возможно только на линии связи СТ с энергосистемой С2 (С1), однако такой режим не вызывает появления значительного тока небаланса, способного привести к срабатыванию ДО. В этом режиме КЗ на отключенной стороне за местом установки измерительного трансформатора тока ТА1 (ТА2) также потребует отключения СТ. Единственным расчётным режимом для определения уставки ДО в этом случае является режим БТН. Следовательно, при фиксации указанного положения выключателей целесообразно задать такую уставку срабатывания ДО  $I_{ДО1}$  ( $I_{ДО2}$ ), которая обеспечивает несрабатывание защиты при максимальном значении БТН со стороны системы С2 (С1). В том случае, если оба выключателя отключены, должна задаваться максимальная из двух возможных уставок для отстройки от БТН, так как в общем случае неизвестно, с какой стороны произойдёт включение СТ. Такое мероприятие позволяет повысить чувствительность ДО к токам внутреннего КЗ, так как часто ток внутреннего КЗ за СТ оказывается больше максимального БТН, возникающего при тех же условиях (как правило, это имеет место при питании СТ со стороны ВН или СН) [57].

Если оба выключателя включены, возможен как АХ, так и внешнее КЗ, а также БТН при восстановлении напряжения после отключения близкого внешнего КЗ. Поэтому в этом режиме уставка ДО  $I_{Д03}$  должна быть такой, чтобы обеспечить несрабатывание защиты во всех указанных расчётных условиях. Таким образом, в зависимости от режима работы выключателей  $Q1$  и  $Q2$  чувствительность ДО может быть повышена в  $I_{Д03}/I_{Д01}$  ( $I_{Д03}/I_{Д02}$ ) раз при условии  $I_{Д03} > I_{Д01}$  ( $I_{Д03} > I_{Д02}$ ).

Для обеспечения адаптивной работы ДО уставки для характерных режимов работы СТ должны быть рассчитаны заранее и занесены в блок памяти микропроцессорного устройства защиты, а изменение текущего значения используемой уставки должно производиться по факту фиксации изменения состояния выключателей (максимальные значения БТН при включении с разных сторон СТ могут быть определены в соответствии с указаниями [16, 57]). Для фиксации изменения положения выключателя необходимо использовать его блок-контакты. Контроль включенного положения выключателей по наличию в них тока не позволяет достоверно определить положение выключателя, поскольку даже во включенном состоянии обоих выключателей ток может не протекать через защищаемый СТ в условиях отсутствия передачи мощности между энергосистемами С1 и С2 (или когда нагрузочный ток слишком мал), однако как внешнее КЗ, так и АХ возможны и в этом режиме. Поскольку в процессе эксплуатации оборудования возможно возникновение дефектов блок-контактов, при которых их положение не соответствует положению основных контактов выключателя, должен быть предусмотрен алгоритм контроля их исправности.

Схема, поясняющая работу алгоритма изменения уставок ДО, приведена на рисунке 3.19 (принято, что выключатель имеет *пофазный привод*). Положение выключателя (включен или отключен) отслеживается с помощью блок-контактов SQ.A1, SQ.B1 и SQ.C1. Если все три блок-контакта (все три фазы выключателя) отключены, фиксируется отключенное положение соответствующего выключателя. Наоборот, если хотя бы один из указанных блок-контактов

находится во включенном положении, то фиксируется включенное положение выключателя (рисунок 3.19, а).

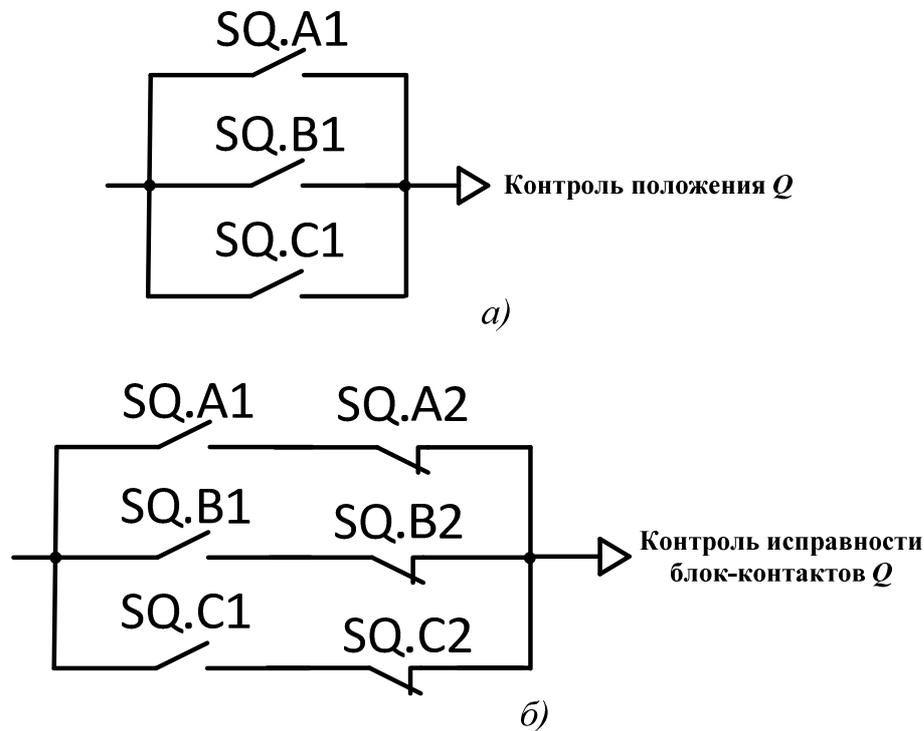


Рисунок 3.19 – Схема для распознавания режимов работы двухобмоточного СТ с помощью блок-контактов его выключателей: а) схема для определения режима работы выключателя; б) схема контроля исправности блок-контактов

Неисправность блок-контактов выявляется с помощью замыкающих блок-контактов SQ.A1, SQ.B1, SQ.C1 и размыкающих блок контактов SQ.A2, SQ.B2 и SQ.C2 (рисунок 3.19, б). При отсутствии неисправности блок-контактов сигнал «Контроль исправности блок-контактов Q» на выходе схемы не формируется. В противном случае, если указанный сигнал сформирован, фиксируется неисправность блок-контактов, то есть ситуация, в которой невозможно достоверно определить положение выключателя. При невозможности организовать схему соединения блок-контактов, изображённую на рисунке 3.19, б, для отслеживания положения выключателя и исправности блок-контактов достаточно знать положение (включён или отключён) каждого из блок-контактов в отдельности (см. далее п.4.2 и рисунок 4.4).

При фиксации неисправности блок-контактов уставка ДО без дополнительной выдержки времени повышается до уровня, обеспечивающего её несрабатывание при максимально возможном дифференциальном сигнале в текущем режиме работы СТ (см. далее п.4.2). Одновременно с этим при фиксации несоответствия запускается выдержка времени, которая с некоторым запасом превышает время, необходимое для изменения положения выключателя. По истечении выдержки времени должен выдаваться сигнал оперативному персоналу о неисправности контактной системы.

Таким образом, ДО в случае повреждения блок-контактов работает с *не меньшей чувствительностью*, чем ДО с традиционно выбранными уставками, а при их исправной работе оказывается *более чувствительной*, при этом оперативный персонал своевременно получает информацию о возникшей неисправности оборудования.

Аналогичные рассуждения могут быть проведены при адаптации уставок ДО к различным режимам работы трёхобмоточного СТ, однако в этом случае число возможных значений изменяемых уставок возрастает, поскольку при питании трёхобмоточного СТ со всех сторон значение тока небаланса при внешних КЗ и АХ, а также дифференциальный сигнал при БТН оказываются различными в зависимости от того, какие именно энергосистемы подключены к СТ при различных положениях выключателей.

## **Выводы**

1. Разработаны усовершенствованные алгоритмы функционирования ДЗ СТ, включающие в себя следующее:

– алгоритм распознавания внешних и внутренних КЗ в течение первых миллисекунд аварийного ПП. Исключение ложного действия алгоритма достигается, с одной стороны, выбором порогового значения дифференциального тока, производящего пуск алгоритма, с другой стороны – вводом алгоритма только в тех режимах работы СТ, в которых невозможно его ложное действие;

– алгоритм защиты от ВЗ, обладающий повышенной чувствительностью при перевозбуждении СТ, когда обычная ДЗ с торможением оказывается нечувствительной или заблокированной из-за возросшего тока намагничивания СТ. Этот алгоритм должен вводиться в работу только при фиксации перехода защищаемого СТ в режим холостого хода;

– дифференциально-фазный алгоритм, использующий информацию на участках идеальной трансформации ТТ. Этот алгоритм обладает повышенной точностью по сравнению с традиционными алгоритмами, основанными на цифровой фильтрации, поскольку предложенный алгоритм использует для своей работы информацию, получаемую на участках идеальной трансформации ТТ, тогда как традиционные цифровые фильтры обрабатывают сигнал как во время идеальной трансформации, так и во время работы ТТ с погрешностью;

– уточнённый алгоритм распознавания БТН и КЗ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального тока. Алгоритм основан на количественных признаках аварийных и нормальных режимов и позволяет распознать аварийный режим в течение первых миллисекунд ПП, то есть до момента насыщения измерительных ТТ, чем обеспечивается сохранение быстродействия ДЗ в условиях экстремальных аварийных режимов;

– алгоритм ДО повышенной чувствительности, адаптирующийся к текущему режиму работы защищаемого СТ. Чувствительность такой ДО тем выше, чем значительнее отличаются уставки ДО, выбранные по условиям отстройки от БТН и токов небаланса в переходном режиме.

Комплексное использование предложенных алгоритмов совместно с традиционными методами распознавания режимов позволяет повысить устойчивость функционирования ДЗ, так как во всех случаях обеспечивается недействие предложенных алгоритмов при внешних повреждениях и БТН, а в условиях глубоких насыщений ТТ при внутренних повреждениях или в условиях аномальных режимов чувствительность ДЗ повышается, так как предложенные алгоритмы отличаются сравнительной простотой и функционируют с большей точностью и быстродействием, чем традиционные алгоритмы, описание которых

имеется в доступных источниках. Необходимость комплексного использования традиционных и предлагаемых методов обусловлена тем, что некоторые предложенные методы работают тем лучше, чем выше токи аварийного режима (это относится, прежде всего, к первому и четвёртому алгоритму из приведенного выше списка), а при малых аварийных токах их работа может оказаться нестабильной, в то время как именно в таких условиях наблюдается эффективная работа традиционных алгоритмов. Тем самым возможно использовать преимущества обоих подходов и одновременно исключить влияние их недостатков.

2. Определена допустимая область применения ранее разработанного алгоритма, распознающего БТН и КЗ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального тока. Установлено, что при насыщении измерительных ТТ в режиме последовательного БТН и в режиме БТН нагруженного СТ без насыщения ТТ в дифференциальном токе присутствуют качественные признаки внутренних КЗ. Причина появления этих признаков при последовательном БТН заключается в особенности последовательных БТН, а именно в появлении дополнительной медленно затухающей апериодической составляющей в токах включения. Попытка отстроиться по скорости изменения тока от последовательных БТН приводит к значительному усложнению защиты и требует сложного расчёта уставок для каждого конкретного случая выполнения защиты СТ. По этой причине эта методика может быть применена только в том случае, если последовательный БТН невозможен, то есть если выключатель, связывающий СТ с энергосистемой, имеет трёхфазный привод. В других случаях целесообразно использовать предложенные в настоящей работе новые количественные признаки распознавания режима. Расчёт уставок для предлагаемых количественных признаков не представляет существенных трудностей, так как методики расчёта однофазных, двухфазных и трёхфазных БТН (здесь учитывается неодновременность замыкания фаз выключателя, связывающего СТ и источник питания), равно как и их форма, хорошо изучены и представлены в соответствующей литературе. Время распознавания режима по

количественным признакам не превышает полпериода промышленной частоты даже при экстремальных ПП. В дифференциальных токах во время БТН нагруженного СТ проявляются качественные признаки внутренних КЗ, причина их появления заключается в наличии тока небаланса, который возникает при сквозном токе нагрузки. Отстройка защиты от этого режима вызывает снижение чувствительности к внутренним повреждениям, поэтому применение и в этом случае предложенных количественных признаков является целесообразным.

3. В ряде случаев использование усовершенствованных алгоритмов защиты может потребовать привлечения дополнительной информации о состоянии защищаемого объекта (положение блок-контактов выключателей или сигналы от измерительного трансформатора напряжения). Благодаря применению специальных средств, оперативно фиксирующих неисправность дополнительного оборудования, предложенные алгоритмы функционируют не хуже традиционных в случае неисправности дополнительного оборудования, а при исправном оборудовании обладают повышенной эффективностью функционирования за счёт адаптации к текущему режиму работы СТ.

4. Для создания полноценного устройства защиты СТ, разработанные алгоритмы функционирования ДЗ должны быть реализованы на базе микропроцессорного терминала РЗ, осуществляющего как функции защиты, так и все необходимые сервисные функции.

## **4 ТЕХНИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТЫ**

Результаты проведённых исследований позволили выявить режимы, в которых возможно нарушение устойчивой работы современных средств ДЗ СТ, то есть снижение скорости срабатывания, недостаточная чувствительность к определённому виду повреждениям или неселективная работа при отсутствии повреждений. Был предложен комплекс мер, направленный на повышение качества работы ДЗ в указанных режимах. С целью доказательства возможности практического применения указанных мер необходима реализация предложенных алгоритмов на базе серийно выпускаемых микропроцессорных терминалов РЗА. Для этого следует, во-первых, определиться с программно-аппаратной частью комплекса, выполняющего функцию распознавания режимов, во-вторых, определить алгоритмическую структуру методов, подлежащих практической реализации.

### **4.1 Аппаратная и программная часть защиты**

Применяемый аппаратный комплекс должен соответствовать всем требованиям, описанным в [69], в частности, должен выполнять функции ввода, хранения и отображения уставок, измерения текущих электрических параметров контролируемого участка сети, регистрации аварийных событий, непрерывной самодиагностики. Построение как аппаратных, так и программных средств комплекса должно выполняться на модульном принципе.

Всем предъявленным в [69] требованиям соответствует Комплекс противоаварийной автоматики многофункциональный КПА-М, производство которого осуществляется АО «ИАЭС» [70]. Комплекс предназначен для реализации функций различных видов противоаварийной автоматики. Комплекс КПА-М выпускается в виде шкафа, основным узлом которого, обеспечивающим ввод аналоговой и дискретной информации о состоянии контролируемого объекта, её обработку и формирование выходных управляющих воздействий,

является блок функциональный (БФ). Конструктивное описание БФ приведено в приложении Д.

## 4.2 Структура алгоритмов защиты

Подтверждение возможности технического исполнения целесообразно произвести для тех алгоритмов, которые до этого не были реализованы. Так, алгоритм контроля длительности чётных полувольт дифференциального тока уже был реализован на микропроцессорном устройстве [38]. Его модификации, предложенные в настоящей работе и связанные, главным образом, с его блокированием в некоторых режимах СТ, не вносят фундаментальных изменений в уже реализованный и работоспособный алгоритм. То же можно сказать о качественном признаке внутреннего повреждения, адаптированного для защиты СТ (см. рисунок 1.5, п.3.1.1): внесённые изменения, позволяющие эффективно использовать данный алгоритм для защиты СТ, также связаны только с его блокированием в определённых режимах работы СТ, что легко достигается на практике с помощью известных алгоритмов. Таким образом, наиболее целесообразно в первую очередь реализовать следующие алгоритмы: алгоритм выявления ВЗ в режиме ПВ (п.3.1.2); алгоритм сравнения фаз по участкам идеальной трансформации (п.3.1.3); алгоритмов, распознающих БТН и внутреннее КЗ по их количественным признакам (п.3.2.3); алгоритм дифференциальной отсечки с адаптирующейся уставкой (п.3.3). Описание работы алгоритма сравнения фаз достаточно подробно представлено в п.3.1.3 и приведено на рисунке 4.1 и рисунке 4.2 в виде блок-схемы. На рисунке 4.1 показан алгоритм определения интервалов точной работы ТТ, на рисунке 4.2 показан алгоритм определения фазового сдвига по этим участкам. Блок-схема защиты от ВЗ при ПВ приведена на рисунке 4.3, также структурная схема этого алгоритма приводится в приложении Д. Алгоритмы чувствительной быстродействующей защиты, контролирующей количественные признаки БТН и КЗ, могут быть наглядно представлены в виде блоков, выполняющих логические операции над входными сигналами, и они приведены на рисунках 4.4 и 4.5.

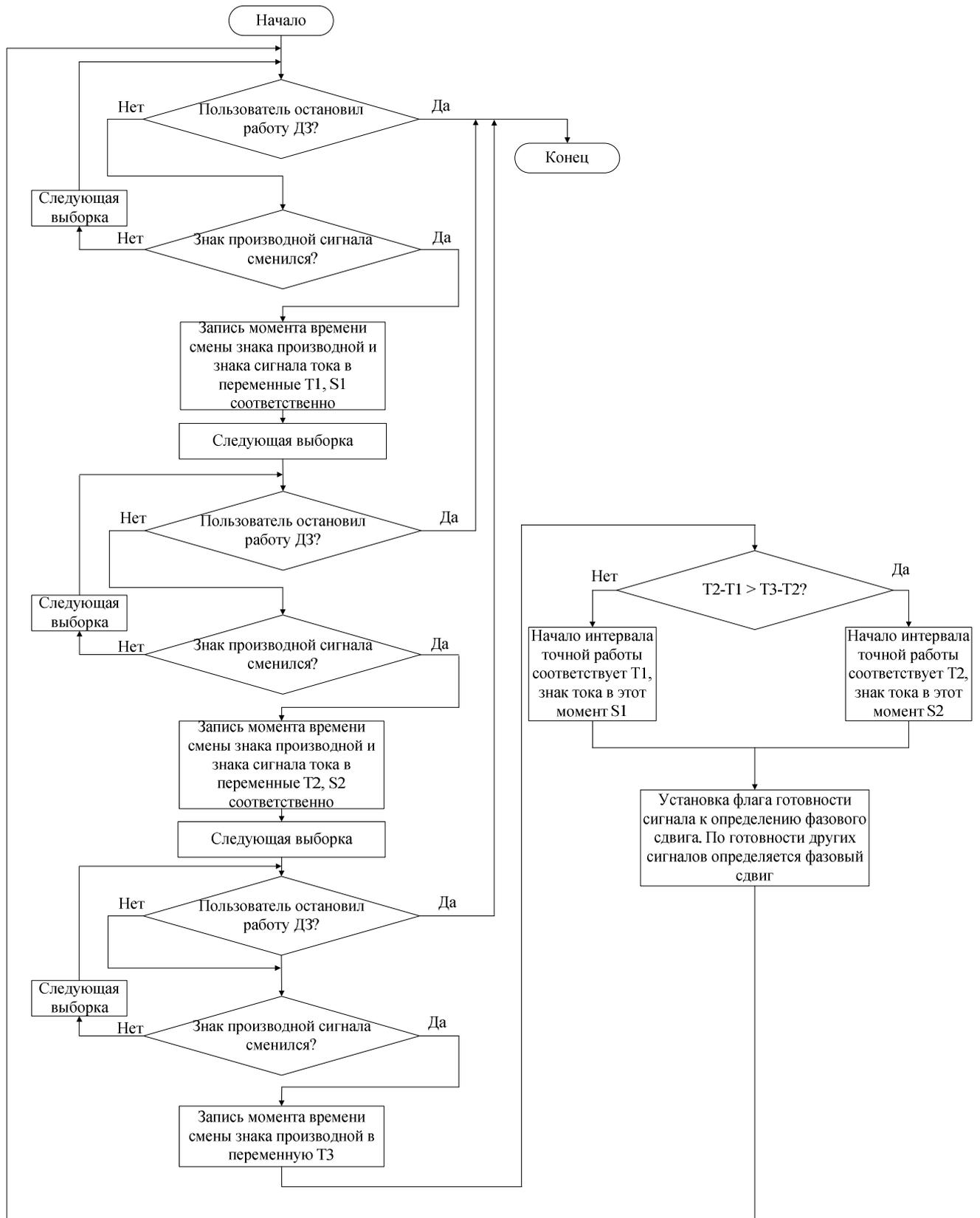


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма определения участков точной работы ТТ

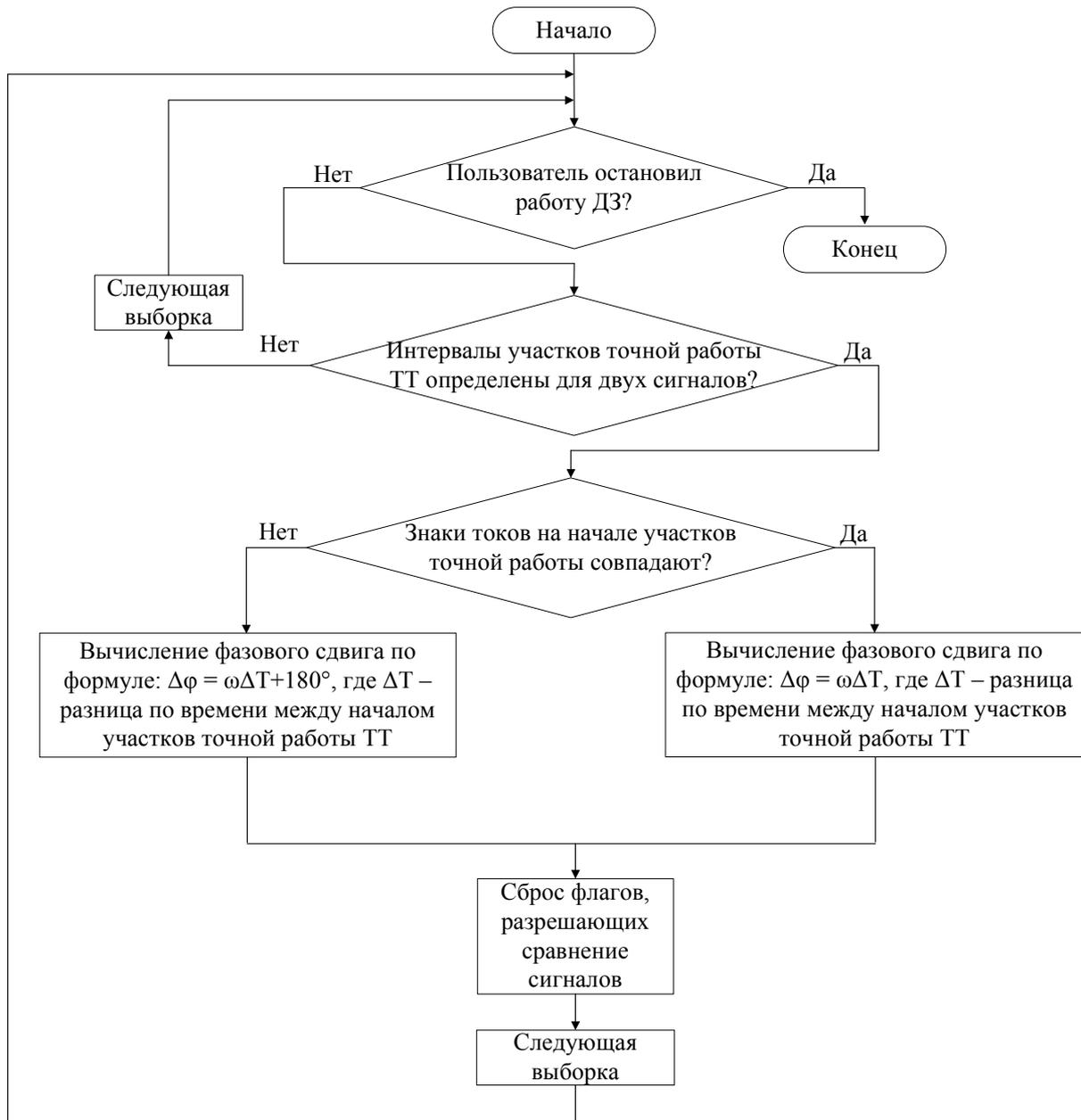


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритма определения фазового сдвига при использовании участков точной работы ТТ

Рассмотрим порядок обработки цифровых сигналов при организации защиты, фиксирующей повреждение по значению производной дифференциального тока (рисунок 4.4). Токи плеч ДЗ  $i_{пл1}$  и  $i_{пл2}$  поступают на элемент Sub, вычисляющий их разность, получая таким образом дифференциальный ток  $i_d$ . Из модулей токов плеч (модули сигналов тока хранятся на выходе элементов abs) выбирается максимальное значение с помощью максиселектора max.

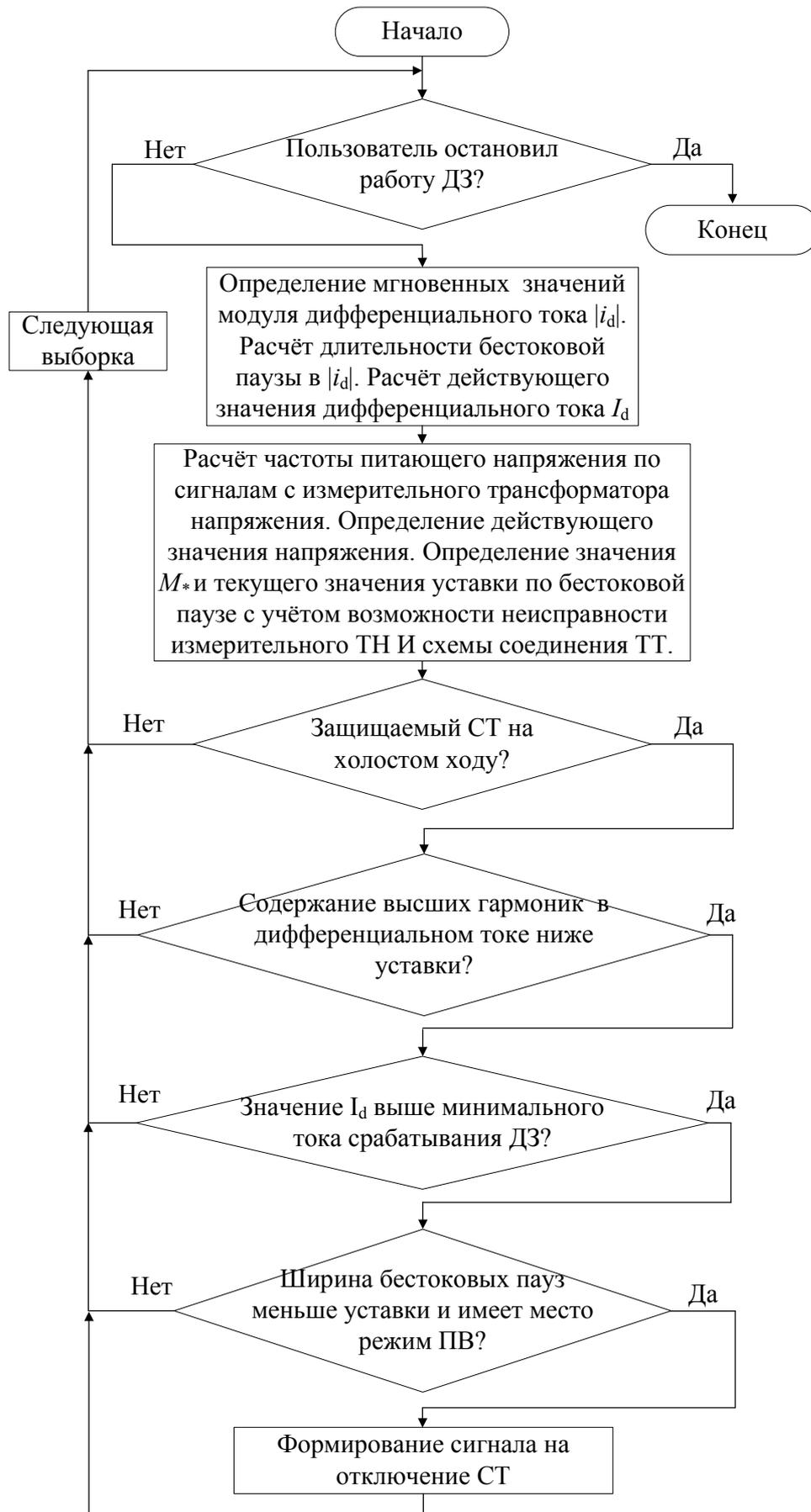


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма выявления ВЗ при ПВ

Полученное значение используется для расчёта тока небаланса: модуль максимального тока умножается на соответствующие коэффициенты из (3.2). Результат, этого умножения формируется на выходе элемента Mult. Алгоритм фиксирует внутреннее повреждение, если на протяжении 3-5 мс (элемент задержки DT1) модуль производной дифференциального тока больше значения уставки  $i'_{уст}$ , а дифференциальный ток больше тока небаланса. При выполнении этих условий формируется логическая «единица» на выходе элемента D2.

После появления логической «единицы» на выходе D2 управляющее воздействие на отключение СТ формируется (если алгоритм введен программной накладкой XB1) только в том случае, если не было зафиксировано внешнее КЗ. Внешнее КЗ фиксируется с помощью элементов DC1-DC2, DC5, D3 следующим образом. Если абсолютные значения токов плеч ДЗ превышают уставку  $i_{н.р}$ , которая устанавливает предел амплитудного значения токов плеч в нормальном режиме, а при этом дифференциальный сигнал на протяжении 3-5 мс (элемент задержки DT2) не превышает рассчитанное значение тока небаланса, то фиксируется внешнее КЗ. Факт фиксации внешнего КЗ запоминается на триггере Trig, выход которого блокирует работу алгоритма во избежание некорректной работы в случае насыщения измерительных ТТ. Разблокировка триггера возможна только спустя время, достаточное для действия защит смежных присоединений (элемент задержки DT3, выдержка времени которого задаётся при наладке) и по факту фиксации перехода СТ в нормальный рабочий режим. Последнее условие отслеживается с помощью элементов DC6 и DC7, на выходе которых формируются логические «единицы» в случае, если действующие значения токов плеч ДЗ не превышают значение уставки  $I_{н.р}$ , задающее максимальный уровень тока нормального режима. Действующие значения токов плеч из их мгновенных значений получают с помощью цифровых блоков RMS, осуществляющих соответствующий расчёт. Выше описан алгоритм действия защиты одной фазы СТ. Работа других фаз защиты аналогична.

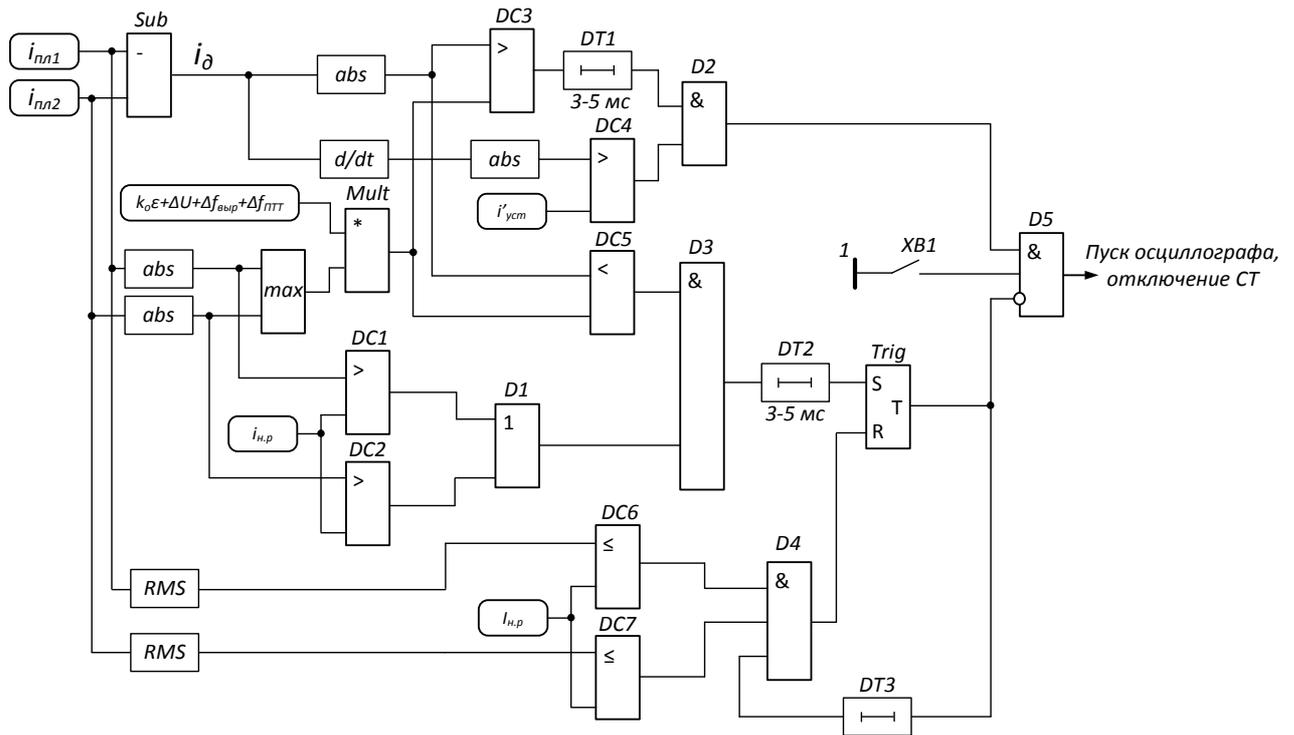


Рисунок 4.4 – Структурная схема алгоритма распознавания аварийного режима по значению производной дифференциального тока

Рассмотрим алгоритм защиты СТ, контролирующей длительность неизменности знака производной дифференциального тока (рисунок 4.3). Токи плеч ДЗ  $i_{nn1}$  и  $i_{nn2}$  поступают на элемент Sub, вычисляющий их разность, получая таким образом дифференциальный ток  $i_\Delta$ . Блок M хранит в памяти текущую выборку дифференциального тока и выборки, полученные на двух предыдущих этапах расчёта  $i_\Delta$ . На выходе блока M формируется логическая «единица», если знак производной  $i_\Delta$  на предыдущем шаге равен знаку производной  $i_\Delta$  на текущем шаге. В указанных условиях логическая «единица» на выходе элемента D1 появляется в случае, если мгновенное значение тока одного из плеч превышает значение тока намагничивания СТ в нормальном режиме (уставка  $i_{уст1}$ ), тогда как мгновенное значение тока другого плеча ниже этого значения (уставка  $i_{уст2}$ ): данное мероприятие необходимо для обеспечения недействия алгоритма при сквозных токах, так как ранее было показано, что в этих условиях длительность постоянства знака производной дифференциального тока может достигать 10 мс в отсутствии повреждений, например в режиме БТН нагруженного СТ. Для схемы

на рисунке 4.5 предполагается, что при включении СТ появляется ток только в первом плече  $i_{n1}$  (данное плечо соответствует питающей стороне СТ).

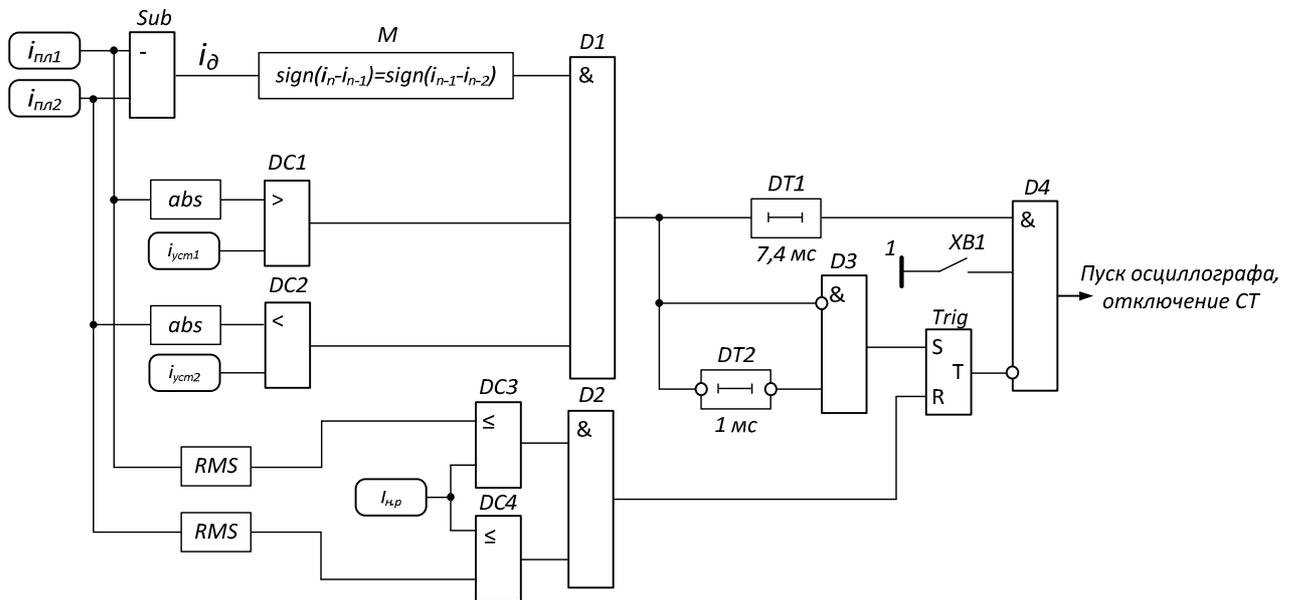


Рисунок 4.5 – Структурная схема алгоритма распознавания аварийного режима по длительности постоянства знака производной дифференциального тока

Если алгоритм введён в работу (программная накладка XB1), и с момента начала ПП логическая «единица» на выходе D1 сохраняется 7,4 мс или более (элемент задержки DT1), формируется сигнал на отключение СТ и пуск осциллографа. Если от начала ПП длительность постоянства знака производной оказывается менее 7,4 мс, то с выхода элемента D3 логическая единица поступает на вход триггера Trig. Выход триггера блокирует сигнал на отключение СТ до момента, пока СТ не перейдёт в режим холостого хода, что отслеживается с помощью элементов DC3, DC4, D2: при снижении действующих значений токов плеч ниже уровня уставки  $I_{н.р.}$ , определяющей минимальный уровень тока нормального режима, логическая «единица» появляется на выходе D2, что приводит к сбросу триггера. Выше описан алгоритм действия защиты одной фазы СТ. Работа других фаз защиты аналогична.

Блок-схема алгоритма адаптивной ДО в общем виде приведена на рисунке 4.6. Структурная схема алгоритма, включающая логические элементы,

приведена на рисунке 4.7. Рассмотрим порядок функционирования адаптивной ДО в предположении, что СТ с двухсторонним питанием подключен к источникам питания выключателями с пофазным приводом (рисунок 4.7). На выходе элемента D1 (D8) формируется логическая «единица» только тогда, когда все замыкающиеся блок-контакты выключателя Q1 (Q2) находятся в отключенном положении. Элементы D2 (D5), D3 (D6), D4 (D7) выполняют операцию «исключающее или» над входными сигналами. Так, если замыкающий и размыкающий контакты одновременно находятся в отключенном положении, то формируется сигнал о недостоверности информации о положении выключателя. Если этот сигнал существует продолжительное время, формируется сигнал оперативному персоналу о неисправности контактной системы. Элементы D9, D10 выполняют операцию «или» над входными сигналами. Селектор Sel формирует на выходе T текущее значение уставки ДО на основании полученных дискретных сигналов P, Q, R, S и введенных в память процессора уставках для различных режимов работы защищаемого СТ.

В таблице 4.1 показан порядок выбора уставок ДО в зависимости от положения выключателей. Приведенные структурные схемы иллюстрируют работу защитных алгоритмов на примере выполнения защиты двухобмоточного СТ. Описание работы алгоритмов приведено для одной фазы СТ, работа алгоритма других фаз аналогична.

В таблице 4.1 приведены значения уставок для всех возможных комбинаций входных сигналов триггера. Значения уставок  $I_{БТН1}$ ,  $I_{БТН2}$ ,  $I_{нб,АХ}$ ,  $I_{нб,вн1}$ ,  $I_{нб,вн2}$  соответственно означают уставки, при которых обеспечено несрабатывание ДО: при БТН со стороны энергосистемы 1 (см. рисунок 3.19); при БТН со стороны энергосистемы 2; при небалансе в режиме асинхронного режима работы энергосистем 1 и 2; при небалансе, вызванном внешним КЗ, питаемом энергосистемой 1; при небалансе, вызванном внешним КЗ, питаемом энергосистемой 2.

Поясним принцип выбора уставок ДО. В первом режиме (таблица 4.1) оба выключателя достоверно включены, поэтому уставка ДО выбирается

максимальной, чтобы обеспечить несрабатывание во всех возможных режимах работы СТ, так как в этом режиме возможны как асинхронные режимы и внешние КЗ, так и потеря и восстановление питания с последующим БТН с любой из сторон. Во втором режиме один из выключателей достоверно отключен. В этом режиме невозможны внешние КЗ, вызывающие значительный ток небаланса, а также асинхронный режим. Поэтому необходимо обеспечить отстройку только от БТН, возможный с любой из питающих сторон. В самом деле, БТН со стороны включенного выключателя возможен после кратковременной потери питания, например, в результате симметричного КЗ на питающей линии с её последующим повторным включением, а также при отключении близкого трёхфазного КЗ в сети со стороны питания.

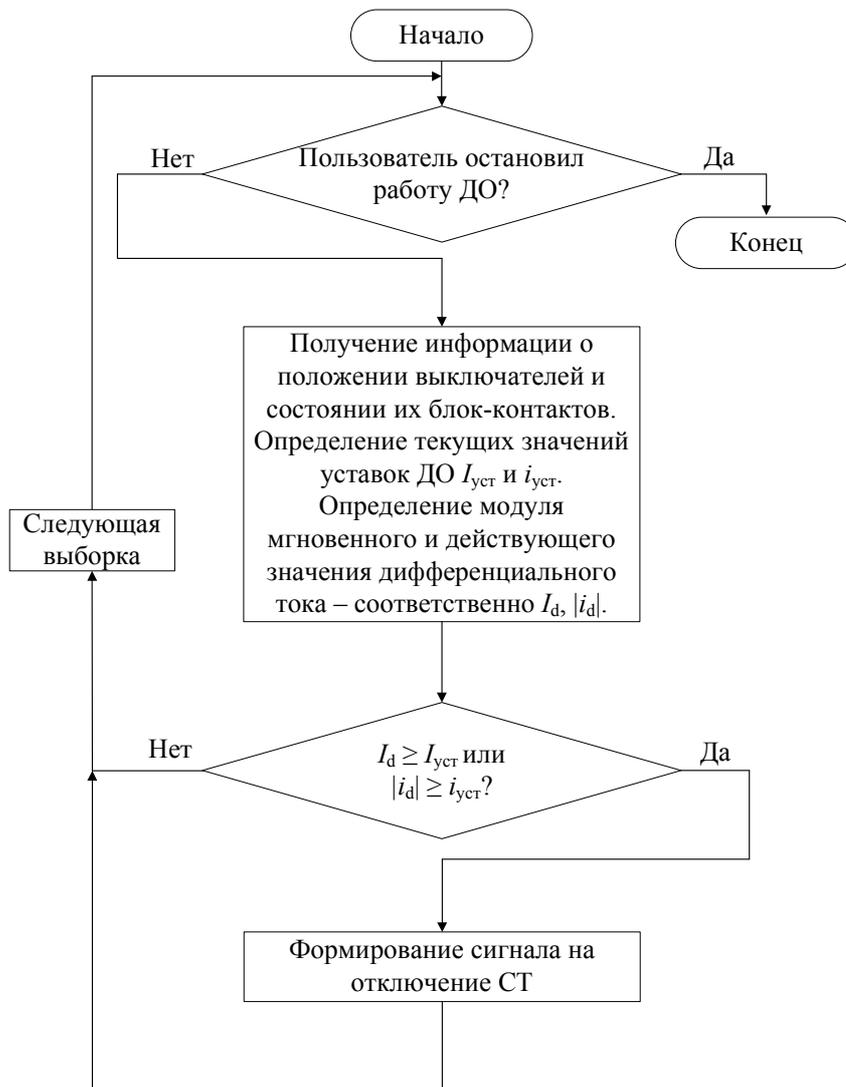


Рисунок 4.6 – Блок-схема адаптивной ДО

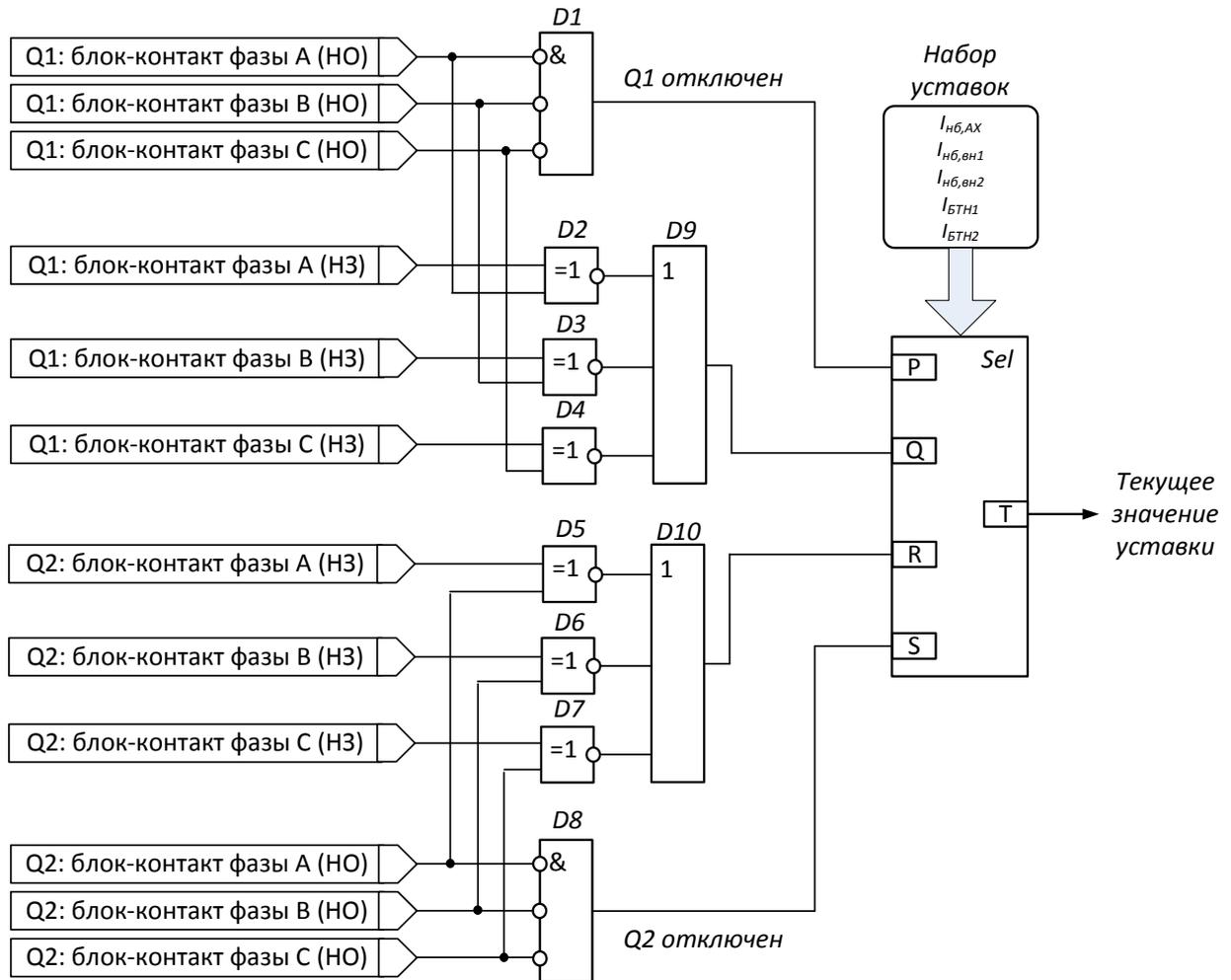


Рисунок 4.7 – Структурная схема алгоритма адаптивной ДО

С другой стороны, включение выключателя на смежной стороне может последовать в момент, когда защищаемый СТ лишён питания вследствие указанной аварии, поэтому в целях обеспечения селективности необходимо обеспечить отстройку ДО от БТН в обоих указанных режимах.

В третьем режиме один из выключателей достоверно включен, положение же другого достоверно неизвестно – он может быть как включен, так и отключен. В этой связи целесообразно обеспечить отстройку ДО от наиболее неблагоприятного режима (то есть когда оба выключателя включены) и выбрать, таким образом, наибольшую возможную уставку. Аналогичным образом следует поступать во всех случаях, когда достоверно определить положение выключателя невозможно.

Таблица 4.1 – Зависимость уставки ДО от входных сигналов селектора Sel

№, п/п	Вход P	Вход Q	Вход R	Вход S	Выход Т
1	0	0	0	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
2	0	0	0	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
3	0	0	1	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
4	0	0	1	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
5	0	1	0	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
6	0	1	0	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
7	0	1	1	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
8	0	1	1	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
9	1	0	0	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
10	1	0	0	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
11	1	0	1	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
12	1	0	1	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
13	1	1	0	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
14	1	1	0	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2})$
15	1	1	1	0	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$
16	1	1	1	1	$\max(I_{БТН1}, I_{БТН2}, I_{нб,АХ}, I_{нб,ВН1}, I_{нб,ВН2})$

Приведённой выше таблицей можно пользоваться и в случае одностороннего питания СТ. В случае, когда источник на той или иной стороне СТ отсутствует, значение БТН с этой стороны, равно как и значение  $I_{нб,АХ}$  следует принять равным нулю.

Разработанные выше алгоритмы защиты СТ были реализованы на базе КПА-М. Все указанные алгоритмы прошли проверку, доказывающую их работоспособность. Общий порядок проверки был следующий: имитировались нормальные рабочие режимы СТ и проверялось отсутствие срабатывания защиты в условиях отсутствия аварии; затем воспроизводится аварийный режим, при

котором проверялась работа защит в соответствии с выставленными уставками. Так, например, для проверки алгоритма защиты от ВЗ при ПВ условия нормального режима заключались в подаче номинального напряжения и тока холостого хода СТ на входы защиты. Режим ПВ имитировался повышением напряжения, а возникновение ВЗ – появлением синусоидального тока выше уровня тока ненагруженного СТ. Проверка изменения уставок ДО в зависимости от положения выключателя осуществлялась так: на дискретные входы терминала подавались сигналы о состоянии блок-контактов выключателей, на аналоговые входы подавались токи аварийного режима, корректность работы адаптивной ДО проверялась по осциллограммам режима, записанным устройством защиты. Список программных окон (подсистем) БФ, а также описание работы реализованных алгоритмов приведено в приложении Д.

Результаты проверки позволили заключить о корректной работе алгоритмов защиты, повышающих общую устойчивость функционирования ДЗ СТ, что говорит о возможности их технической реализации и массового использования в современных средствах ДЗ СТ. Доказательство возможности технической реализации послужило основанием для внедрения разработки в АО «ИАЭС». Копия акта о внедрении приведена в приложении Е, там же приведена копия акта о внедрении в учебный процесс НГТУ основных положений настоящей диссертации. В [71-86] можно найти более подробное описание работы разработанных алгоритмов ДЗ СТ.

### **Выводы**

1. Предложенные в настоящей работе средства повышения устойчивой работы ДЗ СТ описаны на формальном языке и реализованы на базе серийного микропроцессорного устройства РЗ.

2. Результаты испытаний реализованных алгоритмов показывают их корректную работу, что свидетельствует о возможности широкого применения на практике предложенных методов повышения качества работы ДЗ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты теоретических исследований и разработок автора, направленные на повышение устойчивости функционирования ДЗ СТ, заключаются в следующем.

1. Разработаны математические модели СТ, позволяющие достоверно исследовать их работу в режимах включения под напряжения (с возможностью задания условия неодновременного включения фаз выключателя, связывающего СТ с энергосистемой) и восстановления напряжения при включенной нагрузке, а также в режимах внешних и внутренних КЗ. Рассмотрены отличия БТН в группах однофазных СТ, а также в трёхфазных СТ. Как показали численные эксперименты, значения токов намагничивания в режиме БТН в крайних фазах трёхфазного СТ оказываются больше аналогичных значений в группе однофазных СТ ввиду неодинаковых значений магнитных сопротивлений фаз. Данное обстоятельство желательно учитывать при расчёте уставок защит СТ, однако ввиду отсутствия качественного отличия в характере изменения мгновенных значений БТН двух типов СТ все дальнейшие исследования допустимо проводить на более простой модели – модели однофазных СТ. Для исследования ПП во вторичных цепях использованы математические модели групп ТТ.

2. Модели СТ и ТТ интегрированы в программно-испытательный комплекс, позволяющий в интерактивном режиме корректировать параметры используемых моделей, а также в наглядной и удобной форме получать результаты моделирования. Так, например, комплекс позволяет переводить рассчитанные значения токов во вторичных обмотках ТТ в формат COMTRADE, обеспечивая возможность воспроизведения сигналов и их подачи на аналоговые входы устройств РЗ, позволяет подключить алгоритм ДЗ для непосредственной цифровой обработки. Эти средства полезны как с точки зрения их использования научными и проектными организациями, так и для учебных целей.

3. Предложен алгоритм выявления КЗ в обмотках СТ в первые миллисекунды ПП. Возможность его использования обуславливается

привлечением дополнительной информации о режиме работы защищаемого объекта и контролем текущего режима работы СТ с помощью микропроцессорных средств обработки информации.

4. Предложен алгоритм сравнения фаз токов плеч ДЗ СТ, использующий интервалы точной работы ТТ. Ввод данного защитного алгоритма в действие целесообразно производить при больших сквозных токах, что позволяет обеспечить селективное действие чувствительной ДЗ при внешних и внутренних КЗ. Предложенный алгоритм работает значительно точнее (приблизительно в два раза) по сравнению с алгоритмами цифровой фильтрации, поскольку последние используют информацию о токе как во время работы ТТ с большой, так и с малой погрешностью. Использование более точного алгоритма позволяет повысить чувствительность к внутренним КЗ, возникающим в зоне действия защиты и сопровождающимся вытекающими токами нагрузки, а также быстро выявлять переход внешнего КЗ во внутреннее повреждение.

5. Определена область эффективного использования ранее предложенного алгоритма распознавания БТН и внутреннего КЗ по характеру изменения мгновенных значений дифференциального тока в ПП. Установлено, что в режиме последовательного БТН в дифференциальной цепи появляются признаки внутреннего КЗ. Причина их появления заключается в особенности последовательных БТН, а именно в смещении первичного сигнала БТН по оси токов. Несмотря на отличия в численных характеристиках дифференциального сигнала в распознаваемых режимах, учёт этой особенности в алгоритме защиты приводит к её значительному усложнению и снижению чувствительности к внутренним КЗ, поэтому использование этого алгоритма для защиты СТ, в которых не исключён последовательный БТН (с выключателями, имеющими пофазный привод), нецелесообразно.

6. Аналогично, признаки внутренних КЗ появляются в дифференциальной цепи при восстановлении напряжения из-за наличия тока небаланса, обусловленных прохождением через СТ сквозных токов нагрузки. Поэтому при

наличии токов нагрузки целесообразна блокировка срабатывания ДЗ по ранее предложенным признакам, что легко реализуется алгоритмически.

7. Для повышения устойчивости функционирования ДЗ СТ предложены два количественных признака распознавания аварийных и нормальных режимов. Признаки могут быть эффективно использованы как для защит СТ, где возможен последовательный БТН, так и в тех случаях, в которых такой БТН исключён. Расчёт уставок для предлагаемых количественных признаков не представляет существенных трудностей, так как методики расчёта однофазных, двухфазных и трёхфазных БТН, равно как и их форма, хорошо изучены и представлены в соответствующей литературе. Время распознавания режима по количественным признакам не превышает полпериода промышленной частоты даже в экстремальных ПП.

8. Предложен способ выявления ВЗ в режиме перевозбуждения СТ был, использующий времяимпульсный принцип действия. Чувствительность защиты обеспечивается адаптацией уставок к текущему уровню перевозбуждения. Для использования положительного влияния адаптации к текущему режиму работы СТ и достижения тем самым максимальной чувствительности необходимо использовать дополнительную информацию, получаемую от измерительных трансформаторов напряжения. Использование алгоритмических средств контроля исправности цепей напряжения позволяет исключить неселективное действие защиты. При возникновении неисправности цепей напряжения чувствительность снижается до уровня, который имеют традиционные защиты.

9. Предложен способ повышения чувствительности ДО за счёт адаптации её уставки к текущему режиму работы СТ. Режим работы СТ определяется по положению выключателей, связывающих СТ с энергосистемой и нагрузкой. Степень повышения чувствительности ДО зависит от отношения рассчитанной уставки для отстройки от переходного тока небаланса при внешних КЗ и от уставки для отстройки от БТН. Как и в случае выполнения защиты от ВЗ в режиме ПВ, для использования преимущества адаптации к текущему режиму работы СТ и достижения тем самым максимальной чувствительности необходимо

использовать дополнительную информацию с применением блок-контактов выключателей. Использование алгоритмических средств контроля исправности блок-контактов позволяет исключить неселективное действие защиты: в случае неисправности адаптивная ДО работает с той же чувствительностью, что и традиционная ДО.

10. Все предложенные способы повышения устойчивости функционирования ДЗ СТ целесообразно использовать вместе с традиционными защитными алгоритмами, которые используются ведущими фирмами-производителями средств РЗ СТ. Такой подход позволяет использовать преимущества каждого подхода и нивелировать их недостатки при использовании по отдельности.

11. Доказана возможность технической реализации предложенных алгоритмов защиты на базе микропроцессорного терминала КПА-М.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

АХ – асинхронный ход

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БТН – бросок тока намагничивания

ВЗ – витковое замыкание

ВН – высшее напряжение

ДЗ – дифференциальная защита

ДО – дифференциальная отсечка

ДФЗ – дифференциально-фазная защита

ЗО – защищаемый объект

КЗ – короткое замыкание

НН – низшее напряжение

ПБВ – переключение без возбуждения

ПВ – перевозбуждение

ПО – программное обеспечение

ПП – переходный процесс

ПЦР – преобразователь цифровой распределённый

РЗ – релейная защита

РПН – регулирование под напряжением

СТ – силовой трансформатор

ТН – трансформатор напряжения

ТТ – трансформатор тока

ЭВМ – электронная вычислительная машина

ЭДС – электродвижущая сила

ЭЭС – электроэнергетическая система

## СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Устойчивость функционирования релейной защиты – свойство релейной защиты, определяющееся стабильностью несрабатывания при внешних повреждениях и сохранением чувствительности и заданного быстродействия при внутренних повреждениях.

Функции релейной защиты – срабатывание релейной защиты при возникновении внутренних повреждений и несрабатывание при возникновении повреждений вне зоны защиты, а также в нормальных и аномальных режимах работы защищаемого объекта и энергосистемы в целом.

Эффективность функционирования релейной защиты – свойство релейной защиты, определяющееся способностью выполнять предельное число функций (срабатывать при всех возможных внутренних повреждениях, не реагировать на отсутствие повреждений в зоне действия), каждую с предельным эффектом, то есть при обеспечении селективности и с максимально возможной чувствительностью, быстродействием и надёжностью.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Ерушин, В. П. Повышение устойчивости функционирования дифференциальных защит силовых трансформаторов : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02 / В. П. Ерушин. – Новосибирск, 1981. – 217 с.
2. Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов / А. С. Засыпкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
3. Федосеев, А. М. релейная защита электрических систем : учеб. для вузов / А. М. Федосеев. – Москва : Энергия, 1976. – 560 с.
4. Куликов, Ю. А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю. А. Куликов. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. – 284 с. – («Учебники НГТУ»).
5. Багинский, Л. В. Основные особенности продольных дифференциальных защит электрооборудования электростанций и подстанций : учеб. пособие / Л. В. Багинский. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2005. – 66 с.
6. Гуревич, В. И. Микропроцессорные реле защиты: новые перспективы или новые проблемы? / В. И. Гуревич // Новости электротехники. – 2005. – № 6 (36). – С. 57–60.
7. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем : учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
8. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. – Москва : Госэнергоиздат, 1952. – 480 с.
9. Косых, Д. А. Сравнение технических характеристик современных продольных дифференциальных токовых защит генераторов. Совершенствование релейной защиты / Д. А. Косых // Энергетик. – 2009. – № 12. – С. 23–25.
10. Циглер, Г. Цифровые устройства дифференциальной защиты. Принципы и область применения / Г. Циглер ; под ред. Ф. Дьякова. – Нюрнберг, 2005. – 273с.: ил.

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

12. SIPROTEC. Дифференциальная защита 7UT612. Версия 4.0. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://w5.siemens.com/web/ua/ru/em/Automation,\\_control\\_and\\_protection/Relay\\_Protection/Differential\\_protection\\_of\\_transformers/Documents/file\\_8\\_1.pdf](http://w5.siemens.com/web/ua/ru/em/Automation,_control_and_protection/Relay_Protection/Differential_protection_of_transformers/Documents/file_8_1.pdf) – Загл. с экрана.

13. Моделирование электромагнитных переходных процессов в сетях с однофазными силовыми трансформаторами [Электронный ресурс] / В. В. Кузнецов, А. Р. Калядин, Д. Б. Антонов, А. Н. Низовой. – Режим доступа : <http://www.v-itc.ru/electrotech/2008/03/pdf/2008-03-02.pdf>. – Загл. с экрана.

14. Шкаф защиты автотрансформатора типа ШЭ2607 042 (версия ПО 042\_200). Руководство по эксплуатации. ЭКРА. 656453.032 РЭ [Электронный ресурс]. – Чебоксары : ЭКРА, 2016. – Режим доступа : [https://k-energo.com/documents/rukovodstva/she2607/%D0%A0%D0%AD%20%D0%A8%D0%AD2607%20042\\_230.pdf](https://k-energo.com/documents/rukovodstva/she2607/%D0%A0%D0%AD%20%D0%A8%D0%AD2607%20042_230.pdf). – Загл. с экрана.

15. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.:ил.

16. Техническая коллекция Schneider Electric. Методика расчета уставок дифференциальной защиты трансформаторов Sepam T87 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.pro-schneider.ru/content/files/126.pdf>. – Загл. с экрана.

17. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства компании «GE Multilin» [Электронный ресурс] : СТО 56947007 29.120.70.109-2011. – Москва : Изд-во ОАО "ФСК ЕЭС", 2011. – Режим доступа : [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO\\_56947007-29.120.70.109-2011.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.120.70.109-2011.pdf). – Загл. с экрана.

18. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА»

[Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/35.77\\_sto\\_56947007-29.120.70.99-2011\\_new.pdf](http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/35.77_sto_56947007-29.120.70.99-2011_new.pdf). – Загл. с экрана.

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

20. БМРЗ-ТД-2х – защита двухобмоточных трансформаторов [Электронный ресурс] // Поставки КИПиА и электротехнического оборудования. – Режим доступа : <http://www.ooo-pribor.ru/descriptions/23157/>. – Загл. с экрана.

21. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-153-Д-УЗТ-01. Руководство по эксплуатации ДИВГ. 648228.039 – 04.01 РЭ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mtrele.ru/files/documents/2015/re/6-35/BMRZ-100/BMRZ-153-UZT-01.pdf> (дата обращения: 09.11.2016).

22. Глазырин, В. Е. Расчёт релейной защиты понижающих автотрансформаторов на базе микропроцессорных шкафов : учеб. пособие / В. Е. Глазырин, В. А. Давыдов, А. И. Щеглов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 91 с.

23. К вопросу выполнения торможения дифференциальных реле / Е. М. Ульяницкий [и др.] // Изв. вузов. Электромеханика. – 1974. – № 2. – С. 204–210.

24. Багинский, Л. В. К выбору принципа работы быстродействующей защиты основных элементов электрических станций и подстанций / Л. В. Багинский // Электрические станции. – 1978. – № 5. – С. 41–45.

25. Багинский, Л. В. Использование сочетания дифференциально-фазного и дифференциального принципов действия защиты трансформаторов Л. В. Багинский, Г. М. Глазырина, А. И. Шалин // Электричество. – 1978. – № 5. – С. 81–85.

26. Багинский, Л. В. Быстродействующая защита мощных трансформаторов (автотрансформаторов) / Л. В. Багинский, В. П. Пшенко // Электричество. – 1989. – № 4. – С. 14–22.

27. Багинский, Л. В. Дифференциально-фазное реле с торможением Л. В. Багинский, Г. М. Глазырина // Вопросы проектирования и повышения надёжности и экономичности работы электрической части электростанций и подстанций : сб.

науч. трудов / под ред. А. И. Шалина ; Новосиб. электротехн. ин-т. – Новосибирск : Изд-во НЭТИ, 1974. – С. 86–96.

28. Атабеков, Г. И. Современная релейная защита / Г. И. Атабеков, А. М. Федосеев. – Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1948. – 260 с.

29. Дроздов, А. Д. Реле дифференциальных защит элементов энергосистем / А. Д. Дроздов, В. В. Платонов. – Москва : Энергия, 1968. – 112 с.

30. Ульяницкий, Е. И. Дифференциальное реле защиты трансформатора / Е. И. Ульяницкий // Изв. вузов СССР. Электромеханика. – 1969. – № 2. – С. 216–220.

31. Подгорный, Э. В. Исследование работы дифференциальных реле с быстронасыщающимися трансформаторами при повреждении в зоне защиты / Э. В. Подгорный, В. И. Люткевич // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1968. – № 1. – С.1–6.

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

33. Sonnemann, W. K. Magnetizing inrush phenomena in transformer banks / W. K. Sonnemann, C. L. Wagner, G. D. Rockefeller // Power Apparatus and Systems. – 1958. – № 38. – P. 884–892.

34. 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.

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

36. А.с. 164385 (СССР). Способ блокировки релейных защит / В. А. Борисов, Ю. А. Зозуля. – Оpubл. в Б.И., 1967, №12.

37. Способ отстройки дифференциально-фазной защиты трансформатора от броска тока намагничивания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://silovoytransformator.ru/stati/otstroyki-namagnichivaniya.htm>. – Загл. с экрана.

38. Купарев, М. А. Разработка алгоритма функционирования дифференциальной защиты трансформатора с применением теории распознавания образов : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02. / М. А. Купарев. – Новосибирск, 2005. – 223 с.

39. Осинцев, А. А. Разработка методов и средств повышения устойчивости функционирования дифференциальной защиты генератора : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02. / А. А. Осинцев. – Новосибирск, 2013. – 182 с.:ил.

40. Harish Balaga. Numerical Differential Protection of Power Transformer using ANN as a Pattern Classifier [Электронный ресурс] / Harish Balaga, D. N. Vishwakarma, Amrita Sinha. – Режим доступа : [https://www.researchgate.net/publication/279315305\\_Numerical\\_Differential\\_Protection\\_of\\_Power\\_Transformer\\_using\\_ANN\\_as\\_a\\_Pattern\\_Classifier](https://www.researchgate.net/publication/279315305_Numerical_Differential_Protection_of_Power_Transformer_using_ANN_as_a_Pattern_Classifier). – Загл. с экрана.

41. Кужеков, С. Л. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока / С. Л. Кужеков, Г. С. Нудельман // Электромеханика. – 2009. – №4. – С. 12–17.

42. Гуревич В. Оптоэлектронные трансформаторы: нужно быть реалистами / В. Гуревич // Электрические сети и системы. – 2010. – №4. – С. 73–76.

43. Kojovic, L. A. Advanced protective relaying based on Rogowski coil current sensors / L. A. Kojovic // IET 9th International conference on developments in power system protection : Conference publications. – Glasgow, UK, 2008 – P.168–173.

44. Mlejnek, P. System for measurement and testing of contactless current sensors [Электронный ресурс] / P. Mlejnek, P. Kaspar. – Режим доступа : <https://sgs.cvut.cz/workshopy/ws2008.pdf>. – Загл. с экрана.

45. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учеб. для вузов / В. П. Тарасик. – Минск : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.

46. Дмитриев, М. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы [Электронный ресурс] / М. Дмитриев, Г. Евдокунин // Новости электротехники. – 2008. – №5 (53). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2008/53/05.php>. – Загл. с экрана.

47. Глазырин, В. Е. Моделирование переходных процессов в группах трансформаторов тока / В. Е. Глазырин, Г. Э. Торопов // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2000. – № 3 (20). – С. 75–82.
48. Электрические цепи с ферромагнитными элементами в релейной защите / А. Д. Дроздов, А. С. Засыпкин, С. Л. Кужеков [и др.] ; под ред. В. В. Платонова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.: ил.
49. Вольдек, А. И. Электрические машины : учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергия, 1974. – 840 с.: ил.
50. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 4-е изд., перераб. – Москва : Энергия, 1975. – 752 с.: ил.
51. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов : учеб. пособие для вузов / П. М. Тихомиров. – 4-е изд., перераб., и доп. – Москва : Энергия, 1976. – 544 с.
52. Володин, В. Гистерезисная модель нелинейной индуктивности симулятора LTspice [Электронный ресурс] / В. Володин // Силовая электроника. – 2010. – №1. – Режим доступа : [http://www.power-e.ru/2010\\_1\\_56.php](http://www.power-e.ru/2010_1_56.php). – Загл. с экрана.
53. Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sag Effects on Three-Phase Transformers / Joaquín Pedra, Luis Sáinz, Felipe Córcoles, Luis Guasch // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – April, Vol. 20, № 2. – P. 1683–1691.
54. Консультационный центр MATLAB компании Softline [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/gui/index.php>. – Загл. с экрана.
55. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЭНАС, 2012. – 376 с.: ил.
56. Гуревич, В. И. Гибридное герконо-полупроводниковое реле тока с блокировкой от апериодической составляющей и бросков тока намагничивания / В. И. Гуревич // Электроника-Инфо. – 2009. – № 1. – С. 26–28.
57. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110-500 кВ. Расчёты : рук. указ. по релейной защите. – Москва : Энергия, 1980. – Вып. 12. – 88 с., ил.

58. Засыпкин, А. С. Определение параметров силового трансформатора с насыщенным магнитопроводом / А. С. Засыпкин, Г. В. Бердов, М. М. Середин // Электричество. – 1975. – № 12. – С. 24–28.

59. Костенко, М. П. Электрические машины. В 2 ч. Ч.1. Машины постоянного тока. Трансформаторы : учеб. для студентов высш. учеб. заведений / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. – 3-е изд., перераб. – Ленинград : Энергия, 1972. – 544 с. с ил.

60. IEEE C37.111-R2005, IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ieeexplore.ieee.org/document/159102/>. – Загл. с экрана.

61. РЕТОМ-61. Комплекс программно-технический измерительный. Руководство по эксплуатации БРГА. 441323.017 РЭ. Методика проверки БРГА. 441323.017 МП. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dynamics.com.ru/userfiles/file/support/retom-61.pdf>. – Загл. с экрана.

62. Байтер, И. И. Релейная защита и автоматика питающих элементов собственных нужд тепловых электростанций / И. И. Байтер, Н. А. Богданова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 113 с.

63. Айдаров, Ф. А. Упрощенная физическая модель дуги междуфазного короткого замыкания в рудничных электроустановках [Электронный ресурс] / Ф. А. Айдаров, В. И. Задорожний // ГУ "НИИВЭ". – Режим доступа : [http://ukrniive.com.ua/ru/article/physical\\_model.htm](http://ukrniive.com.ua/ru/article/physical_model.htm). – Загл. с экрана.

64. Руководящие указания по расчёту токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б. Н. Неклепаева. – Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

65. Электроизмерительные приборы. Трансформаторы промышленные (КТПВШ, ТА, ТН, Т-0,66, ТШ-0,66, ТП, ТПП и другие). Измерительные трансформаторы тока. Класс напряжения 20кВ. ТШЛ-20-1 [Электронный ресурс] // Западприбор. – Режим доступа : <http://zapadpribor.com/tshl-20-1>. – Загл. с экрана.

66. Глазырин, В. Е. Применение структурных методов распознавания образов для построения дифференциально-фазной защиты сосредоточенных объектов / В. Е. Глазырин, М. А. Купарев // Электро. – 2003. – №3. – С. 18–21.

67. Дроздов, А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А. Д. Дроздов. – Москва-Ленинград : Энергия, 1965. – 240 с.: ил.

68. Глазырин, В. Е. Расчет уставок микропроцессорной релейной защиты блока генератор-трансформатор : учеб. пособие / В. Е. Глазырин, А. И. Шалин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – 130 с.

69. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aquagroup.ru/normdocs/8401>. – Загл. с экрана.

70. АО Институт Автоматизации Энергетических Систем. Кадры. Надежность технических решений : офиц. сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.iaes.ru/production/devices/local>. – Загл. с экрана.

71. Litvinov I. I. Characteristic features of internal and external faults for use in differential protection / I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, V. E. Glazirin // Actual issues of mechanical engineering (AIME 2017) : proc. of the intern. conf., Tomsk, 27–29 July 2017. – Atlantis Press, 2017. – P. 425–432. – (Advances in Engineering Research ; vol.133 ).

72. Litvinov I. I. Improved algorithm for phase comparison for differential protection of a power transformer / I. I. Litvinov, V. E. Glazyrin // Power Technology and Engineering. – 2017. – Vol. 51, iss. 2. – P. 251–255.

73. Литвинов И. И. Анализ осциллограммы дифференциального тока при последовательном броске тока намагничивания силового трансформатора / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2017. – № 5. – С. 17–27.

74. Глазырин В. Е. Признаки аварийных режимов в цепях дифференциальных защит силовых трансформаторов = Semne ale regimurilor de avarie în circuitele protecției diferențiale ale transformatoarelor de putere / В. Е.

Глазырин, И. И. Литвинов // Проблемы региональной энергетики = Problems of regional energy. – 2017. – № 1(33). – С. 24–31.

75. Проверка дистанционного органа устройств РЗ и ПА в асинхронном режиме стандартными средствами испытательного комплекса «РЕТОМ» / А. А. Осинцев, В. Е. Глазырин, И. И. Литвинов, Е. И. Фролова // Электрические станции. – 2017. – № 10. – С. 32–37.

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

77. Литвинов И. И. Усовершенствованный алгоритм сравнения фаз для дифференциальной защиты силового трансформатора = The improved algorithm comparison phase for differential protection of power transformer / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Электрические станции. – 2017. – № 2. – С. 54–58.

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

79. Litvinov I. I. Examination of power generator differential protection stability by use of simulation software / I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Glazyrin // Aspire to science : тез. гор. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 67–68.

80. Litvinov I. I. Improved protective algorithms against turn-to-turn faults in power transformer windings / I. I. Litvinov ; research adviser V. E. Glazyrin ; language adviser E. T. Kitova // Science in Progress : тез. Всерос. науч.-практ. конф. магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 120–121.

81. Litvinov I. I. Principles of mathematical modeling of magnetizing currents in power transformers banks / I. I. Litvinov, E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Glazyrin // Aspire

to science : тез. гор. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С.68–69.

82. Litvinov I. I. Protection against turn-to-turn faults during overexcitation of a power transformer / I. I. Litvinov, E. T. Kitova ; sci. ed. V. E. Glazyrin // Science in Progress : тез. Всерос. науч.-практ. конф. магистрантов и аспирантов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 122–123.

83. Литвинов И. И. Способ фиксации перехода короткого замыкания вне зоны действия дифференциальной защиты силового трансформатора во внутреннее повреждение / И. И. Литвинов, В. Е. Глазырин // Фундаментальные и прикладные исследования : сб. науч. трудов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 106–108.

84. Литвинов И. И. Способ формирования годографа асинхронного режима с заданными характеристиками для проверки АЛАР / И. И. Литвинов ; науч. рук. В. Е. Глазырин // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 134–135.

85. Глазырин В. Е. Уточнённый метод расчёта тока небаланса в дифференциальной защите силового трансформатора / В. Е. Глазырин, И. И. Литвинов // Фундаментальные и прикладные исследования : сб. науч. трудов/ – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С.103–106.

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЁХФАЗНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАЛИЧИИ НАГРУЗКИ

Схемы замещения электрических цепей трансформаторов в указанных режимах работы приведены на рисунках А.1-А.2; на схемах показаны выбранные положительные направления токов в ветвях, а также схема соединений обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (моделируется 11-ая группа).

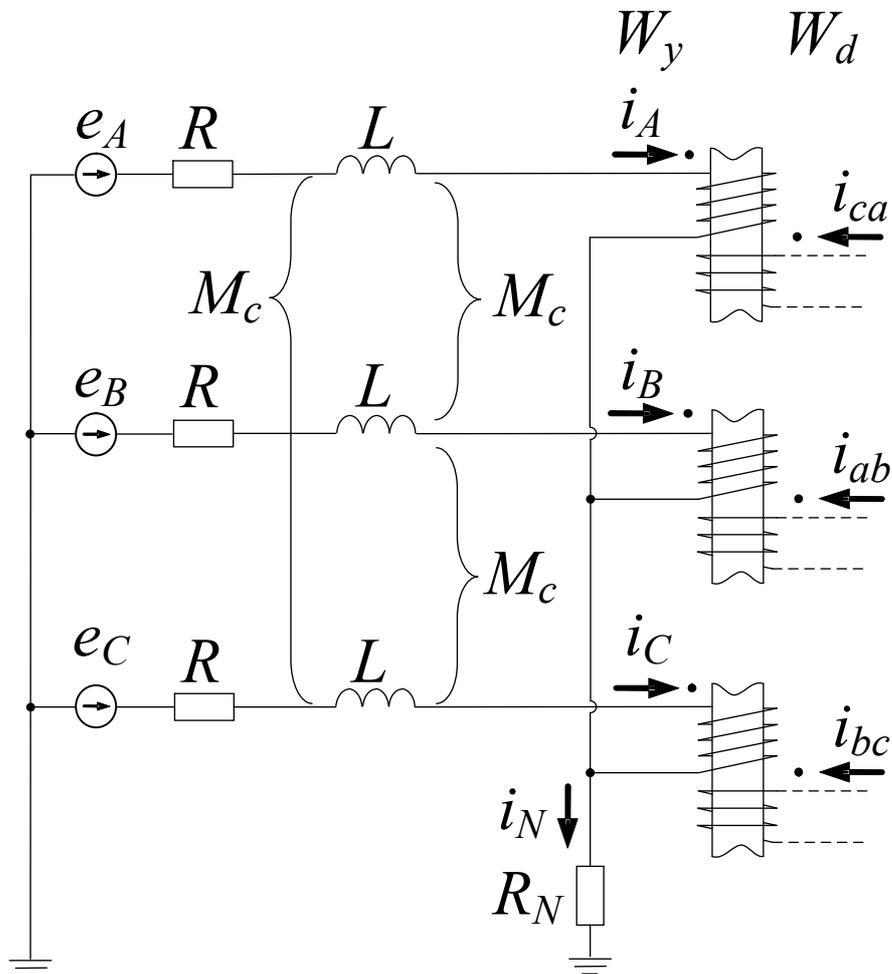


Рисунок А.1 – Схема замещения электрической цепи силового трансформатора с нагрузкой на стороне НН (показана сторона ВН)

При составлении уравнений, описывающих переходные процессы в трансформаторе, принято, что магнитный поток  $\Phi_A = B_A \cdot S$  в стержне  $A$  создаётся под действием токов  $i_A$  и  $i_{ca}$ ; магнитный поток  $\Phi_B = B_B \cdot S$  в стержне  $B$  создаётся под

действием токов  $i_B$  и  $i_{ab}$ ; магнитный поток  $\Phi_C = B_C \cdot S$  в стержне  $C$  создаётся под действием токов  $i_C$  и  $i_{bc}$ .

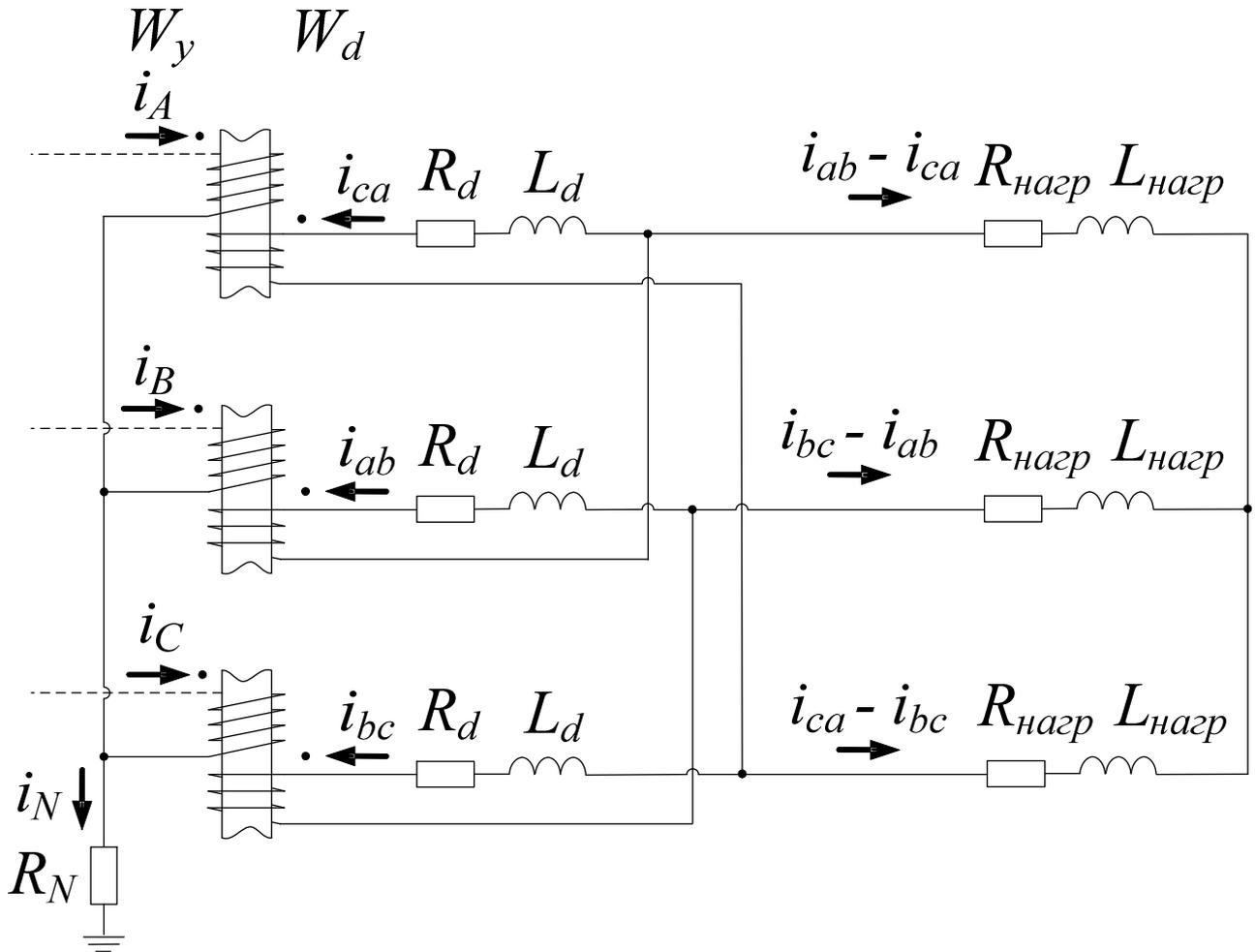


Рисунок А.2 – Схема замещения электрической цепи силового трансформатора с нагрузкой на стороне НН (показана сторона НН)

Как видно из рисунка А.2, нагрузка на стороне НН СТ представлена активными и индуктивными элементами  $R_{нагр}$  и  $L_{нагр}$ , подключенными к выводам обмотки, соединённой в «треугольник». Наличие нагрузки позволяет имитировать возникновение КЗ на стороне НН, что достигается путём мгновенного изменения полного сопротивления нагрузки от заданного значения до значения, близкого к нулю. Ниже приведены системы дифференциальных уравнений для электрической и магнитной цепи:

$$\left\{ \begin{array}{l}
e_a = i_A R + L \frac{di_A}{dt} + M_c \frac{di_B}{dt} + M_c \frac{di_C}{dt} + W_y \frac{d\Phi_A}{dt} + i_N R_N; \\
e_b = i_B R + L \frac{di_B}{dt} + M_c \frac{di_A}{dt} + M_c \frac{di_C}{dt} + W_y \frac{d\Phi_B}{dt} + i_N R_N; \\
e_c = i_C R + L \frac{di_C}{dt} + M_c \frac{di_A}{dt} + M_c \frac{di_B}{dt} + W_y \frac{d\Phi_C}{dt} + i_N R_N; \\
\left( \frac{d\Phi_A}{dt} + \frac{d\Phi_B}{dt} + \frac{d\Phi_C}{dt} \right) W_d + (i_{ab} + i_{bc} + i_{ca}) R_d + \left( \frac{di_{ab}}{dt} + \frac{di_{bc}}{dt} + \frac{di_{ca}}{dt} \right) L_d = 0; \\
(i_{ab} - i_{ca}) R_{\text{назр}} + \left( \frac{di_{ab}}{dt} - \frac{di_{ca}}{dt} \right) L_{\text{назр}} - (i_{bc} - i_{ab}) R_{\text{назр}} - \\
- \left( \frac{di_{bc}}{dt} - \frac{di_{ab}}{dt} \right) L_{\text{назр}} + i_{ab} R_d + L_d \frac{di_{ab}}{dt} + W_d \frac{d\Phi_B}{dt} = 0; \\
(i_{bc} - i_{ab}) R_{\text{назр}} + \left( \frac{di_{bc}}{dt} - \frac{di_{ab}}{dt} \right) L_{\text{назр}} - (i_{ca} - i_{bc}) R_{\text{назр}} - \\
- \left( \frac{di_{ca}}{dt} - \frac{di_{bc}}{dt} \right) L_{\text{назр}} + i_{bc} R_d + L_d \frac{di_{bc}}{dt} + W_d \frac{d\Phi_C}{dt} = 0; \\
i_N = i_A + i_B + i_C.
\end{array} \right. \quad (\text{A.1})$$

Переписываем систему (A.1), заменяя магнитные потоки на соответствующие значения магнитной индукции в стержнях трансформатора:

$$\left\{ \begin{array}{l}
e_a = i_A R + L \frac{di_A}{dt} + M_c \frac{di_B}{dt} + M_c \frac{di_C}{dt} + SW_y \frac{dB_A}{dt} + i_N R_N; \\
e_b = i_B R + L \frac{di_B}{dt} + M_c \frac{di_A}{dt} + M_c \frac{di_C}{dt} + SW_y \frac{dB_B}{dt} + i_N R_N; \\
e_c = i_C R + L \frac{di_C}{dt} + M_c \frac{di_A}{dt} + M_c \frac{di_B}{dt} + SW_y \frac{dB_C}{dt} + i_N R_N; \\
\left( \frac{dB_A}{dt} + \frac{dB_B}{dt} + \frac{dB_C}{dt} \right) SW_d + (i_{ab} + i_{bc} + i_{ca}) R_d + \left( \frac{di_{ab}}{dt} + \frac{di_{bc}}{dt} + \frac{di_{ca}}{dt} \right) L_d = 0; \\
(i_{ab} - i_{ca}) R_{назп} + \left( \frac{di_{ab}}{dt} - \frac{di_{ca}}{dt} \right) L_{назп} - (i_{bc} - i_{ab}) R_{назп} - \\
- \left( \frac{di_{bc}}{dt} - \frac{di_{ab}}{dt} \right) L_{назп} + i_{ab} R_d + L_d \frac{di_{ab}}{dt} + SW_d \frac{dB_B}{dt} = 0; \\
(i_{bc} - i_{ab}) R_{назп} + \left( \frac{di_{bc}}{dt} - \frac{di_{ab}}{dt} \right) L_{назп} - (i_{ca} - i_{bc}) R_{назп} - \\
- \left( \frac{di_{ca}}{dt} - \frac{di_{bc}}{dt} \right) L_{назп} + i_{bc} R_d + L_d \frac{di_{bc}}{dt} + SW_d \frac{dB_C}{dt} = 0; \\
i_N = i_A + i_B + i_C.
\end{array} \right. \quad (A.2)$$

Система уравнений для магнитной цепи (группа однофазных СТ):

$$\left\{ \begin{array}{l}
W_y \frac{di_A}{dt} + W_d \frac{di_{ca}}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A} S} \frac{d\Phi_A}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt}; \\
W_y \frac{di_B}{dt} + W_d \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B} S} \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt}; \\
W_y \frac{di_C}{dt} + W_d \frac{di_{bc}}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C} S} \frac{d\Phi_C}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt}.
\end{array} \right. \quad (A.3)$$

Система уравнений для магнитной цепи (трёхстержневой СТ):

$$\left\{ \begin{array}{l} W_y \frac{di_A}{dt} + W_d \frac{di_{ca}}{dt} = \frac{l_A}{\mu_{\partial A}} \frac{dB_A}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_B}{dt} + W_d \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{l_B}{\mu_{\partial B}} \frac{dB_B}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ W_y \frac{di_C}{dt} + W_d \frac{di_{bc}}{dt} = \frac{l_C}{\mu_{\partial C}} \frac{dB_C}{dt} - R_{m0} \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ S \frac{dB_A}{dt} + S \frac{dB_B}{dt} + S \frac{dB_C}{dt} + \frac{d\Phi_0}{dt} = 0. \end{array} \right. \quad (\text{A.4})$$

В рассмотренных источниках отсутствуют осциллограммы трёхфазных БТН при подключенной нагрузке, поэтому проверка корректности воспроизведения ПП в настоящей модели проводилась следующим образом. Параметры нагрузки задавались на несколько порядков превышающими значение номинальной нагрузки СТ, тем самым имитировалась работа холостого СТ. Возникающий БТН в этих условиях полностью соответствовал по форме и амплитуде БТН в СТ без нагрузки. Тем самым подтверждалась правильность модели.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### РАСЧЁТ ЧИСЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЕГО ВКЛЮЧЕНИИ ПОД НАПРЯЖЕНИЕ

Вначале рассмотрим порядок выбора численных параметров для модели однофазного СТ. Создание модели однофазного трансформатора является подготовительным этапом к моделированию трёхфазных СТ, и ввиду того, что рассмотрение однофазных БТН не представляет такого практического интереса, как рассмотрение трёхфазных БТН, поэтому выбор параметров осуществлялся *упрощённо*. Пусть параметры сердечника и обмоток рассматриваемого однофазного СТ соответствуют параметрам сердечника СТ типа ТРДН-25000/110, при этом в качестве длины средней магнитной линии примем удвоенную длину боковой фазы. Таким образом, площадь поперечного сечения магнитопровода  $S = 0,25 \text{ м}^2$ , длина средней магнитной линии  $l = 2 \cdot 4,62 = 9,24 \text{ м}$ , число витков первичной обмотки  $N_1 = 896$ . Активное сопротивление примем равными паспортному значению активного сопротивления рассматриваемого СТ, а индуктивное сопротивление примем несколько большим индуктивного сопротивления короткозамкнутого СТ [57]. Таким образом, активное сопротивление  $R = 2,5 \text{ Ом}$ , индуктивное сопротивление  $X_L = 73,0 \text{ Ом}$  (на 30% больше паспортного). Действующее значение питающего синусоидального напряжения равно  $U = 63,51 \text{ кВ}$  (фазное напряжение сети 110 кВ), круговая частота источника  $\omega = 314 \text{ рад/с}$ .

В качестве примера расчёта параметров модели трёхфазного СТ рассмотрим порядок определения индуктивных и активных сопротивлений обмоток на сторонах ВН и НН СТ типа ТРДН-25000/110. Обозначим фазные активные сопротивления обмоток на стороне ВН и НН соответственно как  $R_{ВН}$ ,  $R_{НН}$ . Учтём, что эквивалентная индуктивность  $L$  в системе (2.11) состоит из двух слагающих – из индуктивности предвключённой энергосистемы  $L_c$  и индуктивности, обусловленной всеми потоками рассеяния, проходящими вне стержня

магнитопровода, который насыщается в ходе ПП [67]. Обозначим индуктивность рассеяния обмотки ВН как  $L_{p.ВН}$ .

Численные значения параметров магнитной цепи (площади поперечного сечения стержня, числа витков на стороне ВН и НН и длина стержней фаз магнитопровода) данного СТ приняты в соответствии со справочными данными [51]:  $l_A = l_C = 4,62$  м (с учётом длины ярем),  $l_B = 2,78$  м,  $S = 0,25$  м<sup>2</sup>. Данный СТ имеет расщеплённую обмотку НН, а обмотка ВН состоит из двух параллельных ветвей с выводом из середины. Расщеплённая обмотка НН выполняется в виде двух коаксиальных концентров, расположенных на одном стержне магнитопровода. Указанные конструктивные особенности не позволяют непосредственно использовать разработанную математическую модель для расчёта ПП, поскольку электрическая схема данного СТ не соответствует схеме, изображённой на рисунке 2.5. Поэтому при моделировании БТН, с целью не усложнять разработанную модель СТ, следует представить две обмотки НН как некоторую эквивалентную обмотку, имеющую такие параметры  $L_\sigma$ ,  $R_{НН}$ , чтобы мощность потерь короткого замыкания  $P_\kappa$  данного СТ соответствовала паспортным данным, а создаваемый магнитный поток рассеяния эквивалентной обмотки был эквивалентен потоку двух расщеплённых обмоток НН. Мощность эквивалентной обмотки при этом должна соответствовать суммарной мощности расщеплённых обмоток НН. Те же преобразования следует произвести с обмоткой ВН.

Активное сопротивление в схеме замещения СТ в основном определяется активными сопротивлениями его обмоток на сторонах ВН и НН, которое зависит от материала проводников, их длины и площади поперечного сечения. Соотношение активных сопротивлений обмоток сторон ВН и НН может быть определено по формуле:

$$\frac{R_{НН}}{R_{ВН}} = \frac{\rho_{НН} \cdot l_{НН} \cdot S_{ВН}}{\rho_{ВН} \cdot l_{ВН} \cdot S_{НН}} \quad (\text{Б.1})$$

где  $\rho_{BH}$ ,  $\rho_{HH}$  – соответственно удельное электрическое сопротивление материала проводников на стороне ВН и НН, Ом·м;  $l_{BH}$ ,  $l_{HH}$  – соответственно длина проводников обмотки на стороне ВН и НН, м;  $S_{BH}$ ,  $S_{HH}$  – соответственно площади поперечного сечения проводников обмотки на стороне ВН и НН, м<sup>2</sup>.

Обмотки ВН и НН рассматриваемого СТ выполнены из одинакового материала [51], поэтому величины  $\rho_{BH}$ ,  $\rho_{HH}$  в выражении (Б.1) сокращаются, значения  $S_{BH}$ ,  $S_{HH}$  соответственно равны 30 и 240 мм<sup>2</sup>. Значения  $l_{BH}$ ,  $l_{HH}$  неизвестны, однако зная значения массы обмоток ВН и НН на 3 фазы  $G_{HH}$ ,  $G_{BH}$ , плотность материала провода  $\gamma_{Cu}$  (проводники обмоток выполнены из меди) и площади поперечного сечения проводников  $S_{BH}$ ,  $S_{HH}$ , можно вычислить их эквивалентную длину по формуле

$$l = \frac{G}{3 \cdot \gamma_{Cu} S}. \quad (\text{Б.2})$$

Масса проводов обмотки НН и ВН на 3 фазы составляет соответственно [14-51]  $G_{HH} = 2400$  кг (на две группы обмоток),  $G_{BH} = 3955$  кг (с учётом массы обмотки грубого регулирования),  $\gamma_{Cu} = 8900$  кг/м<sup>3</sup>. Используя уравнение (Б.2), находим  $l_{BH} = 4937,6$  м и  $l_{HH} = 374,5$  м. На основании полученных данных имеем  $R_{HH}/R_{BH} = 0,0095$ . Значения индуктивного и активного сопротивлений такого СТ приведены в [55] и составляют соответственно:  $X_T = 56,0$  Ом,  $R_T = 2,5$  Ом. Паспортное значение  $R_T$  приведено к стороне ВН рассматриваемого СТ в предположении параллельной работы расщеплённых обмоток НН, это же значение определяется по Т-образной схеме замещения как:

$$R_T = R_{BH} + R_{HH} \left( \frac{W_y}{W_d} \right)^2. \quad (\text{Б.3})$$

С учётом найденного соотношения  $R_{HH}/R_{BH}$  получаем

$$R_T = R_{BH} + 0,0095 R_{BH} \left( W_y / W_d \right)^2. \quad (\text{Б.4})$$

Число витков обмотки ВН (с учётом обмотки грубого регулирования напряжения) и НН соответственно равно  $W_y = 896$ ,  $W_d = 85$ . Из выражения (Б.4), учитывая известное значение  $R_T$  и отношения  $R_{HH}/R_{BH}$ , получаем  $R_{BH} = 1,22$  Ом и  $R_{HH} = 11,5 \cdot 10^{-3}$  Ом.

Проверку рассчитанных значений  $R_{HH}$  и  $R_{BH}$  можно выполнить путём подсчёта мощности потерь КЗ на сторонах ВН и НН и сравнения их с расчётными значениями, приведёнными в [51]. Фазный ток на стороне ВН  $I_{\phi BH}$  равен номинальному току СТ на стороне ВН  $I_{номВН}$ , т.е.  $I_{\phi BH} = 125,5$  А; фазный ток эквивалентной обмотки  $I_{\phi.эkv}$  рассчитывается через номинальный ток стороны НН  $I_{номНН}$  [51] и составляет

$$I_{\phi.эkv} = \frac{I_{номНН}}{\sqrt{3}} = \frac{S_T}{3 \cdot U_{номНН}} = \frac{25000 \cdot 10^3}{3 \cdot 6300} = 1322 \text{ А}, \quad (\text{Б.5})$$

где  $S_T$  – номинальная мощность СТ, В·А;  $U_{номНН}$  – номинальное напряжение стороны НН, В. Мощности потерь КЗ на сторонах ВН и НН равны

$$\begin{cases} P_{кВН} = 3 I_{\phi BH}^2 \cdot R_{BH} = 56701 \text{ Вт}, \\ P_{кНН} = 3 I_{\phi.эkv}^2 \cdot R_{НН} = 60295 \text{ Вт}. \end{cases} \quad (\text{Б.6})$$

Мощность потерь КЗ обмотки ВН рассматриваемого СТ с учётом обмотки грубого регулирования [51] составляет 56453 Вт, сумма мощности потерь КЗ обмотки НН и активных потерь в баке и деталях конструкции СТ составляет 60730 Вт, что свидетельствует о приемлемой точности проведённого расчёта параметров СТ (мощность потерь в конструктивных элементах СТ, таким

образом, вошла в состав мощности потерь КЗ на стороне НН, а погрешность составляет менее 1%).

Значение индуктивности рассеяния обмоток ВН и НН для расчёта ПП при включении СТ может быть приближённо определено по формуле для расчёта индуктивности катушки с заданным числом витков  $W_y$  ( $W_d$ ) и геометрическими размерами – площадью поперечного сечения  $S_{ВН}$  ( $S_{НН}$ ), определяемой по значению среднего диаметра обмотки СТ и длиной  $l_k$ , равной длине стержня при наличии ферромагнитных прессующих колец или равной длине обмотки при их отсутствии [57, 58]. Рассчитанные по этим параметрам значения токов включения СТ получаются больше их реальных значений. Превышение может достигать 30%. Таким образом, это вносит некоторый запас в отстройку устройств РЗ от режимов БТН.

Расчёт индуктивностей рассеяния рассматриваемого СТ произведен отдельно для каждой обмотки НН (параметры  $L_{p.НН1}$  и  $L_{p.НН2}$ ) и двух параллельных ветвей обмотки ВН (параметры  $L_{p.ВН1}$  и  $L_{p.ВН2}$ ). Высота обмоток ВН и НН рассматриваемого СТ составляет  $l_k = 1,49$  м, средний диаметр обмоток ВН и НН составляет соответственно  $D_{cp.ВН} = 0,94$  м,  $D_{cp.НН} = 0,70$  м [51]. В расчётах параметров  $L_{p.НН1}$ ,  $L_{p.НН2}$  и  $L_{p.ВН1}$ ,  $L_{p.ВН2}$  принимаем, что высота соответствующих частей обмоток ВН и НН составляет половину от  $l_k$ . В результате получаем

$$\begin{cases} L_{p.ВН1} = \frac{\mu_0 W_y^2 \pi D_{cp.ВН}^2}{0,5 \cdot 4 \cdot l_k} = 0,94 \text{ Гн}, \\ L_{p.НН1} = \frac{\mu_0 W_d^2 \pi D_{cp.НН}^2}{0,5 \cdot 4 \cdot l_k} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}, \\ L_{p.ВН1} = L_{p.ВН2}, \\ L_{p.НН1} = L_{p.НН2}, \end{cases} \quad (\text{Б.7})$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума.

Поскольку две ветви обмотки ВН соединены параллельно, можно записать

$$L_{p.BH} = \frac{L_{p.BH1}}{2} = \frac{L_{p.BH2}}{2} = 0,47 \text{ Гн.} \quad (\text{Б.8})$$

Две обмотки стороны НН, соединённые по схеме «треугольник», также работают параллельно, поскольку их потокосцепления, следовательно, и наводимые ЭДС равны, поэтому

$$L_d = \frac{L_{p.HH1}}{2} = \frac{L_{p.HH2}}{2} = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.} \quad (\text{Б.9})$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе проведённого исследования был разработан специальный программный комплекс, позволяющий в удобной форме задавать параметры СТ и ТТ и решать дифференциальные уравнения, описывающие ПП в их цепях. Полученные данные о ПП затем можно использовать как входные сигналы алгоритма защиты, а также воспроизвести с помощью программно-испытательного комплекса, например устройства РЕТОМ-61(51). Комплекс имитационного моделирования может быть широко использован в учебных целях для изучения ПП в силовом и измерительном оборудовании.

Графический интерфейс, созданный в среде разработки графических приложений GUIDE (Graphical User Interface Development Environment – среда разработки графического пользовательского интерфейса) пакета MATLAB, представляет собой результат синтеза различных подсистем, обеспечивающих выполнение указанных выше функций комплекса моделирования. Общая структура системы моделирования приведена на рисунке В.1.

Взаимодействие пользователя со всеми подсистемами осуществляется посредством графической оболочки. Пользователь, пользуясь средой взаимодействия, вводит параметры расчёта в соответствующие программные окна вручную или же загружает их из заранее подготовленной базы данных. По команде пользователя данные из графической оболочки передаются на вход подсистем расчёта. Подсистемы расчёта обрабатывают входные данные и инициируют расчёты с использованием математических моделей, а также выполняют некоторые сервисные функции, например вывод на экран осциллограмм и сохранение результатов моделирования.

Подсистема настройки, загрузки и сохранения параметров расчёта предоставляет возможность редактирования начальных условий проведения эксперимента, параметров силового и измерительного оборудования, сохранения

этих параметров в файл с возможностью последующей загрузки и повторения опытов с заданными условиями и с заданным оборудованием.

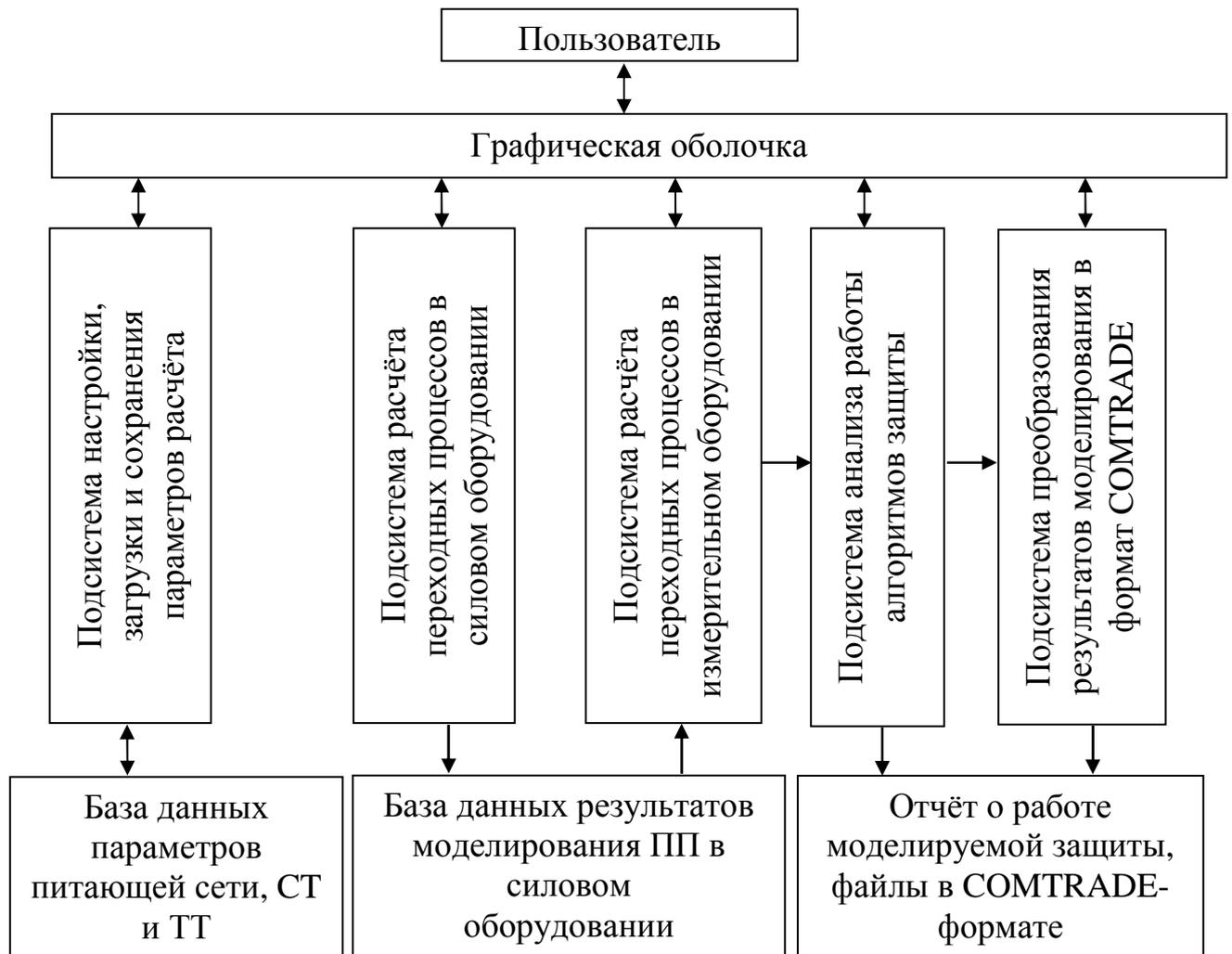


Рисунок В.1 – Структура системы моделирования ПП в цепях ДЗ

Подсистема расчёта переходных процессов в силовом оборудовании организует связь с соответствующими математическими моделями и сохраняет результаты расчёта в форме, удобной для последующей обработки подсистемой подготовки данных для микропроцессорного испытательного комплекса. Опытным путём установлено, что когда время моделирования превышает 6-10 периодов промышленной частоты, численный расчёт ПП в силовом оборудовании должен проводиться с повышенной точностью для снижения величины накопленных ошибок, возникающих из-за численного интегрирования дифференциальных уравнений. Проведение расчёта с повышенной точностью, как

правило, занимает много времени. Поэтому необходимо создание отдельной базы данных, в которой должны сохраняться результаты моделирования ПП в силовом оборудовании с целью их дальнейшего многократного использования. Действительно, при одной и той же первичной схеме вторичные цепи могут иметь различную конфигурацию (например, при решении задач проектирования может стоять вопрос о выборе таких ТТ, при которых работа защиты будет оптимальна, – при этом необходимо исследовать работу защитных алгоритмов при одинаковом первичном оборудовании, но отличающихся ТТ; аналогичным образом можно исследовать устойчивость работы защиты при соединении групп ТТ на сторонах смежного напряжения по схеме «звезда»-«треугольник» или «звезда»-«звезда»), так что при проведении испытаний нет необходимости каждый раз рассчитывать ПП в первичной цепи.

Подсистема расчёта переходных процессов в измерительном оборудовании организует связь с соответствующими математическими моделями, а результаты моделирования передаёт в подсистему имитации алгоритмов защиты и/или сохраняет результаты в формате COMTRADE. Пользователь может подключить или отключить любую из подсистем обработки выходных данных по мере необходимости.

Подсистема анализа работы алгоритмов защиты получает результаты моделирования группы ТТ (выборки магнитной индукции в стержнях сердечников и вторичных токов), которые в дальнейшем анализируются алгоритмом защиты. Алгоритм защиты программируется отдельно и сохраняется в виде отдельного файла. Чтобы сделать подсистему активной, пользователь с помощью графической оболочки указывает полный путь к файлу с алгоритмом. Таким образом в одном файле можно прописать множество защитных и сервисных (например, вывод на экран осциллограмм) алгоритмов. Предполагается, что на выходе рассматриваемой подсистемы формируется некоторый отчёт о результате работы защитного алгоритма (формат отчёта определяется самим пользователем).

Для решения задачи воспроизведения результатов моделирования с помощью микропроцессорного испытательного комплекса требуется сохранять результаты проведенных расчётов в соответствии со стандартом COMTRADE. Стандарт COMTRADE разработан IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) и стал фактическим международным стандартом для записи осциллограмм. Использование этого стандарта позволяет осуществлять анализ аварийных осциллограмм третьими лицами, что важно для исследований и обмена опытом. При создании файлов формата COMTRADE каждая запись имеет три связанных с ней типов файлов. Каждый из типов несёт различную информацию о записанном процессе: заголовок (комментарий к осциллограмме, его наличие не обязательно), конфигурацию и данные (последние два файла используются для непосредственного воспроизведения осциллограмм с указанием таких параметров записи, как частота дискретизации, масштабные коэффициенты, смещение относительно оси времени и т.п.). Осциллограммы, записанные в указанном формате, впоследствии могут быть воспроизведены с помощью микропроцессорного испытательного комплекса РЕТОМ-51(61) и поданы на входы испытываемой защиты.

Будучи активированной пользователем, подсистема преобразования данных сохраняет в отдельной папке результаты моделирования переходных процессов в цепях ТТ в формате COMTRADE.

Примеры экранных окон программного интерфейса приведены на рисунках В.2-В.3. Разработанная программа расчёта БТН при включении СТ позволяет производить циклические расчёты переходных процессов: пользователь вводит начальные и конечные значения параметра, а также задаёт величину, на которую указанный параметр будет изменяться в ходе последующих расчётов. В программе моделирования ПП в силовом трансформаторе можно таким образом изменять следующие параметры (на рисунке В.2 соответствующие графические окна выделены синим цветом): ЭДС источника питания, угол включения, время включения отдельных фаз выключателя, электрические параметры питающей сети, остаточная индукция в стержнях магнитопровода (при

моделировании 3-стержневого СТ остаточный магнитный поток нулевой последовательности вычисляется автоматически, исходя из заданных условий, чтобы выполнялся  $I$  закон Кирхгофа для магнитной цепи). Пользователь может сохранять результаты моделирования в отдельную папку, выбрать тип магнитной системы моделируемого трансформатора. В программе реализован режим выдачи  $3U_0$ , то есть такого режима, когда источники ЭДС содержат только нулевую последовательность. Эта опция представляется необходимой для опытного определения значения  $R_{m0}$ . В программном комплексе реализована функция взаимодействия с моделями БТН нагруженного СТ, моделями включения СТ со стороны НН (описание этих математических моделей в настоящей работе не приводится) по принципу, аналогичному тому, что был приведён выше.

Программный интерфейс, приведённый на рисунке В.3, осуществляет взаимодействие пользователя с моделью ТТ. Программа расчёта ПП в группе ТТ также позволяет осуществлять циклический расчёт, при этом в цикле расчётов можно изменять остаточные индукции в сердечниках ТТ (соответствующие окошки выделены синим цветом). С помощью настоящей программы пользователь получает возможность исследовать поведение ТТ в различных условиях, указав для каждой отдельной группы файл с записанными осциллограммами процессов в первичной цепи. Пользователю не обязательно прибегать к помощи встроенных моделей, имитирующих процессы в первичной цепи ТТ, чтобы воспользоваться программой расчёта ПП во вторичных цепях. Записав данные в определённом формате вручную или с помощью сторонней программы, пользователь может подать на вход ТТ произвольный сигнал.

БТН+КЗ на стороне ВН, включение со стороны ВН

### Параметры источника питания

ЭДС источника: 23720 В  
 Угол вкл. фазы А: 90 град  
 Частота сети: 50 Гц  
 Пофазный привод  
 Самоиндукция источника и фаз ЛЭП: 0.032 Гн  
 Взаимная индуктивность фаз ЛЭП: 0 Гн  
 Активное сопр. источника и ЛЭП: 0.5 Ом  
 Активное сопр. заземления нейтрали сети: 0.05 Ом  
 Время вкл. фазы А: 0 с  
 Время вкл. фазы В: 0 с  
 Время вкл. фазы С: 0 с  
 Режим выдачи 3U0



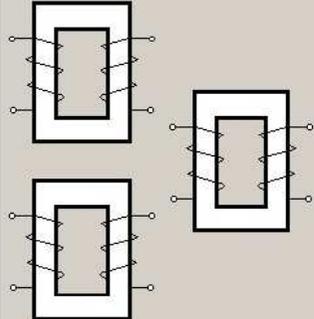
### Параметры силового трансформатора

Индуктивность рассеяния обмотки ВН: 0.032 Гн  
 Индуктивность рассеяния обмотки НН: 0.0007 Гн  
 Активное сопр. обмотки ВН: 0.5 Ом  
 Активное сопр. обмотки НН: 0.05 Ом  
 Остаточная индукция в стержне А: 0 Тл  
 Остаточная индукция в стержне В: 0 Тл  
 Остаточная индукция в стержне С: 0 Тл

**Вид магнитной системы**

Группа 1-фазных трансформаторов  
 Трёхстержневой трансформатор

Длина стержня магнитопровода: 5.75 м  
 Площадь попереч. сечения стержня: 0.85 м²  
 Число витков на стороне ВН: 50  
 Число витков на стороне НН: 12  
 Длина яра магнитопровода: 2.5 м  
 Магнит. сопр. нулевой послед.: 50000 A/B5



Загрузить параметры... Сохранить параметры: MyParam\_in1

### Параметры КЗ

**Вид КЗ на стороне ВН:**

Однофазное  Двухфазное на землю  
 Двухфазное простое  Симметричное

Момент возникновения КЗ: 10 с

### Параметры расчёта

Начало расчёта: 0 с  
 Конец расчёта: 0.04 с  
 Повышенная точность

**Сохранить результаты:**

I<sub>mu</sub>  I<sub>sc</sub>  I<sub>d</sub>  B

MyResults\_in1

<< НАЗАД РАСЧЁТ >>

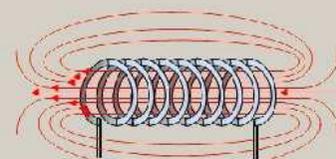


Рисунок В.2 – Окно программного интерфейса для взаимодействия с одной из моделей БТН

1. Сохранить параметры... 2. Загрузить параметры...

ТТ на стороне ВН			ТТ на стороне НН			ТТ на стороне СН					
Название:	ТВТ-220-154		Название:	ТВТ-10-50		Название:	ТВТ-10-50				
R(втор.обм.ТТ), Ом	0.121		R(втор.обм.ТТ), Ом	1.45		R(втор.обм.ТТ), Ом	1.45				
X(втор.обм.ТТ), Ом	0.3		X(втор.обм.ТТ), Ом	1.56		X(втор.обм.ТТ), Ом	1.56				
S(сеч.серд-ка), кв.м	0.00945		S(сеч.серд-ка), кв.м	0.0015		S(сеч.серд-ка), кв.м	0.0015				
L(ср.лин.серд-ка), м	2.5		L(ср.лин.серд-ка), м	1.02		L(ср.лин.серд-ка), м	1.02				
R(нагр.ТТ: А,В,С), Ом	0.6	0.6	0.6	R(нагр.ТТ: А,В,С), Ом	1.2	1.2	1.2	R(нагр.ТТ: А,В,С), Ом	1.2	1.2	1.2
X(нагр.ТТ: А,В,С), Ом	0	0	0	X(нагр.ТТ: А,В,С), Ом	0	0	0	X(нагр.ТТ: А,В,С), Ом	0	0	0
R(нул.провода), Ом	1.2		R(нул.провода), Ом	1.2		R(нул.провода), Ом	1.2				
X(нул.провода), Ом	0		X(нул.провода), Ом	0		X(нул.провода), Ом	0				
W(число витков ТТ)	38		W(число витков ТТ)	1000		W(число витков ТТ)	1000				

Соединение ТТ на ВН:  "Звезда"  "Треугольник"

Соединение ТТ на НН:  "Звезда"  "Треугольник"

Соединение ТТ на СН:  "Звезда"  "Треугольник"

**Ост. индукция в ТТ, Тл:**

Сторона ВН			Сторона НН			Сторона СН		
"А"	"В"	"С"	"А"	"В"	"С"	"А"	"В"	"С"
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Выбрать данные... (3x)

В, Тл	1...8	-0.2	0	1.3997	1.3998	1.3999	1.4	1.5	1.6
	9...16	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4
Н, А/м	1...8	-0.2	0	1.3997	1.3998	1.3999	1.4	87.5	350
	9...16	800	1470	3060	13940	59995	134494	208994	283494

Повышенная точность

Обновить В(Н)

**Авто-режим**

Номер конеч.папки

**Характеристика намагничивания стали**

**COMTRADE-converter**

Частота дискретизации: 1200 Гц (24 выб. за период)

Сохранить результаты: **MyConvert**

**Испытание алгоритмов защиты**

Загрузить алгоритм... **TUREMODELS\interface\test.m**

Сохранить результаты: **MyResultsAlg**

<< НАЗАД      Вывести графики      РАСЧЕТ >>

Рисунок В.3 – Окно программного интерфейса для взаимодействия с моделью ТТ

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### РАБОТА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО- ФАЗНОГО АЛГОРИТМА ПРИ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

На рисунках Г.1 и Г.2 приведены соответственно результаты работы дифференциально фазного алгоритма, основанного на предложенном способе контроля участков идеальной трансформации, и результаты цифровой фильтрации сигналов при 1-фазном КЗ вне зоны защиты (связь СТ с энергосистемой и нагрузкой отсутствует). Здесь на рисунке Г.1 и далее первичные токи в обмотках ТТ обозначены штриховой линией, вторичные токи – сплошной линией.

Как и прежде, для получения токов в аварийном режиме используется разработанная ранее математическая модель, см.п.2.3. Внешние КЗ на стороне ВН СТ имитируются с помощью работы короткозамыкателя «Авария 1», рисунок 2.7. Отсутствие связи с энергосистемой на стороне ВН СТ имитируется значительным увеличением сопротивления этой энергосистемы по сравнению с сопротивлением самого СТ.

Как видно, алгоритм, контролирующий участки идеальной трансформации, обладает практически вдвое большей точностью в определении углового сдвига при глубоких насыщениях ТТ – максимальная погрешность замера составляет 15 эл. град против 30 эл. град. При проведении опыта внешнего КЗ принималось, что нагрузка на ТТ чисто активная, не считая индуктивного сопротивления вторичных обмоток. Дальнейшие опыты с изменением  $\cos\phi$  нагрузки от 0 до 1 показывают, что и в этих условиях алгоритм работает корректно и с большой точностью, а качественных изменений в его работе не наблюдается, поэтому в дальнейшем рассматриваются случаи чисто активной нагрузки ТТ.

Отметим, что при несимметричном внешнем КЗ в условиях отсутствия нагрузки и связи с энергосистемой токи в некоторых фазах СТ отсутствуют, однако в силу особенностей используемой математической модели (рисунок 2.7)

и программного обеспечения, используемого для её работы, сигналы тока имеют место, однако они на несколько порядков меньше значения аварийных токов. Такое поведение модели соответствует поведению сигналов помех в реальных условиях. Замер фазового сдвига между опорным сигналом и сигналом помехи даёт, как правило, непредсказуемые результаты, однако в силу малости этого сигнала его вклад в определение замера фазового сдвига между токами плеч ДЗ ничтожен, независимо от результатов измерения сдвига по фазе относительно опорного сигнала.

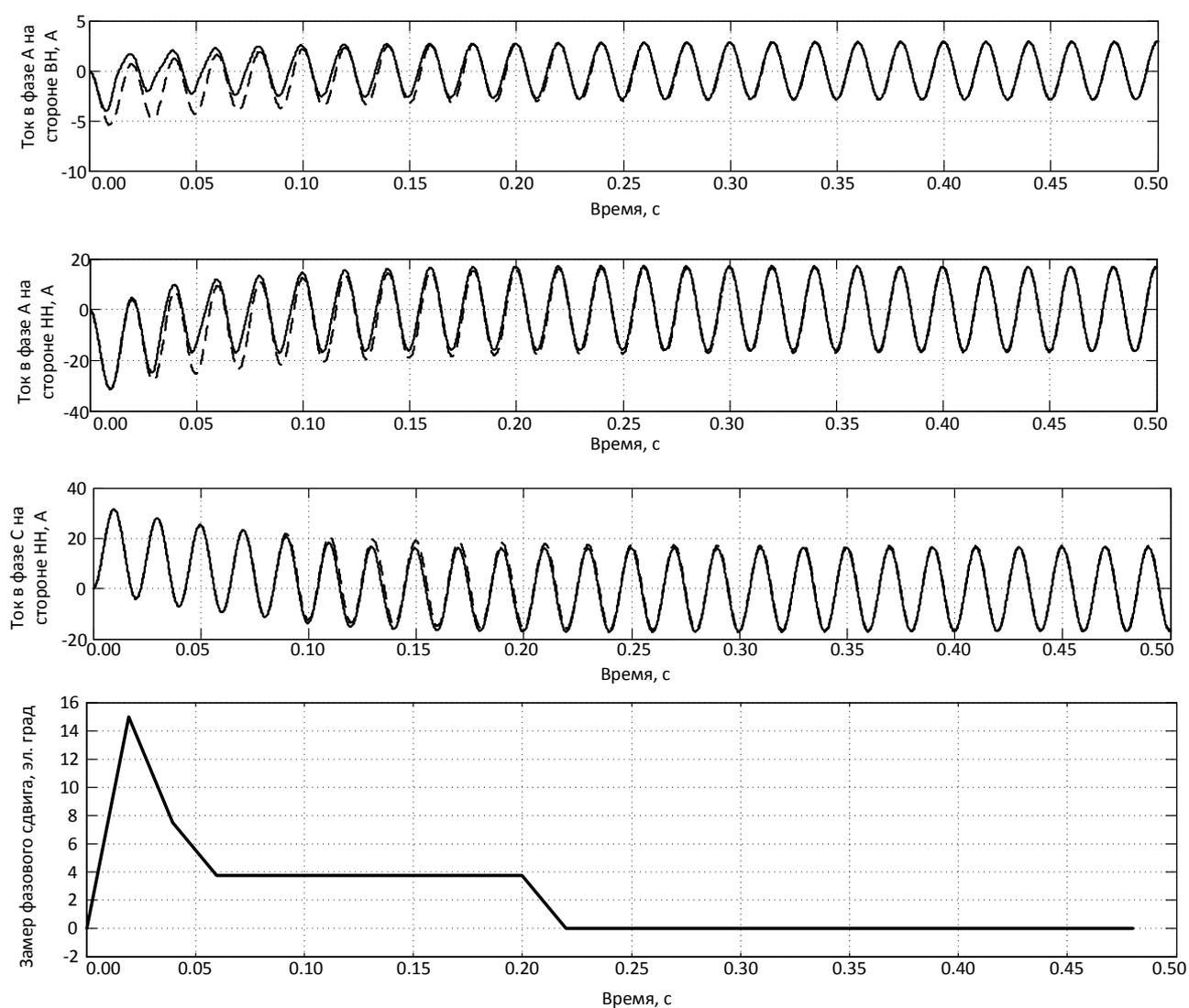


Рисунок Г.1 – Определение фазового сдвига между токами плеч ДЗ при внешнем 1-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, по предложенному методу

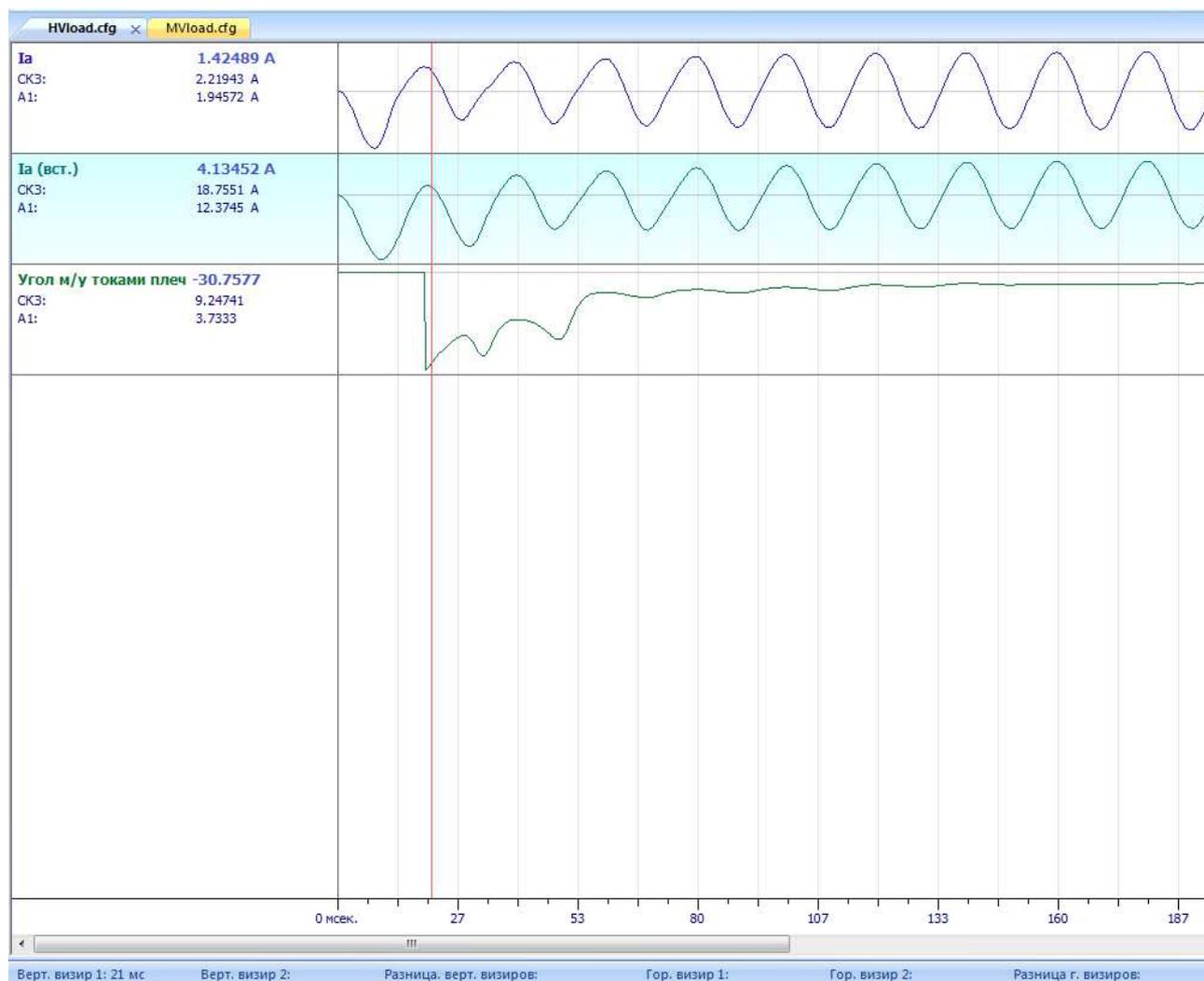


Рисунок Г.2 – Определение фазового сдвига между токами плеч ДЗ при внешнем 1-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, с помощью цифровых фильтров Фурье

Далее приведены результаты работы дифференциально фазного алгоритма, основанного на предложенном способе контроля участков идеальной трансформации, и результаты цифровой фильтрации сигналов при 3-фазном КЗ вне зоны защиты (связь СТ с энергосистемой и нагрузкой отсутствует). Для большей ясности в последующем примере представлены результаты промежуточной работы алгоритма (в примере рассматривается работа алгоритма только в фазе *A*).

На рис Г.3 приведены первичные и вторичные токи ТТ, установленных на стороне ВН и НН СТ. На рисунке Г.4 приведён замер действующего значения соответствующих токов, при этом учтено, что ток в рассматриваемой фазе  $A$  на стороне НН является током плеча ДЗ на соответствующей стороне. На рисунке Г.5 и далее введены следующие обозначения:  $I_{A\text{ ВН}}$  – действующее значение вторичного фазного тока ТТ, установленного в фазе  $A$  на стороне ВН СТ;  $I_{B\text{ ВН}}$  – действующее значение вторичного фазного тока ТТ, установленного в фазе  $B$  на стороне ВН СТ;  $I_{пл\text{ НН}}$  – действующее значение вторичного фазного тока ТТ, установленного в фазе  $A$  на стороне НН СТ, причём этот же ток является током плеча ДЗ со стороны НН СТ.

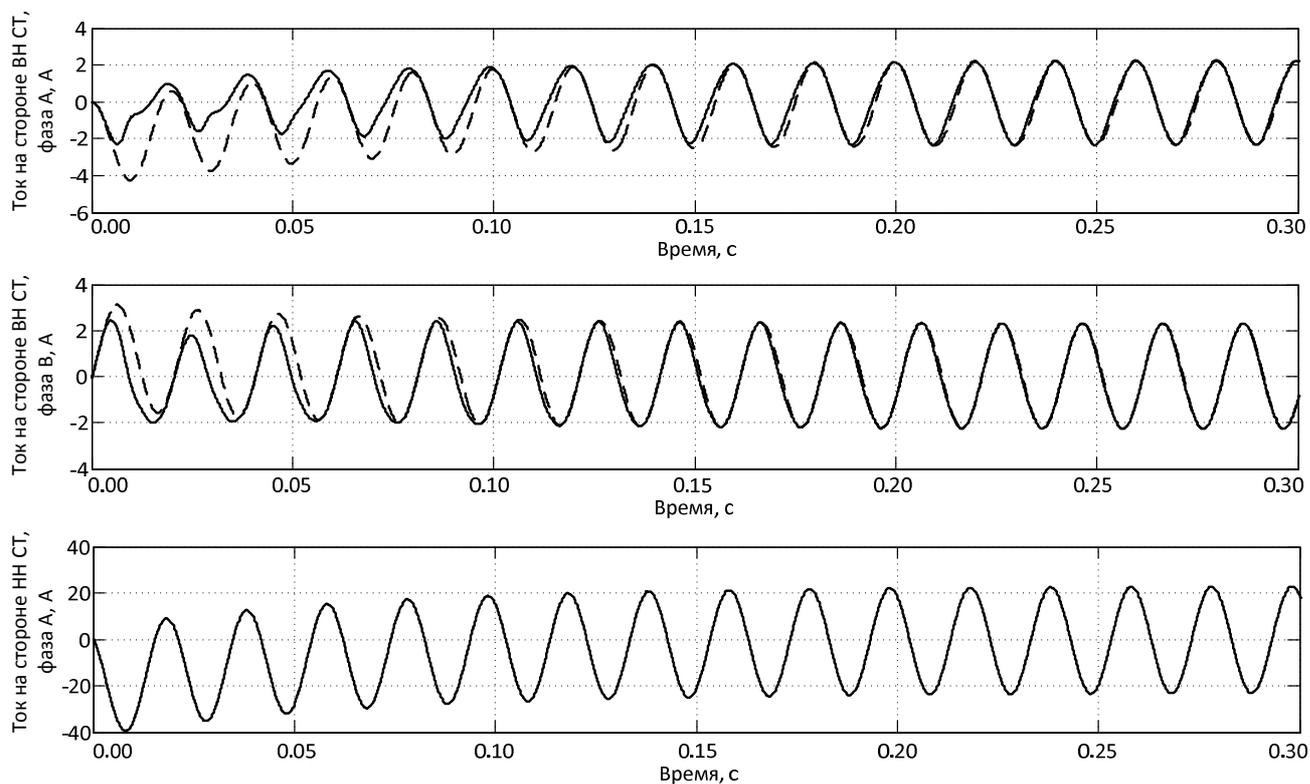


Рисунок Г.3 – Первичные и вторичные токи в обмотках ТТ при внешнем симметричном КЗ на стороне ВН СТ

На рисунке Г.4 приведены результаты замера действующего значения вторичных токов, приведённых на рисунке Г.3 (так как измеряется фазовый сдвиг между токами плеч, то нет необходимости приводить действующие значения

токов к единому базису). На рисунке Г.5 приведён замер фазового сдвига между токами  $I_{A\text{ ВН}}$  (принят за опорный сигнал) и  $I_{B\text{ ВН}}$ . На рисунке Г.6 приведён замер фазового сдвига между токами  $I_{A\text{ ВН}}$  и  $I_{\text{пл НН}}$ . Указанные замеры необходимы для построения векторной диаграммы (рисунок 3.3) и определения фазового сдвига между токами плеч.

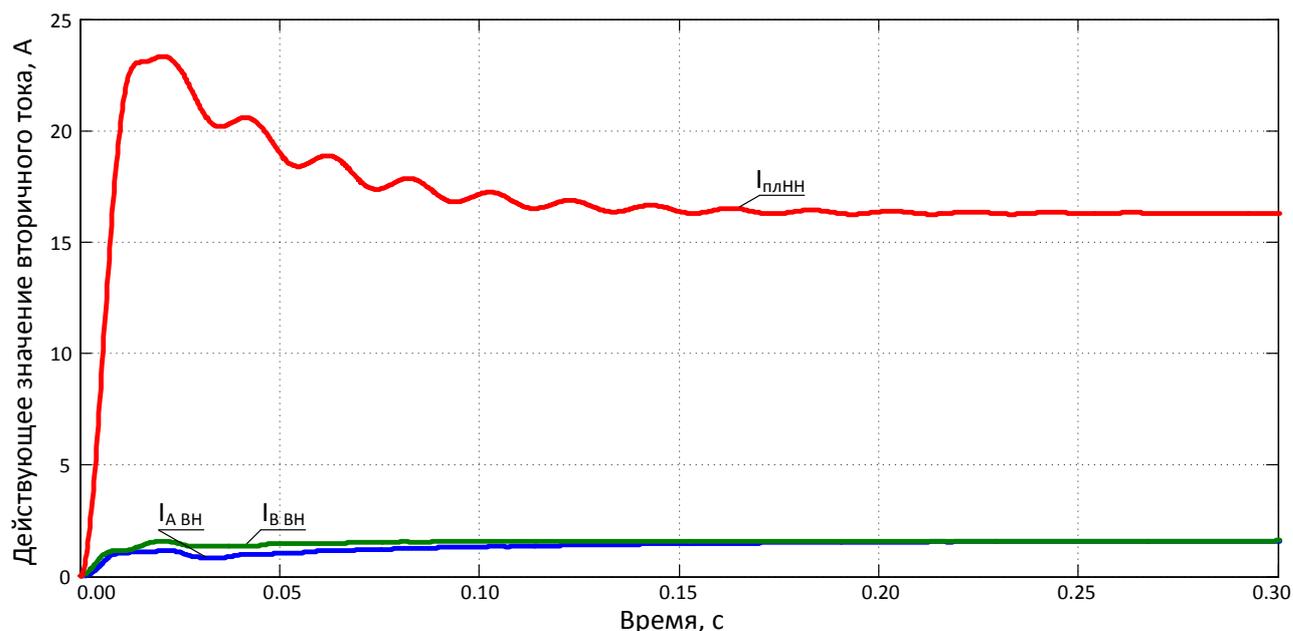


Рисунок Г.4 – Замер действующего значения вторичных токов при внешнем 3-фазном КЗ на стороне ВН СТ

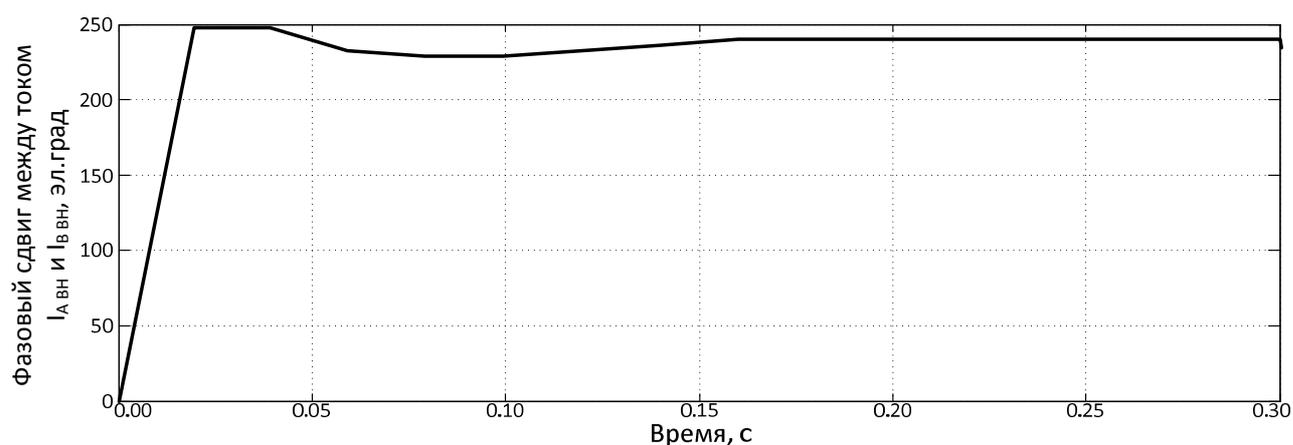


Рисунок Г.5 – Определение фазового сдвига между токами  $I_{A\text{ ВН}}$  и  $I_{B\text{ ВН}}$  при внешнем 3-фазном КЗ на стороне ВН СТ

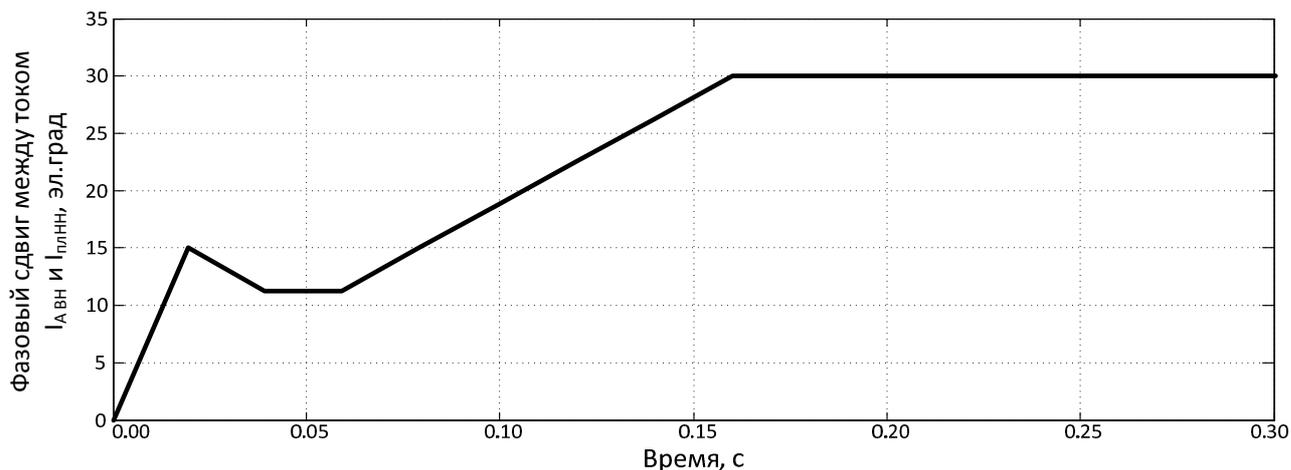


Рисунок Г.6 – Определение фазового сдвига между токами  $I_{A_{ВН}}$  и  $I_{пл_{НН}}$

На рисунках Г.7 и Г.8 приведены соответственно результаты работы дифференциально фазного алгоритма, основанного на предложенном способе контроля участков идеальной трансформации, и результаты цифровой фильтрации сигналов при 3-фазном КЗ вне зоны защиты. Как видно, и в этом случае предложенный алгоритм обладает повышенной точностью работы по сравнению с алгоритмом цифровой фильтрации – погрешность не превышает  $30^\circ$ , тогда как алгоритм фильтрации даёт погрешность до  $40^\circ$ .

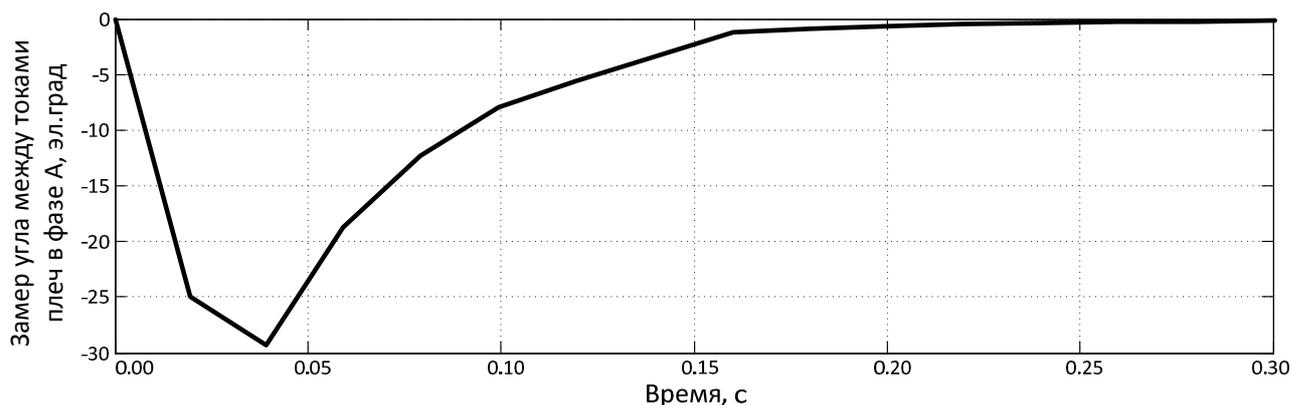


Рисунок Г.7 – Определение фазового сдвига между токами плеч ДЗ при внешнем 3-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, по предложенному методу

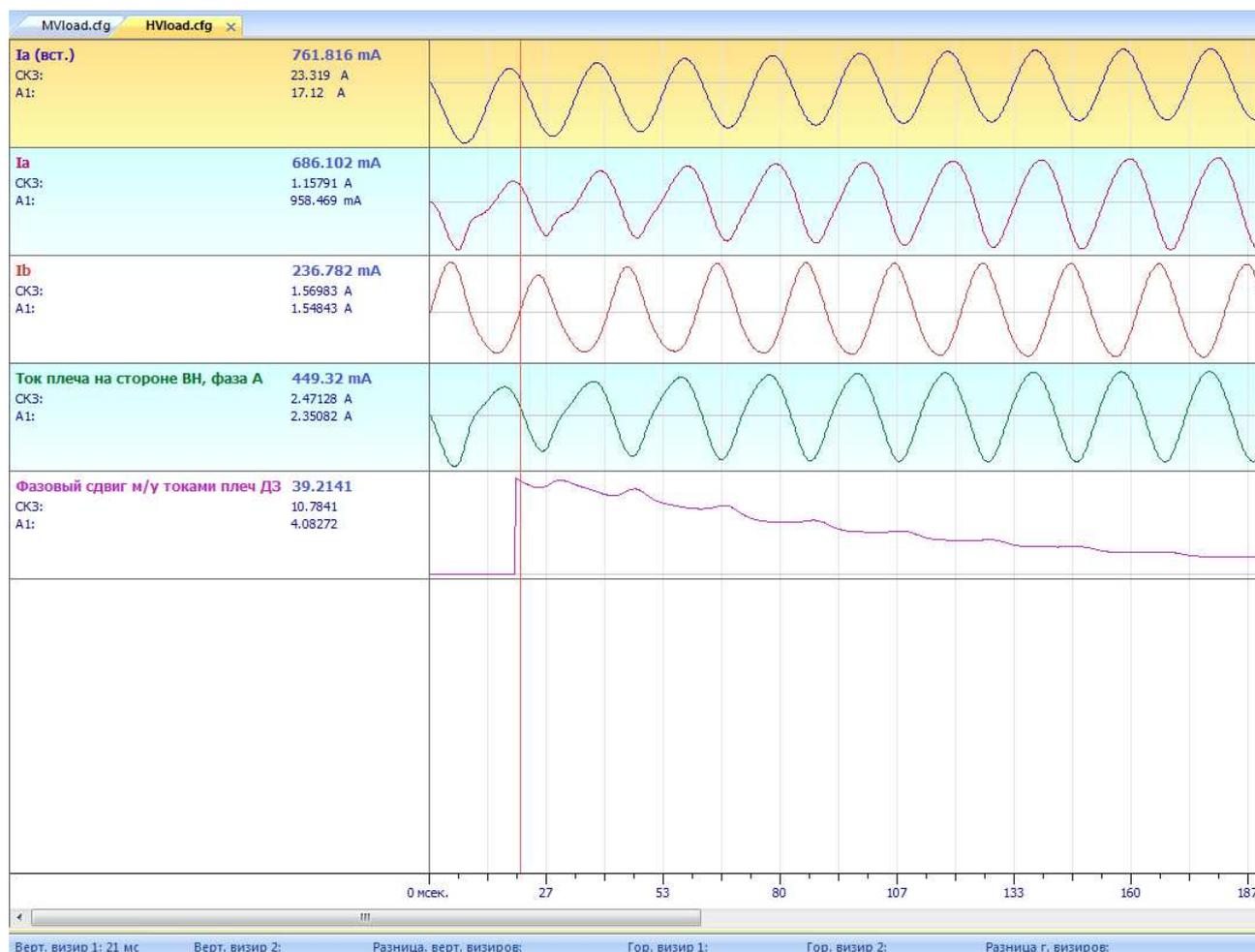


Рисунок Г.8 – Определение фазового сдвига между токами плеч ДЗ при внешнем 3-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, с помощью цифровых фильтров Фурье

Далее приведены результаты работы дифференциально фазного алгоритма, основанного на предложенном способе контроля участков идеальной трансформации, и результаты цифровой фильтрации сигналов при 3-фазном КЗ в зоне защиты на стороне НН СТ (в математической модели работает короткозамыкатель «Авария 3»). Принято, что энергосистема на стороне ВН имеет индуктивное сопротивление 2,1 Ом, постоянная времени энергосистемы принята равной 0,2 с, а фазовый сдвиг между генератором и системой принят предельным теоретически возможным и равным  $90^\circ$ . Результаты работы алгоритмов приведены на рисунках Г.9-Г.14

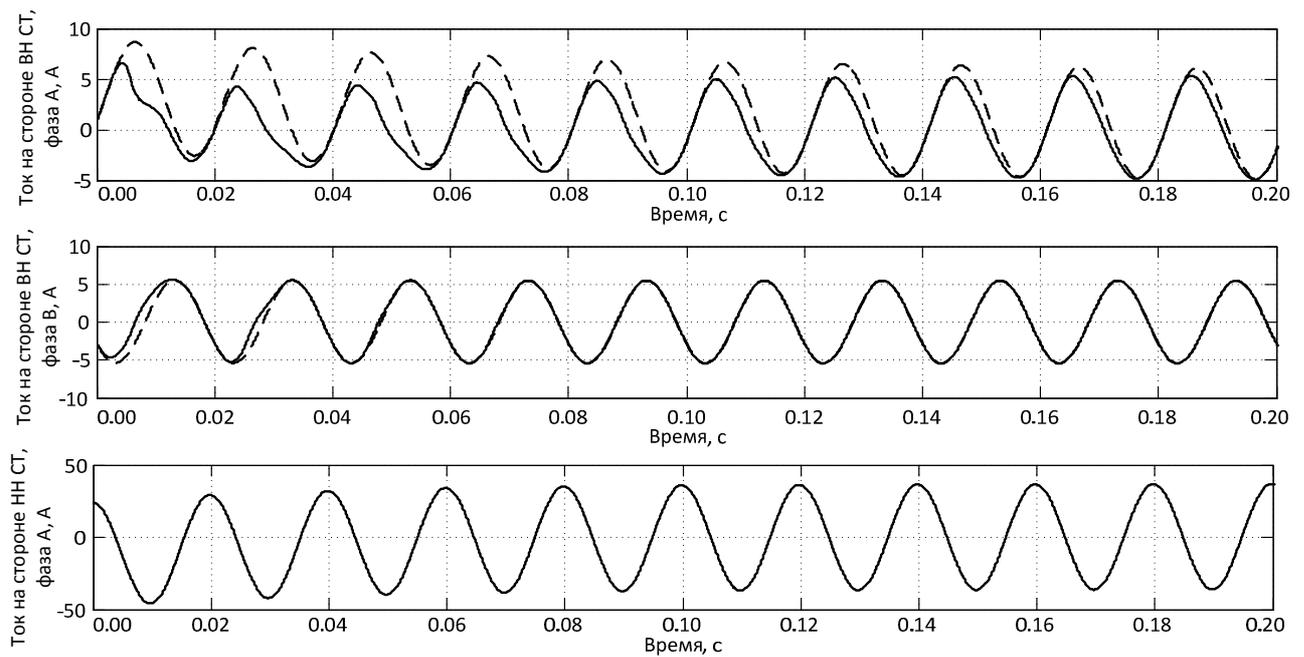


Рисунок Г.9 – Первичные и вторичные токи в обмотках ТТ при внутреннем симметричном КЗ на стороне НН СТ

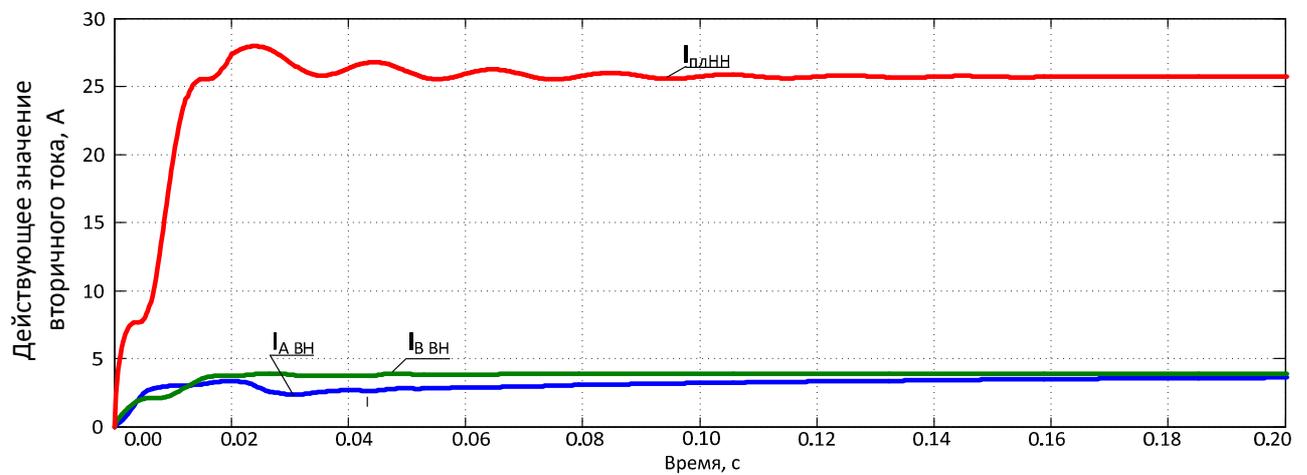


Рисунок Г.10 – Замер действующего значения вторичных токов при внутреннем 3-фазном КЗ на стороне НН СТ

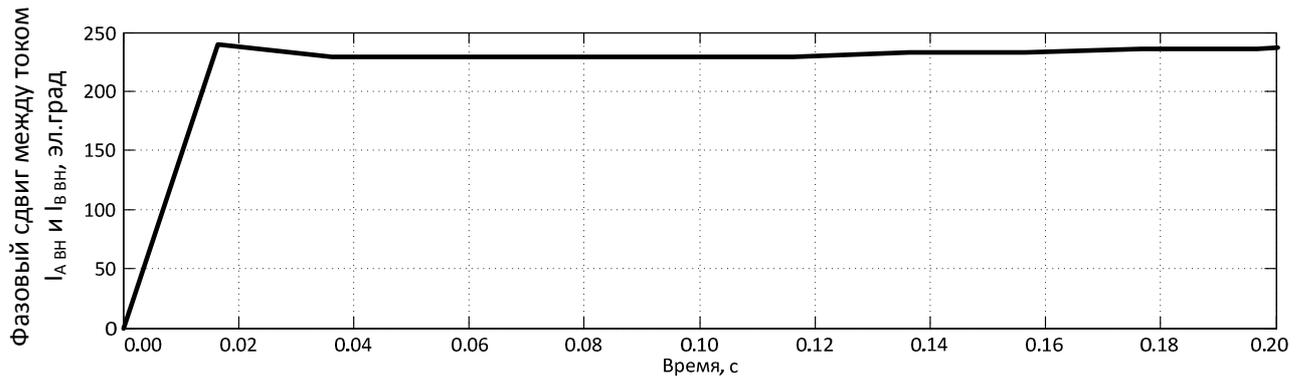


Рисунок Г.11– Замер действующего значения вторичных токов при внутреннем 3-фазном КЗ на стороне НН СТ

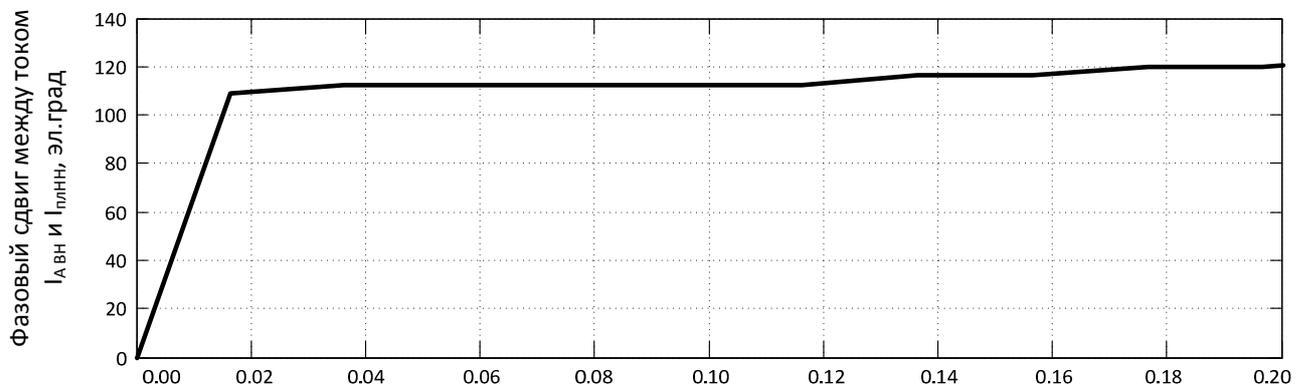


Рисунок Г.12 – Определение фазового сдвига между токами  $I_{A \text{ ВН}}$  и  $I_{\text{пл НН}}$  при внутреннем 3-фазном КЗ на стороне НН СТ

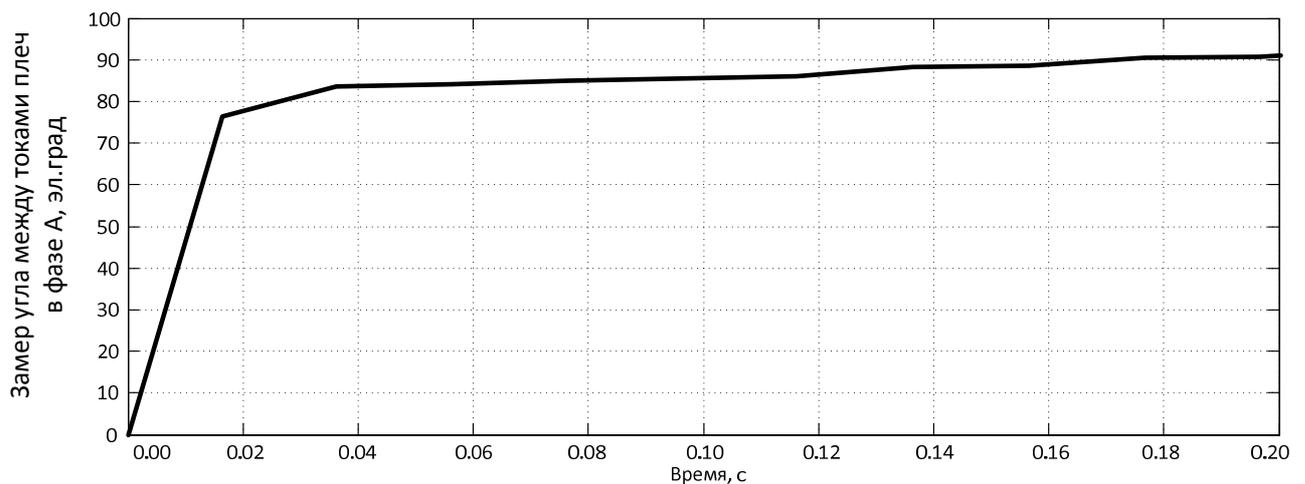


Рисунок Г.13 – Определение фазового сдвига между токами плеч ДЗ при внутреннем 3-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, по предложенному методу

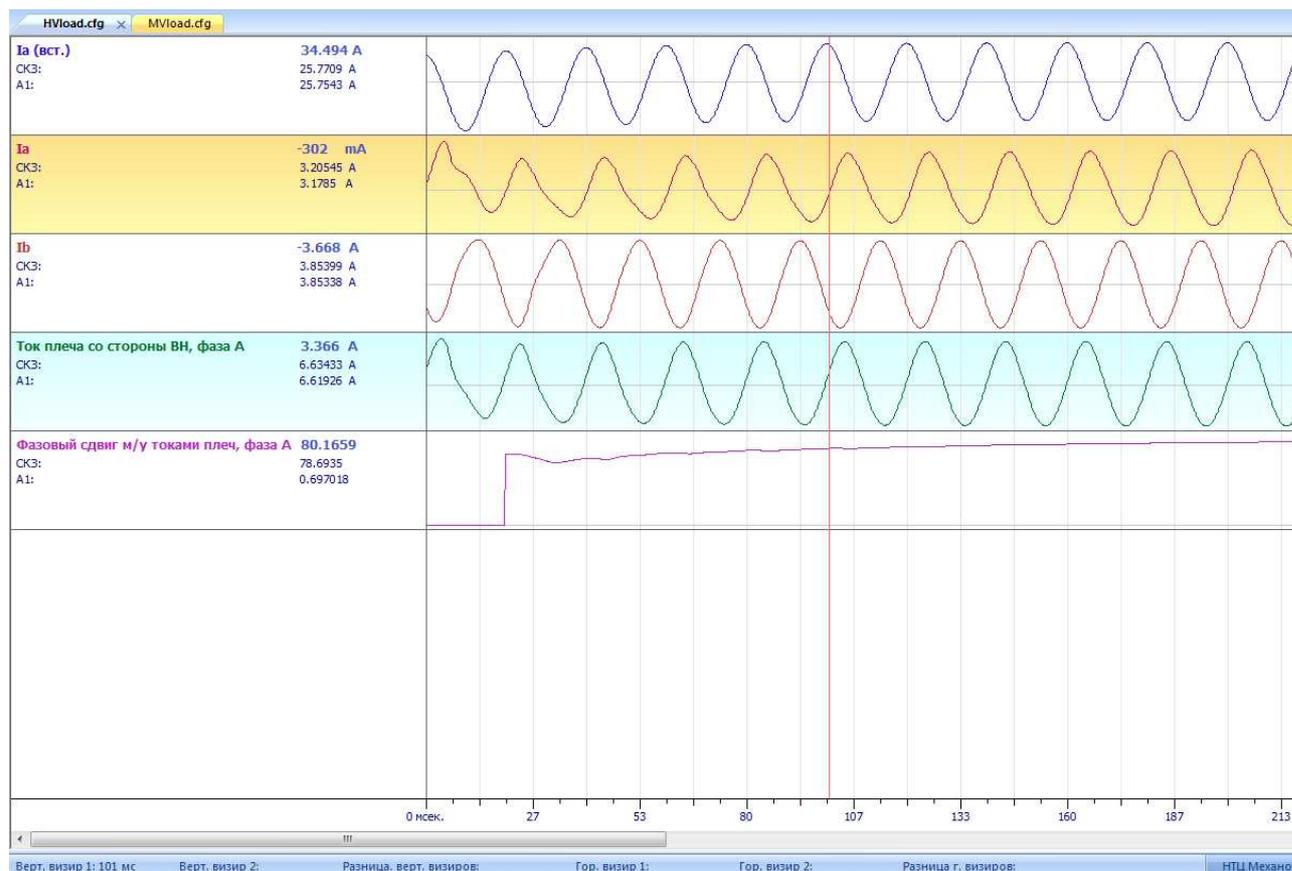


Рисунок Г.14 – Определение фазового сдвига между токами плеч ДЗ при внутреннем 3-фазном КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, с помощью цифровых фильтров Фурье

Как видно, предложенный алгоритм вновь демонстрирует повышенную точность работы по сравнению с методом цифровой фильтрации.

Далее приведён код программной функции SigPHS, реализованной на языке MATLAB, выполняющей сравнение фаз двух сигналов: на вход функции подаются массивы мгновенных значений двух сравниваемых сигналов ( $I1$  и  $I2$ ) и массив выборок времени  $t$ , определяющий моменты получения выборок тока; на выходе функция формирует значение фазового сдвига – массив значений фазового сдвига  $FI\_FOR\_PLOT$ , полученный в моменты идеальной трансформации, которые занесены в массив  $T\_FOR\_PLOT$ .

```
function [T_FOR_PLOT,FI_FOR_PLOT]=SigPHS(t,I1,I2)
```

```
t1_ctrl_pos=0; t2_ctrl_pos=0;
```

```
t1_ctrl_neg=0; t2_ctrl_neg=0;
```

```
T_control_one=0; T_control_two=0;
```

```
Allow_control=0; Lim_pos=1.0;
```

```
dI1=zeros(1,length(t)); dI2=zeros(1,length(t));
```

```
F=zeros(1,length(t)); G=zeros(1,length(t));
```

```
deltaT=zeros(1,length(t));
```

```
T_FOR_PLOT=0; FI_FOR_PLOT=0;
```

```
%Derivative
```

```
for i=2:length(t)
```

```
dI1(i)=I1(i)-I1(i-1);
```

```
dI2(i)=I2(i)-I2(i-1);
```

```
end
```

```
%%Process
```

```
%-----
```

```
dt1=0;
```

```
dt2=0;
```

```
point1=0;point2=0;point3=0;
```

```
pointI1=0;pointI2=0;pointI3=0;
```

```
FirstPeriod=0;
```

```
T_CONTROL=-1; I_CONTROL=0;
```

```
for i=3:length(t)
```

```

if (sign(dI1(i))~=sign(dI1(i-1)))&&(point1==0)
point1=t(i); pointI1=I1(i);
Cont1=0;
continue
end

```

```

if (sign(dI1(i))~=sign(dI1(i-1)))&&(point2==0)
point2=t(i); pointI2=I1(i);
continue
end

```

```

if (sign(dI1(i))~=sign(dI1(i-1)))&&(point3==0)
point3=t(i); pointI3=I1(i);
continue
end

```

```

if (point1~=0)&&(point2~=0)&&(point3~=0)
dt1=point2-point1;
dt2=point3-point2;

```

```

if dt1<dt2
    T_CONTROL=point1; POINT1_IS_CONTROL=1; POINT2_IS_CONTROL=0;
end

```

```

if dt1>dt2
    T_CONTROL=point2; POINT1_IS_CONTROL=0; POINT2_IS_CONTROL=1;
end

```

```

if dt1==dt2

```

```
T_CONTROL=-1; POINT1_IS_CONTROL=-1; POINT2_IS_CONTROL=-1;
end
```

```
if FirstPeriod==0;
```

```
FirstPeriod=1;
```

```
T_array=[point1,point2,point3];
```

```
I_array=[pointI1,pointI2,pointI3];
```

```
Control_array=[POINT1_IS_CONTROL,POINT2_IS_CONTROL];
```

```
else
```

```
T_array=[T_array,point2,point3];
```

```
I_array=[I_array,pointI2,pointI3];
```

```
Control_array=[Control_array,POINT1_IS_CONTROL,POINT2_IS_CONTROL];
```

```
end
```

```
point1=point3;
```

```
point2=0;
```

```
point3=0;
```

```
dt1=0;
```

```
dt2=0;
```

```
end
```

```
end
```

```
T_array1=T_array;
```

```
I_array1=I_array;
```

```
Control_array1=Control_array;
```

```
T_array=0;I_array=0;Control_array=0;
```

```
%-----
```

```

dt1=0;dt2=0;
point1=0;point2=0;point3=0;
pointI1=0;pointI2=0;pointI3=0;
FirstPeriod=0;
T_CONTROL=-1;
I_CONTROL=0;

```

```

for i=3:length(t)

```

```

    if (sign(dI2(i))~=sign(dI2(i-1)))&&(point1==0)
        point1=t(i); pointI1=I2(i);
        Cont1=0;
        continue
    end

```

```

    if (sign(dI2(i))~=sign(dI2(i-1)))&&(point2==0)
        point2=t(i); pointI2=I2(i);
        continue
    end

```

```

    if (sign(dI2(i))~=sign(dI2(i-1)))&&(point3==0)
        point3=t(i); pointI3=I2(i);
        continue
    end

```

```

    if (point1~=0)&&(point2~=0)&&(point3~=0)
        dt1=point2-point1;
        dt2=point3-point2;
    end

```

```
if dt1<dt2
```

```
    T_CONTROL=point1; POINT1_IS_CONTROL=1; POINT2_IS_CONTROL=0;
```

```
end
```

```
if dt1>dt2
```

```
    T_CONTROL=point2; POINT1_IS_CONTROL=0; POINT2_IS_CONTROL=1;
```

```
end
```

```
if dt1==dt2
```

```
    T_CONTROL=-1; POINT1_IS_CONTROL=-1; POINT2_IS_CONTROL=-1;
```

```
end
```

```
if FirstPeriod==0;
```

```
    FirstPeriod=1;
```

```
    T_array=[point1,point2,point3];
```

```
    I_array=[pointI1,pointI2,pointI3];
```

```
    Control_array=[POINT1_IS_CONTROL,POINT2_IS_CONTROL];
```

```
else
```

```
    T_array=[T_array,point2,point3];
```

```
    I_array=[I_array,pointI2,pointI3];
```

```
    Control_array=[Control_array,POINT1_IS_CONTROL,POINT2_IS_CONTROL];
```

```
end
```

```
point1=point3;
```

```
point2=0;
```

```
point3=0;
```

```
dt1=0;
```

```
dt2=0;
```

```
end
```

end

T\_array2=T\_array;

I\_array2=I\_array;

Control\_array2=Control\_array;

%-----

i=2;

while i<length(T\_array1)

if i<=min(length(Control\_array1),length(Control\_array2))

if (Control\_array1(i)==1)||(Control\_array1(i)==-1)

if (Control\_array2(i)==1)||(Control\_array2(i)==-1)

fi=(T\_array1(i)-T\_array2(i))\*314.15926\*180/3.1415926;

if sign(I\_array1(i))~=sign(I\_array2(i))

fi=fi+180;

end

elseif (Control\_array2(i-1)==1)||(Control\_array2(i-1)==-1)

fi=(T\_array1(i)-T\_array2(i-1))\*314.15926\*180/3.1415926;

if sign(I\_array1(i))~=sign(I\_array2(i-1))

fi=fi+180;

end

end

end

if (Control\_array1(i-1)==1)||(Control\_array1(i-1)==-1)

if (Control\_array2(i)==1)||(Control\_array2(i)==-1)

```
fi=(T_array1(i-1)-T_array2(i))*314.15926*180/3.1415926;
    if sign(I_array2(i))~=sign(I_array1(i-1))
        fi=fi+180;
    end
elseif (Control_array2(i-1)==1)||(Control_array2(i-1)==-1)
fi=(T_array1(i-1)-T_array2(i-1))*314.15926*180/3.1415926;
    if sign(I_array1(i-1))~=sign(I_array2(i-1))
        fi=fi+180;
    end
end
end

if fi>=360
fi=fi-360;
end

if fi<=-360
fi=fi+360;
end

T_FOR_PLOT=[T_FOR_PLOT,T_array1(i)];
FI_FOR_PLOT=[FI_FOR_PLOT,fi];

end

i=i+2;
end
```

Далее приведён код программной функции SigRMS, реализованной на языке MATLAB, выполняющей вычисление действующего значения входного сигнала тока: на вход функции подаются массивы мгновенных значений тока (массив  $I$ ) и массив выборок времени  $t$ , а также частота дискретизации сигнала  $fs$  (частота дискретизации принята равной 4,8 кГц во всех функциях); действующее значение сигнала тока записывается функцией в выходную переменную  $D$ .

```
function D=SigRMS(t,I,fs)
t1=t;
y1=I;
t2=0.00:1/fs:(0.02-0.0001);
y2=0.*t2;
% Объединение сигналов:
y=[y2 y1];
t=[t2 t1];

current_sample=0.02*fs;
D=zeros(length(t)-current_sample,1);
for k=1:1:(length(t)-current_sample)
    for l=0:1:(0.02*fs-1)
        D(k)=D(k)+y(current_sample-l)^2;
    end
    D(k)=sqrt(D(k)/(0.02*fs));
    current_sample=current_sample+1;
end
```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ**  
**МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ**  
**АВТОМАТИКИ КПА-М**

Комплекс противоаварийной автоматики (КПА-М, рисунок П7.1) предназначен для решения задач противоаварийной автоматики и противоаварийного управления различных уровней иерархии и сложности и может выполнять, в зависимости от комплектации и заданной конфигурации программного обеспечения, множество видов локальной и системной автоматики.



Рисунок Д.1 – Внешний вид терминала КПА-М

Конструктивно БФ выполнен в 19-дюймовой кассете. Все основные его части устанавливаются в этой кассете и выполняются в виде функциональной завершённых модулей, каждый из которых реализован в виде печатной платы с разъёмами для подключения к объединительной плате и для связи с внешними устройствами. В состав БФ входит ряд функционально завершённых блоков:

– *блок питания*, выполненный в виде отдельной платы на базе серийно выпускаемых модулей импульсных преобразователей напряжения, устанавливаемой в кассету. Он обеспечивает гальваническую развязку входного напряжения питания от цепей стабилизированных напряжений питания плат БФ;

– *микропроцессорный блок*, который выполняет функции обработки цифровой информации, поступающей от средств ввода аналоговых и дискретных сигналов, выполняет заложенные в него функции и выдаёт управляющие воздействия через каналы выходных дискретных сигналов. Закладываемые в блок функции могут выполнять задачи противоаварийной автоматики, технологической автоматики, а также релейной защиты и системной автоматики. Микропроцессорный блок реализован с использованием перспективной платформы, предназначенной для построения промышленных систем автоматизации и основанной на стандарте Q-seven. Ядром блока является модуль Q-seven, в котором реализован процессор, оперативная память и память программ, а связь с внешними устройствами осуществляется через интерфейсы PCIe, USB, SATA;

– *блоки ввода дискретных сигналов*, осуществляющие приём дискретных сигналов с обеспечением гальванической развязки между источником сигнала и внутренними схемами БФ. Стандартный блок ввода рассчитан на приём 16 дискретных сигналов;

– *блоки вывода дискретных сигналов*, осуществляющие выдачу дискретных сигналов и команд через полевые интерфейсы вывода дискретных сигналов, в которых установлены малогабаритные выходные реле. Стандартный блок вывода рассчитан на 16 дискретных выходных сигналов.

Приём аналоговой информации осуществляется преобразователями цифровыми распределёнными (ПЦР), которые монтируются в шкафу КПА-М и связываются с БФ через физический канал, выполненный в стандарте RS-485. Устройства ПЦР осуществляют приём аналоговой информации, обеспечивая гальваническую развязку между входными цепями, цепями питания и каналом последовательного обмена. Для приёма входных аналоговых сигналов, имеющих

различную форму, имеется несколько видов ПЦР: ПЦР-Т (для ввода информации о мгновенных значениях тока) ПЦР-Н (для ввода информации о мгновенных значениях напряжений), ПЦР-ПТ (для ввода информации о значениях постоянного тока) и т.д.

В функциональном блоке КПА-М используется операционная система реального времени QNX Neutrino RTOS v.6.5, гарантирующая не только правильность решения задач спроектированной системы, но и сроки выполнения задачи. Среда разработки приложений под данной операционной системой поддерживает язык программирования C++, поэтому реализация программы защиты выполнена средствами этого языка. Конфигурации БФ (процессу определения количества и типа его составных частей) предшествует разработка подлежащего реализации алгоритма.

Программное обеспечение конкретного устройства на базе КПА-М представляет собой набор программных блоков, объединенных в технологическую цепочку при помощи стандартных механизмов обмена данными, по сути – при помощи таблиц настройки (рисунок Д.2). При этом программные блоки, отвечающие за фиксацию и обработку дискретных сигналов (аварийные сигналы, сигналы состояния элементов схемы района управления), выполняют все необходимые операции в течение *чётко детерминированного интервала времени* (стандартная величина – 1 мс). Далее приводятся примеры разработанных программных окон, отражающих работу подсистем, выполняющих функцию защиты.

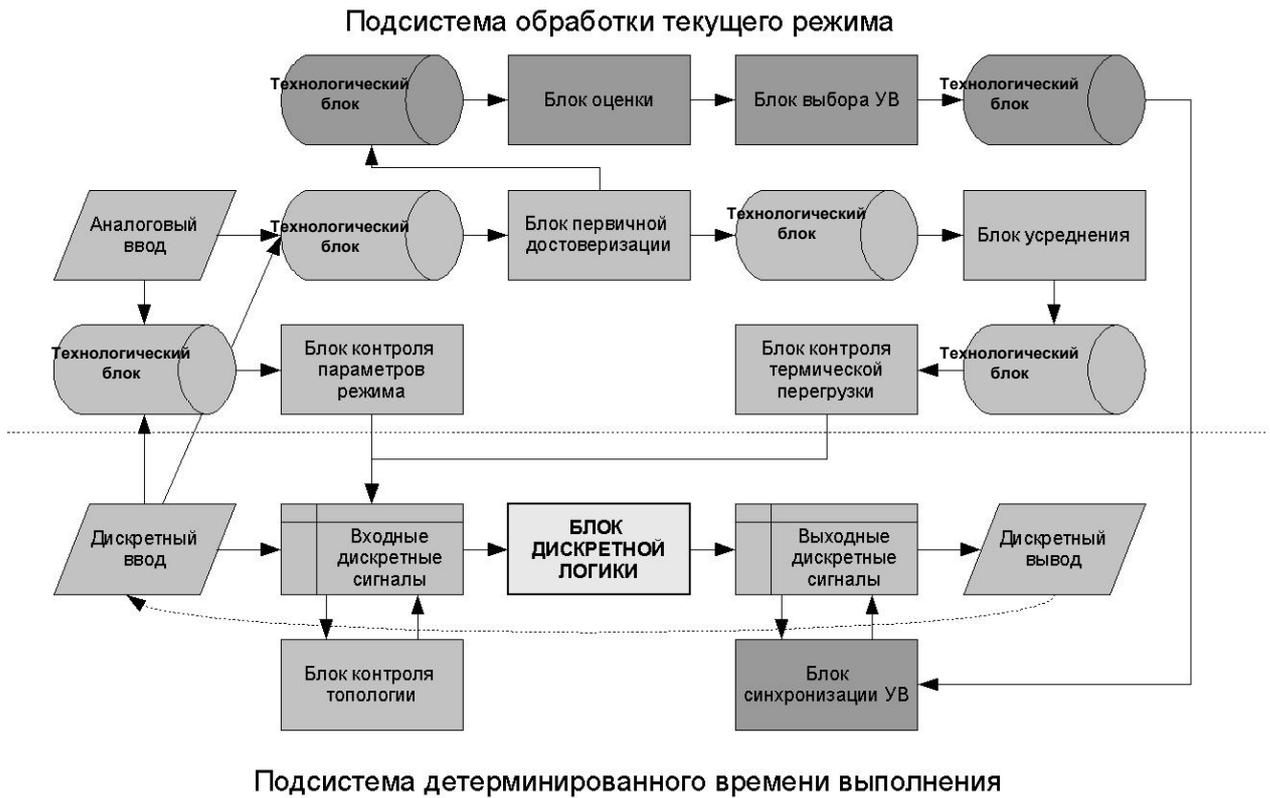


Рисунок Д.2 – Технологическая цепочка КПА-М

Для реализации алгоритмов двухобмоточного СТ, описанных выше в п.4.2, необходима информация о токах на сторонах ВН и НН СТ, а также информация о напряжении, получаемая от ТН, установленного на питающей стороне СТ. Таким образом, к БФ необходимо подключить 2 измерительных преобразователя тока (ПЦР-Т) и 1 преобразователь напряжения (ПЦР-Н). Списки входных и выходных сигналов БФ приведены соответственно в таблице Д.1 и таблице Д.2. В соответствии с этим списком, к БФ необходимо подключить 1 плату дискретного ввода и 2 платы дискретного вывода, одна из которых выполняет сигнальные функции, другая формирует управляющие воздействия через промежуточные реле.

Таблица Д.1 – Список входных сигналов БФ

№, п/п	Сигнал	Примечание/расшифровка
1	Настройка	Сигнал перевода БФ в режим настройки
2	Съём сигнализации	Сброс сигналов, фиксирующих срабатывание алгоритмов или неисправность устройства
3	Ввод ДЗ СТ	Ввод защитных алгоритмов с ключа управления
4	Вык. Q1: замкнут НО БК ф.А	Замкнут нормально отключенный блок-контакт фазы А выключателя Q1
5	Вык. Q1: замкнут НО БК ф.В	Замкнут нормально отключенный блок-контакт фазы В выключателя Q1
6	Вык. Q1: замкнут НО БК ф.С	Замкнут нормально отключенный блок-контакт фазы С выключателя Q1
7	Вык. Q1: замкнут НЗ БК ф.А	Замкнут нормально замкнутый блок-контакт фазы А выключателя Q1
8	Вык. Q1: замкнут НЗ БК ф.В	Замкнут нормально замкнутый блок-контакт фазы В выключателя Q1
9	Вык. Q1: замкнут НЗ БК ф.С	Замкнут нормально замкнутый блок-контакт фазы С выключателя Q1
10	Вык. Q2: замкнут НО БК ф.А	Замкнут нормально отключенный блок-контакт фазы А выключателя Q2

<b>№, п/п</b>	<b>Сигнал</b>	<b>Примечание/расшифровка</b>
11	Вык. Q2: замкнут НО БК ф.В	Замкнут нормально отключенный блок-контакт фазы В выключателя Q2
12	Вык. Q2: замкнут НО БК ф.С	Замкнут нормально отключенный блок-контакт фазы С выключателя Q2
13	Вык. Q2: замкнут НЗ БК ф.А	Замкнут нормально замкнутый блок-контакт фазы А выключателя Q2
14	Вык. Q2: замкнут НЗ БК ф.В	Замкнут нормально замкнутый блок-контакт фазы В выключателя Q2
15	Вык. Q2: замкнут НЗ БК ф.С	Замкнут нормально замкнутый блок-контакт фазы С выключателя Q2

Таблица Д.2 – Список выходных сигналов БФ

<b>№, п/п</b>	<b>Сигнал</b>	<b>Примечание/расшифровка</b>
1	Срабатывание КПА-М	Сигнал на лицевой панели
2	Неисправность КПА-М	Сигнал на лицевой панели
3	Настройка	Сигнал на лицевой панели
4	Ввод ДО	Сигнал на лицевой панели
5	Выключатель Q1 вкл.	Сигнал на лицевой панели
6	Выключатель Q1 откл.	Сигнал на лицевой панели
7	Выключатель Q2 вкл.	Сигнал на лицевой панели
8	Выключатель Q2 откл.	Сигнал на лицевой панели
9	Неиспр. блок-контактов Q1	Сигнал на лицевой панели
10	Ввод откл. по производ.	Сигнал на лицевой панели

№, п/п	Сигнал	Примечание/расшифровка
11	Ввод откл. по длит-ст	Сигнал на лицевой панели
12	Ввод откл. при ПВ	Сигнал на лицевой панели
13	Неисправность «U»	Сигнал на лицевой панели
14	Срабатывание ДЗ (KL)	Сигнал на промежуточное реле
15	Срабатывание КПА-М (KLH)	Сигнал на промежуточное реле
16	Исправность КПА-М (KLH)	Сигнал на промежуточное реле

Разработанный интерфейс основной подсистемы КПА-М приведён на рисунок Д.3. В этом окне приводятся общие данные для всех остальных подсистем, реализованных в терминале, а именно: данные о дискретных (входных и выходных) и аналоговых сигналах (токи и напряжения, а также расчётные значения сопротивлений и мощностей). В главном меню подсистемы доступен набор общих функций, определяющих работу терминала в целом: окно диагностики, команда запуска внутреннего осциллографа, настройка локальной сети и т.п.

The screenshot displays the KPA-M software interface. On the left is a menu with options: 'Неисправность', 'Настройка', 'Запись осцилл.', 'Связь с АСУТП', 'КПА-М', 'Диф.отсечка', 'Откл.о произв.', 'Откл.о длит.', 'Откл. при ПВ', 'КИН', and 'КИУ'. The main area contains a table of parameters:

Параметр	Значение (измер.)	Значение (первич.)
U1: Группа напряжений №1		
U <sub>1.A</sub>	57.69 В	126.92 кВ
U <sub>1.B</sub>	57.69 В	126.92 кВ
U <sub>1.C</sub>	57.69 В	126.92 кВ
U <sub>1.ни</sub>	99.98 В	126.99 кВ
I1: Цели тока ВН		
I <sub>1.A</sub>	4.99 А	699 А
I <sub>1.B</sub>	5.00 А	700 А
I <sub>1.C</sub>	4.99 А	699 А
I2: Цели тока НН		
I <sub>2.A</sub>	4.99 А	998 А
I <sub>2.B</sub>	5.00 А	1000 А
I <sub>2.C</sub>	4.99 А	998 А

At the bottom left, the time and date are shown as 17:50:14 24.01.2018. On the right, there are two lists of signals:

**Входные сигналы**

- 1:01 Настройка
- 1:02 Съём сигнализации
- 1:03 Ввод ДЭ СТ
- 1:04 Вык. Q1: замкнут Н0 БК ф.А
- 1:05 Вык. Q1: замкнут Н0 БК ф.В
- 1:06 Вык. Q1: замкнут Н0 БК ф.С
- 1:07 Вык. Q1: замкнут НЗ БК ф.А
- 1:08 Вык. Q1: замкнут НЗ БК ф.В
- 1:09 Вык. Q1: замкнут НЗ БК ф.С
- 1:10 Вык. Q2: замкнут Н0 БК ф.А
- 1:11 Вык. Q2: замкнут Н0 БК ф.В
- 1:12 Вык. Q2: замкнут Н0 БК ф.С
- 1:13 Вык. Q2: замкнут НЗ БК ф.А
- 1:14 Вык. Q2: замкнут НЗ БК ф.В
- 1:15 Вык. Q2: замкнут НЗ БК ф.С
- 1:16

**Выходные сигналы**

- 1:01 Срабатывание КПА-М
- 1:02 Неисправность КПА-М
- 1:03 Настройка
- 1:04 Ввод ДО
- 1:05 Выключатель Q1 вкл.
- 1:06 Выключатель Q1 откл.
- 1:07 Выключатель Q2 вкл.
- 1:08 Выключатель Q2 откл.
- 1:09 Неиспр. блок-контактов Q1
- 1:10 Неиспр. блок-контактов Q2
- 1:11 Ввод откл. по производ.
- 1:12 Ввод откл. по длит-сти
- 1:13 Ввод откл. при ПВ
- 1:14 Неисправность "U"
- 1:15
- 1:16
- 2:01 Срабатывание ДЭ

Рисунок Д.3 – Программный интерфейс основной подсистемы КПА-М

На рисунках Д.4 и Д.5 изображены соответственно программный интерфейс адаптивной ДО и осциллограмма, демонстрирующая её работу. На осциллограмме сигналов показано срабатывание ДО при увеличении дифференциального тока выше значения уставки. Следует отметить, что ДО, реализованная на базе микропроцессорного устройства, способна реагировать как на действующие, так и на мгновенные значения дифференциального тока, чем объясняется срабатывание защиты до того момента, как действующее значение дифференциального тока достигло значения уставки.

**КПА-М Меню F9**

- Неисправность
- Настройка
- Запись осцилл.
- Связь с АСУТП
- КПА-М
- Диф.отсечка**
- Откл.о произв.
- Откл.о длит.
- Откл. при ПВ
- КИН
- КИУ

**Входные сигналы**

- ✓ SAC1: ввод ДО
- ✓ Q1:зам. НО контакт ф.А
- ✓ Q1:зам. НО контакт ф.В
- ✓ Q1:зам. НО контакт ф.С
- Q1:зам. НЗ контакт ф.А
- Q1:зам. НЗ контакт ф.В
- Q1:зам. НЗ контакт ф.С
- Q2:зам. НО контакт ф.А
- Q2:зам. НО контакт ф.В
- Q2:зам. НО контакт ф.С
- ✓ Q2:зам. НЗ контакт ф.А
- ✓ Q2:зам. НЗ контакт ф.В
- ✓ Q2:зам. НЗ контакт ф.С

**Внутренние сигналы**

**Выходные сигналы**

- ✓ Ввод ДО
- Выкл. Q1 отключен
- ✓ Выкл. Q2 отключен
- ✓ Выкл. Q1 включен
- Выкл. Q2 включен
- Неиспр.БК Q1
- Неиспр.БК Q2
- Срабатывание ДО

Параметр	Значение
I <sub>ВН.А</sub>	699 А
I <sub>ВН.В</sub>	700 А
I <sub>ВН.С</sub>	699 А
I <sub>НН.А</sub>	1402 А
I <sub>НН.В</sub>	1405 А
I <sub>НН.С</sub>	1402 А
Ток пл. ф. А (ВН)	1211.46 А
Ток пл. ф. В (ВН)	1211.46 А
Ток пл. ф. С (ВН)	1210.24 А
Ток пл. ф. А (НН)	1214.07 А
Ток пл. ф. В (НН)	1216.52 А
Ток пл. ф. С (НН)	1214.07 А
Диф. ток в ф. А	2.85 А
Диф. ток в ф. В	5.15 А
Диф. ток в ф. С	3.91 А
Тек. уставка	1350.00 А

**18:58:50** 24.01.2018

Рисунок Д.4 – Программный интерфейс подсистемы адаптивной ДО

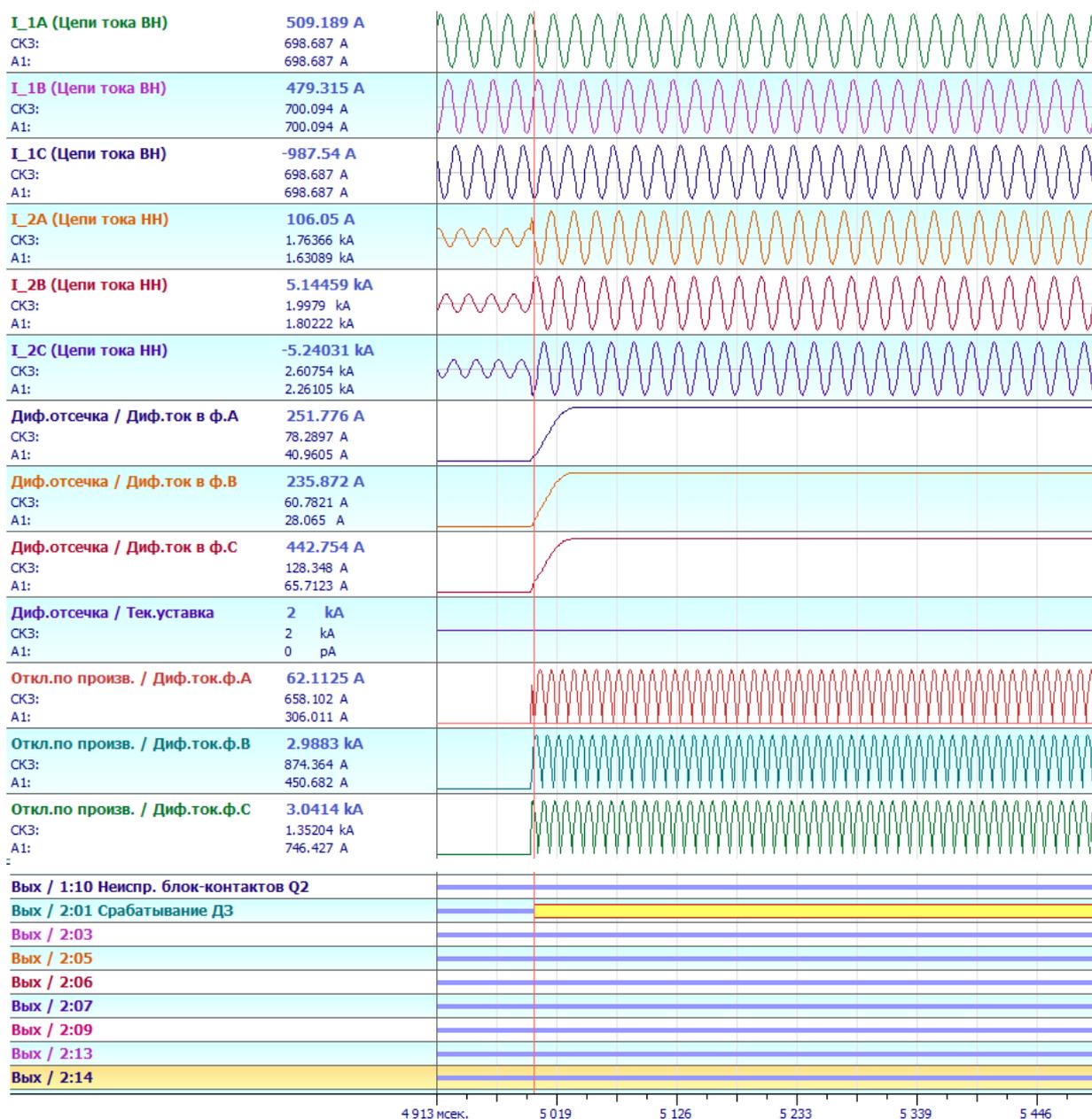


Рисунок Д.5 – Осциллограмма сигналов алгоритма ДО

На рисунках Д.6 и Д.7 изображены соответственно программный интерфейс алгоритма отключения СТ по значению производной дифференциального тока и осциллограмма, демонстрирующая работу алгоритма. На осциллограмме сигналов показано срабатывание защиты при увеличении значения производной дифференциального тока выше значения уставки.

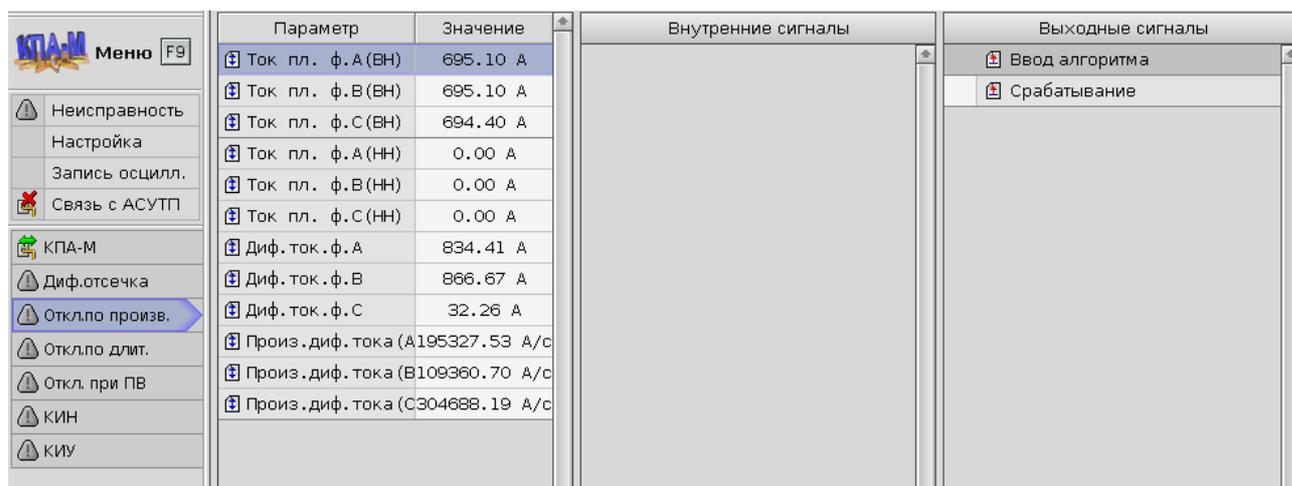


Рисунок Д.6 – Программный интерфейс подсистемы отключения СТ по значению производной дифференциального тока

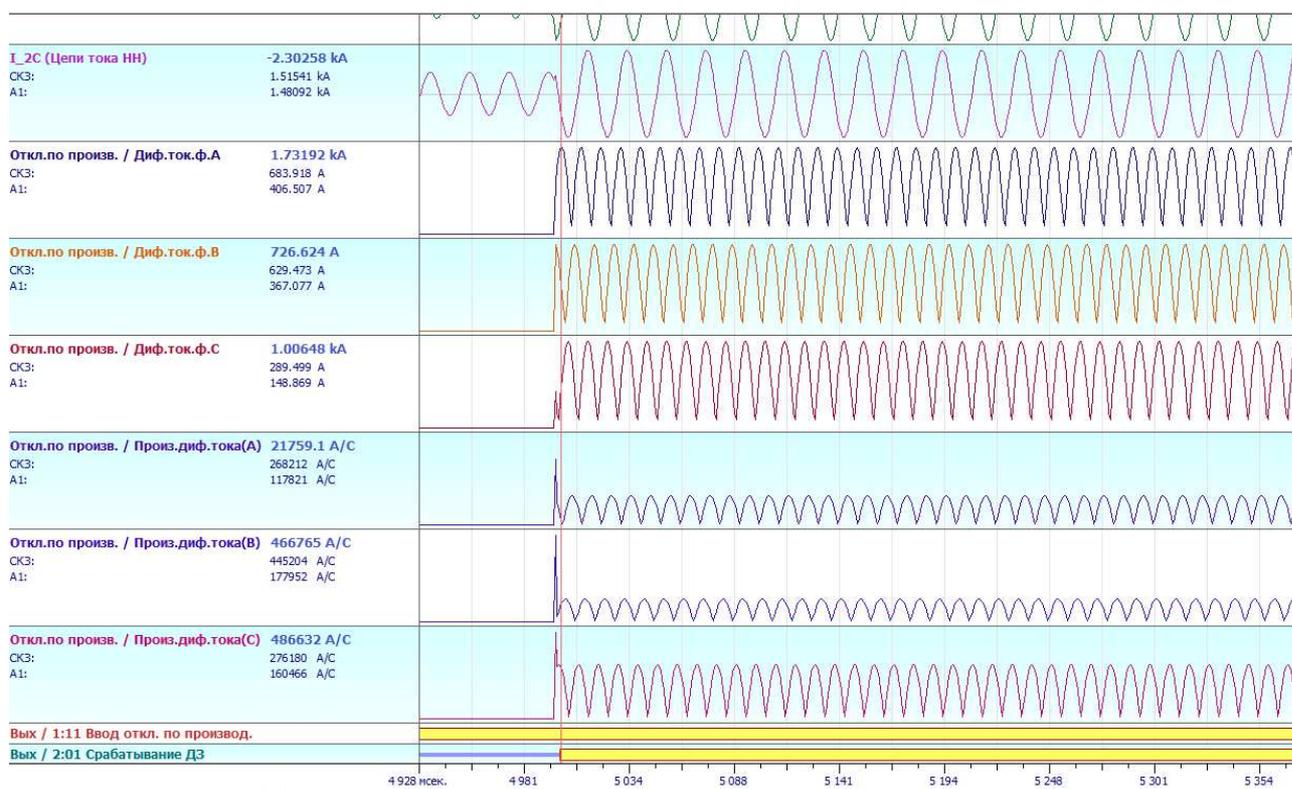


Рисунок Д.7 – Осциллограмма сигналов алгоритма отключения по значению производной дифференциального тока

На рисунках Д.8 и Д.9 изображены соответственно программный интерфейс алгоритма отключения СТ по значению длительности постоянства знака производной дифференциального тока и осциллограмма, демонстрирующая

работу алгоритма. На осциллограмме сигналов показано срабатывание защиты при увеличении значения длительности постоянства знака производной дифференциального тока выше значения уставки.

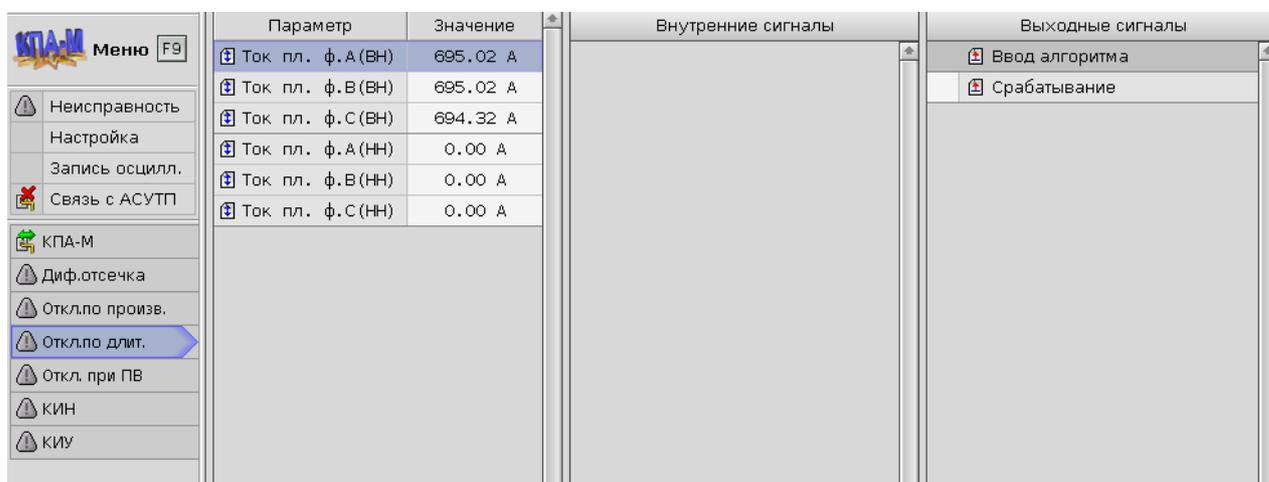


Рисунок Д.8 – Программный интерфейс подсистемы отключения СТ по длительности постоянства знака производной дифференциального тока

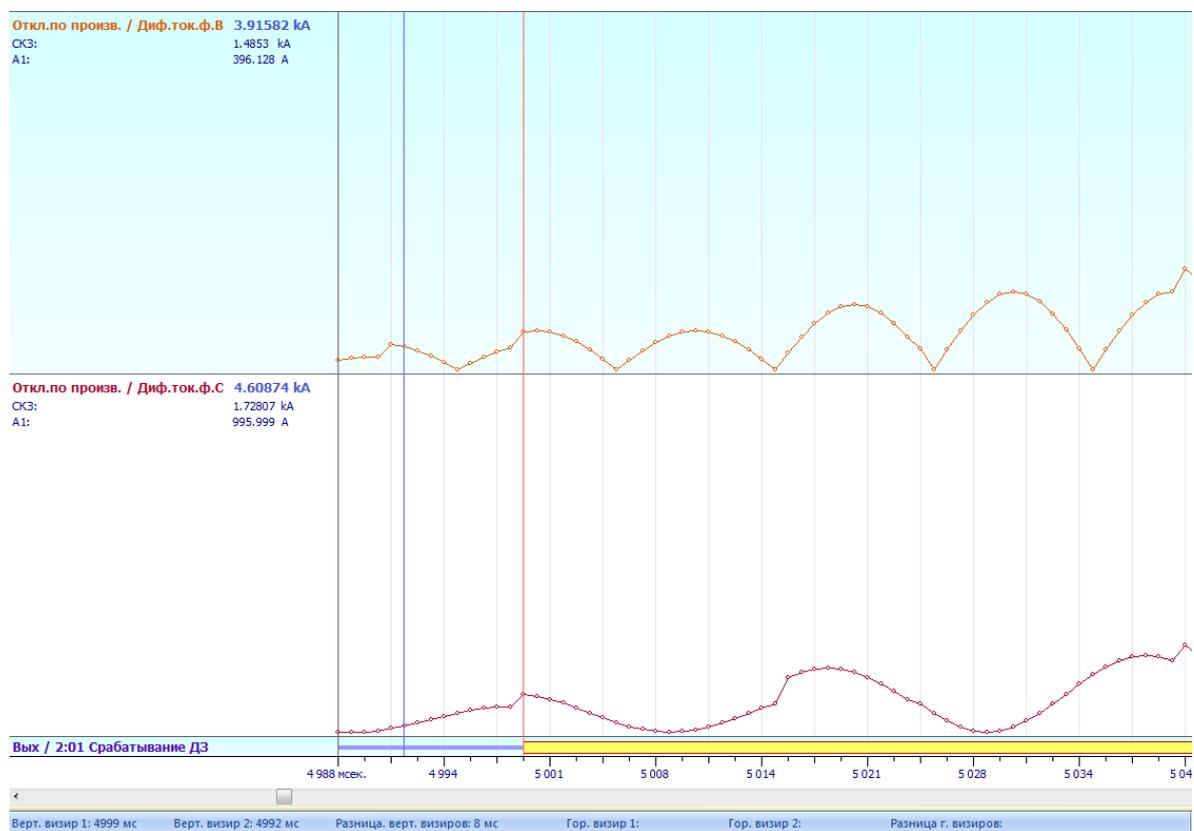


Рисунок Д.9 – Осциллограмма сигналов алгоритма отключения по длительности постоянства знака производной дифференциального тока

На рисунках Д.10 и Д.11 изображены соответственно программный интерфейс алгоритма выявления ВЗ в обмотках СТ в режиме ПВ и осциллограмма, демонстрирующая работу алгоритма. Алгоритм рассчитывает время превышения значения дифференциального тока значения уставки. В случае, когда рассчитанное таким образом время оказывается больше уставки, алгоритм формирует управляющее воздействие на отключение СТ. На осциллограмме сигналов показано срабатывание защиты при длительности времени превышения дифференциальным током порогового значения (в данном примере – 300 А) выше значения уставки. Отключение наступает в момент ввода алгоритма в действие.

Параметр	Значение
U <sub>A</sub>	126.91 кВ
U <sub>B</sub>	126.91 кВ
U <sub>C</sub>	126.91 кВ
Ток пл. ф. А (ВН)	695.48 А
Ток пл. ф. В (ВН)	695.48 А
Ток пл. ф. С (ВН)	694.78 А
Ток пл. ф. А (НН)	0.00 А
Ток пл. ф. В (НН)	0.00 А
Ток пл. ф. С (НН)	0.00 А
Диф. ток ф. А	695.48 А
Диф. ток ф. В	695.48 А
Диф. ток ф. С	694.78 А
Время превыш. ф. А	0.0075 с
Время превыш. ф. В	0.0075 с
Время превыш. ф. С	0.0075 с
Тек. уставка ф. А	0.0080 с

Рисунок Д.10 – Программный интерфейс подсистемы обнаружения ВЗ в обмотках СТ в режиме ПВ

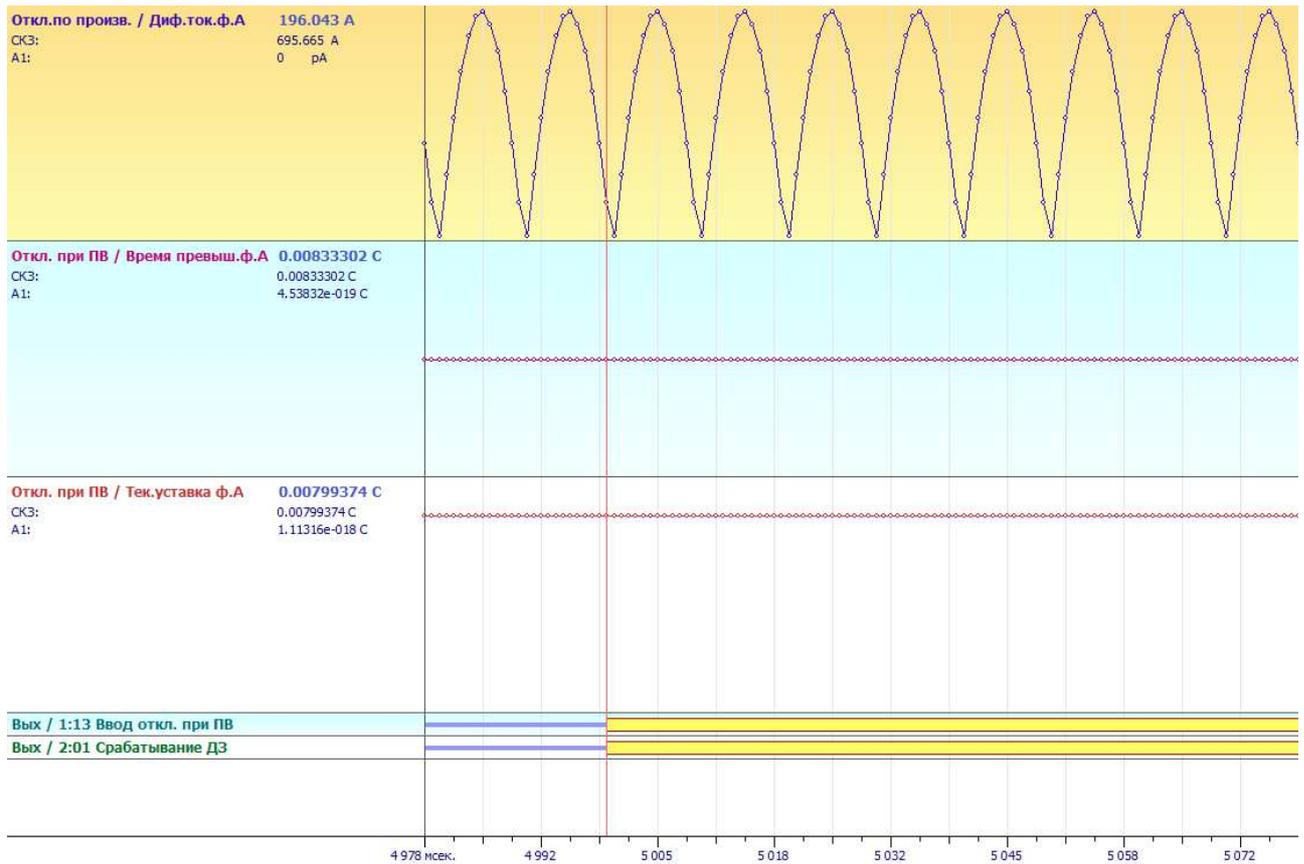


Рисунок Д.11 – Осциллограмма сигналов алгоритма выявления ВЗ в обмотках СТ  
в режиме ПВ

На рисунках Д.12 и Д.13 изображены соответственно программный интерфейс алгоритма определения фазового сдвига по участкам точной работы ТТ и осциллограмма, демонстрирующая работу алгоритма. Большое число опытов, демонстрирующее работу алгоритма в ПП, было показано выше в приложении Г, поэтому здесь показана только работа в условиях нормального режима.

The screenshot shows a software interface with the following components:

- Menu (left):** Includes options like 'Неисправность', 'Настройка', 'Запись осцилл.', 'Связь с АСУТП', 'КПА-М', 'Диф.отсечка', 'Откл.произв.', 'Откл.длит.', 'Откл.при ПВ', 'КИН', 'КИУ', and 'Диф.фаз.' (highlighted).
- Table (center):**

Параметр	Значение
$i_{вн, А}$	4239 А
$i_{вн, В}$	-48 А
$i_{вн, С}$	-4190 А
$i_{нн, А}$	1024 А
$i_{нн, В}$	327 А
$i_{нн, С}$	-1353 А
$I_{вн, А}$	3441 А
$I_{вн, В}$	3448 А
$I_{вн, С}$	3441 А
$I_{нн, А}$	998 А
$I_{нн, В}$	1000 А
$I_{нн, С}$	998 А
Сдвиг фаз	15.00 град
Сигнал 1	4239.26 А
Сигнал 2	1024.04 А
- Internal signals (right):** An empty panel titled 'Внутренние сигналы'.
- External signals (right):** An empty panel titled 'Выходные сигналы'.
- Status bar (bottom left):** Shows '20:17:27' and '14.02.2018'.

Рисунок Д.12 – Программный интерфейс подсистемы определения фазового сдвига сигналов по участкам точной работы ТТ



Рисунок Д.13 – Осциллограмма сигналов алгоритма, определяющего фазовый сдвиг сигналов по участкам точной работы ТТ

Рассмотрим несколько подробнее особенности работы защиты СТ от ВЗ при ПВ, общая структура которой приведена на рисунке Д.14. Измерительные органы (ИО) принимают сигналы от вторичных обмоток ТТ и ТН и преобразуют аналоговые величины в удобную для дальнейшей обработки форму.



обмотке ТН. По текущей кратности ПВ рассчитывается значение уставки по длительности бестоковой паузы  $t_{n.уст}$ . Расчёт производится по формулам (3.10), (3.11), (3.12).

Реагирующий орган (РО) осуществляет сравнение рассчитанного значения бестоковой паузы в дифференциальном токе со значением уставки. На выходе РО формируется логический сигнал «1» при превышении  $t_{n.уст}$  над  $t_n$ , иначе на выходе РО формируется логический сигнал «0».

Блок формирования управляющего воздействия (БФУП) выполняет операцию логического умножения входных сигналов блока и формируется команда на отключение СТ, если все входы БФУП являются логическими «единицами», иначе – команда на отключение не формируется.

Когда информация о текущей кратности ПВ становится недостоверной, что фиксируется в случае срабатывания КИН (когда блок КИН выдаёт сигнал «1») уставка выдержки времени  $t_{n.уст}$  изменяется БРУП так, чтобы она соответствовала бестоковой паузе в рабочем сигнале при такой кратности ПВ, выше которой необходимо отключение СТ без выдержки времени, в [2] рекомендуется в качестве этого значения принимать кратность ПВ, допустимую в течение 2,5 секунд.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е**  
**СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОЙ РАБОТЫ**

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по учебной работе НГТУ  
 д.т.н., доцент  
 С.В. Брованов  
 2017 г.



**СПРАВКА**

**о внедрении результатов диссертационной работы И.И. Литвинова  
 «Повышение устойчивости функционирования дифференциальной  
 защиты силового трансформатора»  
 в учебном процессе факультета Энергетики  
 Новосибирского государственного технического университета**

Настоящей справкой подтверждается, что разработанные И.И. Литвиновым методы быстрого обнаружения внутренних повреждений в обмотках силового трансформатора, метод использования участков идеальной трансформации измерительных трансформаторов тока для выполнения дифференциально-фазной защиты, а также программный комплекс имитационного моделирования переходных процессов в силовых и измерительных трансформаторах внедрены в учебном процессе факультета Энергетики НГТУ.

Материалы диссертационной работы успешно используются при подготовке магистров по специальности 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. Основные положения и результаты диссертации включены в следующие дисциплины: «Современные средства релейной защиты», «Релейная защита электроэнергетических систем».

Декан факультета Энергетики,  С.С. Чернов  
 к.т.н., доцент

Зав. кафедрой ЭлСт,  
 к.т.н., доцент  Г.В. Глазырин

УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор АО «ИАЭС»  
 А.К. Ландман  
 2018 г.

Справка



об использовании научных и практических результатов кандидатской диссертационной работы Литвинова Ильи Игоревича

Теоретические и практические результаты диссертационной работы И.И. Литвинова, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, используются при выполнении работ акционерного общества «Институт автоматизации энергетических систем» по следующим направлениям.

1) Математическая модель силового трансформатора в режиме включения под напряжение, учитывающая конструктивные особенности сердечника и параметры питающей энергосистемы, используется для расчёта начального тока срабатывания чувствительной части дифференциальной защиты, а также для расчёта уставки грубого органа защиты (дифференциальной отсечки) по условию отстройки от броска тока намагничивания при включении трансформатора и при восстановлении напряжения после отключения внешнего КЗ.

2) Алгоритмы адаптивной дифференциальной защиты трансформатора от витковых замыканий в режиме перевозбуждения сердечника применяются в процессе проектирования релейной защиты объектов энергетики.

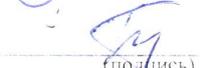
3) Разработанная экспериментальная база на основе предложенных математических моделей позволяет воспроизводить рабочие сигналы в цепях релейной защиты и используется для проведения комплексных проверок устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики в условиях, максимально приближенных к реальным.

Директор департамента проектирования

  
 (подпись)

Попов Г. Н.

Заместитель генерального директора

  
 (подпись)

Петров А.С.