

На правах рукописи



Рубан Николай Юрьевич

**СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ЗАЩИТЫ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические
системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Гусев Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мусин Агзам Хамитович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова,
профессор кафедры «Электрификация
производства и быта»

Сальников Василий Герасимович
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВПО «Новосибирская государственная
академия водного транспорта», профессор
кафедры «Электроэнергетические системы и
электротехника»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирский
федеральный университет, г. Красноярск

Защита состоится «03» декабря 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «15» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.269.10

А.В. Кабышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Согласно обобщенной статистике 25-28% тяжелых системных аварий происходит из-за неправильных действий релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики, главным образом РЗ, в том числе высокочастотной дифференциально-фазной защиты (ВЧДФЗ), являющейся основной защитой линий электропередачи высокого напряжения. Поскольку дефекты и поломки аппаратуры в этой статистике учтены отдельно, главной их причиной служат неадекватные реальным условиям функционирования настройки РЗ, определяемые двумя взаимосвязанными факторами:

1) использованием для настройки при проектировании и эксплуатации РЗ недостаточно полной и достоверной информации о возможных процессах в ЭЭС и соответственно защищаемых объектах;

2) приближенным и обобщенным учетом погрешностей преобразования режимной информации измерительными трансформаторами (ИТ) и собственно аппаратурой конкретных типов применяемых РЗ.

Взаимосвязь данных факторов очевидна, так как использование более полной и достоверной указанной информации может быть нивелировано грубым учетом погрешностей ее преобразования в средствах РЗ, а её неправильная работа, особенно при каскадных действиях, в свою очередь искажает эту информацию.

Стремлению решения обозначенной проблемы и ее различных аспектов посвящено множество работ отечественных и зарубежных учёных: Атабекова Г.И., Багинского Л.В., Вавина В.Н., Гуревича В.И., Дроздова А.Д., Дони Н.А., Засыпкина А.С., Иванова В.П., Казанского В.Е., Кнобеля Я., Кожина А.Н., Кутявина И.Д., Левиуша А.И., Лоханина Е.К., Лямеца Ю.Я., Наумова В.А., Нудельмана Г.С., Овчаренко Н.И., Подгорного Э.В., Рубинчика В.А., Сапира Е.Д., Торопова Г.Э., Фабриканта В.Л., Федосеева А.М., Шабада М.А., Шнеерсона Э.М., Якубсона Г.Г., Dewadas M., Dommel H.W., Perez S.G.A., Sachdev M.S., Vazquez E. и др. Однако, несмотря на это, данная проблема продолжает сохраняться.

Поскольку основным способом получения определяющей указанные факторы информации служит, в силу известных обстоятельств, преимущественно математическое моделирование, неизбежен вывод о несоответствии свойств и возможностей используемых для этих целей средств расчета режимов и процессов в ЭЭС, необходимым для решения данной проблемы. Из вышеизложенного следует, что минимизация влияния названных факторов на адекватность настройки РЗ и соответственно повышение надежности и эффективности её работы связана с проблемой развития и совершенствования средств моделирования реальных ЭЭС в целом, объединяющей совокупность сложных и актуальных задач, среди которых

достаточно полное и достоверное моделирование функционирования РЗ является одной из первоочередных. При этом, в связи с тем, что различным видам РЗ присущи специфические принципы и разнообразные средства их реализации, для каждого вида РЗ это отдельная научно-техническая задача.

Целью данной диссертационной работы является создание средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, позволяющих обоснованно выявлять причины неправильных действий и радикально минимизировать их влияние на функционирование конкретных реализаций ВЧДФЗ путем их адекватной настройки в соответствии с действительными условиями эксплуатации.

Для достижения обозначенной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Выявление и анализ причин существования факторов, определяющих неадекватную настройку ВЧДФЗ.

2. Определение и обоснование методики создания средств всережимного моделирования ВЧДФЗ.

3. Синтез на основе сформулированной методики всережимных математических моделей ВЧДФЗ, достаточно полно и достоверно воспроизводящих во всех ее значимых элементах и защите в целом преобразование процессов контролируемой режимной информации.

4. Разработка программных реализаций синтезированных всережимных моделей ВЧДФЗ различных исполнений, ориентированных на использование массивов мгновенных значений данных, полученных с помощью регистраторов аварийных событий (РАС) или соответствующих средств всережимного моделирования ЭЭС, а также на применение во всережимных моделирующих комплексах ЭЭС, и позволяющих осуществлять анализ причин неправильных действий ВЧДФЗ в конкретных условиях их функционирования, разрабатывать рекомендации по устранению этих причин или минимизации их влияния на работу анализируемых ВЧДФЗ.

5. Проведение экспериментальных исследований разработанных средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, подтверждающих наличие свойств и возможностей, необходимых для детализированного анализа преобразования режимной информации элементами и ВЧДФЗ различных исполнений в целом, а также для их адекватной настройки в конкретных условиях функционирования.

Идея работы

Основной идеей работы является создание средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, ориентированных на применение в соответствующих комплексах моделирования ЭЭС и на автономное применение с использованием массивов мгновенных значений данных, полученных с помощью регистраторов

аварийных событий в реальных ЭЭС или посредством их всережимного моделирования, для осуществления детализированного анализа преобразования процессов изменения режимной информации функциональными элементами и ВЧДФЗ различных исполнений в целом и ее адекватной реальным условиям функционирования настройки.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались фундаментальные законы, методы математического анализа и теоретических основ электротехники, в частности метод направленных графов и методы численного интегрирования дифференциальных уравнений; сертифицированные программные комплексы (MathCAD, Maple, MATLAB); специализированные методы и программно-технические средства всережимного моделирования реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС), разработанные в лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Национального исследовательского Томского политехнического университета; методы объектно-ориентированного программирования.

Достоверность результатов исследований подтверждается корректностью использования классических положений, фундаментальных законов электротехники и математического анализа, а также соответствием экспериментальных результатов, полученных с помощью разработанных средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, теоретически прогнозируемым данным и результатам тестового компьютерного моделирования.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Сформулирована и обоснована специализированная методика создания средств всережимного моделирования функционирования ВЧДФЗ с учетом преобразования режимной информации конкретными реализациями ВЧДФЗ и ИТ.

2. Синтезированы всережимные математические модели, достаточно полно и достоверно воспроизводящие процессы в значимых элементах и конкретных реализациях в целом электромеханических и микропроцессорных ВЧДФЗ и ИТ.

3. Разработаны программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени ВЧДФЗ электромеханического и микропроцессорного исполнения и защищаемых ими трехфазных линий электропередачи с распределенными и сосредоточенными параметрами, адаптированные к применению в ВМК РВ ЭЭС для осуществления детализированного анализа преобразования режимной информации функциональными элементами ВЧДФЗ и защитой в целом, обеспечивающего адекватную реальным условиям функционирования настройку.

Практическая значимость диссертационной работы

Свойства и возможности разработанных средств моделирования ВЧДФЗ позволяют надежно и эффективно решать следующие важнейшие практические задачи:

- выполнять детализированный анализ функционирования элементов и ВЧДФЗ различных исполнений в целом с использованием массивов мгновенных значений данных, полученных с помощью РАС в реальных ЭЭС или соответствующих средств моделирования ЭЭС, и выявлять причины неправильной работы ВЧДФЗ;
- разрабатывать мероприятия по устранению или минимизации выявленных причин;
- адекватно настраивать ВЧДФЗ различного исполнения для конкретных условий их функционирования в ЭЭС путём интегрирования разработанных программ моделирования ВЧДФЗ в средства всережимного моделирования ЭЭС.

Реализация результатов работы

Разработанные средства моделирования ВЧДФЗ реализованы в виде специализированной программы, предназначенной для автономного использования на персональном компьютере, а также в виде программного кода, интегрированного в специализированные процессоры трехфазных линий электропередачи программно-технических средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС. Применение созданных средств позволяет надежно и эффективно решать актуальные задачи исследования и настройки ВЧДФЗ в проектных и научно-исследовательских организациях электроэнергетики, службах РЗ ЭЭС, а также в ВУЗах электроэнергетического профиля.

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

1. «Всережимное моделирование в реальном времени функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики электроэнергетических систем для исследования эффективности транспортировки и распределения электроэнергии». ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы». Госконтракт № ГК 14.740.11.0526, 10.12.2010 г. – 14.10.2011 г.

2. «Разработка методов и средств управления интеллектуальными энергосистемами на Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС)». ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы». Госконтракт № ГК 16.513.11.3123, 13.10.2011 г. – 06.09.2012 г.

3. «Информационно-телекоммуникационная моделирующая система реального времени интеллектуальных энергосистем». ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы». Госконтракт № ГК 07.514.11.4075, 13.10.2011 г. – 06.09.2012 г.

4. «Разработка технических предложений по применению Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) «Томск» в составе активно-адаптивной сети МЭС Сибири и разработка моделируемой схемы режимов работы электрической сети напряжением 220 кВ и выше ОЭС Сибири». Хоздоговор между ОАО «НТЦ Электроэнергетики» и ТПУ № 7-584/10у, 01.10.2010 г. – 30.04.2011 г.

5. «Разработка проекта всережимной трехфазной модели энергокластера Эльгауголь и создание программно-технической базы для решения задач адаптивной автоматической системы оптимального управления и регулирования напряжения и реактивной мощности (ААСОУ)». Хоздоговор между ЗАО «НОВИНТЕХ» и ТПУ № 2-496/2011у, 03.10.2011 г. – 30.04.2012 г.

Кроме этого, результаты работы используются в учебном процессе по дисциплине «Релейная защита и автоматика энергосистем» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета и рекомендованы для применения в ОАО «Томские магистральные сети» (подтверждено актами внедрения).

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа существования причин неправильных действий ВЧДФЗ в ЭЭС и обоснование направления решения задач их выявления и адекватной настройки ВЧДФЗ различных исполнений в конкретных условиях функционирования.

2. Специализированная методика создания средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, обеспечивающих решение задач определения причин неправильных действий ВЧДФЗ различных исполнений и их адекватной настройки для конкретных условий функционирования.

3. Синтезированные всережимные математические модели ВЧДФЗ электромеханического и микропроцессорного исполнения, достаточно полно и достоверно воспроизводящие в них и ИТ преобразование процессов изменения контролируемой информации при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ЭЭС и соответственно защищаемых объектов.

4. Разработанные программные реализации всережимных моделей ВЧДФЗ различных исполнений, ориентированные на автономное применение с использованием массивов мгновенных значений данных, полученных с помощью РАС или средств всережимного моделирования ЭЭС, а также на применение в

средствах всережимного моделирования ЭЭС для анализа причин неправильных действий ВЧДФЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватной настройки.

5. Результаты экспериментальных исследований созданных средств всережимного моделирования ВЧДФЗ в ЭЭС, подтверждающие наличие свойств и возможностей, необходимых для детализированного анализа преобразования режимной информации элементами и конкретной реализацией ВЧДФЗ в целом, а также для их адекватной настройки на основе результатов проведенного анализа.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на региональных, всероссийских и международных конференциях, семинарах и выставках:

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

2. Шестнадцатая всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: Экология, Надежность, Безопасность», ТПУ, г. Томск, 2010г.

3. Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», ТПУ, г. Томск, 2011г.

4. Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», УрФУ (г. Екатеринбург, 2010 г.), СамГТУ (г. Самара, 2011г.).

5. Всероссийская молодежная конференция «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики», ТПУ, г. Томск, 2012 г.

6. Научно-практическая конференция «Актуальные вопросы противоаварийного управления ОЭС Сибири», ОДУ Сибири, г. Кемерово, 2012г.

7. 14-ый международный форум «Высокие технологии XXI века», г. Москва, 24-27 апреля 2013г. (разработка отмечена медалью).

8. Московский международный энергетический форум «ТЭК-2013 в XXI веке», г. Москва, 8-11 апреля 2013г. (разработка отмечена медалью).

9. Международная выставка изобретений, г. Женева, Швейцария, 10-14 апреля 2013г. (разработка отмечена золотой медалью).

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 25 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ и 2 патента РФ на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 112 наименований и 4 приложений. Объем

основной части диссертации – 166 страниц, в том числе 150 рисунков, 5 таблиц. Объем приложений к диссертации – 39 страниц, в том числе 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена проблема неправильных действий РЗ и обоснована актуальность создания средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, определены факторы, влияющие на адекватность настройки устройств РЗ, в том числе ВЧДФЗ, реальным условиям функционирования и, как следствие, на правильность их работы: 1) использование при проектировании и эксплуатации РЗ, в частности ВЧДФЗ, недостаточно полной и достоверной информации о возможных процессах в ЭЭС и соответственно в защищаемом объекте; 2) чрезмерно приближенный и обобщенный учет погрешностей, формируемых ИТ и собственно аппаратурой используемых типов защиты. Поскольку информация о возможных процессах в ЭЭС, соответственно защищаемых объектах и ее преобразование в конкретных реализациях РЗ и ИТ, может быть получена только путем моделирования, очевиден вывод об отсутствии у применяемых для расчета режимов и процессов в ЭЭС средств свойств и возможностей, необходимых для достаточно полного и достоверного воспроизведения указанных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы оборудования и ЭЭС в целом. В связи с этим целью работы является выявление причин, препятствующих их реализации, и разработка средств всережимного моделирования ВЧДФЗ различных исполнений, обеспечивающих такие свойства и возможности и позволяющих осуществлять детализированный анализ преобразования режимной информации функциональными элементами ВЧДФЗ, защитой в целом и ее адекватную реальным условиям функционирования настройку.

В первой главе представлены результаты исследования проблемы адекватной настройки ВЧДФЗ линий электропередачи, определяемой ранее указанными факторами. Ввиду обозначенных во введении обстоятельств данная проблема может быть решена только на основе достаточно полного и достоверного моделирования ЭЭС, включая РЗ, которое обеспечивается при выполнении следующих условий:

- использование для всех значимых элементов и ЭЭС в целом, включая РЗ, математических моделей, полно и достоверно описывающих реальный непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов в этих элементах при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы;
- решение с гарантированной точностью на неограниченном интервале совокупной модели реальных ЭЭС.

Однако сформированная с применением указанных моделей совокупная математическая модель реальных ЭЭС, даже с учетом допустимого частичного

эквивалентирования, неизбежно содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений высокого порядка. В используемых для расчета режимов и процессов в ЭЭС средствах единственным способом решения такой системы дифференциальных уравнений является численное их интегрирование, при этом, согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, такая математическая модель ЭЭС не может быть удовлетворительно решена, поскольку не соответствует условиям применимости этих методов. Улучшение обусловленности может быть достигнуто только за счет уменьшения объема моделируемой ЭЭС, упрощения математических моделей оборудования или ограничения интервала решения, что в свою очередь приводит к потере достоверности воспроизводимых процессов в ЭЭС. Кроме того, при данном подходе имеет место фундаментальная проблема определения действительной ошибки решения. Все это в совокупности исключает возможность использования подобного рода средств для решения указанной проблемы. Именно поэтому для определения уставок РЗ в настоящее время используются специализированные программы расчета установившихся токов КЗ (АРМ СРЗА, ТКЗ-3000) и ориентированные на их использование методики, в соответствии с которыми при расчете уставок РЗ учет погрешностей преобразования первичной режимной информации о процессах в ЭЭС конкретными реализациями защиты и ИТ осуществляется весьма упрощенно – посредством различных обобщенных отстроечных коэффициентов, что в совокупности приводит к неадекватной реальным условиям функционирования настройке РЗ.

Для обоснования причин существования обозначенной проблемы адекватной настройки РЗ выполнен анализ наиболее известных и распространенных в отечественной энергетике в настоящее время средств математического моделирования ЭЭС (МУСТАНГ, EUROSTAG и др.), подтверждающий наличие у них ранее описанных упрощений и ограничений и позволяющий сделать вывод о неприемлемости их использования для решения указанной проблемы.

В связи с распространением в последнее время регистраторов аварийных событий и появлением удовлетворяющих ранее обозначенные условия средств всережимного моделирования реальных ЭЭС, таких как разработанный в Томском политехническом университете ВМК РВ ЭЭС, задача детализированного моделирования РЗ становится актуальной и практически реализуемой. При этом, поскольку различным видам РЗ присущи специфические принципы и разнообразные средства их реализации, то данная научно-техническая задача применительно к каждому виду РЗ решается отдельно. В данной диссертационной работе эта задача решается применительно к одной из наиболее распространенных и ответственных защит линий электропередачи высокого напряжения – ВЧДФЗ.

Во второй главе сформулирована и обоснована концепция всережимного моделирования ВЧДФЗ, предусматривающая совокупность мероприятий, реализация которых позволяет повысить адекватность настройки ВЧДФЗ конкретным условиям ее функционирования за счет определения действительных погрешностей преобразования режимной информации измерительными трансформаторами и конкретными реализациями защит и задания на этой основе уставок ВЧДФЗ, исключив при этом необходимость применения обобщенных приблизительных коэффициентов. Для осуществления этой концепции сформирована методика создания средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, регламентирующая ее реализацию:

- Анализ принципиальных схем ВЧДФЗ конкретных исполнений, на основе которого определяются элементы схемы, осуществляющие непрерывное преобразование сигналов и способные формировать значимые погрешности.
- Составление на основе результатов анализа п.1 адекватных схем замещения учитываемых функциональных блоков моделируемой ВЧДФЗ и расчет параметров их элементов.
- Получение ПФ функциональных блоков устройства ВЧДФЗ, с учетом их взаимосвязи, осуществляемой определением соответствующих эквивалентных сопротивлений нагрузки этих блоков, и формирование дифференциальных уравнений, определяющих эти ПФ.
- Предварительные тестовые исследования полученных математических моделей с помощью программ MathCAD и MATLAB Simulink для оценки амплитудных и фазовых погрешностей функциональных блоков моделируемой ВЧДФЗ при конкретных частотах преобразуемых сигналов;
- Формализация разработанных математических моделей ВЧДФЗ в виде программных кодов и последующая их реализация в специализированной программе автономного использования и средствах всережимного моделирования ЭЭС.
- Экспериментальное исследование разработанных средств всережимного моделирования ВЧДФЗ, включающее испытание моделей в широком спектре нормальных, аварийных и послеаварийных режимов работы защищаемой ЛЭП.

В третьей главе представлены результаты синтеза универсальных всережимных математических моделей электромеханических и микропроцессорных ВЧДФЗ. Основным результирующим фрагмент такого рода модели наиболее распространенной в отечественной электроэнергетике электромеханической ВЧДФЗ – ДФЗ-201 (рисунок 2), полученный согласно методике вследствие анализа принципиальной схемы, составления адекватной схемы замещения и др., иллюстрирует приведенная система дифференциальных уравнений математической модели блока реагирующих органов:

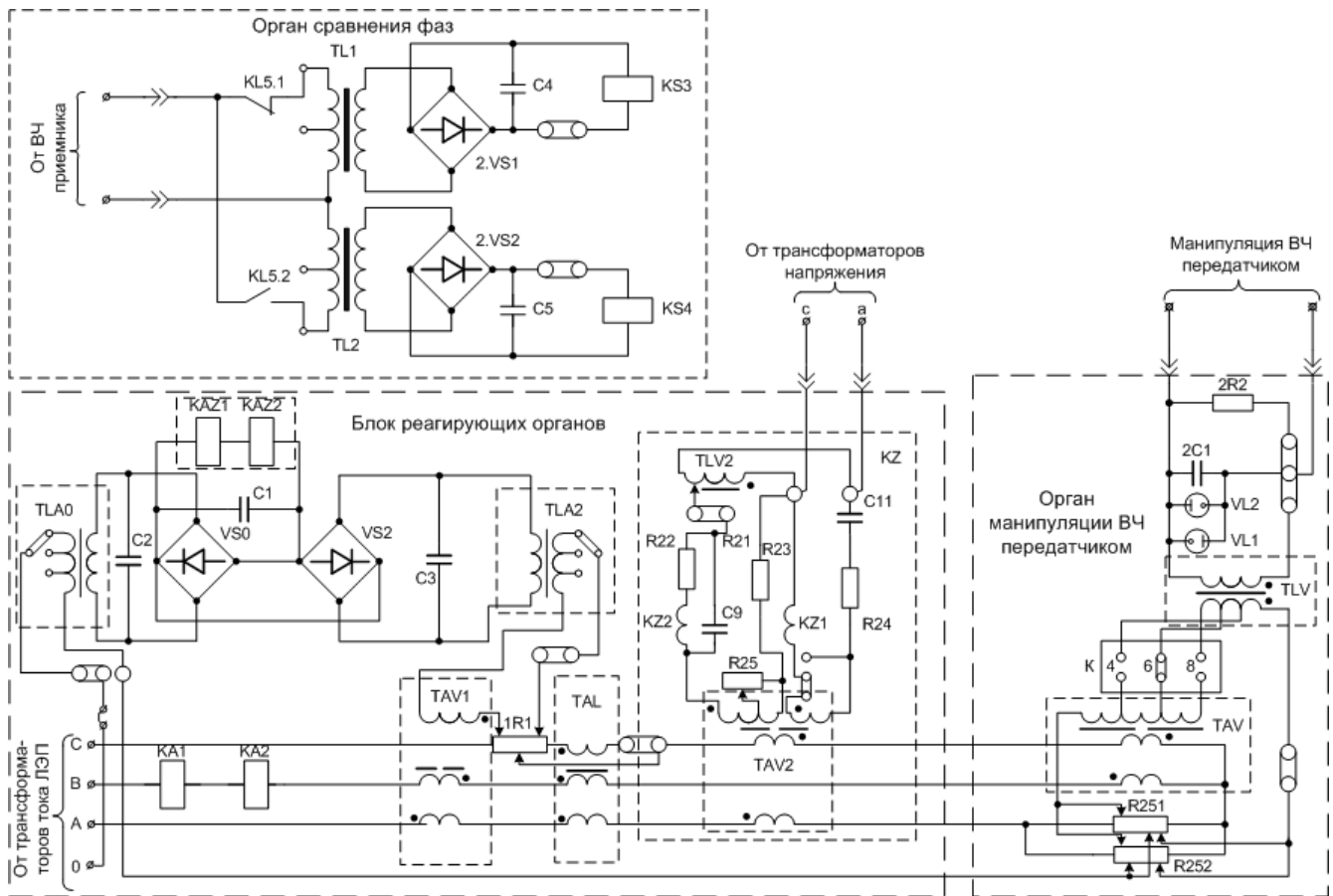


Рисунок 1 – Принципиальная схема ДФЗ-201: KA1, KA2 – реле тока типа РТ-40; KZ1, KZ2 – обмотки индукционного реле сопротивления KZ; TAV, TAV1, TAV2 – трансреакторы; TAL – промежуточный трансформатор тока; TLV – промежуточный трансформатор напряжения; TLV2 – промежуточный автотрансформатор; TLA0, TLA2 – промежуточные трансформаторы тока нулевой и обратной последовательностей; TL1, TL2 – промежуточные трансформаторы; VS0, VS2, 2.VS1, 2.VS2 – выпрямительные мосты; KAZ1, KAZ2, KS1, KS2 – поляризованные реле; VL1, VL2 – газонаполненные стабилитроны; 1R1, R25, R251, R252 – регулируемые резисторы; R21-R24, 2R2 – нерегулируемые резисторы; C1-C5, C9, C11, 2C1 – конденсаторы.

$$\begin{aligned}
 & \frac{d^3(i_{B.BX.TAV1}(t) \cdot A_{1TAV1})}{dt^3} + \frac{d^2(i_{B.BX.TAV1}(t) \cdot B_{1TAV1} - u_{BЫX.TAV1}(t) \cdot B_{2TAV1})}{dt^2} + \\
 & + \frac{d(i_{B.BX.TAV1}(t) \cdot C_{1TAV1} - u_{BЫX.TAV1}(t) \cdot C_{2TAV1})}{dt} - u_{BЫX.TAV1}(t) \cdot D_{2TAV1} = 0 \\
 & \frac{d^3(i_{A.BX.TAV1}(t) \cdot A_{1TAV1})}{dt^3} + \frac{d^2(i_{A.BX.TAV1}(t) \cdot B_{1TAV1} - u_{BЫX.TAV1}(t) \cdot B_{2TAV1})}{dt^2} + \\
 & + \frac{d(i_{A.BX.TAV1}(t) \cdot C_{1TAV1} - u_{BЫX.TAV1}(t) \cdot C_{2TAV1})}{dt} - u_{BЫX.TAV1}(t) \cdot D_{2TAV1} = 0
 \end{aligned}$$

$$\frac{d^2(u_{BBIX.TAL}(t) \cdot A_{2TAL} - i_{B.BX.TAL}(t) \cdot A_{1TAL})}{dt^2} + \frac{d(u_{BBIX.TAL}(t) \cdot B_{2TAL} - i_{B.BX.TAL}(t) \cdot B_{1TAL})}{dt} +$$

$$+ u_{BBIX.TAL}(t) \cdot C_{2TAL} = 0$$

$$\frac{d^2(u_{BBIX.TAL}(t) \cdot A_{2TAL} - i_{A.BX.TAL}(t) \cdot A_{1TAL})}{dt^2} + \frac{d(u_{BBIX.TAL}(t) \cdot B_{2TAL} - i_{A.BX.TAL}(t) \cdot B_{1TAL})}{dt} +$$

$$+ u_{BBIX.TAL}(t) \cdot C_{2TAL} = 0$$

$$\frac{d^5(i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot A_{2TLA2})}{dt^5} + \frac{d^4(i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot B_{2TLA2} - u_{BX.TLA2}(t) \cdot B_{1TLA2})}{dt^4} +$$

$$+ \frac{d^3(i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot C_{2TLA2} - u_{BX.TLA2}(t) \cdot C_{1TLA2})}{dt^3} + \frac{d^2(i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot D_{2TLA2} - u_{BX.TLA2}(t) \cdot D_{1TLA2})}{dt^2} +$$

$$+ \frac{d(i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot E_{2TLA2} - u_{BX.TLA2}(t) \cdot E_{1TLA2})}{dt} + i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot F_{2TLA2} = 0$$

$$+ \frac{d^3(u_{KAZ2}(t) \cdot A_{2KAZ2})}{dt^3} + \frac{d^2(u_{KAZ}(t) \cdot B_{2KAZ2} - i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot B_{1KAZ2})}{dt^2} +$$

$$+ \frac{d(u_{KAZ2}(t) \cdot C_{2KAZ2} - i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot C_{1KAZ2})}{dt} + u_{KAZ2}(t) \cdot D_{2KAZ2} - i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot D_{1KAZ2} = 0$$

$$+ \frac{d^3(u_{KAZ3}(t) \cdot A_{2KAZ2})}{dt^3} + \frac{d^2(u_{KAZ}(t) \cdot B_{2KAZ2} - i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot B_{13KAZ2})}{dt^2} +$$

$$+ \frac{d(u_{KAZ3}(t) \cdot C_{2KAZ2} - i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot C_{13KAZ2})}{dt} + u_{KAZ3}(t) \cdot D_{2KAZ2} - i_{BBIX.TLA2}(t) \cdot D_{13KAZ2} = 0$$

$$\frac{d^4(i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot A_{2TLA0} - i_{BX.TLA0}(t) \cdot A_{1TLA0})}{dt^4} + \frac{d^3(i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot B_{2TLA0} - i_{BX.TLA0}(t) \cdot B_{1TLA0})}{dt^3} +$$

$$+ \frac{d^2(i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot C_{2TLA0} - i_{BX.TLA0}(t) \cdot C_{1TLA0})}{dt^2} +$$

$$+ \frac{d(i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot D_{2TLA0} - i_{BX.TLA0}(t) \cdot D_{1TLA0})}{dt} + i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot E_{2TLA0} = 0$$

$$\frac{d^3(u_{KAZ2}(t) \cdot A_{2KAZ0})}{dt^3} + \frac{d^2(u_{KAZ2}(t) \cdot B_{2KAZ0} - i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot B_{1KAZ0})}{dt^2} +$$

$$+ \frac{d(u_{KAZ2}(t) \cdot C_{2KAZ0} - i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot C_{1KAZ0})}{dt} + u_{KAZ2}(t) \cdot D_{2KAZ0} - i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot D_{1KAZ0} = 0$$

$$\frac{d^3(u_{KAZ3}(t) \cdot A_{2KAZ0})}{dt^3} + \frac{d^2(u_{KAZ3}(t) \cdot B_{2KAZ0} - i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot B_{13KAZ0})}{dt^2} +$$

$$+ \frac{d(u_{KAZ3}(t) \cdot C_{2KAZ0} - i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot C_{13KAZ0})}{dt} + u_{KAZ3}(t) \cdot D_{2KAZ0} - i_{BBIX.TLA0}(t) \cdot D_{13KAZ0} = 0$$

$$\frac{d(i_{B.BBIX.TA2}(t) \cdot A_{2TA2} - i_{B.BX.TA2}(t) \cdot A_{1TA2})}{dt} + i_{B.BBIX.TA2}(t) \cdot B_{2TA2} - i_{B.BX.TA2}(t) \cdot B_{1TA2} = 0$$

$$\frac{d^2(i_{C.BBIX.TA3}(t) \cdot A_{2TA3} - i_{C.BX.TA3}(t) \cdot A_{1TA3})}{dt^2} + \frac{d(i_{C.BBIX.TA3}(t) \cdot B_{2TA3} - i_{C.BX.TA3}(t) \cdot B_{1TA3})}{dt} +$$

$$+ i_{C.BBIX.TA3}(t) \cdot C_{2TA3} - i_{C.BX.TA3}(t) \cdot C_{1TA3} = 0$$

где $A_{1TAV1} = 9 \cdot L_{1TLA2} \cdot L_{2TAL} \cdot L_{\mu TAV1}$ и аналогичным образом полученные B_{1TAV1} , C_{1TAV1} и др. – введенные для краткой записи обозначения, представленные в диссертации.

Нелинейность намагничивания сердечника ИТ и других трансформаторов в схемах ВЧДФЗ реализована табличным заданием $L_{\mu} = f(i_{\mu})$, определяемой кривой $B = f(H)$.

Полученная система дифференциальных уравнений и аналогичное математическое описание остальных функциональных элементов защиты и ИТ в совокупности образуют всережимную математическую модель ДФЗ-201.

Представленные в диссертации результаты тестового компьютерного моделирования математических моделей функциональных блоков и ВЧДФЗ в целом подтвердили соответствие полученных характеристик теоретическим.

Четвертая глава содержит результаты разработки специализированной программы реализации синтезированных моделей ВЧДФЗ (DPPmodels), структура и функциональная блок-схема которой представлены на рисунке 2. Ввиду невысокой сложности систем дифференциальных уравнений синтезированных моделей ВЧДФЗ для их решения оказался приемлемым малозатратный по вычислительным ресурсам метод Эйлера.

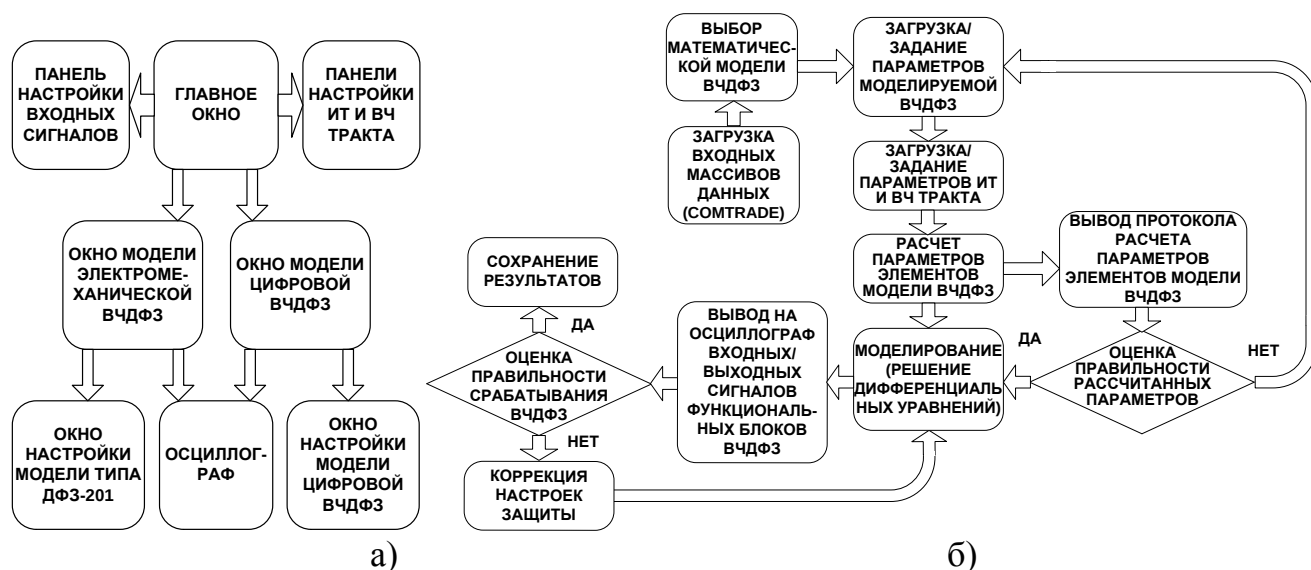


Рисунок 2 – Программа DPPmodels: а) структура программы; б) функциональная блок-схема

Главное окно программы DPPmodels, представленное на примере электромеханической модели ВЧДФЗ (рисунок 3) содержит панель управления, обеспечивающую следующие пользовательские возможности: навигация по вкладкам; вызов панели задания входных сигналов; активизация панелей изменения параметров измерительных трансформаторов, ВЧ тракта, элементов ВЧДФЗ; запрос протокола с рассчитанными параметрами всех элементов модели; вызов осциллографа; запуск моделирования.

Предусмотрено сохранение файла настроек в формате текстового документа.

На рисунках 4÷5 приведены фрагменты результатов исследования и оценки настроек ДФЗ-201, а на рисунках 6÷8 – микропроцессорной ВЧДФЗ, выполненных с помощью программы DPPmodels и ВМК РВ ЭЭС, на котором в моделируемой ЭЭС защищаемым объектом принята одна из ВЛ-220 кВ. Исследования проведены при

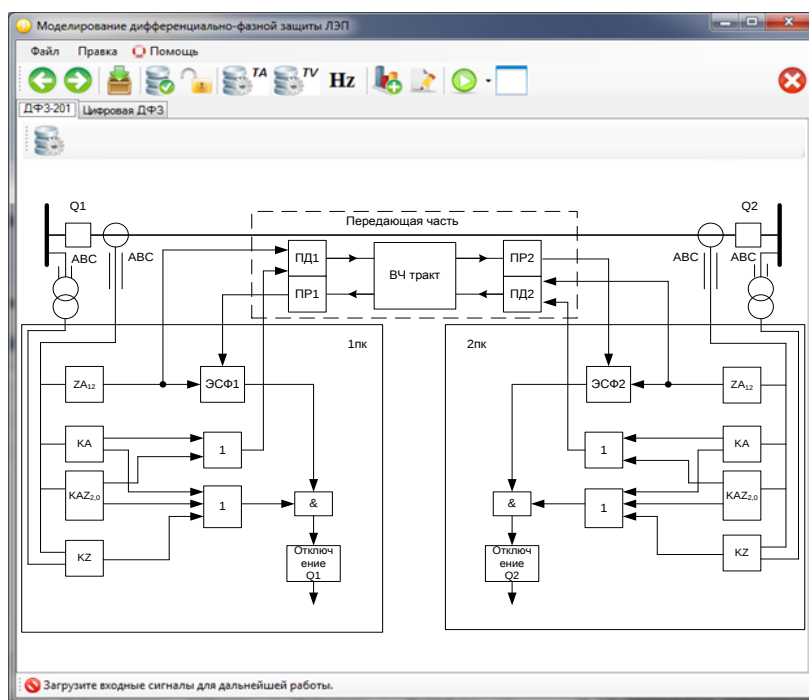


Рисунок 3 – Главное программное окно модели электромеханической ВЧДФЗ

внешних и внутренних одно-, двух- и трехфазных КЗ, а также в режиме синхронных качаний и реверса мощности.

Фрагменты результатов исследования погрешностей преобразования режимной информации функциональными элементами ДФЗ-201 и ИТ при однофазном КЗ фазы А приведены на рисунках 4 и 5 и сведены в таблицу.

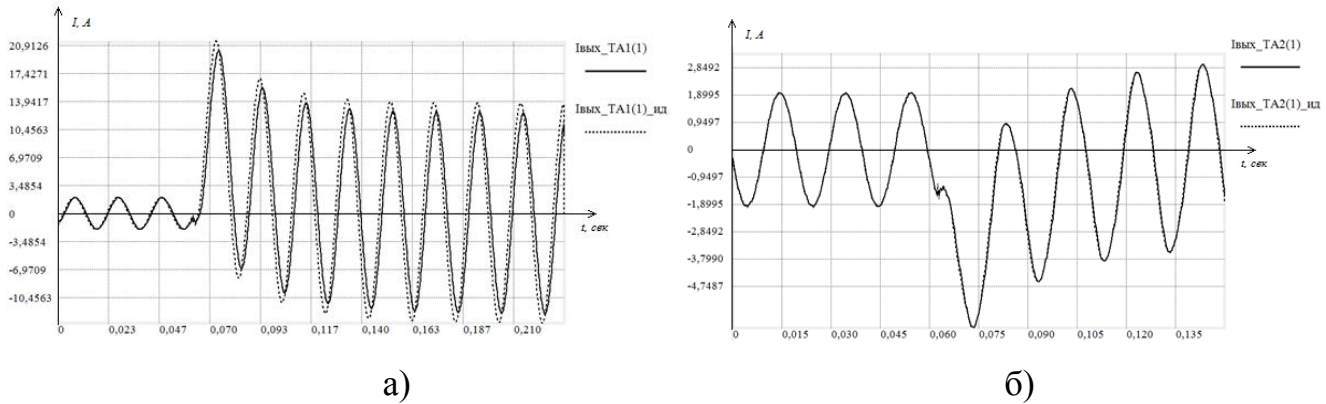


Рисунок 4 – Осциллограммы вторичных токов ИТ фаз А (а) и В (б)

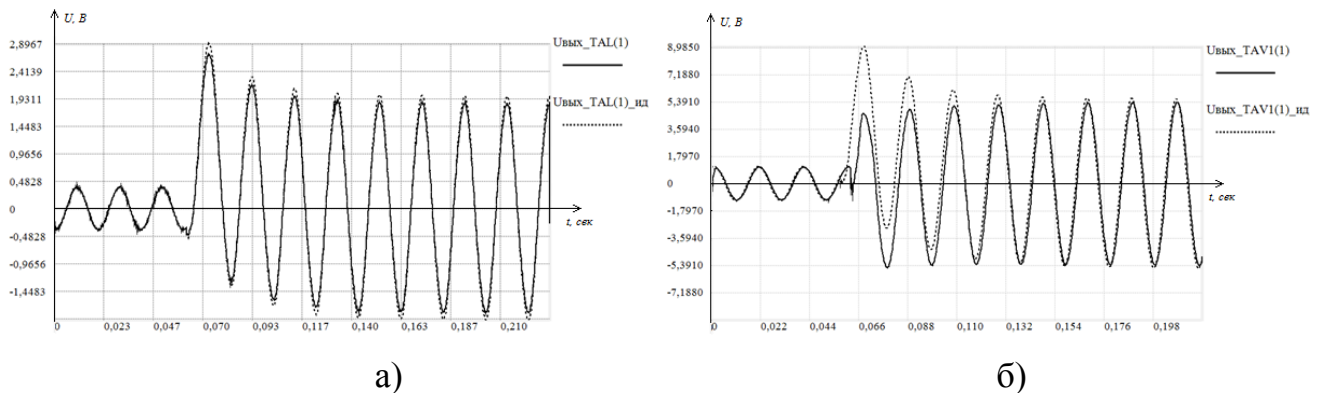


Рисунок 5 – Осциллограммы процессов преобразования режимной информации трансформатором TAL (а) и трансреактором TAV1 (б)

Элемент	Амплитудная погрешность, (%)	Фазовая погрешность, % (град.)
ИТ ТА1	8,2	6,5 (23,4)
ИТ ТА2	0,2	1,1 (3,8)
ИТ ТА3	1,8	3,5 (12,6)
TAL	6	0,1 (0,4)
TAV1 (установившееся значение тока КЗ)	5,2	2,3 (8,1)
TAV1 (начальный момент КЗ)	48	9,4 (33,7)
TLA2 (установившееся значение тока КЗ)	5,9	5,7 (20,5)
TLA2 (начальный момент КЗ)	2,6	1,1 (4)
Результирующее отклонение сигнала на выходе TLA2 (установившееся значение тока КЗ)	21,5	2,3 (8,3)
Результирующее отклонение сигнала на выходе TLA2 (начальный момент КЗ)	50,4	6,1 (21,8)
Результирующее отклонение сигнала на выходе TLA0 (начальный момент КЗ)	7,7	14,1 (50,8)

Для иллюстрации различных возможностей DPPmodels результаты аналогичных исследований микропроцессорной ВЧДФЗ (рисунки 6÷8) представлены осциллограммами не мгновенных, а действующих значений.

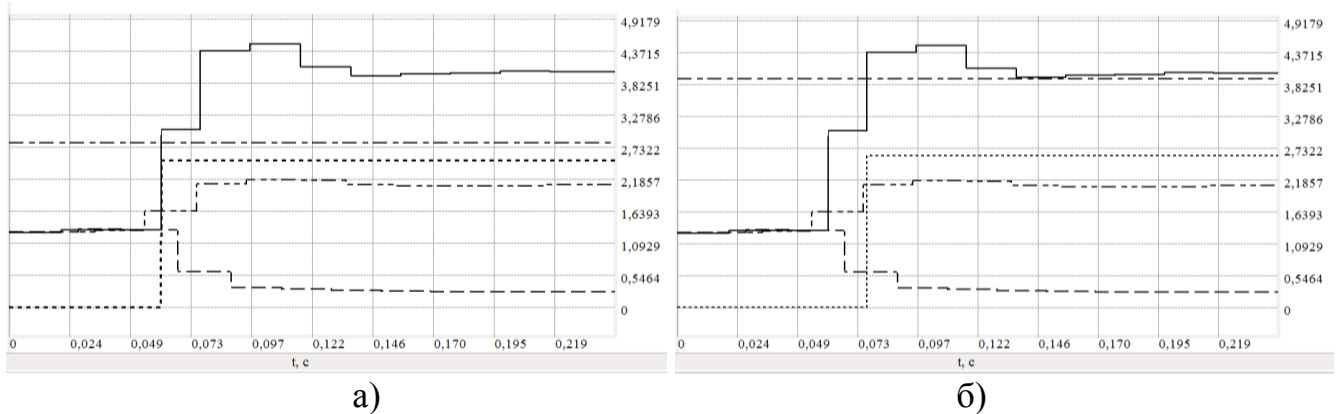


Рисунок 6 – Осциллограммы действующих значений фазных токов, уставки и логического сигнала о срабатывании/несрабатывании пускового (а) и отключающего (б) токовых органов 1-го полукомплекта защиты

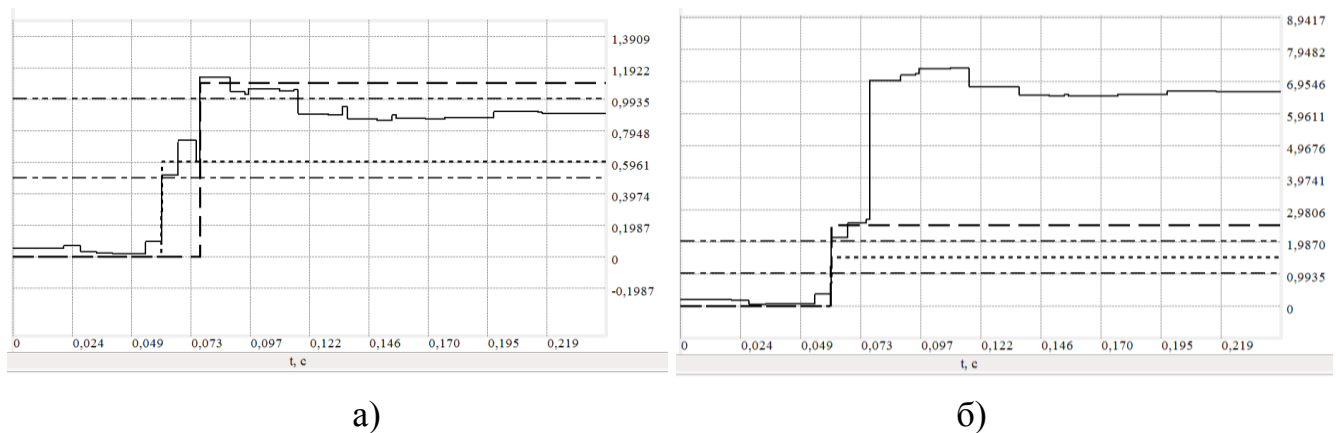


Рисунок 7 – Осциллограммы действующего значения тока обратной (а) и суммы токов обратной и нулевой (б) последовательностей, уставок и логических сигналов о срабатывании/несрабатывании пускового и отключающего органов 1-го полукомплекта защиты

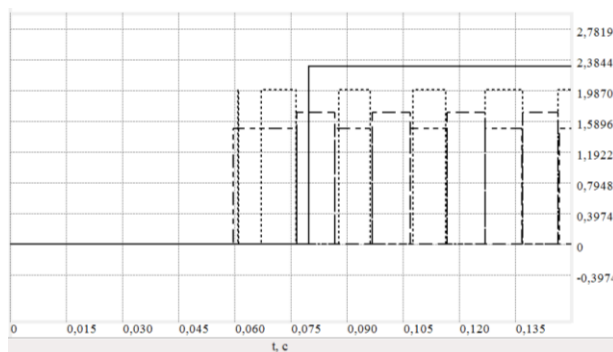
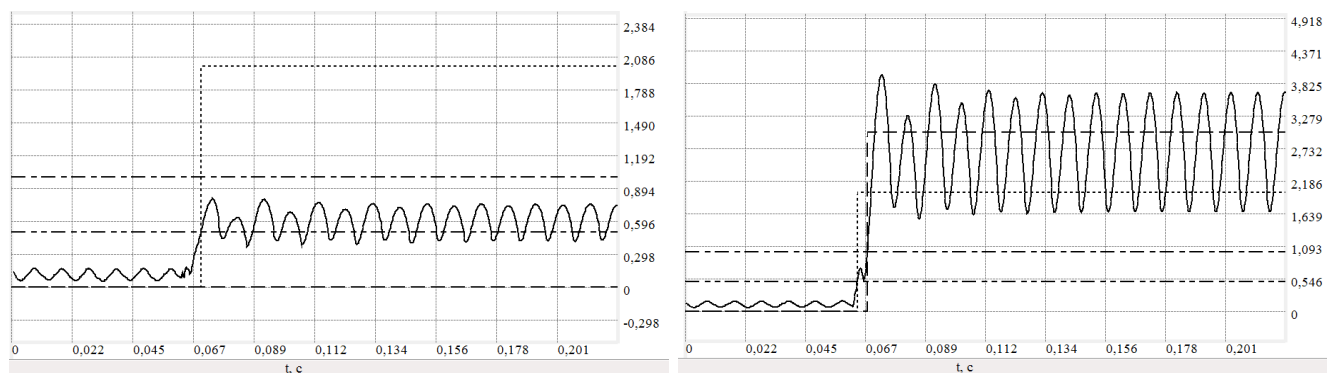


Рисунок 8 – Осциллограммы логических сигналов передатчика и входа приемника, на входе и выходе органа сравнения фаз 1-го полукомплекта защиты

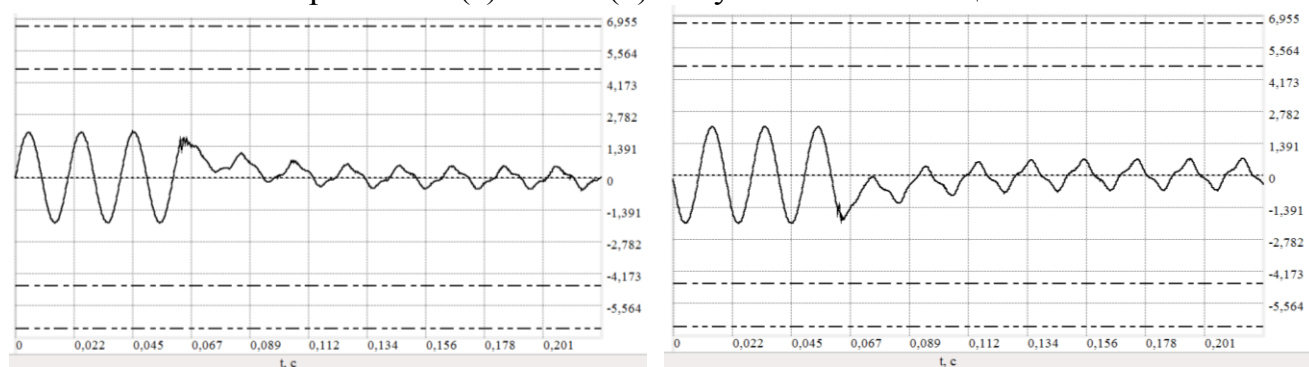
Эксперимент однофазного КЗ в зоне действия защиты наглядно демонстрирует значение фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) в пусковом органе защиты. Факт несрабатывания защиты при отсутствии ФТНП отражают рисунки 9÷11.



а)

б)

Рисунок 9 – Осциллограммы тока реле, уставок по току обратной последовательности и логического сигнала о срабатывании/несрабатывании пускового и отключающего реле 1-го (а) и 2-го (б) полукомплектов защиты



а)

б)

Рисунок 10 – Осциллограммы вторичного тока ИТТ фазы В, уставок и логического сигнала о срабатывании/несрабатывании пускового и отключающего токовых реле 1-го (а) и 2-го (б) полукомплектов защиты

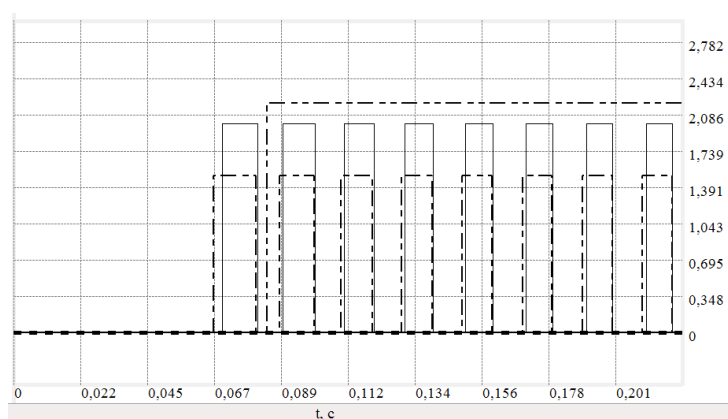


Рисунок 11 – Осциллограммы логических сигналов передатчика и входа приемника, на входе и выходе органа сравнения фаз 1-го полукомплекта защиты

В рассмотренном фрагменте экспериментальных исследований сформировавшиеся различные погрешности различных элементов ВЧДФЗ, достигающие на разных стадиях протекания процессов 50%, определяют результирующую погрешность величины уставки порядка 25-30%, что в данных конкретных условиях функционирования создает значительную вероятность неправильной работы

ВЧДФЗ. Из полученных осциллограмм также следует, что при отсутствии ФТНП

чувствительности отключающего реле KAZ2 1-го полукомплекта защиты, питаемого только током обратной последовательности, недостаточно для его срабатывания. Кроме того, поскольку реле тока КА1 и КА2 установлены во вторичных цепях ИТТ фазы В, то при повреждении фазы А их срабатывания также не происходит. В результате, не смотря на запуск ВЧ передатчика и правильное определение места повреждения, 1-й полукомплект не срабатывает. Экспериментальные исследования разработанных средств моделирования ВЧДФЗ электромеханического и микропроцессорного исполнения, проведенные в широком спектре режимов и процессов, включающем: всевозможные одно-, двух-, трехфазные внутренние и внешние КЗ защищаемой линии, синхронные качания, реверс мощности и др., подтверждают наличие свойств и возможностей, позволяющих определять и анализировать погрешности ИТ, конкретных функциональных блоков ВЧДФЗ и защиты в целом на различных стадиях протекания процессов и использования полученной информации для адекватной реальным условиям функционирования настройки ВЧДФЗ.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. На основе анализа существующих методик и средств расчета настроек ВЧДФЗ, включая программные и программно-аппаратные комплексы расчета режимов и процессов в ЭЭС, выявлены и обоснованы причины существования факторов их неадекватной настройки и, соответственно, возможных неправильных действий, главными из которых являются: 1) использование при проектировании и эксплуатации средств РЗ и ПА, в том числе ВЧДФЗ, недостаточно полной и достоверной информации о возможных процессах в ЭЭС и, соответственно, защищаемых объектах; 2) чрезмерно приближенный и обобщенный учет погрешностей, формируемых ИТ и собственно аппаратурой используемых типов защиты.

2. Основываясь на результатах этого анализа предложена концепция всережимного моделирования ВЧДФЗ, предусматривающая совокупность мероприятий, реализация которых позволяет повысить адекватность настройки ВЧДФЗ конкретным условиям ее функционирования за счет определения реальных значений погрешностей ИТ, конкретных реализаций защит и использования этой информации при расчете уставок ВЧДФЗ, исключая необходимость применения для их коррекции обобщенных приблизительных коэффициентов.

3. В соответствии с предложенной концепцией сформулирована методика создания средств всережимного математического моделирования ВЧДФЗ различных исполнений, предусматривающая детальный анализ принципиальных схем конкретных реализаций ВЧДФЗ, составление на основе этого анализа адекватных схем замещения и соответствующих всережимных математических моделей,

достоверно описывающих процессы во всех значимых элементах и ВЧДФЗ в целом, включая ИТ, а также программную реализацию этих моделей, позволяющую осуществлять адекватную конкретным условиям функционирования их настройку.

4. Согласно разработанной методике синтезированы математические модели для ВЧДФЗ электромеханического и микропроцессорного исполнения, достаточно полно и достоверно воспроизводящие процессы в конкретных реализациях защит и ИТ. Результатами тестового компьютерного моделирования разработанных моделей ВЧДФЗ подтверждено соответствие характеристик конкретных элементов, функциональных блоков и ВЧДФЗ в целом теоретическим.

5. Разработаны программные средства реализации математических моделей ВЧДФЗ – DPPmodels, позволяющие выявлять погрешности преобразования режимной информации функциональными элементами ВЧДФЗ и ИТ, анализировать причины неправильной работы ВЧДФЗ различного исполнения и осуществлять адекватную настройку для конкретных условий их функционирования в ЭЭС.

6. Экспериментальными исследованиями разработанных средств моделирования ВЧДФЗ электромеханического и микропроцессорного исполнения в широком спектре режимов подтверждено существенное влияние погрешностей ИТ, конкретных функциональных блоков и ВЧДФЗ в целом на правильность её функционирования, соответственно актуальность учета действительных, а не обобщенных погрешностей для их адекватной настройки.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают эффективность применения разработанных средств для повышения адекватности настройки ВЧДФЗ при их проектировании и эксплуатации, а совокупность результатов диссертационной работы свидетельствует о достижении поставленной цели.

В приложениях представлены методики расчета уставок высокочастотной дифференциально-фазной защиты различных исполнений, основные фрагменты программного кода DPPmodels, параметры элементов ВЧДФЗ, а также акты внедрения результатов работы.

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

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Сулайманов А.О. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем / А.О. Сулайманов, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан // Электричество, 2012. – №6. – С. 17–20.

2. Рубан Н.Ю. Средства моделирования для адекватной настройки дифференциально-фазной высокочастотной защиты линий электропередачи / Н.Ю. Рубан, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов // Современные проблемы науки и образования,

2014. – № 3 [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.science-education.ru/117-13213>, свободный, 23.05.2014.

3. Прохоров А.В. Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем [Текст] / А.В. Прохоров, Р.А. Уфа, А.С. Васильев, Н.Ю. Рубан // Известия ТПУ. - 2014. - № 4. - С. 123-133

Материалы трудов конференций:

1. Рубан Н.Ю. Математическое моделирование измерительной части дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ-201/ Н.Ю. Рубан, И.С. Гордиенко // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, Часть 2 - Новосибирск, 3-5 декабря 2010. - Новосибирск: НГТУ, 2010. – с. 113 – 115.

2. Рубан Н.Ю. Всережимное математическое моделирование релейной защиты типа ДФЗ-201/ Н.Ю. Рубан, А.Ф. Прутик, М.В. Андреев // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XVI Всероссийской научно-технической конференции, Томск, 8-10 Декабря 2010.-Томск: ТПУ, 2010.-с. 37-39.

3. Рубан Н.Ю. Анализ методов и средств моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики / Н.Ю. Рубан, М.В. Андреев, А.Ф. Прутик // 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. 51 – 53.

4. Рубан Н.Ю. Повышение адекватности моделирования релейной защиты на примере дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-201 / Н.Ю. Рубан, М.В. Андреев, И.С. Гордиенко // Тинчуринские чтения: материалы докладов VI-й Международной молодежной научной конференции, Казань, 27-29 Апреля 2011. - Казань: Изд-во КГЭУ, 2011 - Т. 1 - С. 93-94

5. Рубан Н.Ю. Математическая модель дифференциально-фазной высокочастотной защиты типа ДФЗ-201 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. 251.

6. Рубан Н.Ю. Математическое моделирование органа сравнения фаз дифференциально-фазной защиты ДФЗ-201 // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи». В 3 т. – 21-25 ноября 2011г, Самара: СамГТУ, Том 1. 423 с., с. 88-91.

7. Андреев М.В. Применение детализированных моделей для повышения достоверности проверки устройств релейной защиты и автоматики в «замкнутом

цикле» / М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи». В 2 т. – 14-18 октября 2013г, Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), Том 2. 462 с., с 7-10.

Патенты на изобретения:

1. Пат. РФ 2469393, МПК (2011) G 06 G 7/62. Устройство для моделирования трехфазной линии электропередачи с сосредоточенными параметрами / Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Рубан Н.Ю., Гусев А.С., Прутик А.Ф., Андреев М.В.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"; – 2011143567/08; заявл. 27.10.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. – с.11

2. Пат. РФ 2469394, МПК (2011) G 06 G 7/62. Устройство для моделирования трехфазной линии электропередачи с распределенными параметрами / Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Гордиенко И.С., Гусев А.С., Свечкарев С.В., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Прутик А.Ф.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"; – 2011146618/08; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. – с.12

Личный вклад:

1. Анализ причин существования проблемы неправильных действий ВЧДФЗ и обоснование направления ее решения.

2. Разработка и обоснование методики создания средств всережимного моделирования ВЧДФЗ.

3. Синтез в соответствии с разработанной методикой математических моделей ВЧДФЗ электромеханического и микропроцессорного исполнения, достаточно полно и достоверно воспроизводящих в них и ИТ реальный спектр процессов.

4. Разработка программной реализации средств всережимного моделирования ВЧДФЗ (DPPmodels).

5. Экспериментальные исследования созданных средств всережимного моделирования ВЧДФЗ.

6. В опубликованных в соавторстве работах по теме диссертации определяющая роль принадлежит автору данной диссертационной работы.