

На правах рукописи



**Гордиенко Иван Сергеевич**

**ВСЕРЕЖИМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ С  
УЧЕТОМ ИХ РЕАЛИЗАЦИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2015

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:**

**Сальников Василий Герасимович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»

**Большанин Георгий Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», профессор кафедры «Электроэнергетика и Электротехника»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится «29» апреля 2015 г. в 16:00 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 библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>.

Автореферат разослан «12» марта 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.269.10

А.В. Кабышев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Проблема и ее актуальность.** Актуальность решаемой проблемы определяется высоким уровнем аварийности электроэнергетических систем (ЭЭС) из-за неправильной работы средств релейной защиты и автоматики (РЗА), в том числе базирующихся на дистанционном принципе основных и резервных защит линий электропередачи, автотрансформаторов, синхронных генераторов, а также устройств автоматики ликвидации асинхронного режима и ряде других средств РЗА, который согласно обобщенной статистике системных аварий в мировой электроэнергетике составляет 25 процентов. Поскольку поломки, дефекты, ошибки персонала, природные факторы в данной статистике учтены отдельно, основной причиной неправильной работы РЗА является их неадекватная конкретным условиям функционирования настройка.

Согласно принципам работы дистанционных защит (ДЗ) их неадекватная настройка обусловлена двумя факторами: 1) использование недостаточно полной и достоверной информации о процессах изменения токов и напряжений в защищаемых объектах ЭЭС; 2) чрезмерно приближенный учет погрешностей преобразования контролируемых токов и напряжений в измерительных трансформаторах (ИТ) и конкретных реализациях ДЗ. Очевидно, что непременным условием решения обозначенной проблемы является, прежде всего, наличие возможности детализированного анализа работы ДЗ различных исполнений в конкретных условиях их функционирования, позволяющего достаточно достоверно оценивать процессы изменения токов и напряжений в защищаемых объектах, погрешности преобразования в ИТ и применяемых типах ДЗ, и определения на основе результатов этого анализа параметров адекватной настройки ДЗ.

Изучению режимов функционирования ЭЭС и протекающих процессов в оборудовании и в ЭЭС в целом, задачам их моделирования посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Бернас С., Веников В.А., Воропай Н.И., Горев А.А., Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Мамиконянц Л.Г., Окин А.А., Парк. Р., Портной М.Г., Рюденберг Р., Ульянов С.А., Цек З. и др. Различные аспекты задач исследования и математического описания функционирования средств РЗА с учетом процессов в ИТ и реализациях, а также их настройка рассмотрены в трудах Адоньева Н.М., Афанасьева В.В., Васильева А.Н., Гельфанда Я.С., Дьякова А.Ф., Кибеля В.М., Новеллы В.Н., Овчаренко Н.И., Федосеева А.М., Федосеева М.А., Чернобровова Н.В., Шабада М.А. и др. Вопросы, касающиеся теоретических основ формирования измерительных органов ДЗ, средств и особенностей их аппаратной реализации, формирования характеристик срабатывания (ХС) и настройки, в большей мере отражены в работах Брига А.Н., Дони Н.А., Нудельмана Г.С., Удриса А.П., Фабриканта В.Л., Федорова Э.К., Циглера Г., Шнеерсона Э.М. и др. Однако проблема адекватной настройки РЗА, в том числе ДЗ, по-прежнему остается актуальной.

Поскольку, ввиду недопустимости, за редким исключением, натуральных экспериментов в ЭЭС, особенно аварийного характера, и невозможности из-за чрезвычайной сложности их полноценного физического моделирования, настройка РЗА, и соответственно ДЗ, осуществляется с помощью различных

программных и программно-технических средств математического моделирования ЭЭС, неизбежным становится вывод о несоответствии свойств и возможностей указанных средств условиям решения рассматриваемой проблемы.

Полнота и достоверность математического моделирования ЭЭС определяется адекватностью применяемых математических моделей основного и вспомогательного оборудования, включая РЗА, и способностью средств их реализации решать совокупную модель реальной ЭЭС с гарантированной приемлемой точностью. Достигнутый уровень физико-математического представления и описания процессов в оборудовании, в том числе РЗА, и ЭЭС в целом не накладывает принципиальных ограничений на формирование всережимных моделей ЭЭС, реализацией которых обеспечивается такое воспроизведение непрерывного спектра процессов в значимом основном и вспомогательном оборудовании, включая РЗА, и ЭЭС в целом, в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы. Однако образуемая при этом совокупная математическая модель реальной ЭЭС, даже при допустимом частичном эквивалентировании, неизбежно содержит жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно высокого, по математическим меркам, порядка, решение которой методами численного интегрирования оказывается невозможным, в связи с ограничительными условиями их применимости, определяемыми теорией методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений. Единственным путем получения решения может служить только снижение жесткости, дифференциального порядка, нелинейности и уменьшение интервала решения, принципиально ограничиваемого теоремой Далквиста, что достижимо только за счет декомпозиции процессов и существенного упрощения математической модели ЭЭС. Отмеченные обстоятельства при расчете режимов и процессов в реальных ЭЭС приводят к необходимости значительного упрощения моделей не только РЗА, но и основного оборудования, в частности электросетевого. Кроме того, согласно той же теории методов дискретизации, независимо от степени соответствия математической модели ЭЭС условиям применения указанных методов, всегда неизвестной остается действительная ошибка численного интегрирования дифференциальных уравнений.

Указанная теоретическая необходимость упрощений и ограничений полностью подтверждается характеристиками всех без исключения используемых в настоящее время средств расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС. В результате, ввиду высокой ответственности настройки РЗА, а также в связи с отсутствием гарантированной точности расчета токов и напряжений в программах моделирования переходных процессов (Мустанг и EUROSTAG и др.), последние для расчета уставок РЗА не используются. В этих целях в настоящее время применяются соответствующие требованиям Руководящих указаний средства расчета установившихся значений токов и напряжений в аварийных режимах (ТКЗ-3000, АРМ СРЗА и др.), в которых решение систем алгебраических уравнений выполняется методически точно, однако вызванные в результате аварии протеканием переходных процессов

апериодические и гармонические составляющие режимных величин, и погрешности преобразования этой информации в ИТ и конкретных реализациях РЗА учитываются с помощью обобщенных коэффициентов отстройки.

Ввиду вышеизложенного, а также в связи с распространением аналого-цифровых регистраторов аварийных событий (РАС) и появлением средств всережимного моделирования ЭЭС, обеспечивающих получение достоверной информации о процессах изменения токов и напряжений в защищаемых объектах и ЭЭС в целом, для решения проблемы адекватной настройки РЗА стало актуальным создание средств их всережимного моделирования: а) предусматривающих автономное применение с использованием массивов мгновенных значений токов и напряжений, полученных с помощью РАС и средств всережимного моделирования ЭЭС для конкретных условий функционирования; б) интегрированных непосредственно в средства всережимного моделирования ЭЭС. В последнем случае обеспечивается не только возможность детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их соответствующей этим условиям настройки, но и более адекватный учет влияния работы ДЗ на функционирование других моделируемых средств РЗА и ЭЭС в целом в широком спектре воспроизводимых режимов.

Учитывая разнообразие принципов и специфику реализаций РЗА, разработка таких средств всережимного моделирования для каждого их вида является сложной и самостоятельной научно-технической задачей.

**Целью данной работы** является создание средств всережимного моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ, обеспечивающих детализированный анализ работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватную настройку, необходимых для повышения эффективности функционирования данного вида защит и ЭЭС в целом.

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

1. Определение и обоснование причин существования проблемы адекватной настройки ДЗ и направления ее решения, предусматривающего создание средств всережимного моделирования ДЗ с учетом ИТ и конкретных реализаций.

2. Разработка методики, регламентирующей создание средств всережимного математического моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ, включающей синтез всережимных математических моделей ДЗ и разработку средств их программной реализации: а) для автономного применения с использованием массивов мгновенных значений токов и напряжений, полученных с помощью РАС и средств всережимного моделирования ЭЭС; б) для интегрирования непосредственно в средства всережимного моделирования ЭЭС.

3. Синтез всережимных математических моделей распространенных типов ДЗ электромеханического, микроэлектронного и микропроцессорного исполнения.

4. Разработка программных средств реализации синтезированных всережимных математических моделей ДЗ, свойства и возможности которых позволяют выполнять детализированный анализ работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватную настройку.

5. Экспериментальное исследование созданных средств всережимного моделирования ДЗ, подтверждающее наличие свойств и возможностей, необходимых для детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватной настройки.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы фундаментальные законы и методы теоретических основ электротехники, математического анализа, в том числе анализ электрических цепей методом направленных графов, численные методы интегрирования. Проведение экспериментально-расчетных исследований выполнено с использованием программ АРМ СРЗА, Мустанг, Mathcad, Maple, MATLAB, программно-технического всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС), а также массивов мгновенных значений токов, напряжений и дискретных сигналов срабатывания реальных ДЗ, полученных с помощью РАС.

#### **Научная новизна работы.**

1. Предложена и обоснована методика всережимного моделирования ДЗ с учетом их конкретных реализаций и ИТ.

2. Синтезированы всережимные математические модели ДЗ, достаточно полно и достоверно описывающие значимый спектр процессов в ИТ, функциональных элементах и ДЗ в целом, электромеханического, микроэлектронного и микропроцессорного исполнения.

3. Разработаны программные средства реализации синтезированных всережимных математических моделей ДЗ для их автономного применения с использованием массивов мгновенных значений токов и напряжений, полученных с помощью РАС или средств всережимного моделирования ЭЭС, а также для интегрирования в средства всережимного моделирования ЭЭС.

**Практическая ценность.** Разработанные средства всережимного моделирования ДЗ позволяют надежно и эффективно решать важные для эксплуатации, проектирования, исследования и обучения задачи детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватной настройки: 1) используя автономно эти средства и массивы мгновенных значений токов и напряжений защищаемых объектов ЭЭС, полученных с помощью РАС и средств всережимного моделирования ЭЭС; 2) интегрируя их непосредственно в средства всережимного моделирования ЭЭС.

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы реализованы в ряде научно-исследовательских работ, выполненных при непосредственном участии автора диссертации:

1. «Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем». ФЦП «Научные и научно-педагогические

кадры инновационной России на 2009-2013 годы» Госконтракт № П537, 17.05.2010 г. – 19.10.2012 г.

2. «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 № 14.740.11.0526, 10.12.2010 г. – 14.10.2011 г.

3. «Информационно-телекоммуникационная моделирующая система реального времени интеллектуальных энергосистем». ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». Госконтракт № 07.514.11.4075, 13.10.2011 г. – 06.09.2012 г.

4. «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» Хоздоговор между ЗАО «НОВИНТЕХ» и ТПУ № 2-496/2011у, 03.10.2011 г. – 30.04.2012 г.

Кроме этого, результаты диссертационной работы использованы для учебных и научно-исследовательских целей при выполнении курсовых и ВКР магистрантов кафедры «Электроэнергетические системы» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета и рекомендованы для применения в ОАО «Томская распределительная компания» (подтверждено актами внедрения).

**Личный вклад автора.** Автором выполнено исследование проблемы адекватной настройки ДЗ, определены и обоснованы предъявляемые к средствам моделирования ЭЭС для решения этой проблемы критерии; предложена и обоснована методика всережимного моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ, предусматривающая их автономную программную реализацию и интегрирование в средства всережимного моделирования ЭЭС; синтезированы всережимные математические модели распространенных типов ДЗ электромеханического, микроэлектронного и микропроцессорного исполнения; разработаны программные реализации этих моделей в программе MATLAB и в специализированной программной среде ВМК РВ ЭЭС; выполнены исследования созданных средств всережимного моделирования ДЗ в MATLAB с использованием реальных массивов мгновенных значений токов и напряжений, записанных с помощью РАС и полученных в различных режимах на ВМК РВ ЭЭС. Кроме того, проведены исследования функционирования интегрированных в ВМК РВ ЭЭС средств всережимного моделирования ДЗ в различных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы моделируемой ЭЭС Томской области.

**Основные результаты, выносимые на защиту.**

К защите представлены следующие результаты диссертационной работы:

1. Результаты исследования проблемы адекватной настройки ДЗ и обоснованное направление ее решения путем создания и применения средств всережимного моделирования ДЗ с учетом их конкретных реализаций и ИТ.

2. Сформулированная и обоснованная методика создания средств всережимного моделирования ДЗ, включающая синтез всережимных математических моделей электромеханических, микроэлектронных и микропроцессорных ДЗ с учетом их конкретных реализаций и ИТ, а также два варианта их программной реализации в MATLAB и ВМК РВ ЭЭС.

3. Синтезированные в соответствии с методикой всережимные математические модели электромеханической, микроэлектронной и микропроцессорной ДЗ, достаточно полно и достоверно описывающие значимый спектр процессов в ИТ, функциональных элементах и ДЗ в целом.

4. Разработанные программные средства всережимного моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ, ориентированные для автономного использования в MATLAB и интегрированные в ВМК РВ ЭЭС, предназначенные для решения задач детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватной настройки.

5. Результаты экспериментальных исследований созданных средств всережимного моделирования ДЗ, выполненных в MATLAB с использованием натуральных массивов мгновенных значений токов и напряжений РАС, а также выполненных с помощью ВМК РВ ЭЭС, подтверждающие наличие свойств и возможностей, необходимых для решения задач детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватной настройки.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на следующих научных мероприятиях:

1. Шестнадцатая всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: экология, надежность, безопасность», ТПУ, г. Томск, 2010г.

2. Международная всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», НГТУ, г. Новосибирск, 2010г.

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

4. Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России», г. Чебоксары, 2012г.

5. Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технология», ТПУ (г. Томск, 2012г.), ТПУ (г. Томск, 2014г.).

6. The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST2012, ТПУ, г. Томск, 2012г.

7. Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи», СамГТУ (г. Самара, 2011г.), УрФУ (г. Екатеринбург, 2012г.), Новочеркасский политехнический институт (г. Новочеркасск, 2013г.).

8. 59-й Всемирный Салон инноваций, научных исследований и новых технологий «Брюссель-Иннова/Эврика 2010», г. Брюссель (Бельгия), 2010г.

9. 12-й международный форум «Высокие технологии XXI века», г. Москва, 24-27 апреля 2013г. (разработка отмечена золотой медалью).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 26 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых периодических изданиях по перечню ВАК РФ и 2 патента РФ на изобретения.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из списка сокращений, введения, четырех глав, заключения, содержащих 149 страниц, 6 таблиц, 85 рисунков и список литературы из 87 наименований, а также трех приложений на 63 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначены решаемая проблема и ее актуальность, а также направление ее решения, сформулирована и обоснована цель, поставлены задачи исследования. Кроме этого, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведена общая характеристика диссертационной работы: личный вклад автора, апробация, публикация и структура диссертации.

**В первой главе** исследована проблема адекватной настройки ДЗ, сформулированы и обоснованы обеспечивающие ее минимизацию задачи: 1) детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования, позволяющего оценивать процессы изменения токов и напряжений защищаемых объектах и погрешности их преобразования в ИТ и применяемых типах ДЗ посредством их всережимного моделирования с учетом реализаций и ИТ; 2) определения параметров адекватной настройки ДЗ на основе результатов детализированного анализа их работы. Определены и обоснованы критерии, предъявляемые к средствам моделирования ЭЭС, для решения этих задач: 1) достоверное воспроизведение квазиустановившихся и переходных процессов для определения контролируемых ДЗ токов и напряжений в защищаемых объектах во всевозможных нормальных, аварийных, послеаварийных режимах реальных ЭЭС; 2) адекватный учет погрешностей преобразования контролируемых токов и напряжений в ИТ и в функциональных элементах ДЗ конкретных реализаций.

Выполнен сопоставительный анализ распространенных в эксплуатации программных средств моделирования реальных ЭЭС (АРМ СРЗА, Мустанг, EUROSTAG и др.) и разработки Энергетического института Томского политехнического университета Всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) на предмет их соответствия указанным критериям, в результате которого подтверждено несоответствие используемых в настоящее время программных средств моделирования ЭЭС приведенным критериям. В полной мере указанным критериям соответствует программно-технический комплекс ВМК РВ ЭЭС, обеспечивающий получение достаточно полной и достоверной информации о процессах в значимом силовом оборудовании и ЭЭС в целом в различных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах функционирования, предусматривающий

формирование массивов мгновенных значений токов и напряжений защищаемых элементов ЭЭС в формате COMTRADE, возможность программной реализации всережимных математических моделей РЗА, в том числе ДЗ.

Во второй главе сформулирована и обоснована методика всережимного математического моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ, включающая: 1) анализ принципиальных схем и технических данных конкретных ИТ и ДЗ; 2) получение передаточных функций (ПФ) элементов, выполняющих непрерывное преобразование сигналов, на основе их схем замещения, и определяющих их дифференциальных уравнений с учетом нелинейных характеристик намагничивания электромагнитных элементов 3) составление алгебраических и логических функций; 4) формирование на основе полученных систем дифференциальных, алгебраических уравнений и логических функций совокупной всережимной математической модели ДЗ; 5) программную реализацию синтезированных всережимных моделей ДЗ: а) для автономного применения в MATLAB с использованием массивов мгновенных значений токов и напряжений, полученных с помощью РАС или средств всережимного моделирования ЭЭС; б) для интеграции непосредственно в средства всережимного моделирования ЭЭС, в частности в ВМК РВ ЭЭС.

В соответствии с разработанной методикой синтезированы с учетом реализаций и измерительных трансформаторов тока (ИТТ) и напряжения (ИТН) всережимные математические модели распространенных в эксплуатации электромеханической (ДЗ-2 ЭПЗ-1636), микроэлектронной (ШДЭ-2801) и микропроцессорной (БМРЗ-ДЗ-02-01-11) ДЗ, структурные схемы которых приведены на рисунке

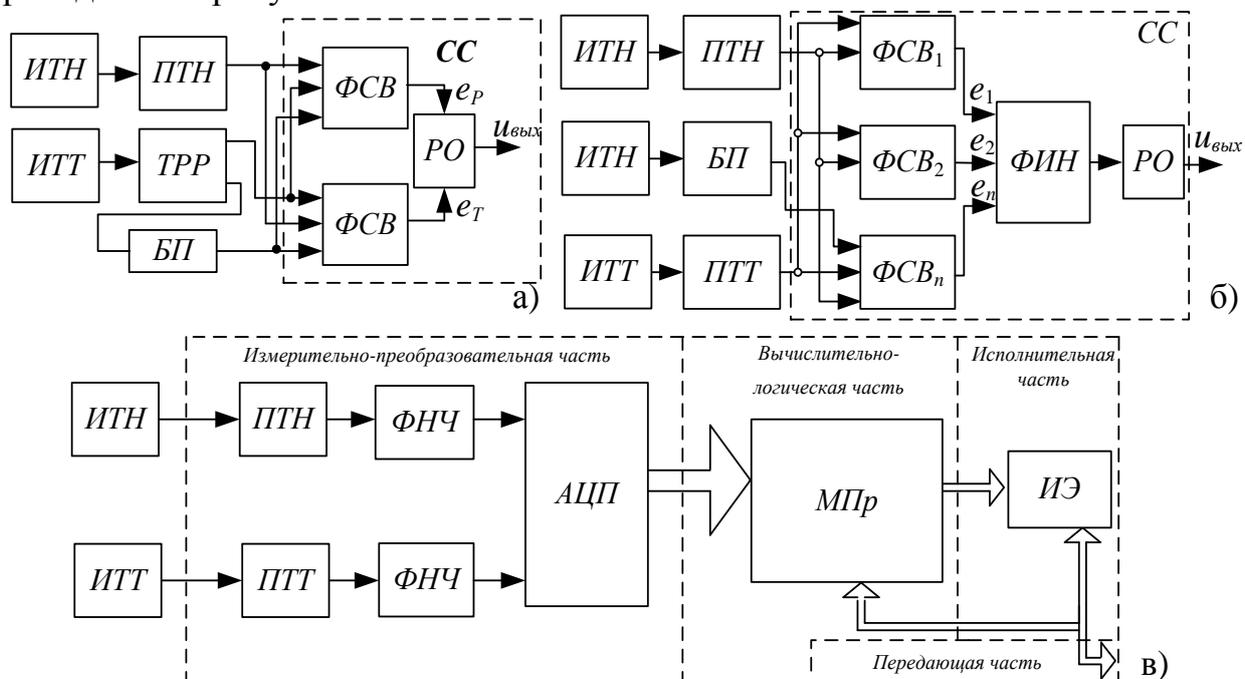


Рисунок 1 – Обобщенные структурные схемы электромеханической (а), микроэлектронной (б), микропроцессорной (в) ДЗ

где ПТТ и ПТН – промежуточные трансформаторы тока и напряжения; ТРР – трансреактор; БП – блок (орган) памяти; ФСВ – формирователь сравниваемых величин ( $e_T, e_P, e_1, e_2, e_3$ ), ФИН – формирователь импульсов несовпадения; РО – реагирующий орган; СС – схема сравнения; ФНЧ – фильтр нижних частот; АЦП – аналого-цифровые преобразователи; МПр – микропроцессоры; ИЭ – исполнительный элемент.

Фрагменты синтеза всережимной математической модели микропроцессорной (МП) ДЗ иллюстрируют рисунки 2, 3, приведенные ПФ (1, 2, 3), определяемые системой уравнений (4).

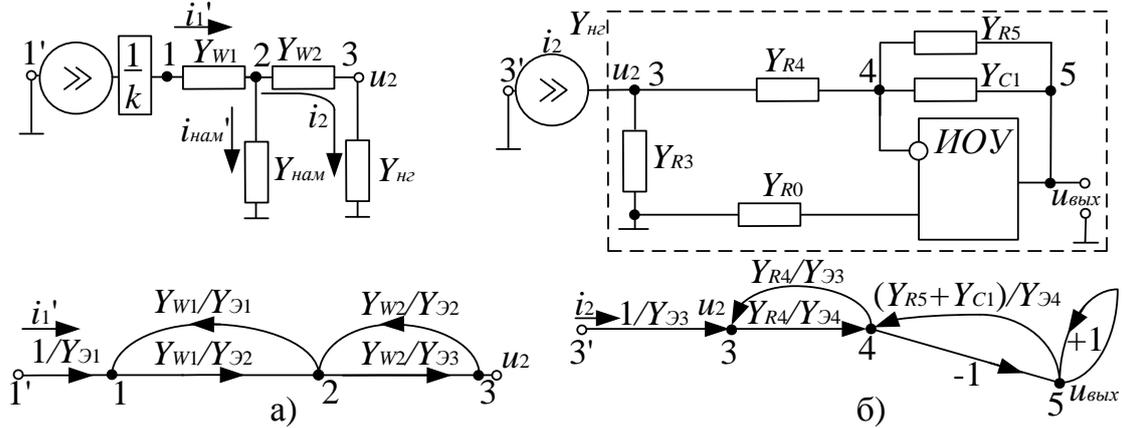


Рисунок 2 – Схема замещения и граф ПТТ (а), схема замещения и граф ФНЧ (б)

$$\text{где } Y_{W1} = \frac{1}{R_1 + p \cdot L_1}, \quad Y_{W2} = \frac{1}{R_2 + p \cdot L_2}, \quad Y_{\text{нам}} = \frac{1}{p \cdot L_{\text{нам}}}.$$

$$W_{\text{ПТТ}_c_{\text{нз}}}(p) = \frac{u_2(p)}{i_1'(p)} = \frac{B_1 \cdot p}{A_2 \cdot p^2 + B_2 \cdot p + C_2}, \quad (1)$$

$$W_{\text{нз}}(p) = \frac{1}{Y_{\text{нз}}(p)} = \frac{u_2(p)}{i_2(p)} = \frac{B_3}{A_4 \cdot p + B_4}, \quad (2)$$

$$W_{\text{ФНЧ}}(p) = \frac{u_{\text{вых}}(p)}{u_2(p)} = \frac{B_5}{A_6 \cdot p + B_6}, \quad (3)$$

где  $B_1 = L_{\text{нам}} R_5 R_3 R_4$ ;  $A_2 = C_1 R_4 R_5 (R_4 L_2 + R_3 L_2 + L_{\text{нам}} R_4 + L_{\text{нам}} R_3)$ ;  $B_2 = -L_{\text{нам}} R_4 R_3 - R_4 R_3 L_2 - R_4^2 L_2 + L_{\text{нам}} R_3 R_5 + R_5 R_3 L_2 - L_{\text{нам}} R_4^2 + R_4 C_1 R_5 R_3 R_2 + C_1 R_4^2 R_5 R_2$ ;  
 $C_2 = R_5 R_3 R_2 - R_4 R_3 R_2 - R_4^2 R_2 + R_5 R_3 R_4$ ;  $B_3 = R_5 R_3 R_4$ ;  $A_4 = R_5 C_1 R_4 (R_4 + R_3)$ ;  
 $B_4 = R_5 R_3 - R_4 R_3 - R_4^2$ ;  $B_5 = R_5$ ;  $A_6 = R_4 R_5 C_1$ ;  $B_6 = -R_4$ .

$$A_2 \cdot \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} + B_2 \cdot \frac{du_2(t)}{dt} - B_1 \cdot \frac{di_1'(t)}{dt} + C_2 \cdot u_2(t) = 0,$$

$$A_4 \cdot \frac{du_2(t)}{dt} + B_4 \cdot u_2(t) - B_3 \cdot i_2(t) = 0,$$

$$i_{\text{нам}}'(t) = i_1'(t) - i_2(t), \quad (4)$$

$$L_{\text{нам}} = f(i_{\text{нам}}'),$$

$$A_6 \cdot \frac{du_{\text{вых}}(t)}{dt} + B_6 \cdot u_{\text{вых}}(t) - B_5 \cdot u_2(t) = 0.$$

Измерительные (ИТТ, ИТН) и промежуточные (ПТТ, ТРР, ПТН) трансформаторы моделируются с учетом зависимости  $L_{нам}=f(I_{нам})$ , определяемой в соответствии с кривой намагничивания  $B=f(H)$  (рисунок 3).

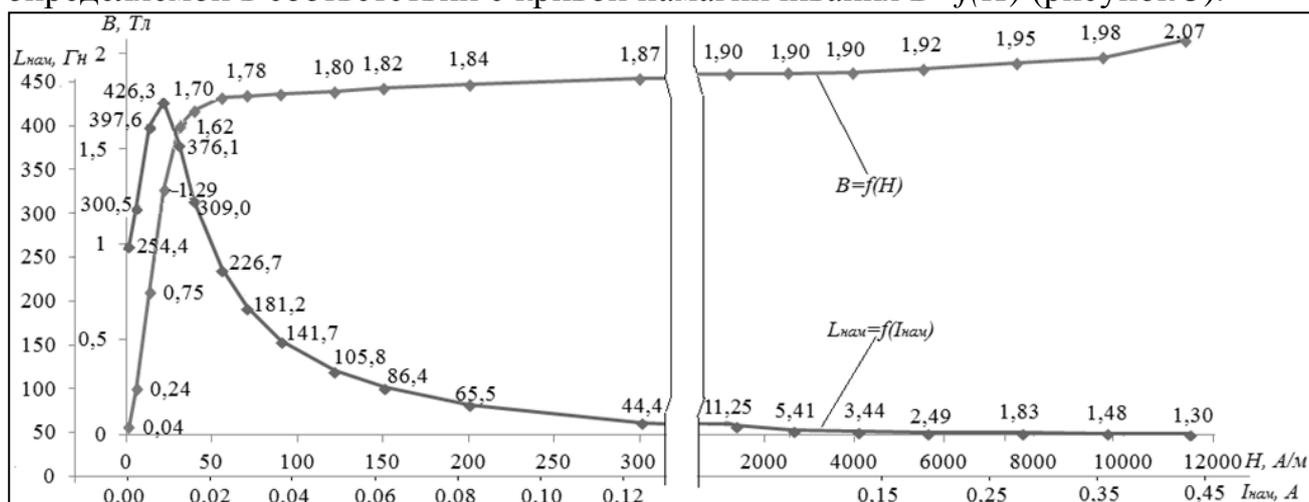


Рисунок 3 – Графики  $B=f(H)$  марки стали 3413,  $L_{нам}=f(I_{нам})$  ПТТ

Полученные таким образом системы уравнений для всех элементов ДЗ в совокупности образуют всережимную модель ДЗ, в соответствии с которой разрабатывается ее программная реализация.

**В третьей главе** представлены результаты программной реализации всережимной математической модели ДЗ типа ШДЭ-2801 в MATLAB и обобщенной всережимной модели ДЗ, адаптируемой для конкретных типов, в среде ВМК РВ ЭЭС.

На рисунке 4 приведена функциональная блок-схема программной реализации в MATLAB первой ступени реле сопротивления (РС) ДЗ ШДЭ-2801 (остальные ступени реализованы аналогично): From workspace – преобразование массивов мгновенных значений токов и напряжений; S-function – программные коды (приведены в приложении к диссертации) на языке семейства Си решения систем дифференциальных, алгебраических уравнений и логических функций математической модели ДЗ; Scope – формирование осциллограмм входных и выходных сигналов моделируемых ИТ и функциональных элементов ДЗ.

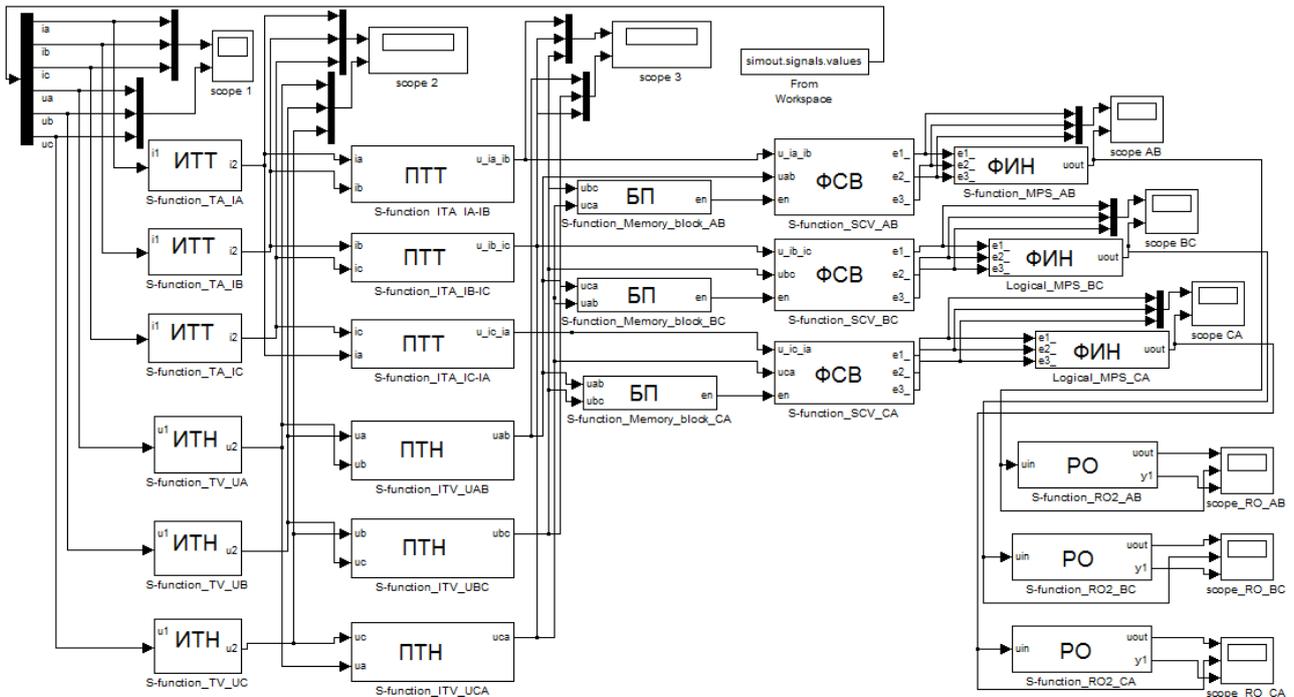


Рисунок 4 – Функциональная блок-схема всережимной модели РС первой ступени ДЗ ШДЭ-2801 в среде MATLAB

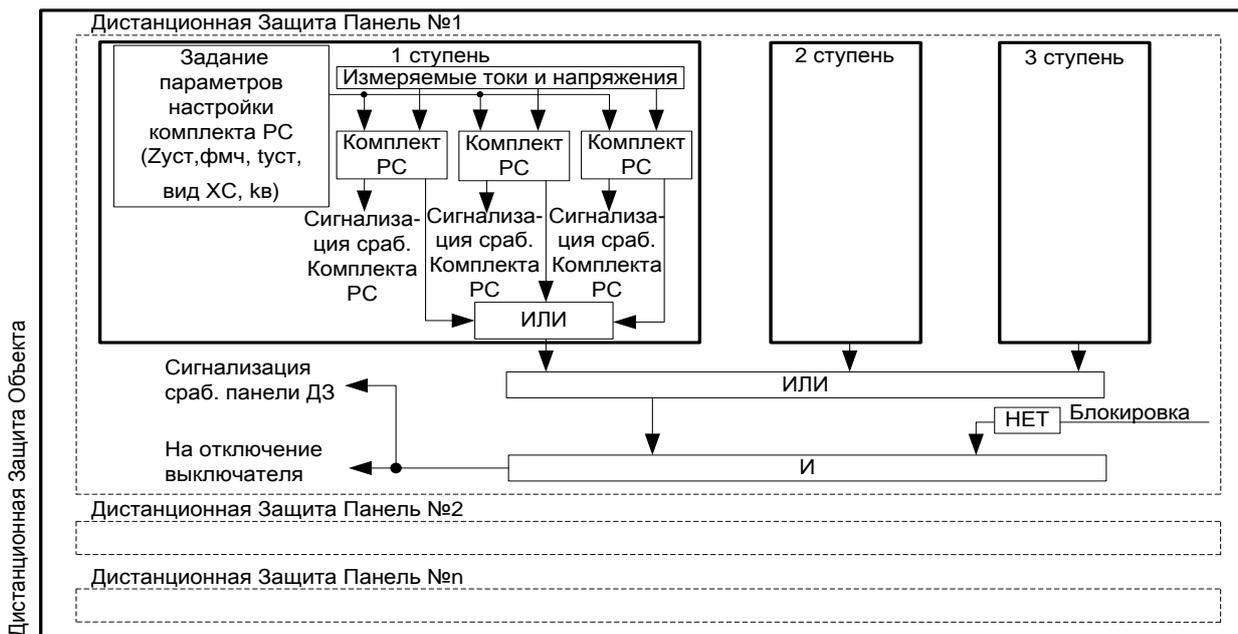


Рисунок 5 – Структурная блок-схема всережимной модели ДЗ в среде ВМК РВ ЭЭС

Структурная блок-схема программной реализации всережимных моделей ДЗ воздушной линии (ВЛ) в среде ВМК РВ ЭЭС представлена на рисунке 5 (программный код приведен в приложении к диссертации), а соответствующая ей динамическая панель наблюдения и управления (ДПНУ) всережимной модели ДЗ ВЛ 110кВ А-Б, соединяющей в моделируемой ЭЭС подстанцию А и Б, показана на рисунке 6.

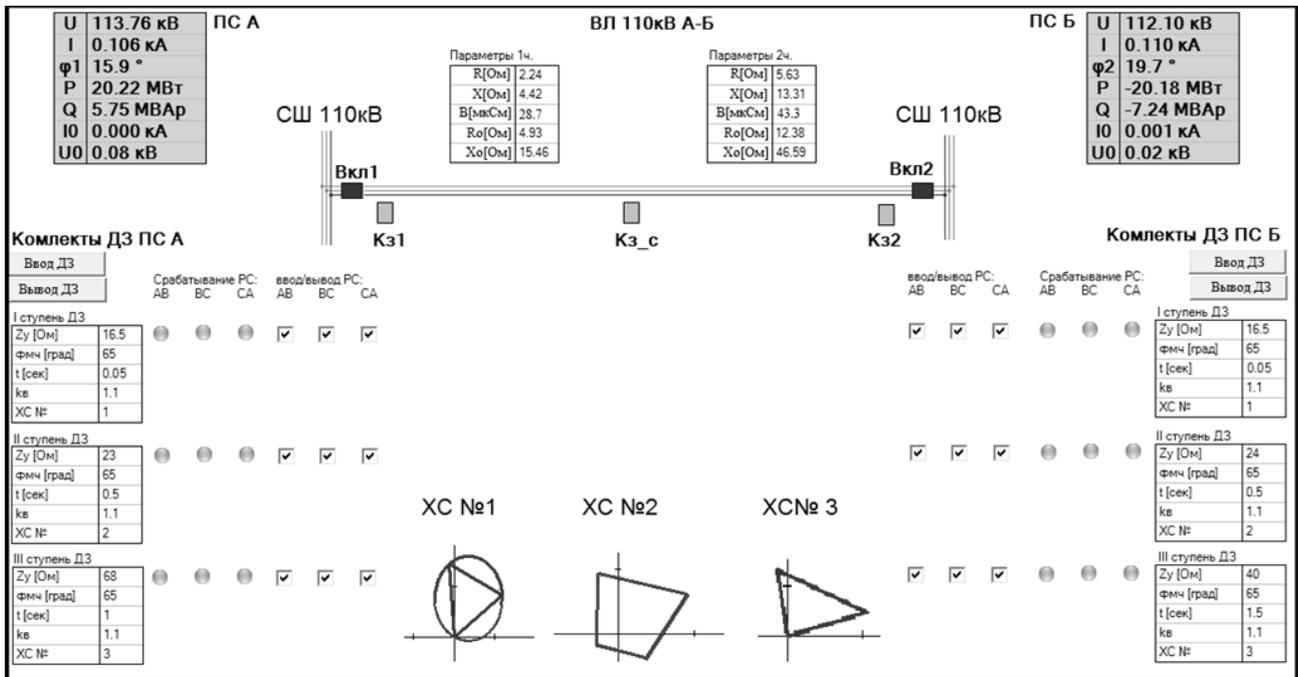


Рисунок 6 – ДПНУ ДЗ ВЛ 110кВ А-Б

ДПНУ ДЗ служит для интерактивного наблюдения при моделировании изменений режимных величин защищаемого объекта ЭЭС, управления его параметрами, включая пофазное, а также параметрами моделируемых ДЗ: 1) сопротивление уставки ( $Z_{уст}$ ); 2) угол наклона характеристики срабатывания ХС (фмч); 3) выдержка времени ступени ( $t_{уст}$ ); 4) коэффициент возврата (кв); 5) вид ХС (1-окружность; 2-четырёхугольник; 3-треугольник и др.).

В четвертой главе приведены результаты исследований разработанных средств всережимного моделирования ДЗ при указанном ранее их автономном исполнении и интегрированных в средства всережимного моделирования ЭЭС, в частности:

- В MATLAB выполнены эксперименты с использованием реальных массивов мгновенных значений токов и напряжений аварийных процессов, полученных с помощью РАС, а также ВМК РВ ЭЭС в различных аварийных режимах защищаемой ВЛ 110кВ А–Б, результатами которых:
  - показана возможность определения действительных погрешностей ИТТ в конкретных условиях функционирования, в частности при двухфазном КЗ (рисунок 7) максимальная погрешность по амплитуде составила 7 процентов, по фазе – 8 градусов, при трехфазном КЗ (рисунок 8) по амплитуде – 20 процентов, по фазе – 33 градуса (аналогичным образом выполнены исследования модели ИТН в режимах коммутационных перенапряжений); подтверждена значительная величина этих погрешностей при значительных величинах токов КЗ и аperiodической составляющей;

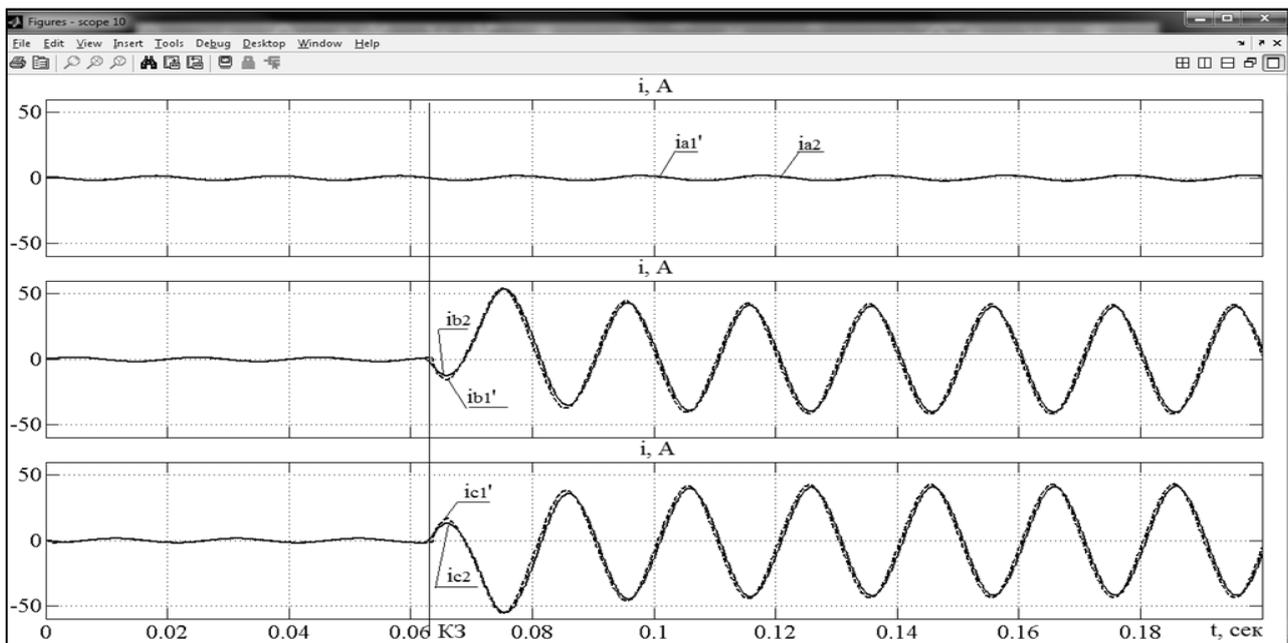


Рисунок 7 – Осциллограммы вторичных и приведенных первичных токов моделей ИТТ ТФНД-110-750/5 при КЗ фаз В и С защищаемой ВЛ

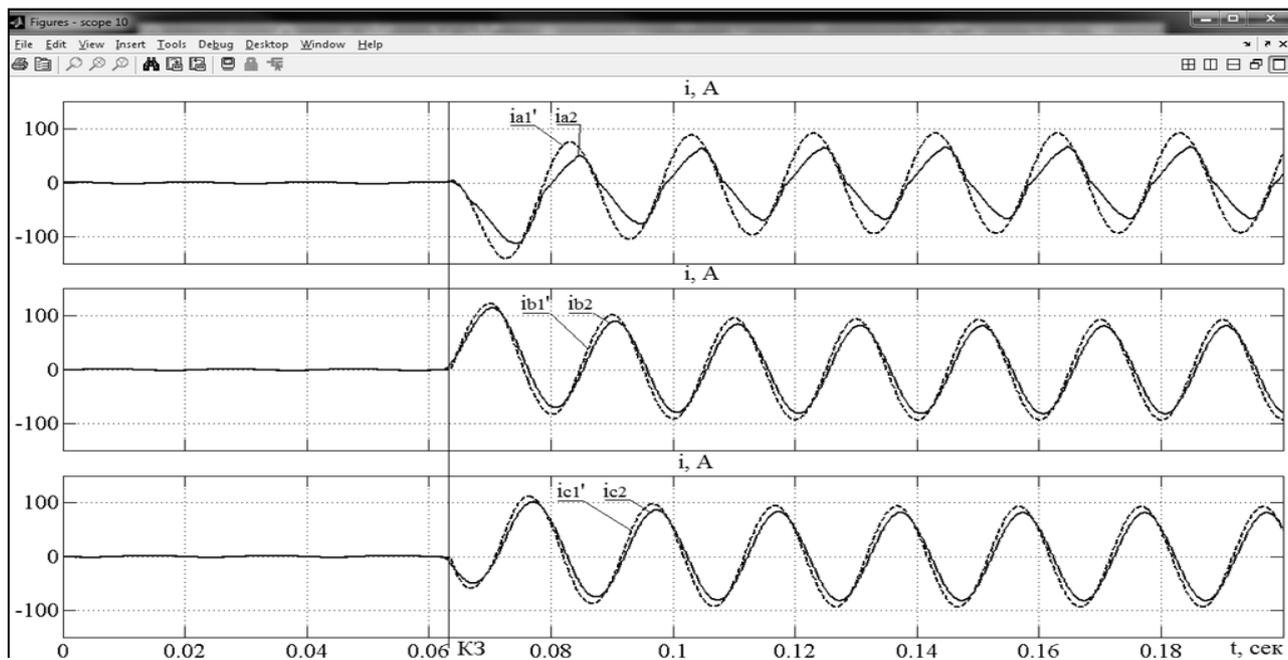


Рисунок 8 – Осциллограммы вторичных и приведенных первичных токов моделей ИТТ ТФНД-110-750/5 при трехфазном КЗ в защищаемой ВЛ

— продемонстрирована работа БП РС моделируемой ДЗ ШДЭ-2801 в режимах несимметричных и симметричных КЗ и его влияние на функционирование направленных РС первой ступени (рисунок 9, 10), например, в режиме КЗ фаз ВС наибольшая погрешность преобразования БП комплекта РС ВС составила по амплитуде 58 процентов, по фазе 36 градусов (рисунок 10);

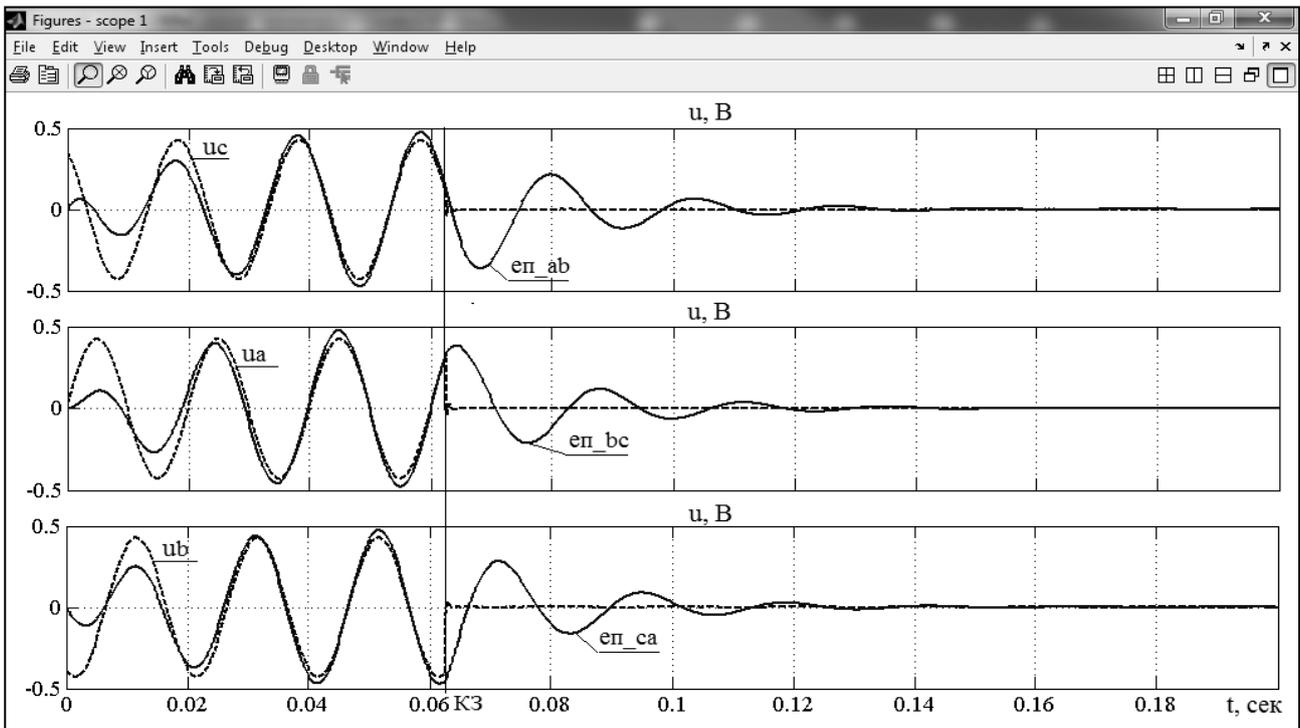


Рисунок 9 – Осциллограммы выходных сигналов ( $e_n$ ) БП РС ДЗ ШДЭ-2801и приведенных фазных напряжений в режиме при трехфазном КЗ в защищаемой ВЛ

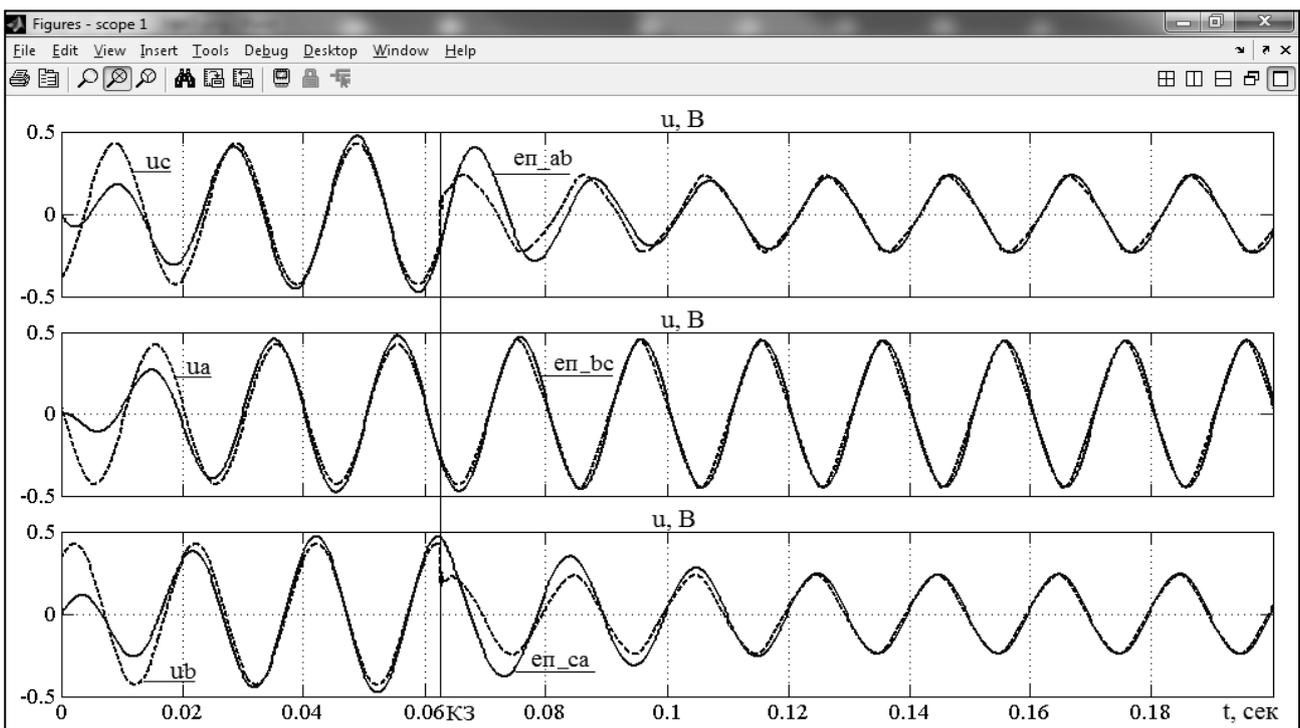


Рисунок 10 – Осциллограммы выходных сигналов ( $e_n$ ) БП РС ДЗ ШДЭ-2801и приведенных фазных напряжений при КЗ фаз В и С защищаемой ВЛ

— произведен сравнительный анализ функционирования модели первой ступени ДЗ ШДЭ-2801 с полученными при помощи РАС результатами функционирования реальной ДЗ ШДЭ-2801 (рисунок 11), по результатам которого определена причина ложного срабатывания ДЗ в

рассматриваемом режиме качаний: выполнение условий срабатывания комплекта РС АВ первой ступени ДЗ и несрабатывание блокировки от качаний.

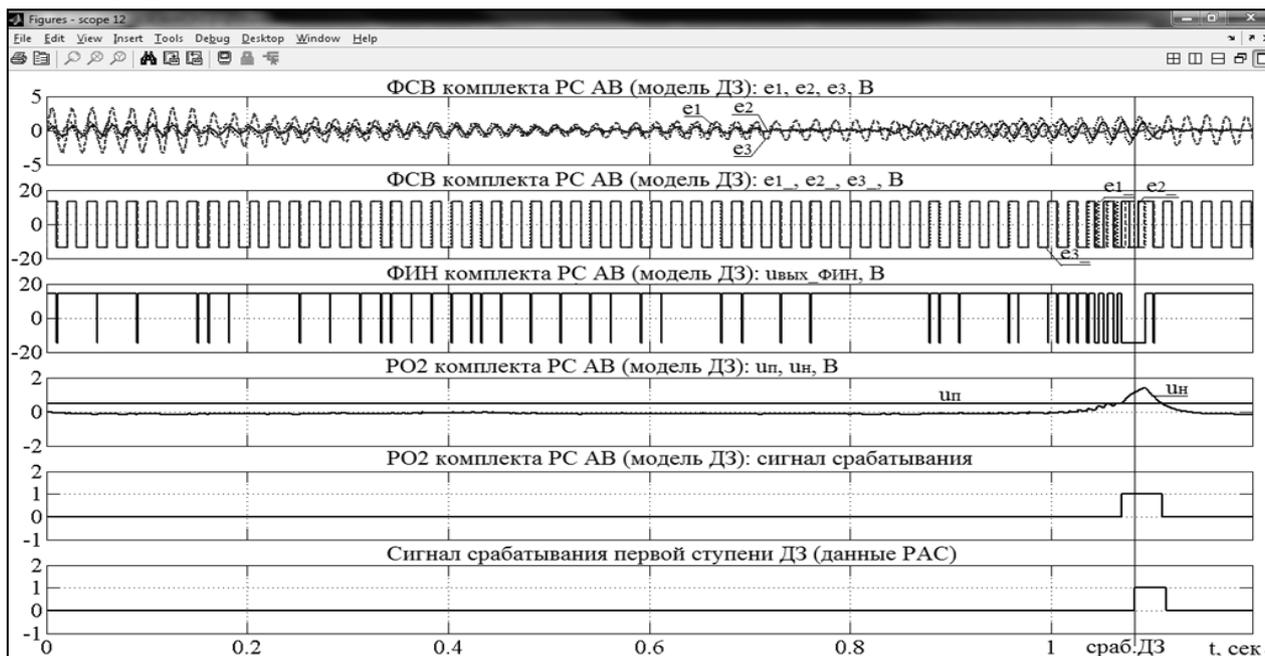


Рисунок 11 – Осциллограммы результатов функционирования ФСВ, ФИН и РО2 работавшего комплекта РС АВ в режиме качаний

- Выполнены исследования функционирования разработанных средств всережимного моделирования ДЗ в составе ВМК РВ ЭЭС при всех видах КЗ на различных участках защищаемой ВЛ, фрагменты которых применительно к ДЗ типа ШДЭ-2801 приведены на рисунках 12 и 13:

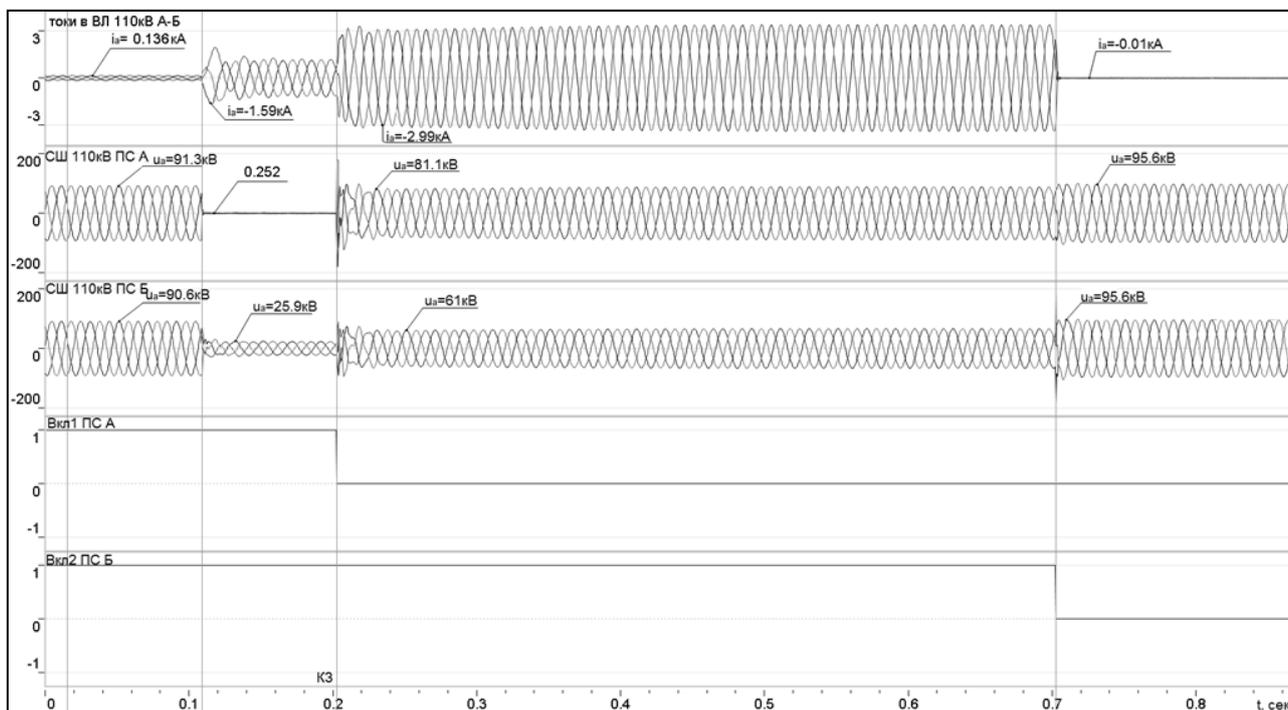


Рисунок 12 – Осциллограммы функционирования первой ступени ДЗ на ПС А и второй ступени ДЗ на ПС Б при трехфазном КЗ на ВЛ 110кВ А – Б у шин ПС А

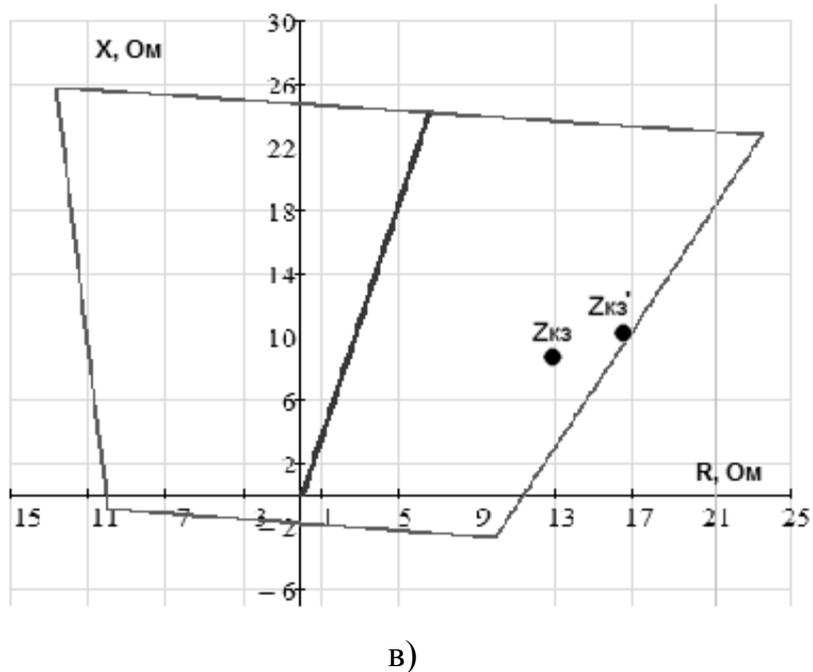
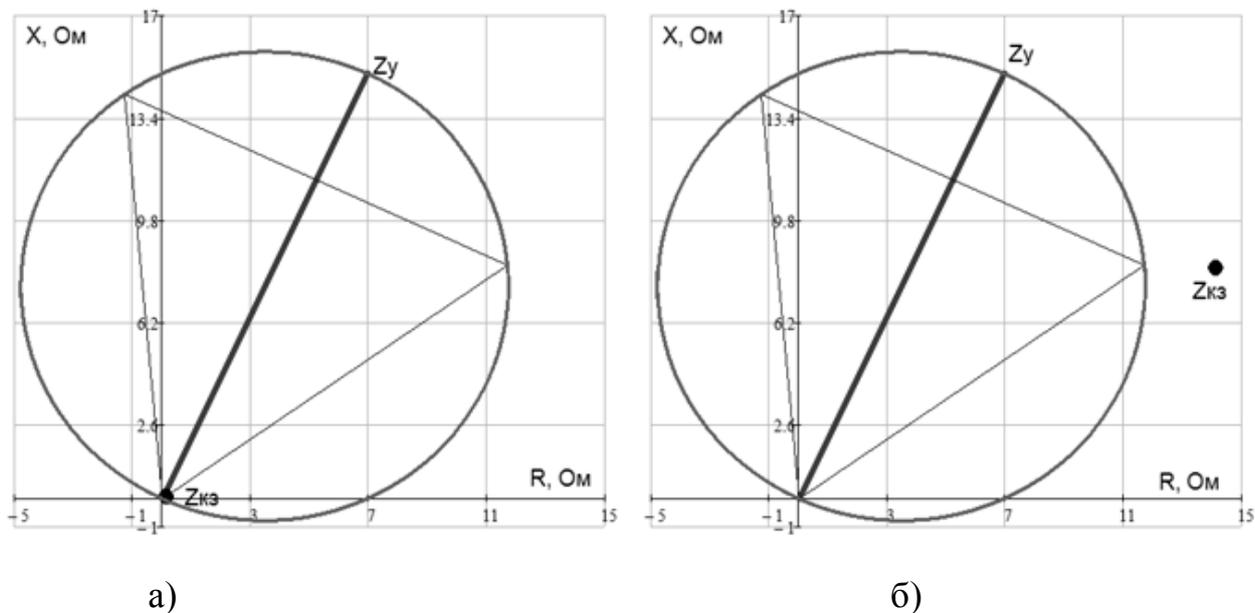


Рисунок 13 – ХС комплекта РС АВ всережимной модели ДЗ при трехфазном КЗ в ВЛ 110кВ А-Б: а) первая ступень ДЗ на ПС А; б) первая ступень ДЗ на ПС Б; в) вторая ступень ДЗ на ПС Б

где  $Z_{кз}$  – сопротивление защищаемой ВЛ 110кВ А-Б для  $t=0,12$  секунды;  $Z_{кз}'$  – сопротивление защищаемой ВЛ 110кВ А-Б для  $t=0,22$  секунды (после отключения ВЛ на ПС А);  $Z_1$  – сопротивление, с которым выполнялось согласование уставки второй ступени при расчете в АРМ СРЗА.

Всережимное моделирование обеспечивает возможность получения достоверной информации о процессах изменения контролируемых ДЗ токов и напряжений в защищаемой ВЛ. Благодаря этому, а также учитываемых в модели ДЗ ШДЭ-2801 ранее приводимых погрешностей измерительных трансформаторов и функциональных элементов для ее адекватной настройки определена целесообразность смещения правой границы ХС второй ступени

(для данного типа ДЗ имеется две ступени задания правой границы четырехугольной ХС) на ПС Б, так как при каскадном отключении ВЛ 110кВ А-Б с определенной при помощи АРМ СРЗА (приведено в диссертации) согласно директивным указаниям настройкой ХС возможен отказ второй ступени, что приведет к увеличению времени отключения КЗ (рисунок 13в).

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. В результате анализа причин неправильного функционирования ДЗ выявлены и обоснованы факторы их существования, обусловленные применением для настройки ДЗ средств моделирования ЭЭС, не соответствующих сформулированным критериям адекватного моделирования. Определено направление решения проблемы: всережимное моделирование ДЗ с учетом их реализаций и ИТ, обеспечивающее возможность детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватную настройку на основании выполненного анализа.

2. Сформулирована и обоснована методика создания средств всережимного моделирования ДЗ, необходимых для решения проблемы их адекватной настройки.

3. Синтезированы в соответствии с методикой всережимные модели электромагнитных ИТ и ДЗ электромеханического, микроэлектронного и микропроцессорного исполнения.

4. Разработаны средства всережимного моделирования ДЗ с учетом конкретных реализаций и ИТ, предусматривающие автономное применение в MATLAB и интегрированные в ВМК РВ ЭЭС, обладающие свойствами и возможностями, необходимыми для решения задач детализированного анализа работы ДЗ в конкретных условиях функционирования и их адекватной этим условиям настройки.

5. Проведены исследования разработанных средств всережимного моделирования ДЗ, подтверждающие наличие свойств и возможностей, необходимых для детализированного анализа работы и адекватной настройки ДЗ.

Совокупность результатов диссертационной работы свидетельствует о достижении поставленной цели.

**В приложениях** приведены математические модели основных функциональных элементов моделируемых ДЗ и расшифровка введенных для краткости их записи обозначений, а также программные коды реализации всережимных моделей ДЗ для MATLAB и ВМК РВ ЭЭС. Кроме этого, в приложениях представлены акты внедрения результатов работы.

Наиболее значимый материал диссертации отражен в следующих публикациях:

**Статьи в рецензируемых журналах:**

1. И.С. Гордиенко. Методика и средства адекватной настройки дистанционных защит / И.С. Гордиенко, Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - 2013 - Т. 38 - №. 2. - С. 145-151

2. И.С. Гордиенко. Программные средства всережимного математического моделирования и анализа функционирования дистанционных защит / И.С. Гордиенко // Современные проблемы науки и образования, 2014. – №3 [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.science-education.ru/117-13148>, свободный, 20.05.2014.

#### **Материалы трудов конференций:**

1. И.С. Гордиенко. Моделирование основных узлов первой ступени дистанционной защиты / И.С. Гордиенко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т 1. Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика, Томск, 6-8 Октября 2011. - Томск: СПБ Графикс, 2011 - с. 259-260.

2. И.С. Гордиенко. Математическое моделирование реагирующего органа РО1 дистанционной защиты комплекта ШДЭ2801 / И.С. Гордиенко // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды Международной молодежной научно-технической конференции в двух томах. Т. 1, Самара, 22-25 Ноября 2011. - Самара: Самарский государственный технический университет, 2011 - с. 41-45.

3. И.С. Гордиенко. Анализ общих принципов построения измерительных органов дистанционных защит в целях моделирования [Электронный ресурс] / И.С. Гордиенко // Современная техника и технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 9-13 Апреля 2012. - Томск: ТПУ, 2012 - Т. 1 - с. 37-38.

4. И.С. Гордиенко. Всережимное моделирование дистанционной защиты в реальном времени / Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, И.С. Гордиенко // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III Международной научно-технической конференции. В 2 т., Екатеринбург, 22-26 Октября 2012. - Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2012 - Т. 2 - с. 100-105.

5. И.С. Гордиенко. Автоматизированный комплекс тестирования, настройки и разработки систем управления, релейной защиты и противоаварийной автоматики / А.О. Сулайманов, А.В. Прохоров, Ю.С. Боровиков, М.В. Андреев, И.С. Гордиенко // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: сборник тезисов докладов Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 17-20 Апреля 2012. - Чебоксары: Чебоксарская типография № 1, 2012 - с. 96-101.

6. I.S. Gordienko. Distance Protection Simulation By Considering Hardware And Measuring Transformers Realization / I.S. Gordienko, A.S. Gusev, A.O. Sulaymanov // 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012. - Tomsk: TPU Press, 2012 - Vol. 2 - p. 533-537.

7. И.С. Гордиенко. Адекватное моделирование дистанционных защит на базе современных средств моделирования энергосистем / И.С. Гордиенко // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды IV Международной научно-технической конференции, Т.2, г. Новочеркасск, 14-18 октября 2013. - Новочеркасск: Лик, 2013 - с. 40-43.

8. И.С. Гордиенко. Всережимное математическое моделирование дистанционных защит в целях их уточненной настройки / И.С. Гордиенко // Современные техника и технологии: сборник трудов XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - с. 17-18.

**Патенты на изобретение:**

1. Пат. №2469394 РФ, МПК G06G7/62. Устройство для моделирования трехфазной линии электропередачи с распределенными параметрами // Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, И.С. Гордиенко, А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, М.В. Андреев, Н.Ю. Рубан, А.Ф. Прутик; заявитель и патентообладатель «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; – № 2011146618/08; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

2. Пат. №2479025 РФ, МПК G06G7/62. Устройство для моделирования трехфазного трехобмоточного трансформатора // Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, М.В. Андреев, А.С. Гусев, А.Ф. Прутик, И.С. Гордиенко; заявитель и патентообладатель «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; – № 2011146496/08; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.