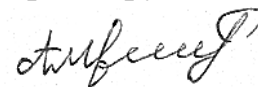


На правах рукописи



Андреев Михаил Владимирович

**СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Боровиков Юрий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Гольдштейн Валерий Геннадьевич

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный
технический университет», профессор кафедры
«Автоматизированные электроэнергетические
системы»

Панкратов Алексей Владимирович

кандидат технических наук, филиал ОАО
«ФСК ЕЭС» Томское предприятие
«Магистральные электрические сети»,
диспетчер центра управления сетями

Ведущая организация:

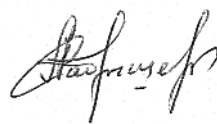
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина».

Защита состоится «09» октября 2013 г. в 16.30 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.10 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан «04» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.269.10
д.т.н., с.н.с.



А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Всё основное оборудование электроэнергетических систем (ЭЭС): генераторы, трансформаторы (автотрансформаторы), линии электропередачи (ЛЭП) и др. непрерывно взаимосвязано единым процессом производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. При этом силовые трансформаторы и автотрансформаторы, наряду с присущими им функциями, являются технологическими «концентраторами» и относятся к категории наиболее дорогостоящего оборудования ЭЭС, необоснованное отключение или выход из строя которых связаны со значительным технологическим и экономическим ущербом. Минимизировать эти последствия позволяет правильное действие релейной защиты (РЗ) и прежде всего основной – дифференциальной защиты трансформаторов (ДЗТ).

Между тем, согласно обобщенной статистике аварийности в российских и зарубежных ЭЭС, примерно 25% тяжелых аварий являются следствием неправильных действий РЗ и противоаварийной автоматики (ПА), в том числе и ДЗТ, которые работают неправильно примерно в 20 % случаев. Причем, неправильные действия РЗ в 50 – 70% случаев приводят к развитию аварийных ситуаций в тяжелые системные аварии.

Поскольку поломки и дефекты в этой статистике учтены отдельно, главной причиной неправильных действий РЗ является несоответствие их настроек реальным условиям функционирования, которое, принимая во внимание применяемые методики, определяется двумя основными факторами:

- 1) использованием при расчете уставок недостаточно полной и достоверной информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС;
- 2) неадекватным учетом погрешностей, формируемых конкретными реализациями РЗ и измерительными трансформаторами (ИТ).

Очевидно, что оба эти фактора взаимосвязаны и их радикальная минимизация зависит от развития и совершенствования средств моделирования ЭЭС, в том числе РЗ и ПА.

Ввиду известной специфики ЭЭС натурные эксперименты, особенно аварийного характера, недопустимы, а чрезмерная сложность ЭЭС исключает их адекватное физическое моделирование. Поэтому основным способом получения указанной информации оказывается математическое моделирование, полнота и достоверность которого зависит от общепонятных условий:

1) уровня адекватности применяемых математических моделей всего значимого оборудования, включая РЗ и ПА, и ЭЭС в целом;

2) способности используемых средств решения образующейся совокупной математической модели ЭЭС выполнять его без существенных упрощений и ограничений и с необходимой гарантированной точностью.

Исследованию и стремлению выполнения различных аспектов этих условий посвящены множество работ отечественных и зарубежных ученых: Атабекова Г.И., Багинского Л.В., Вавина В.Н., Глазырина В.Е., Голанцова Е.Б., Гуревича В.И., Дмитриенко А.М., Дроздова А.Д., Засыпкина А.С., Казанского В.Е., Кнобеля Я., Кужекова С.Л., Купарева М.А., Кутявина И.Д., Лоханина Е.К., Лямеца Ю.Я., Наумова В.А., Нудельмана Г.С., Овчаренко Н.И., Овчинникова В.В., Подгорного Э.В., Торопова Г.Э., Фабриканта В.Л., Федосеева А.М., Шабата М.А., Шевцова В.М., Шнеерсона Э.М., Dewadasa M., Pereza S.G.A., Vazquez E., и др.

Однако, несмотря на то, что достигнутый в настоящее время уровень физико-математического представления и описания процессов в оборудовании и ЭЭС в целом позволяет синтезировать математические модели элементов ЭЭС, включая РЗ, технологическую и ПА, достаточно полно и достоверно воспроизводящие в них реальный непрерывный спектр нормальных, аварийных и послеаварийных процессов, получающаяся при этом математическая модель ЭЭС, даже с учетом допустимого частичного эквивалентирования и с предельно упрощенным моделированием РЗ и ПА в виде операций сравнения и логических функций, неизбежно содержит очень жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно высокого порядка, которая, согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, плохо обусловлена на ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования и удовлетворительно не может быть решена.

Данное обстоятельство длительное время препятствовало минимизации, прежде всего, первого, а соответственно и связанного с ним второго фактора. В результате неизбежными становятся применяемые в используемых в настоящее время средствах расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС известные по характеристикам этих средств упрощения и ограничения, препятствующие выполнению обозначенных условий.

По мере создания более совершенных программно-технических средств моделирования ЭЭС: Real Time Digital Simulator (RTDS), Power Grid Real Time Digital Hardware in the Loop Simulator (eMEGASim) и особенно Всережимного

моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) все большую актуальность приобретает задача минимизации второго фактора. Необходимость и значимость её решения обусловлены отсутствием в данных средствах разработанных и испытанных достаточно полных и достоверных математических моделей конкретных РЗ и ПА, в том числе ДЗТ, и программных, программно-технических средств их реализации.

В связи с вышеизложенным **целью данной диссертационной работы** является создание средств всережимного моделирования в ЭЭС ДЗТ с учетом процессов в конкретных их реализациях и измерительных трансформаторах тока (ИТТ), обеспечивающих возможность более адекватной настройки и повышения эффективности функционирования ДЗТ, а также достоверность воспроизведения аварийных и особенно послеаварийных процессов в ЭЭС.

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

1. Обоснование методики синтеза всережимных математических моделей ДЗТ, учитывающих процессы в конкретных реализациях и ИТТ.
2. Синтез на основе сформулированной методики математических моделей для всех типов ДЗТ, достаточно полно и достоверно воспроизводящих в них и ИТТ реальный спектр процессов.
3. Компьютерное тестовое исследование синтезированных моделей ДЗТ.
4. Разработка программных средств практической реализации всережимных математических моделей ДЗТ.
5. Экспериментальные исследования разработанных средств всережимного моделирования ДЗТ.

Идея работы

Основная идея работы заключается в создании средств всережимного моделирования ДЗТ, достаточно полно и достоверно воспроизводящих процессы в конкретных реализациях защит и ИТТ, позволяющих осуществлять проверку и настройку ДЗТ для конкретных условий их функционирования и, соответственно, повышать в целом эффективность функционирования данных защит.

Методы исследований

Для решения поставленных в работе задач использовались фундаментальные законы и методы теоретических основ электротехники; методы математического анализа, в частности, метод направленных графов; объектно-ориентированное программирование. Проведение экспериментально-расчетных исследований выполнено с использованием программ: АРМ СРЗА (комплекс

программ для расчетов электрических величин при повреждениях сети и уставок релейной защиты), Mathcad, Maple, MATLAB, системы программирования Microsoft Visual Studio 2010 Professional (версия 10.0.40219.1 SP1Rel), а также прошедшего всесторонние испытания и опытную эксплуатацию программно-технического всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС).

Достоверность результатов исследований подтверждается соответствием результатов, полученных с помощью разработанных средств всережимного моделирования ДЗТ, теоретическим данным, корректностью использования применяемых фундаментальных методов электротехники и математики, результатами компьютерного моделирования, а также данными независимых источников.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

1. Сформулированная и обоснованная методика создания всережимных математических моделей ДЗТ.
2. Синтезированные всережимные математические модели электромеханических, электронных и микропроцессорных ДЗТ, достаточно полно и достоверно воспроизводящие процессы в конкретных реализациях защит и ИТТ.
3. Разработанная структура устройства моделирования силового трехфазного многообмоточного трансформатора – специализированного гибридного процессора, позволяющего использовать разработанные средства всережимного моделирования ДЗТ.

Практическая значимость и реализация результатов работы

На основе синтезированных математических моделей, учитывающих процессы в их конкретных реализациях и ИТТ, разработаны программные средства всережимного математического моделирования дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов (ММДЗТ), позволяющие:

- осуществлять достаточно полное и достоверное воспроизведение процессов в ДЗТ на базе реле РНТ-560/ДЗТ-10, ДЗТ-21/ДЗТ-23, цифровых ДЗТ при различных по спектру и уровням сигналов на входах ИТТ, в том числе задаваемых реальными осциллограммами, и выполнять всесторонние исследования этих защит;
- производить проверку и адекватную настройку ДЗТ для конкретных условий их функционирования в ЭЭС: 1) путем применения ММДЗТ в соответствующих средствах моделирования ЭЭС; 2) путем автономного использования ММДЗТ на персональных компьютерах и загрузки массивов

мгновенных значений (осциллограмм) входных сигналов ИТТ, в том числе в виде COMTRADE-файлов, полученных с помощью соответствующих средств моделирования ЭЭС или аварийных регистраторов;

- проводить достоверный анализ и выявлять причины неправильных действий защит, связанных с функционированием элементов и их совокупностей в конкретных ДЗТ и ИТТ, разрабатывать рекомендации по их модернизации или модификации.

Разработанные программные средства математического моделирования дифференциальных защит трансформатора (ММДЗТ) предназначены для использования в проектных и научно-исследовательских организациях электроэнергетической отрасли, службах РЗ ЭЭС, а также в ВУЗах энергетического профиля.

Проведена апробация разработанных программных средств всережимного моделирования дифференциальных защит трансформатора на реальных объектах Томской энергосистемы. Результаты работы использованы в учебном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета, на предприятии ОАО «Томские магистральные сети» (подтверждено актами об использовании результатов).

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа причин неправильных действий ДЗТ в ЭЭС и предлагаемое направление их минимизации.
2. Сформулированная и обоснованная методика синтеза всережимных математических моделей ДЗТ, адекватно учитывающих аппаратные погрешности защит и ИТТ.
3. Синтезированные согласно сформулированной методике всережимные математические модели ДЗТ различных типов.
4. Разработанные программные средства всережимного моделирования ДЗТ – ММДЗТ, реализующие синтезированные модели ДЗТ.
5. Результаты экспериментальных исследований созданных средств всережимного моделирования ДЗТ в ЭЭС.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на следующих конференциях, семинарах и выставках:

1. Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», НГТУ, г. Новосибирск, 2010 г. и 2011 г.

2. Шестнадцатая всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность», ТПУ, г. Томск, 2010 г.
3. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», ТПУ, г. Томск, 2011 г.
4. Международная научно-техническая конференция «Энергетика глазами молодежи», СамГТУ (Самара, 2011 г.), УрФУ (г. Екатеринбург, 2012 г.).
5. Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России», г. Чебоксары, 2012 г.
6. The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012, ТПУ, г. Томск, 2012 г.
7. 14-ый международный форум «Высокие технологии XXI века», г. Москва, 24-27 апреля 2013 (разработка отмечена медалью).
8. Московский международный энергетический форум «ТЭК-2013 в XXI веке», г. Москва, 8-11 апреля 2013 (разработка отмечена медалью).
9. Международная выставка изобретений, г. Женева, Швейцария, 10-14 апреля 2013 (разработка отмечена золотой медалью).

Результаты данной диссертационной работы реализованы в ряде НИР, выполненных при личном участии автора:

1. Госконтракт № ГК 14.740.11.0526 «Всережимное моделирование в реальном времени функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики электроэнергетических систем для исследования эффективности транспортировки и распределения электроэнергии». Руководитель: Прутик А.Ф. Сроки выполнения работы: 10.12.2010 г. – 14.10.2011 г.
2. Госконтракт № ГК 16.513.11.3123 «Разработка методов и средств управления интеллектуальными энергосистемами на Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС)». Руководитель: Гусев А.С. Сроки выполнения работы: 13.10.2011 г. – 06.09.2012 г.
3. Госконтракт № ГК 07.514.11.4075 «Информационно-телекоммуникационная моделирующая система реального времени интеллектуальных энергосистем». Руководитель: Боровиков Ю.С. Сроки выполнения работы: 13.10.2011 г. – 06.09.2012 г.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 26 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ и патент РФ на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 106 наименований и 11 приложений. Объем основной части диссертации – 143 страницы, в том числе 113 рисунков, 3 таблицы. Объем приложений к диссертации – 144 страницы, в том числе 169 рисунков, 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, представлены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и другие основные характеристики данной диссертационной работы.

В первой главе исследована проблема неадекватности настройки дифференциальных защит трансформаторов (ДЗТ). Главной причиной помимо первого фактора (использование при расчете уставок недостаточно полной и достоверной информации о режимах и процессах в оборудовании и ЭЭС) является неадекватный учет в существующих методиках расчета уставок ДЗТ: 1) броска намагничивающего тока; 2) погрешностей, формируемых измерительными трансформаторами тока (ИТТ); 3) погрешностей, формируемых конкретными реализациями ДЗТ; 4) влияния апериодической составляющей.

На основе результатов исследований данной проблемы обосновано направление её решения, позволяющее радикально минимизировать второй фактор (неадекватный учет погрешностей, формируемых конкретными реализациями РЗ и ИТТ) неправильных действий ДЗТ, которое связано с созданием всережимных моделей ДЗТ, достаточно полно и достоверно воспроизводящих реальный спектр процессов в конкретных устройствах ДЗТ и ИТТ, а также программных средств реализации этих моделей – ММДЗТ.

Проведенный анализ средств моделирования ЭЭС (АРМ СРЗА, ЕМТР, МУСТАНГ, EUROSTAG, ВМК РВ ЭЭС) на предмет соответствия критериям:

1) использование полных и достоверных трехфазных математических моделей основного и сопутствующего оборудования ЭЭС, в том числе РЗ и ПА;

2) способность решения системы дифференциальных уравнений, описывающих полную совокупную модель ЭЭС реальной размерности и адекватным учетом функционирования РЗ, с гарантированной приемлемой точностью на неограниченном временном интервале; определил в качестве наиболее адекватного источника массивов мгновенных значений (осциллограмм) первичных токов для автономного исследования ММДЗТ и для всесторонних экспериментальных исследований ДЗТ в ЭЭС удовлетворяющий всем обозначенным критериям ВМК РВ ЭЭС.

Во второй главе сформулирована и обоснована методика синтеза всережимных математических моделей ДЗТ, включающая в себя следующие этапы: 1) анализ принципиальных схем ДЗТ для формирования адекватных схем замещения; 2) составление схем замещения с учетом ИТТ и особенностей конкретных реализаций; 3) получение передаточных функций (ПФ) конкретных устройств ДЗТ с учетом ИТТ с целью их анализа во временной и частотной областях; 4) ранжировка с помощью теории точности и чувствительности элементов схемы и её функциональных узлов для оценки их влияния на точность функционирования синтезированных моделей с целью их упрощения, в случае необходимости; 5) предварительное компьютерное тестирование и исследование полученных математических моделей с помощью программ Mathcad, MATLAB Simulink др.; 6) формализация полученных математических описаний в виде программных кодов для реализации математических моделей ДЗТ в средствах их применения; 7) всестороннее экспериментальное исследование разработанных средств всережимного моделирования ДЗТ в ЭЭС.

Теоретической основой для синтеза математических моделей служит ПФ, которая является универсальным математическим описанием и позволяет производить анализ во временной и частотной областях, а наиболее эффективный метод получения ПФ – метод направленных графов.

В третьей главе представлены результаты синтеза на основе приведенной в главе 2 методики универсальных математических моделей электромеханических, электронных и цифровых ДЗТ (ЦДЗТ), для создания которых обоснованы и сформированы показанные на рисунках 1 и 2 их обобщенные структурные схемы.

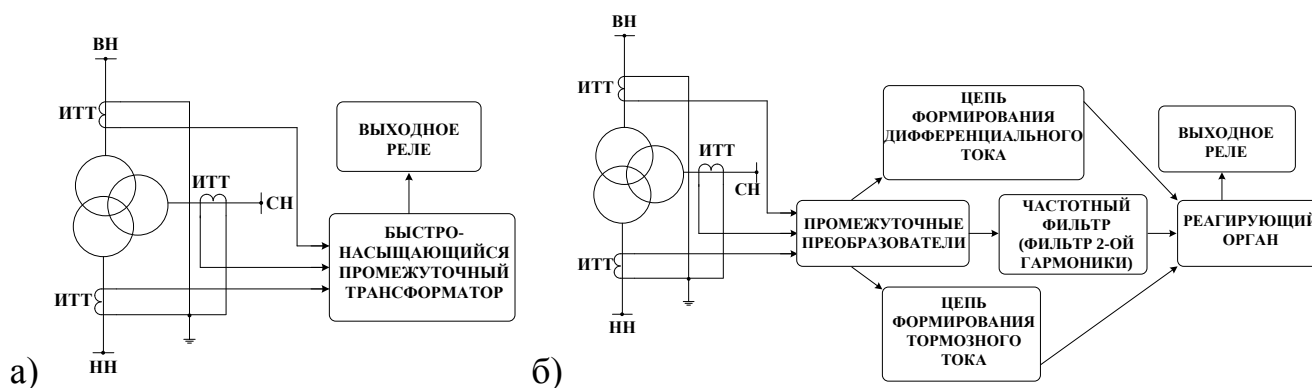


Рисунок 1 – Обобщенные структурные схемы: а) электромеханической ДЗТ; б) электронной ДЗТ

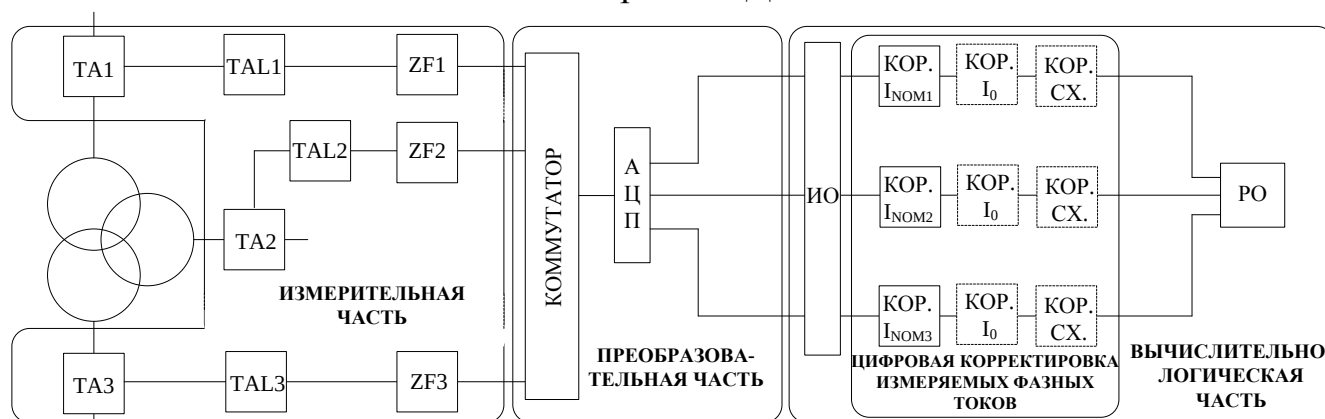


Рисунок 2 – Обобщенная структура ЦДЗТ: ТА1, ТА2, ТА3 – ИТТ на сторонах высшего, среднего и низшего напряжения соответственно; TAL1, TAL2, TAL3 – промежуточные трансформаторы тока; ZF1, ZF2, ZF3 – частотные фильтры; ИО – измерительный орган; РО – реагирующий орган, в котором реализован основной алгоритм работы ЦДЗТ

Реализацию методики иллюстрирует фрагмент синтеза математической модели ДЗТ-21 (рисунок 3), включающий схему замещения рабочей цепи ДЗТ-21, её граф, ПФ и соответствующее дифференциальное уравнение.

Частотные характеристики синтезированных моделей ДЗТ, а также результаты их компьютерного тестового исследования представлены в приложениях диссертационной работы, в частности, согласно данным исследованиям в номинальном режиме работы вносимые элементами схемы электромеханической ДЗТ на реле РНТ-565 погрешности следующие: 1) амплитудные погрешности выбранных ИТТ сторон высшего (ВН), среднего (СН) и низшего (НН) напряжения соответственно примерно равны 9%, 5% и 9%; фазовые погрешности – 30%, 20% и 30%; 2) амплитудная погрешность дифференциального реле $\approx 9\%$, фазовая погрешность $\approx 0.04\%$.

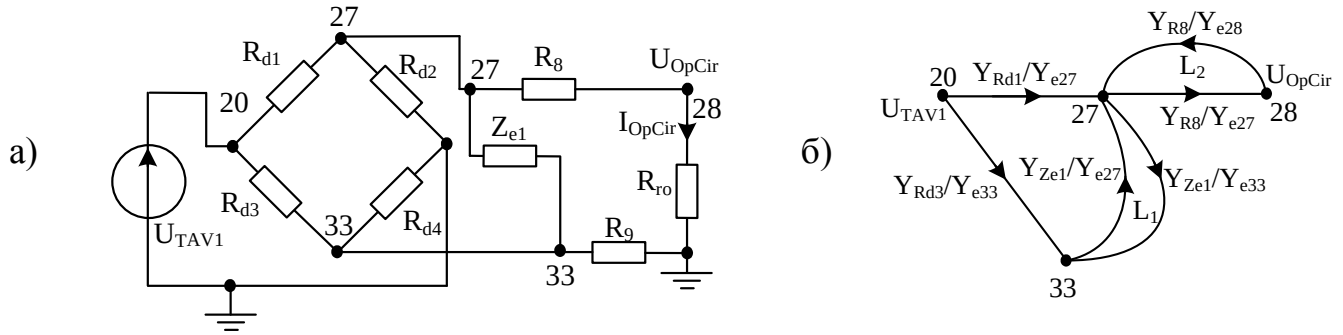


Рисунок 3 – Фрагмент синтеза математической модели ДЗТ-21: а) схема замещения рабочей цепи: U_{TAV1} – напряжение на выходе трансреактора; R_{d1} , R_{d2} , R_{d3} , R_{d4} – сопротивления диодов; R_{ro} – входное сопротивление реагирующего органа; U_{OpCir} , I_{OpCir} – напряжение и ток на выходе рабочей цепи; Z_{e1} – эквивалентное сопротивление части схемы рабочей цепи; б) граф схемы замещения рабочей цепи

$$W_{opCir}(p) = \frac{U_{OpCir}(p)}{U_{TAV1}(p)} = \frac{\frac{Y_{Rd1} \cdot Y_{R8}}{Y_{e27} \cdot Y_{e28}} + \frac{Y_{Rd3} \cdot Y_{Ze1} \cdot Y_{R8}}{Y_{e33} \cdot Y_{e27} \cdot Y_{e28}}}{1 - (L_1 + L_2)} = \frac{K_1 \cdot p + K_2}{K_3 \cdot p + K_4},$$

где K_1 , K_2 , K_3 , K_4 – коэффициенты, определяемые RLC-параметрами схемы рабочей цепи ДЗТ-21.

$$\frac{d(u_{OpCir}(t) \cdot K_3 - K_1 \cdot u_{TAV1}(t))}{dt} + u_{OpCir}(t) \cdot K_4 - K_2 \cdot u_{TAV1}(t) = 0$$

Полученные дифференциальные уравнения являются основой для программной реализации в средствах моделирования ДЗТ.

В четвертой главе рассмотрены результаты разработки специализированной программы математического моделирования дифференциальных защит трансформатора (ММДЗТ), обеспечивающей реализацию синтезированных моделей ДЗТ. Структура разработанной программы и её функциональная блок-схема представлены на рисунке 4.

Решение дифференциальных уравнений в ММДЗТ осуществляется методом Эйлера, применимость которого определяется невысокой (по математическим меркам) сложностью систем дифференциальных уравнений математических моделей ДЗТ. Использование данного метода также позволяет минимизировать требования к вычислительным ресурсам. Для учета нелинейности намагничивания сердечника ИТТ и промежуточных преобразователей в программе по

мгновенному значению тока намагничивания, который определяется из уравнения баланса магнитодвижущих сил, в соответствии с зависимостью $Z_{\mu} = f(i_{\mu})$, рассчитанной из $B = f(H)$, выбирается сопротивление цепи намагничивания.

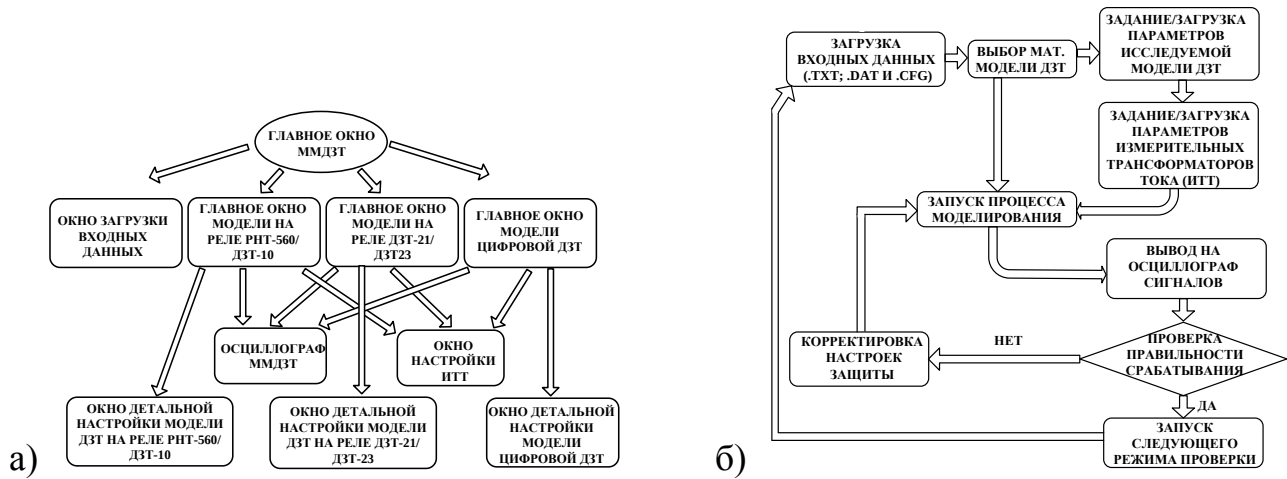


Рисунок 4 – Программа ММДЗТ: а) структура программы; б) функциональная блок-схема

Фрагмент пользовательского интерфейса ММДЗТ для ЦДЗТ иллюстрирует представленное на рисунке 5 программное окно (формы управления остальными моделями выглядят аналогично).

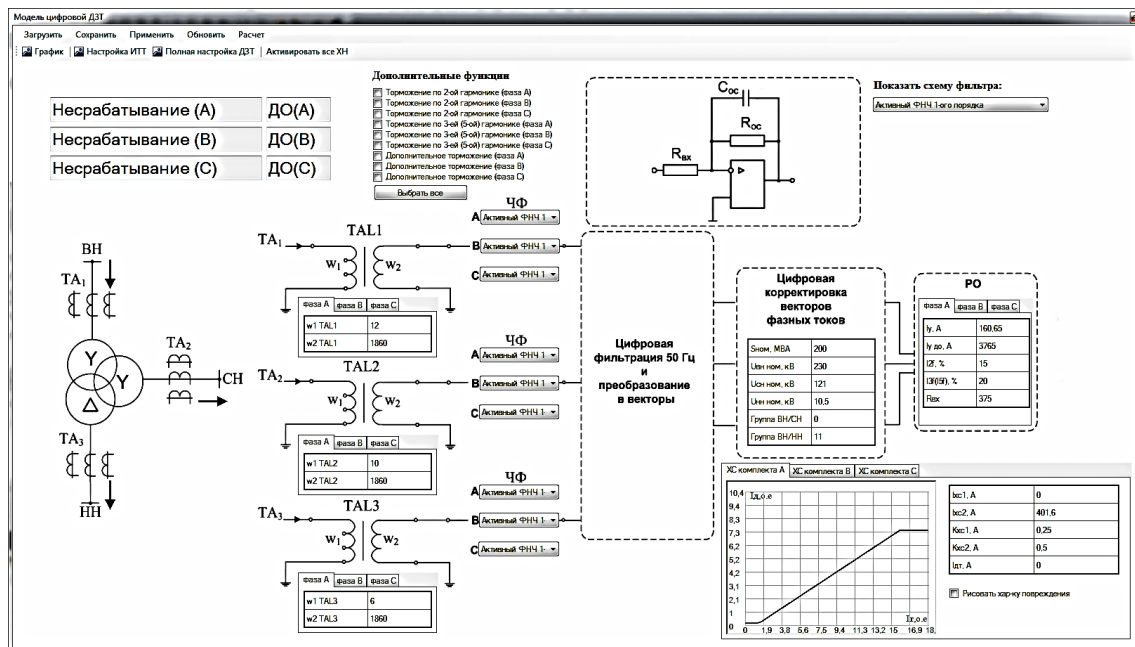


Рисунок 5 – Главное программное окно модели цифровой ДЗТ

На рисунках 6÷9 представлены фрагменты результатов проверки настроек ДЗТ на реле РНТ-565, на рисунке 10 – ДЗТ на реле ДЗТ-21, на рисунках 11÷14 – цифровой ДЗТ (SIEMENS SIPROTEC 7UT62) с помощью программы ММДЗТ. Расчет уставок названных защит осуществлялся в соответствии с руководящими указаниями. Для нахождения токов коротких замыканий (КЗ) использована программа АРМ СРЗА. Проверка этих уставок проведена с использованием модели Томской ЭЭС, реализованной в ВМК РВ ЭЭС; в качестве защищаемого объекта принят мощный автотрансформатор АДЦТН-200000/220/110 одной из основных подстанций энергосистемы – ПС Зональная. Результаты, представленные ниже, получены в режиме внешнего трехфазного КЗ на шинах 220 кВ ПС Зональная. Исследования в других режимах: при всевозможных трехфазных, двухфазных и однофазных внешних и внутренних КЗ, а также при включении защищаемого объекта под напряжение на холостом ходу; приведены в приложении диссертационной работы.

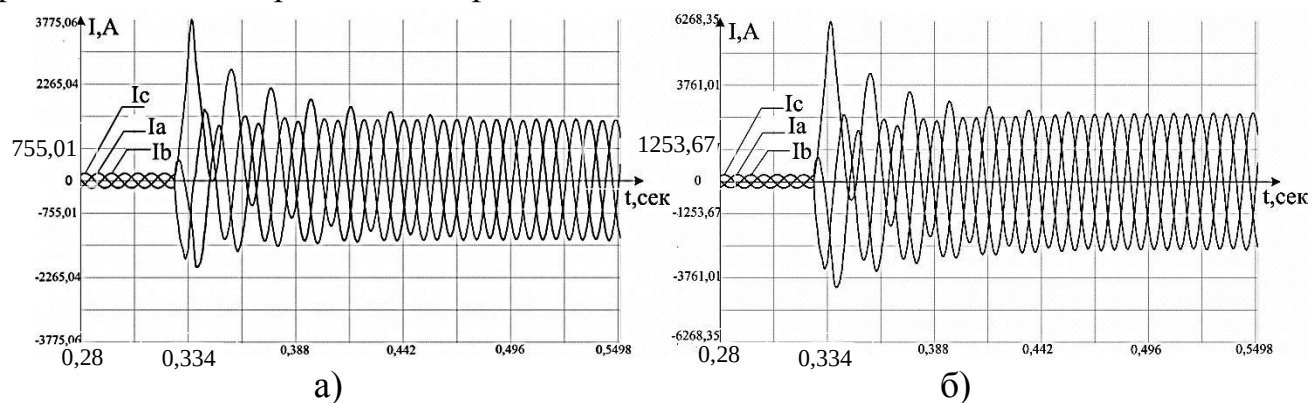


Рисунок 6 – Осциллограммы фазных первичных токов сторон ВН (а) и СН (б) автотрансформатора

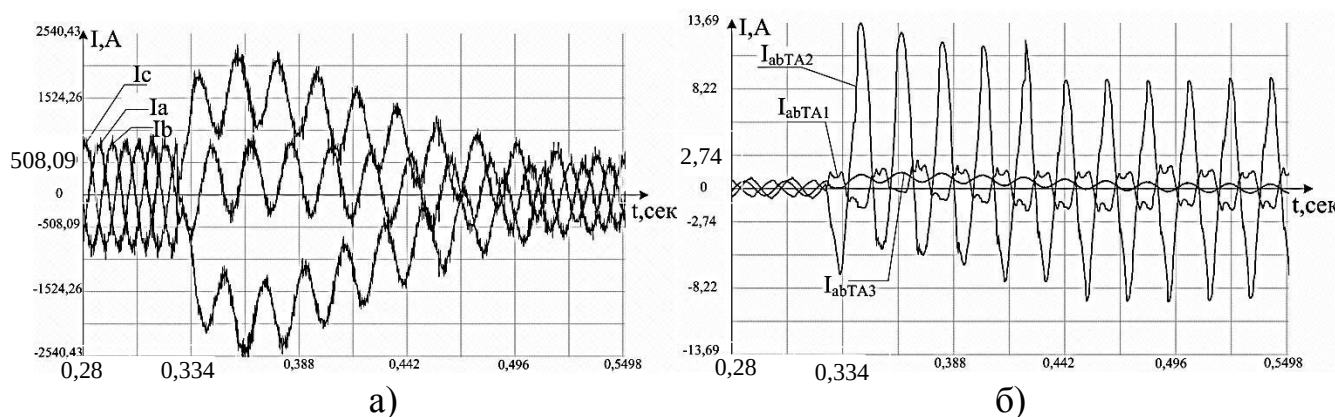


Рисунок 7 – Осциллограммы: а) фазных первичных токов стороны НН автотрансформатора; б) линейных токов между фазами А и В на выходах ИТТ

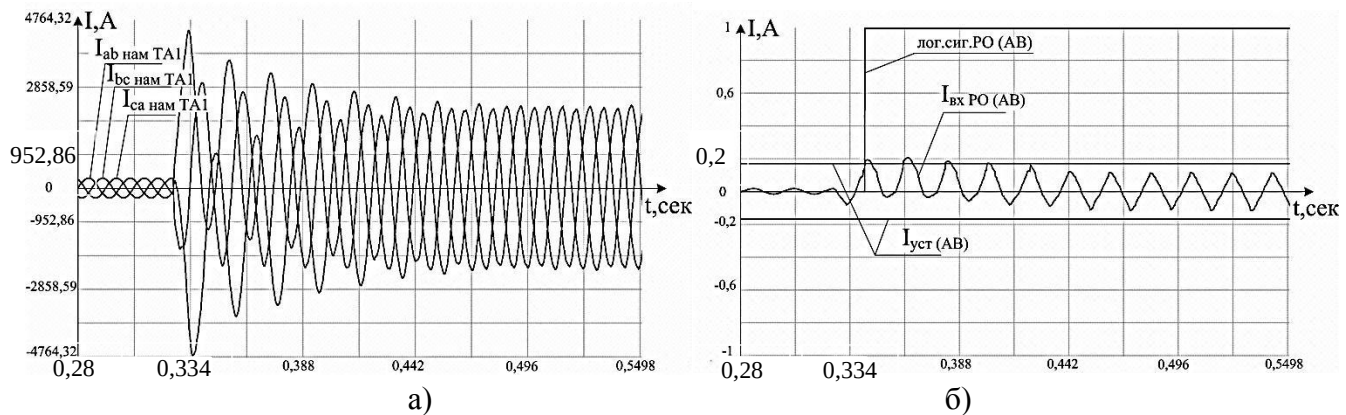


Рисунок 8 – Осциллограммы: а) токов намагничивания ИТТ стороны ВН; б) функционирования реагирующего органа дифференциального реле комплекта АВ

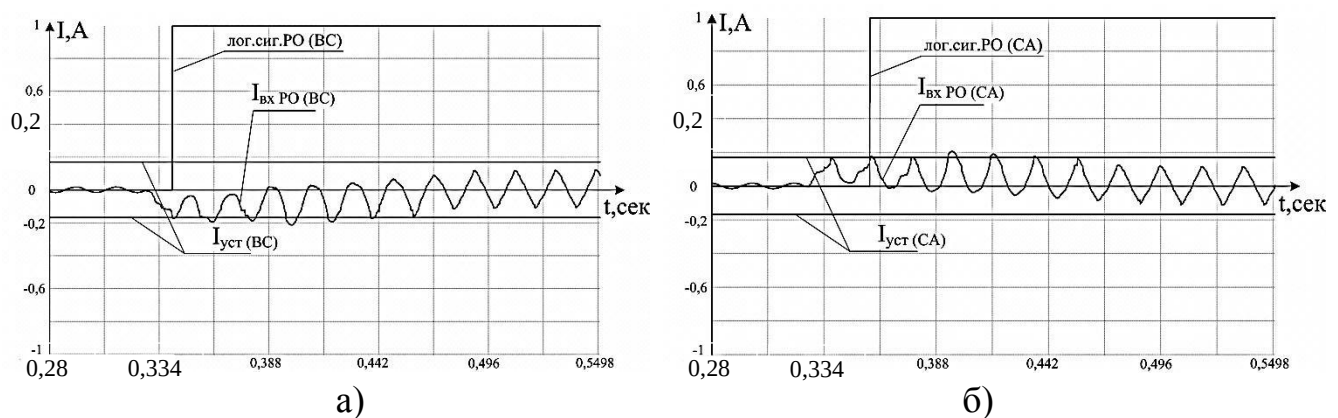


Рисунок 9 – Осциллограммы функционирования реагирующего органа дифференциального реле: а) комплекта ВС; б) комплекта СА

Согласно осциллограммам на рисунках 8 (б) и 9 произошло ложное срабатывание всех трех комплектов (АВ, ВС, СА) РНТ-565. Основная причина этого – неполная компенсация токов из-за соответствующих фазовых погрешностей ИТТ: фазовое смещение тока ИТТ стороны СН относительно токов сторон ВН и НН составляет примерно 13° . Исключить ложное срабатывание ДЗТ в этом случае можно: 1) подбором ИТТ с одинаковыми фазовыми погрешностями; 2) введением фазоповоротных устройств; 3) заглублением уставки срабатывания защиты с помощью включенного между секциями короткозамкнутых обмоток резистора ($R_{КЗ}$).

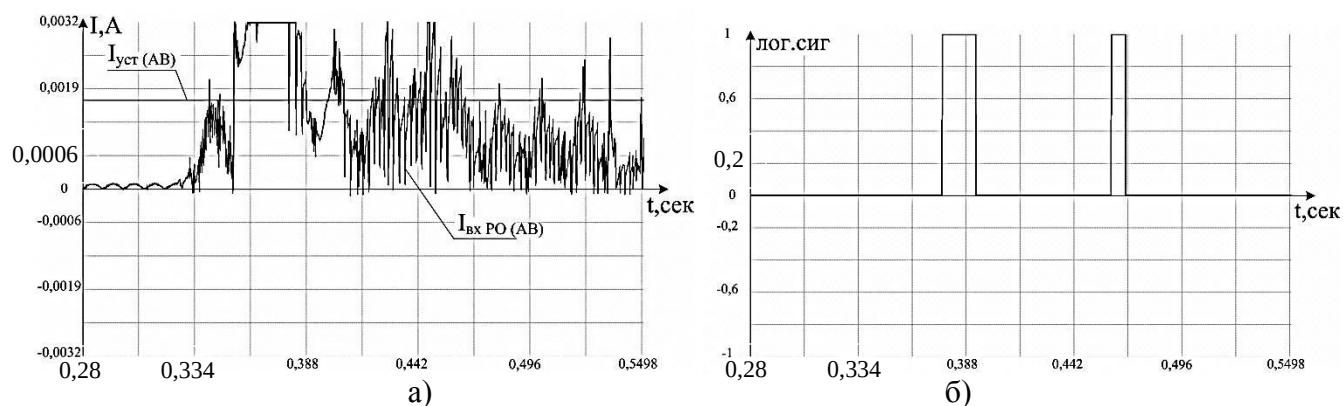


Рисунок 10 – а) ток на входе реагирующего органа комплекта АВ; б) импульсы на выходе элемента выдержки времени на срабатывание реагирующего органа комплекта АВ

В данном режиме произошло ложное срабатывание комплектов защиты ДЗТ-21. Главной причиной этого является искажение формы вторичного тока ИТТ сторон ВН и СН защищаемого автотрансформатора вследствие глубокого насыщения стали сердечника. Кроме того, возникающий при КЗ спектр сигналов затрудняет выделение используемым в ДЗТ-21 LC-фильтром второй гармонической составляющей, на блокировку от которой ориентирована защита. Для устранения неправильного действия ДЗТ потенциально возможны следующие варианты: 1) применение ИТТ, исключающих насыщение сердечника; 2) использование фильтров, позволяющих осуществлять более качественное выделение второй гармоники и соответственно блокировку ДЗТ; 3) изменение (заглубление) уставки срабатывания ДЗТ.

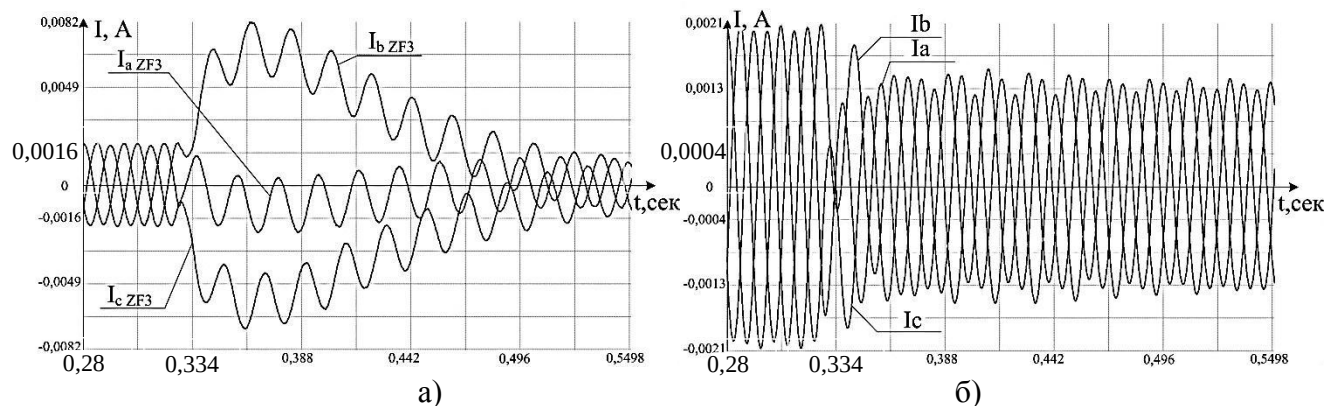


Рисунок 11 – Осциллограммы: а) фазных токов на выходе промежуточных частотных фильтров ZF₃; б) фазных токов на выходе ZF₃ после цифровой фильтрации

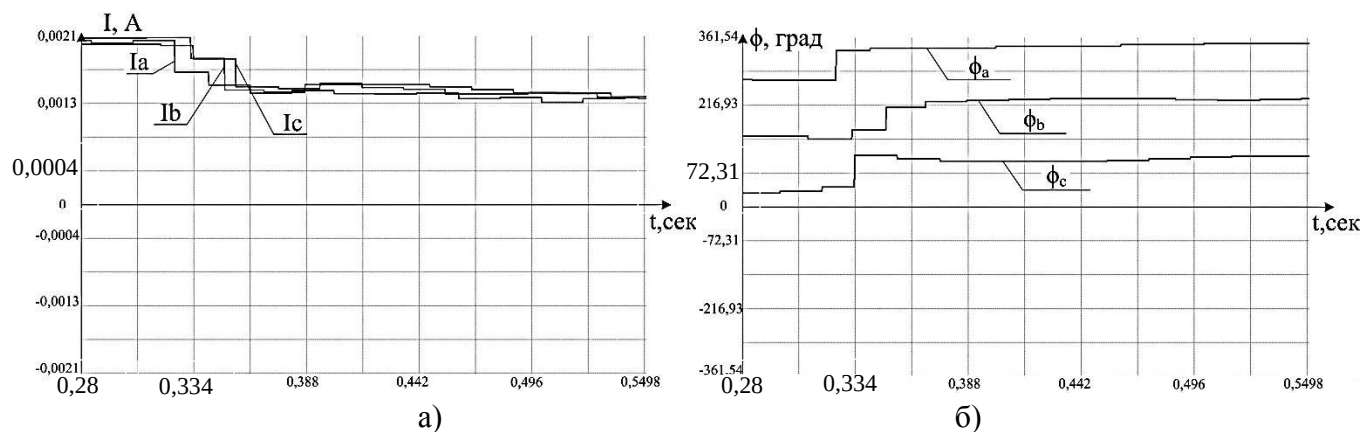


Рисунок 12 – а) модули векторов фазных токов с выхода ZF₃; б) фазы векторов фазных токов с выхода ZF₃

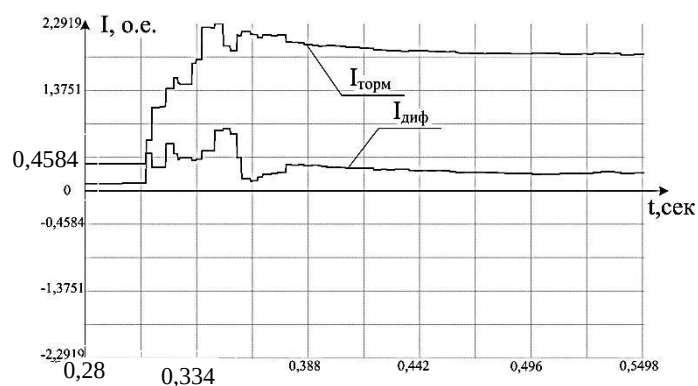


Рисунок 13 – Модули векторов дифференциального и тормозного токов комплекта А

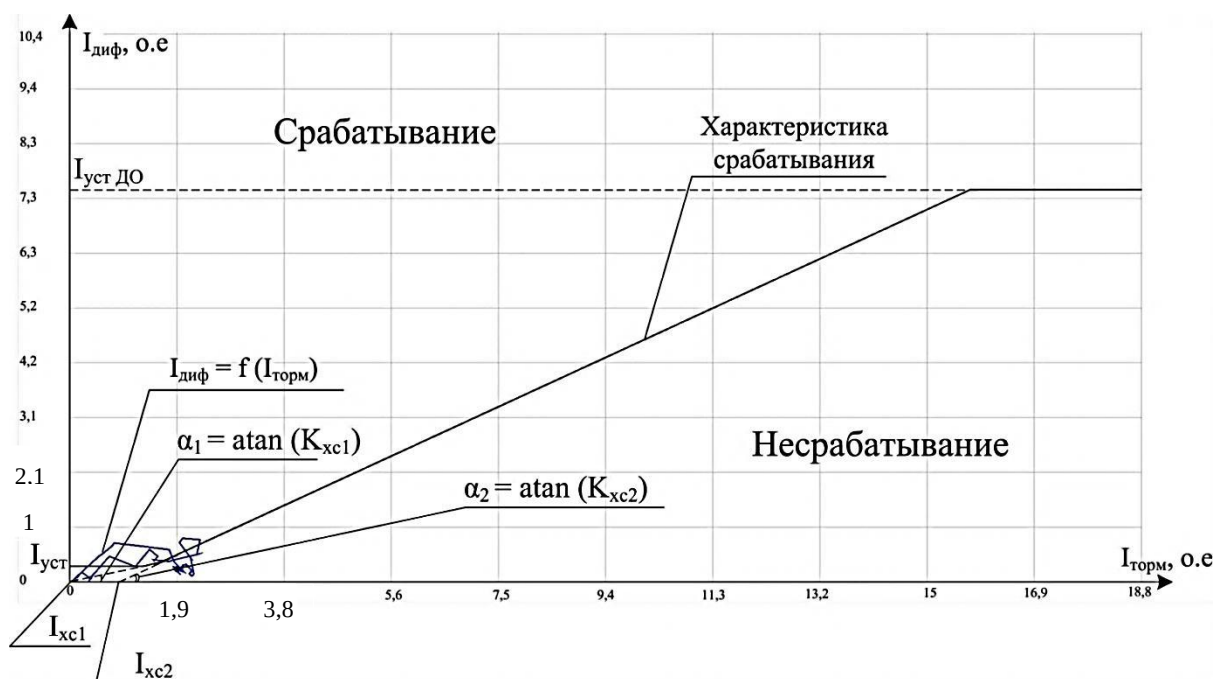


Рисунок 14 – Функционирование реагирующего органа комплекта А

В данном режиме произошло ложное срабатывание ЦДЗТ. Главной причиной этого также является неодинаковость фазового смещения ИТТ, установленных на разных сторонах защищаемого автотрансформатора. Для устранения ложных срабатываний защиты потенциально возможны следующие варианты: 1) подбор ИТТ, обеспечивающих одинаковое фазовое смещение; 2) реализация коррекции фазовых смещений в алгоритме ЦДЗТ; 3) изменение параметров характеристики срабатывания (ХС): ток уставки, углы наклона ветвей.

Поскольку в данной работе автором не ставилась задача разработки новых устройств защиты и алгоритмов или модификации старых, для устранения ложного срабатывания ДЗТ всех типов защит выбирался вариант изменения (загрубления) уставок. Ниже приведены конечные результаты корректировки настроек ДЗТ для одного комплекта защит.

Защита	Регулируемый параметр	Начальное значение	Скорректированное значение	Отклонение скорректированного значения от изначально установленного
РНТ-565	Сопротивление резистора между секциями короткозамкнутых обмоток	10 Ом	4 Ом	60 %
ДЗТ-21	Уставка срабатывания (сопротивление регулировочного резистора)	0,32 о.е. (6,1 кОм)	0,1225 о.е. (2,45 кОм)	61,7 %
ЦДЗТ (SIEMENS SIPROTEC 7UT62)	1)ток уставки $I_{уст}$; 2)ток уставки дифференциальной отсечки $I_{уст\ ДО}$; 3)основание второй ветви ХС I_{xc1} ; 4)наклон первой ветви ХС K_{xc1} ; 5) наклон второй ветви ХС K_{xc2} .	1) 160,65 А; 2) 3765,33А; 3) 401,6 А; 4) 0,25; 5) 0,5.	1)351,4 А; 2) 5120,4 А; 3) 878,5 А; 4) 1; 5) 1,5.	1) 118,7 %; 2) 36 %; 3) 118,75 %; 4) 300 %; 5) 200 %.

Совместное использование нескольких из предложенных вариантов устранения ложных срабатываний позволит избежать сильного загрубления уставок ДЗТ.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. На основе анализа возможных причин неправильных действий ДЗТ, включающего исследование программно-аппаратных особенностей защит, а также существующих методик расчета уставок, обоснованно установлено, что существующие методики неадекватно учитывают погрешности конкретных реализаций ДЗТ и расчет уставок производится с применением приближенных и обобщенных коэффициентов, существенно загроубляющих уставки защиты.

2. В результате анализа программных и программно-аппаратных комплексов расчета режимов и процессов в ЭЭС установлено, что используемые в настоящее время средства не обеспечивают необходимую для адекватной настройки РЗ достоверность.

3. Разработана и обоснована методика создания всережимных математических моделей ДЗТ, позволяющих повысить адекватность и эффективность их функционирования.

4. Согласно положениям методики синтезированы математические модели для всех типов ДЗТ, достаточно полно и достоверно воспроизводящие процессы в конкретных реализациях защит и ИТТ.

5. Созданы программные средства математического моделирования ДЗТ – ММДЗТ, обеспечивающие необходимую для адекватной настройки ДЗТ полноту и достоверность воспроизведения процессов в конкретных реализациях ДЗТ и ИТТ в реальных условиях функционирования, применение которых позволит повысить эффективность ДЗТ.

Результаты диссертационной работы образуют теоретически обоснованную и экспериментально проверенную научно-техническую основу для создания аналогичных средств всережимного моделирования функционирования в ЭЭС других РЗ и ПА.

В приложениях представлены результаты сравнительного анализа ВМК РВ ЭЭС с АРМ СРЗА и ПВК МУСТАНГ, расчеты уставок защит, фрагменты программного кода ММДЗТ, результаты компьютерного тестового исследования в MATLAB, а также результаты экспериментальных исследований, подтверждающих адекватность разработанных средств всережимного моделирования ДЗТ.

Основной и наиболее значимый материал диссертационной работы отражен в следующих публикациях:

Статьи в рецензируемых журналах:

1. А.О. Сулайманов, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем // Электричество, 2012. – №6. – с. 17-20.
2. М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования, 2013. – №3 [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.science-education.ru/109-9343>, свободный, 11.06.2013.

Материалы трудов конференций:

1. М.В. Андреев, А.Ф. Прутик, Н.Ю. Рубан. Математическое моделирование измерительной части дифференциальной защиты типа ДЗТ-21 // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, Часть 2 - Новосибирск, 3-5 декабря 2010. - Новосибирск: НГТУ, 2010. – с. 37-38.
2. М.В. Андреев, А.Ф. Прутик, Н.Ю. Рубан. Задача адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики и пути её решения // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Материалы всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи - Уфа, 2-3 ноября 2010. - Уфа: УГАТУ, 2010. – с. 61-62.
3. М.В. Андреев. Внедрение всережимных математических моделей средств релейной защиты и автоматики в образовательный процесс // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. – Томск, 6-8 октября 2011г.: Томский политехнический университет. Т.1, 340 с. – с. 229-231.
4. М.В. Андреев. Математическая модель дифференциальной защиты с торможением типа ДЗТ-21 с учетом измерительных трансформаторов и особенностей аппаратной реализации // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. – Томск, 6-8 октября 2011г.: Томский политехнический университет. Т.1, 340 с. – с. 252.
5. М.В. Андреев. Всережимное моделирование реагирующего органа дифференциальной защиты ДЗТ-21 // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи». В 3 т. – 21-25 ноября 2011г, Самара: СамГТУ, Том 1. 423 с., с 46-51.

6. А.О. Сулайманов, А.В. Прохоров, Ю.С. Боровиков, М.В. Андреев, И.С. Гордиенко. Автоматизированный комплекс тестирования, настройки и разработки систем управления, релейной защиты и противоаварийной автоматики // Материалы докладов международной научно-практической конференции и выставки «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» – 17-20 апреля 2012 г. Чебоксары, 150 с. – с. 96-101.

7. Yu. Borovikov, A. Prokhorov. M.V. Andreev. Application of Hybrid Real-Time Power System Simulator for Setting up and Close Loop Testing of Protection and Control Equipment // The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012 - September 17-21, 2012 Tomsk Polytechnic University, Volume II. – p. 609-612.

Кроме этого различные аспекты диссертационной работы рассмотрены в других 16 публикациях.

Патенты на изобретения:

1. Пат. № 2479025 РФ, МПК G06G7/62. Устройство для моделирования трехфазного многообмоточного трансформатора // Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев, А.С. Гусев, А.Ф. Прутик, И.С. Гордиенко; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"; – 2011146496/08; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.04.2013. Бюл. №10. – с.11 (доля автора – 30 %).

Личный вклад

1. Анализ причин неправильных действий ДЗТ и выработка направления их минимизации.

2. Разработка и обоснование методики синтеза всережимных математических моделей ДЗТ.

3. Синтез в соответствии с разработанной методикой математических моделей ДЗТ всех типов, достаточно полно и достоверно воспроизводящих в них и ИТТ реальный спектр процессов.

4. Разработка программы ММДЗТ.

5. Проведение экспериментально-расчетных исследований.

6. Формулировка научной новизны и практической значимости диссертационной работы.