

На правах рукописи



**Уфа Руслан Александрович**

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА  
ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ  
ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2017

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

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Гусев Александр Сергеевич**

**Официальные оппоненты:** **Русина Анастасия Георгиевна,**  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы»

**Дмитриев Степан Александрович**  
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы».

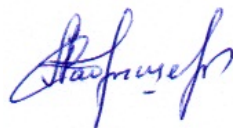
**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск

Защита состоится 20 декабря 2017 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53а и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан «    » октября 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.269.10



А.В. Кабышев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

Современные вставки постоянного тока (ВПТ) со статическими преобразователями напряжения (СПН) на базе силовых быстродействующих полностью управляемых полупроводниковых ключей позволяют эффективно решать ряд актуальных задач в мировой электроэнергетике: объединение раздельно работающих электроэнергетических систем (ЭЭС) и их частей; ограничение токов короткого замыкания (КЗ) в объединяемых ЭЭС и их частях; демпфирование низкочастотных колебаний в ЭЭС и повышение колебательной устойчивости их функционирования; передачу электроэнергии на постоянном токе. Согласно отчету CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques - Международный Совет по большим электрическим системам высокого напряжения) в настоящее время в мировой электроэнергетике проектируются, строятся и уже эксплуатируются 15 ВПТ, в том числе два проекта, планируемые для реализации в российских ЭЭС.

Особенности и специфика функционирования ВПТ значительно изменяют и усложняют процессы в оборудовании и динамические свойства ЭЭС в целом, соответственно условия работы силового оборудования, средств релейной защиты, противоаварийной и технологической автоматики, и порождают актуальную для науки и практики задачу получения, в том числе оперативного, достаточно полной и достоверной информации об этих процессах в ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимой для надежного и эффективного решения вышеуказанных задач на этапах проектирования, исследования, эксплуатации, развития и совершенствования ЭЭС. Ввиду недопустимости натурных экспериментов и невозможности из-за сложности современных ЭЭС их адекватного физического моделирования основным путем получения данной информации служит преимущественно математическое моделирование. При этом, обеспечение полноты и достоверности воспроизведения обозначенных процессов связано с необходимостью применения соответствующих моделей, адекватно описывающих единый непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом. Такие модели ЭЭС, даже без ВПТ, образуют жесткие нелинейные системы дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности, аналитически точно нерешаемые и плохо обусловленные, согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, на условиях применимости методов их численного интегрирования и поэтому неподлежащие удовлетворительному решению.

Единственным способом улучшения этой обусловленности является снижение жесткости, дифференциального порядка и ограничение интервала решения, достигаемые только за счет декомпозиции режимов и процессов в ЭЭС, упрощения математических моделей оборудования и ЭЭС в целом, ограничения интервала воспроизведения процессов. При этом, независимо от указанных упрощений и ограничений, всегда неизвестной остается присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений методическая ошибка решения, определение которой

в теории методов дискретизации дифференциальных уравнений отнесено к категории фундаментальных проблем.

Совокупность указанных факторов определяет принципиально неразрешимую в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода проблему полноты и достоверности воспроизведения процессов в собственно ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы. Очевидно, что эту проблематику наследуют все используемые в настоящее время многочисленные программно-вычислительные комплексы (ПВК) сугубо численного расчета режимов и процессов в ЭЭС. Практическим подтверждением этого служат результаты проведенных совершенно неудовлетворительных верификаций, в частности при анализе тяжелой системной аварии в Западной энергосистеме США, выполненной посредством сопоставления данных специально подготовленного моделирования с помощью ПВК ETMSP с аналогичной натурной информацией, зарегистрированной системой векторных измерений (PMU).

Единственным путем радикального решения обозначенной проблемы может служить только методологически альтернативный существующему комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

Следует отметить, что указанные причины рассмотренной проблемы присущи моделированию любых больших динамических систем и в 1998 г. университетами и научно-исследовательскими центрами США инициирован и ежегодно проводится в индустриально развитых странах специализированный международный симпозиум «Гибридные системы: вычисление и управление» (HSCC).

**Степень разработанности темы исследования.** Различным аспектам проблемы адекватного моделирования ЭЭС посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: Александров Г.Н., Аюев Б.И., Бартоломей П.И., Веников В.А., Воропай Н.И., Герасимов А.С., Гольдштейн В.Г., Гусев А.С., Жданов П.С., Колосок И.Н., Кочкин В.И., Кощеев Л.А., Ландман А.К., Лозинова Н.Г., Паздерин А.В., Погосян Т.А., Поссе А.В., Строев В.А., Фишов А.Г., Шакарян Ю.Г., Шлайфштейн В.А., Andersson G., Povh D., Fang Tian, Fulli G., Retanz C., Sood V.K. и др. Однако, несмотря на это, известные теоретические и практические решения проблемы полноты и достоверности моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом пока еще далеки от принципиально значимых результатов. Поэтому идея работы, посвященная радикальному решению обозначенной проблемы на основе комплексного подхода, несомненно является актуальной для мировой электроэнергетической науки и практики.

#### **Цели и задачи работы.**

Целью работы является разработка в соответствии с методологически альтернативным доминирующему одностороннему сугубо численному подходу к моделированию ЭЭС комплексным подходом концепции всережимного адекватного

моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, обеспечивающей достаточно полное и достоверное воспроизведение в реальном времени и на неограниченном интервале единого непрерывного спектра нормальных и аномальных, квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, а также средств реализации этой концепции. Кроме этого, целью данной работы предусмотрено создание экспериментальных средств и проведение исследований, подтверждающих обозначенные свойства и возможности разработанных концепции и средств её осуществления.

Для достижения указанных целей поставлены и решены следующие задачи:

1) выявление и обоснование причин существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальной неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направления её радикального решения на основе методологически альтернативного комплексного подхода;

2) обоснование и формулирование в соответствии с комплексным подходом концепции всережимного адекватного моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы;

3) разработка структуры средств осуществления предложенной концепции, а также принципов их построения, образующих специализированный гибридный процессор (СГП) для всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ, в том числе в составе аналогично моделируемых ЭЭС;

4) создание экспериментальных средств реализации разработанных концепции и её осуществления;

5) проведение комплекса исследований, подтверждающих свойства и возможности разработанных концепции и средств её осуществления, необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом.

**Предметом исследования** являются нормальные и аномальные, квазиустановившиеся и переходные процессы функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ.

**Объектом исследования** являются средства всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ.

**Научная новизна работы:**

1) выявлены и обоснованы причины существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальная неразрешимость в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направление её радикального решения;

2) предложен методологически альтернативный существующему комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом;

3) обоснована и сформулирована концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС;

4) в соответствии с предложенной концепцией разработаны структура и принципы построения средств её реализации, образующих СГП ВПТ.

#### **Теоретическую значимость работы определяют:**

1) результаты теоретического обоснования неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также направления её радикального решения на основе методологически альтернативного комплексного подхода;

2) обоснованная и сформулированная в соответствии с комплексным подходом концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС;

3) разработанные в соответствии с предложенной концепцией структура и принципы построения средств её реализации.

#### **Практическая значимость работы.**

Разработанные средства всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом позволяют получить в реальном времени достаточно полную и достоверную информацию о едином непрерывном спектре квазиустановившихся и переходных процессов в собственно ВПТ и реальной ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для надежного и эффективного решения актуальных в мировой электроэнергетике задач: объединения раздельно работающих ЭЭС и их частей, ограничения токов КЗ в объединяемых ЭЭС и их частях, демпфирования низкочастотных колебаний в таких ЭЭС и повышение колебательной устойчивости их функционирования, передачи электроэнергии на постоянном токе, а также связанных с этим задач проектирования, исследования и эксплуатации: оценки условий работы оборудования ВПТ и ЭЭС, включая устройства релейной защиты, автоматики и др.

**Методы исследования:** теория дифференциального и интегрального исчисления, теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метод непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теория линейных и нелинейных электрических цепей, теория автоматического регулирования и управления, методы математического и

физического моделирования, методы теории точности и чувствительности вычислительных устройств, схемотехника на интегральных микросхемах, экспериментальные методы исследования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1) выявление и обоснование причин существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальной неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода и направления её радикального решения;

2) методологически альтернативный существующему одностороннему сугубо численному моделированию функционирования ВПТ в ЭЭС комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта этой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом;

3) обоснованная и сформулированная концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС;

4) результаты разработки и обоснования структуры и принципов построения средств реализации предложенной концепции, образующих СГП ВПТ;

5) созданный экспериментальный образец средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и реальной ЭЭС с ВПТ, позволяющий получить полную и достоверную информацию о едином непрерывном спектре нормальных и аномальных, квазиустановившихся и переходных процессов в собственно ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимую для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом;

6) результаты экспериментальных исследований, подтверждающие реализацию теоретически обоснованных свойств и возможностей разработанных средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом.

**Достоверность результатов** исследования подтверждается использованием классических положений и законов теоретической электротехники, математики, теории дифференциального и интегрального исчисления, теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, метода непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, теоретически обоснованных и всесторонне апробированных независимыми исследованиями математических моделей, а также соответствием натурным данным.

### **Апробация результатов исследований.**

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на 20 международных и всероссийских научно-технических конференциях и конкурсах, в частности: International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (Малайзия, г.Куала-Лумпур, 2013г.); 2nd International Conference on Systems and Informatics (Китай, г.Шанхай, 2014г.); XI International Forum on Strategic Technology (г.Новосибирск: НГТУ, 2016г.); 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 (г. Челябинск: ЮУрГУ, 2017г.); IV, V Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» (г.Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2013 г.; г.Томск: ТПУ, 2014г.); Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение» (диплом III степени, г. Новосибирск: НГТУ, 2014г.); VII Международная научная конференция молодых ученых «Электротехника. Электротехнология. Энергетика» (г. Новосибирск: НГТУ, 2015г.); Научно-практическая конференция «Опыт и перспективы применения силовой электроники и электропередач постоянным током для повышения надежности электрических сетей и реализации международных проектов» (г.Москва: ВВЦ, 2016г.); Конкурс научно-инновационных проектов Siemens по направлению «Энергоэффективные технологии для инфраструктуры городов» (Диплом I степени г.Москва, 2014г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 32 печатные работы, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ и патент на изобретение.

**Личный вклад автора.** Основные результаты работы, связанные с анализом, выявлением и обоснованием проблемы полноты и достоверности моделирования функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, направления её решения, а также разработкой концепции всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, структуры и принципов построения средств её реализации, созданием экспериментальных средств и проведением исследований, подтверждающих определяемые концепцией свойства и возможности, получены лично автором диссертационной работы.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы при выполнении государственных контрактов: Соглашение на предоставление гранта от 20.09.2012 г. № 14.В37.21.1506 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» на тему: «Разработка и экспериментальные исследования программно-аппаратных элементов блока моделирования автоматизированной системы интеллектуального управления высоковольтного преобразовательного комплекса на базе вставки постоянного тока»; Гос.задание № 3901 от 01.01.2016 г. «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

Кроме этого, результаты диссертации используются в учебной и научно-исследовательской деятельности кафедры «Электроэнергетические системы» Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета (каф. ЭЭС ЭНИН ТПУ) и необходимы для обоснованного выбора средств объединения отдельно работающих ЭЭС и их частей, в частности Томской ЭЭС, а также оценки режимных условий такого объединения, для решения задач передачи электроэнергии на постоянном токе и др. Указанное использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами каф. ЭЭС ЭНИН ТПУ, ОАО «НИИПТ», ОАО «Томские магистральные сети» и ПАО «ФСК ЕЭС» Восточная ПМЭС.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из списка сокращений и терминов, введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 96 наименований, содержащих 120 страниц, 4 таблицы, 60 рисунков, а также двух приложений на 9 страницах.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена проблема и обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены выносимые на защиту основные положения, а также сведения о методах исследования и достоверности результатов, апробации и публикации, реализации результатов, структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** выявлены и обоснованы причины существования проблемы адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, а также её принципиальной неразрешимости в рамках существующего одностороннего сугубо численного подхода. Данный теоретически обоснованный и подтвержденный свойствами и возможностями существующих ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС вывод соответствует проведенным специально подготовленным верификациям этих ПВК, в частности опубликованным результатам анализа системной аварии в Западной энергосистеме США, выполненного с помощью ПВК ETMSP и натурных данных (рис. 1). Одной из основных причин неудовлетворительных результатов верификации отмечают упрощения моделей оборудования ВПТ, систем их автоматического управления и др.

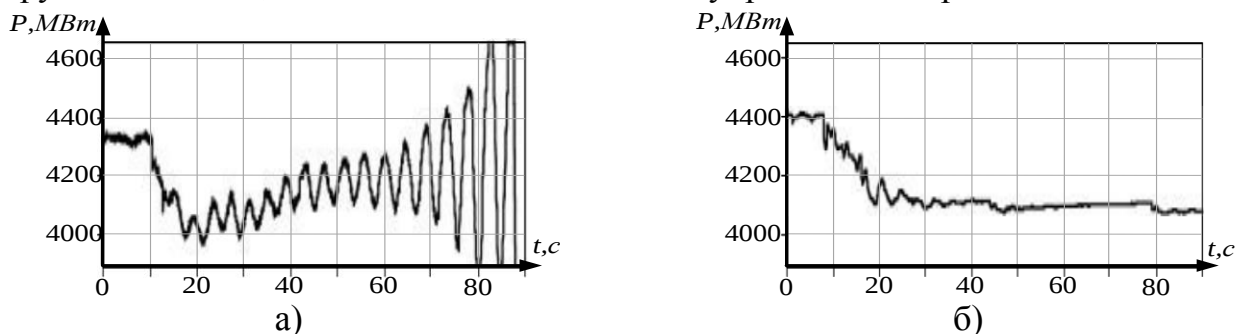


Рисунок 1 – Изменение перетока мощности в линии электропередачи постоянного тока в реальности (а) и результаты моделирования с помощью ПВК ETMSP (б)

Актуальность обозначенной проблемы подтверждает также состояние важнейшего показателя надежности ЭЭС – статистики аварийности в мировой электроэнергетике, согласно которой 50% тяжелых аварий происходит из-за неправильных действий релейной защиты, автоматики и ошибочных или запоздалых действий диспетчерского персонала, главной причиной которых является использование недостаточно полной и достоверной информации о процессах в оборудовании и ЭЭС, получаемой, как уже отмечалось, преимущественно с помощью указанных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

Все вышеобозначенные обстоятельства показывают, что решение рассмотренной проблемы является принципиально невозможным в рамках одностороннего сугубо численного моделирования ЭЭС и единственным путем радикального решения обозначенной проблемы является методологически альтернативный существующему комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование, позволяющее для каждого аспекта решаемой сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы, способы и средства, агрегирование которых обеспечивает успешное решение проблемы в целом.

**Во второй главе** в соответствии с комплексным подходом обоснована и сформулирована концепция радикального решения проблемы всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС:

1) для оборудования ВПТ, не содержащего коммутационные элементы, обосновываются и синтезируются всережимные бездекомпозиционные математические модели, достаточно полно и достоверно воспроизводящие единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных процессов при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах его работы;

2) применяется способ методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале систем дифференциальных уравнений синтезированных математических моделей оборудования ВПТ: трансформаторов связи, фильтров высших гармоник, фазных реакторов, цепи постоянного тока;

3) для осуществления способа методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования ВПТ разрабатываются и используются специализированные параллельные цифро-аналоговые структуры;

4) разрабатывается и применяется соответствующая топологии воспроизводимого СПН цифроуправляемая физическая модель (ЦУ ФМ СПН) на базе цифроуправляемых аналоговых ключей (ЦУАК), обеспечивающая адекватное воспроизведение коммутаций силовых полупроводниковых ключей и спектра всевозможных процессов в СПН в целом;

5) разрабатывается и применяется цифруправляемая физическая модель продольно-поперечного трёхфазного коммутатора (ЦУ ФМ ППК) на базе ЦУАК, обеспечивающая адекватное воспроизведение в ВПТ всевозможных продольных и поперечных трехфазных коммутаций, включая пофазные, необходимых для моделирования функционирования линейных выключателей и различных КЗ;

6) представленные мгновенными значениями напряжений непрерывные математические переменные входных/выходных токов специализированных параллельных цифро-аналоговых структур непрерывного методически точного решения в реальном времени систем дифференциальных уравнений математически моделируемого оборудования ВПТ преобразуются с помощью преобразования напряжение-ток в соответствующие им модельные физические токи и взаимодействие этих структур с ЦУ ФМ СПН, ЦУ ФМ ППК, а также моделируемого ВПТ в аналогично моделируемых ЭЭС в целом, с помощью Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС), осуществляется на модельном физическом уровне;

7) все информационно-управляющие функции, включая моделирование систем автоматического управления (САУ) ВПТ (управление состоянием ЦУАК ЦУ ФМ СПН), релейной защиты ВПТ, автоматизированное и автоматическое управление, в том числе функциональное, параметрами математически моделируемого оборудования ВПТ, управление состоянием ЦУАК ЦУ ФМ ППК, функциональное преобразование и отображение информации осуществляются посредством цифро-аналогового, аналого-цифрового преобразований (ЦАП, АЦП) и ИТ-технологий;

8) для обеспечения современного уровня информационно-управляющих возможностей и гарантированной необходимой инструментальной точности моделирования все разработанные программно-аппаратные средства всережимного моделирования в реальном времени ВПТ реализуются на базе новейших достижений интегральной микроэлектроники и микропроцессорной техники.

Разработана структура осуществления данной концепции, образующая специализированный гибридный процессор (СПП) для всережимного моделирования в реальном времени ВПТ (рис. 2), содержащий гибридные сопроцессоры (ГСП) трансформаторов связи (Т), фильтров высших гармоник (ФВГ), фазных реакторов (Р) и цепи постоянного тока (ЦПТ), представляющие собой соответствующие решаемым системам дифференциальных уравнений математических моделей этого оборудования параллельные цифро-аналоговые структуры методически точного непрерывного неявного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале данных систем с цифровым управлением, в том числе функциональным, их параметрами и преобразованием представленных мгновенными значениями напряжений непрерывных математических переменных входных-выходных токов с помощью преобразователей напряжение-ток ( $u/i$ ) в соответствующие им модельные физические токи. Модельные физические входы/выходы ГСП и СПП ВПТ в целом оснащаются согласно структурной схеме ВПТ выполненными на базе ЦУАК ЦУ ФМ ППК1–8 благодаря чему обеспечивается адекватное воспроизведение всевозможных

коммутационных процессов оборудования ВПТ и ВПТ в ЭЭС в целом. Необходимость реализации в реальном времени алгоритмов САУ ВПТ, релейной защиты, АЦП, оперативного управления ЦУ ФМ ППК и осуществления множества других информационно-управляющих функций предопределяет их разделение и выполнение с помощью нескольких АЦП и взаимодействующих микропроцессоров, специально ориентированных на это распределение и образующих соответствующий микропроцессорный узел (МПУ).

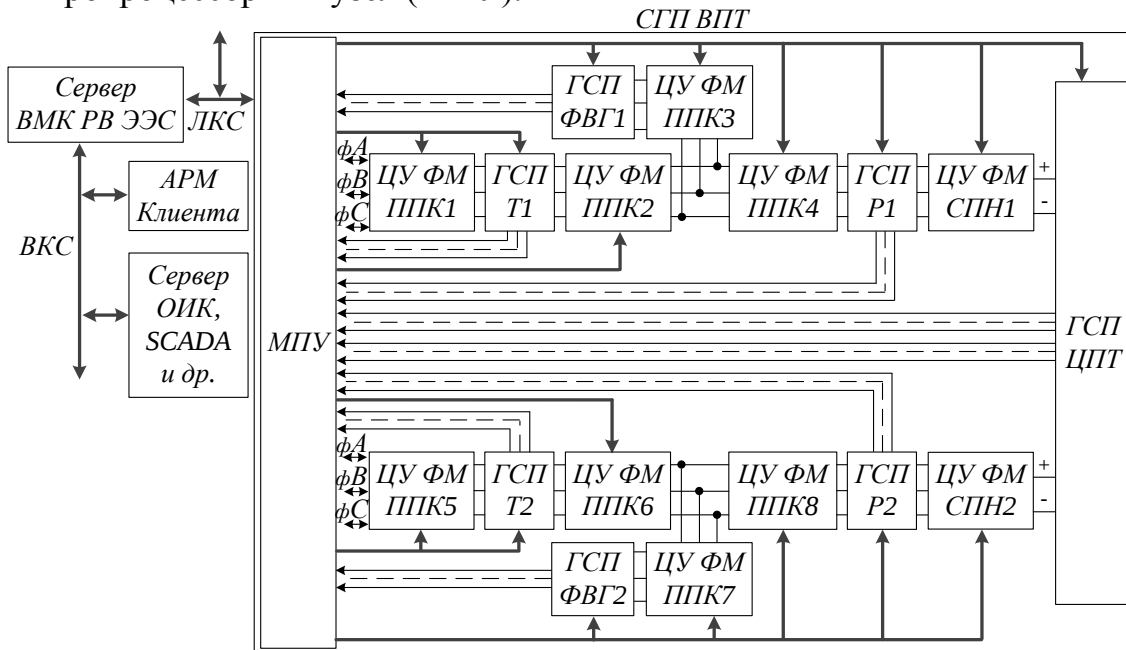


Рисунок 2 –  
Структурная  
схема СГП  
ВПТ

В структуре ВМК РВ ЭЭС естественное функциональное трехфазное взаимодействие СГП ВПТ в узлах моделируемой ЭЭС обеспечивается на модельном физическом уровне, а информационно-управляющее взаимодействие осуществляется посредством центрального процессора МПУ, связанного по локальной компьютерной сети (ЛКС) с Сервером ВМК РВ ЭЭС, взаимодействующим также по внешней компьютерной сети (ВКС) с автоматизированным рабочим местом клиента (пользователя) ВМК РВ ЭЭС (АРМ Клиента) и внешними программно-техническими средствами (Сервер ОИК, SCADA и др.).

В третьей главе рассмотрены принципы построения СГП ВПТ: структурные и функциональные схемы  $j$ -го полюса ГСП ЦПТ и идентичные для каждой фазы ГСП Т1/2, ГСП ФВГ1/2, ГСП Р1/2, 3-х уровневых ЦУ ФМ СПН1/2, ЦУ ФМ ППК1–8, а также МПУ. Структурная схема  $j$ -го полюса ГСП ЦПТ, соответствующая схеме замещения и всережимной математической модели каждого полюса ЦПТ (рис.3), приведена на рисунке 4. Согласно параметрам интегральных микроэлектронных ЦУАК их коммутационные характеристики являются практически идеальными по сравнению с моделируемыми силовыми полупроводниковыми ключами ВПТ, линейными высоковольтными выключателями и различными КЗ, поэтому, для обеспечения адекватности воспроизведения коммутационных процессов ЦУАК дополняются соответствующими моделируемым коммутациям RC-схемами

замещения (рис.5). Синтезированные с учетом вышеизложенного структурные схемы ЦУ ФМ СПН и ЦУ ФМ ППК представлены на рисунке 6.

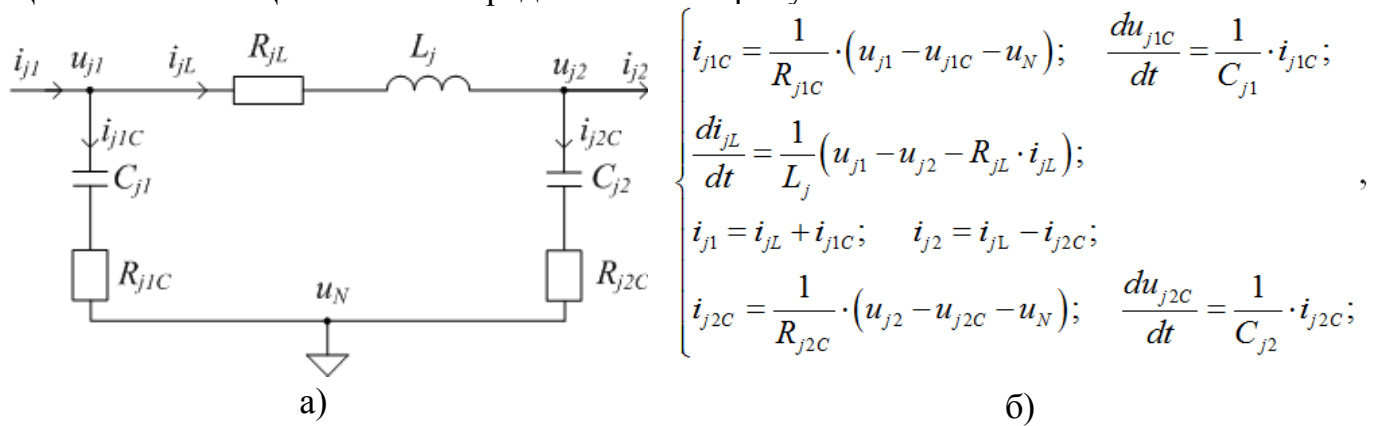


Рисунок 3 – Схема замещения (а) и система уравнений всережимной математической модели  $j$ -го полюса ЦПТ (б), где  $j$  – отрицательный или положительный полюс;  $R_{jL}$  и  $L_j$  – активное сопротивление и индуктивность сглаживающего реактора (СР)  $j$ -го полюса;  $R_{j1C}$ ,  $R_{j2C}$  и  $C_{j1}$ ,  $C_{j2}$  – активные сопротивления и емкости конденсаторных батарей (КБ)  $j$ -го полюса;  $u_{j1C}$ ,  $u_{j2C}$  – напряжения на реактивных сопротивлениях конденсаторных батарей  $j$ -го полюса ЦПТ;  $u_N$  – напряжение нейтрали.

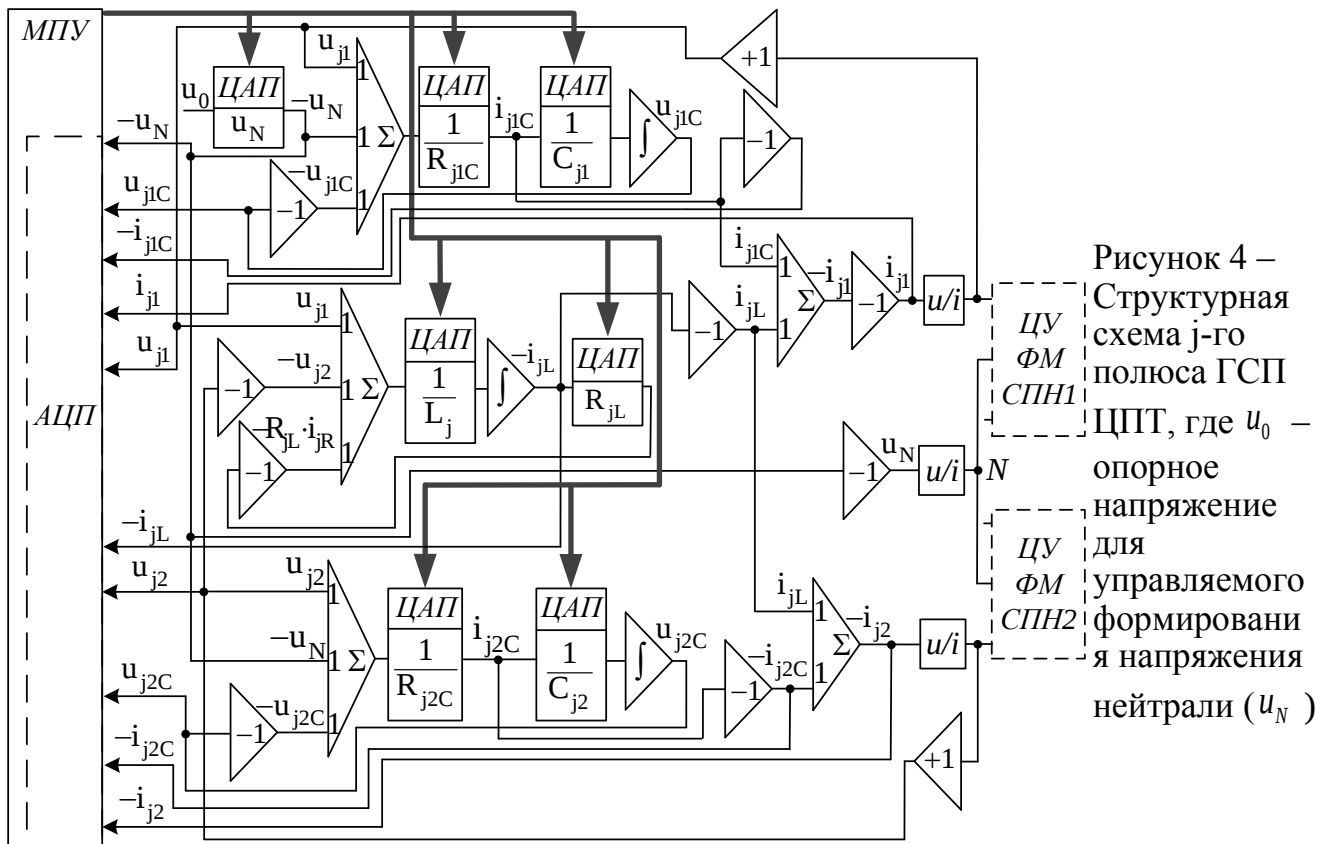


Рисунок 4 – Структурная схема  $j$ -го полюса ГСП ЦУ ФМ СПН1 ЦПТ, где  $u_0$  – опорное напряжение для управления формированием напряжения нейтрали ( $u_N$ )

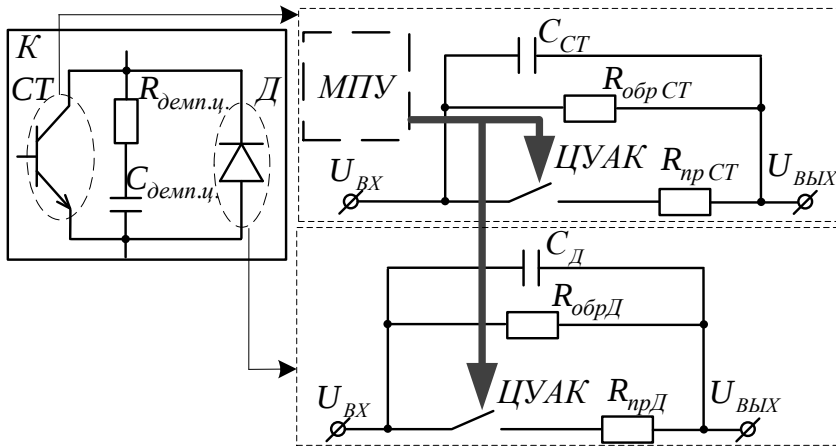


Рисунок 5 – ЦУ ФМ  
а) быстродействующего полностью управляемого полупроводникового  $i$ -го ключа ( $K_i$ ), содержащая модели силового транзистора (СТ) (а) и обратного диода (Д) (б), а также демпфирующей цепи ( $R_{дем.ц.}, C_{дем.ц.}$ )

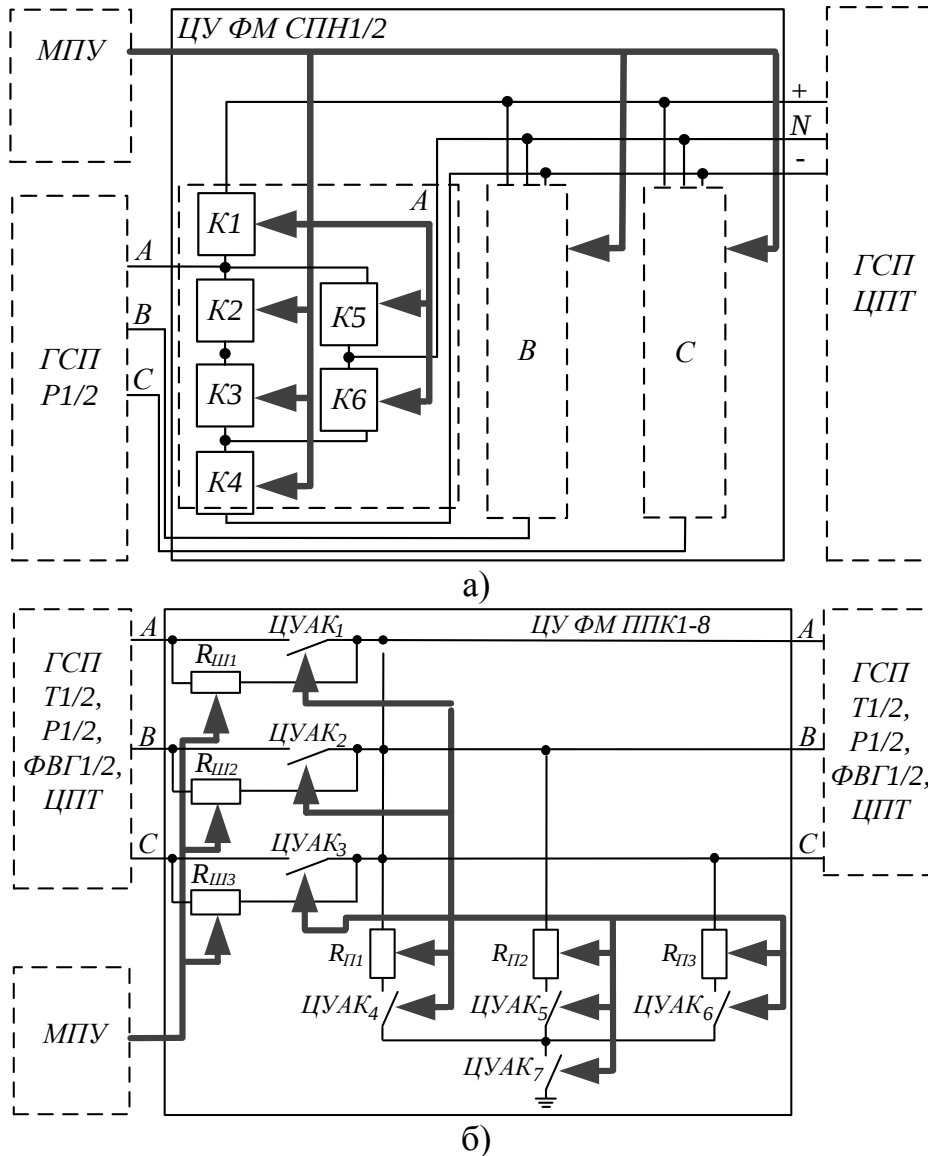


Рисунок 6 – Структурные схемы ЦУ ФМ СПН (а) и ЦУ ФМ ППК (б), где  $R_{ш1-3}$  – цифруправляемые сопротивления, позволяющие учитывать сопротивление шунтов выключателя;  $R_{п1-3}$  – цифруправляемые сопротивления, используемые для учета переходных сопротивлений КЗ

Согласно положению концепции всережимного моделирования функционирования ВПТ в ЭЭС ранее указанные все информационно-управляющие функции СГП ВПТ и требования к ним определяют приведенную на рисунке 7 структуру МПУ СГП ВПТ: 1) центральный процессор (ЦП) предназначен для обеспечения взаимодействия между Сервером ВМК РВ ЭЭС и процессорами аналого-цифрового преобразования ГСП (ПАЦП ГСП), САУ (ПАЦП САУ), процессорами коммутации ЦУ ФМ ППК (ПК ЦУ ФМ ППК) и ЦУ ФМ СПН (ПК ЦУ ФМ СПН), в том числе приема от Сервера ВМК РВ ЭЭС значений параметров базы данных моделируемого оборудования ВПТ и их установки в ЦАП ГСП, передачи данных моделирования на Сервер ВМК РВ ЭЭС, синхронизации работы всех процессоров МПУ СГП моделируемого оборудования в ВМК РВ ЭЭС, перепрограммирования процессоров МПУ СГП ВПТ и др.; 2) посредством ПАЦП ГСП обеспечивается аналого-цифровое преобразование, чтение и обработка данных моделирования ГСП, а также функциональное управление, включая динамическое, задаваемыми в ЦАП ГСП параметрами моделируемого оборудования; 3) ПАЦП САУ предназначен для оцифровки и функциональной обработки данных моделирования, необходимых для реализации алгоритмов САУ ВПТ (преобразование координат, формирование управляющих воздействий для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и др.); 4) в ПК ЦУ ФМ СПН реализуются ШИМ и формирование управляющих воздействий для ЦУАК ЦУ ФМ СПН, а также быстродействующие защиты ВПТ; 5) с помощью ПК ЦУ ФМ ППК осуществляется управление ЦУАК ЦУ ФМ ППК, включая выполнение коммутаций в заданные моменты времени.

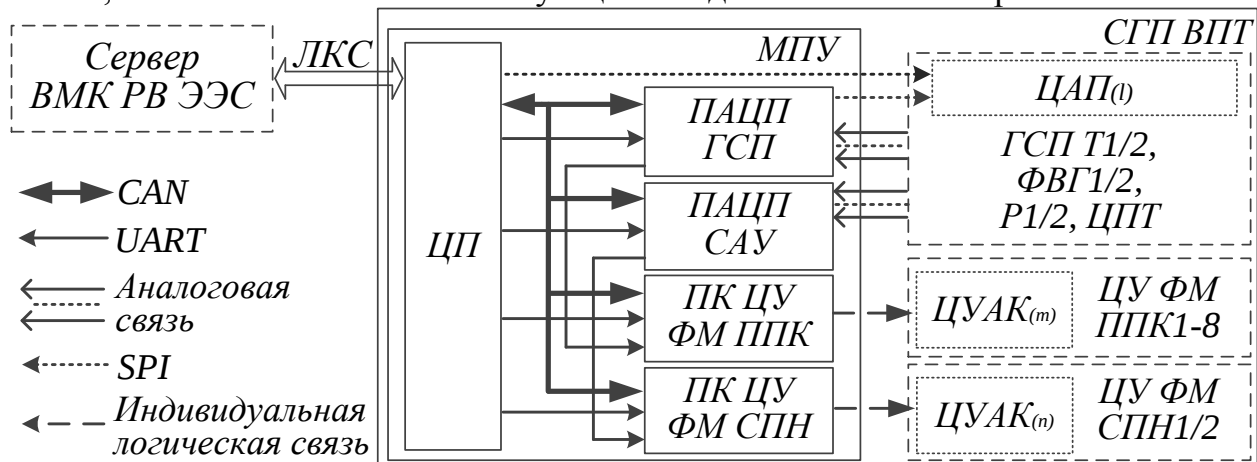


Рисунок 7 – Структурная схема МПУ СГП ВПТ, где шина CAN предназначена для широковещательных взаимодействий между процессорами МПУ, UART – для индивидуального взаимодействия между процессорами МПУ, SPI – для управления параметрами моделируемого оборудования, задаваемыми в ЦАП ГСП, ЛКС – информационно-управляющего взаимодействия ЦП с Сервером ВМК РВ ЭЭС

В четвертой главе приведены результаты тестовых исследований разработанных ГСП Т1/2, ГСП ФВГ1/2, ГСП Р1/2, 3-х уровневых ЦУ ФМ СПН1/2, ЦУ ФМ ППК1–8 и МПУ СГП ВПТ, подтверждающие их адекватность, фрагменты которых представлены на рисунках 8–14.

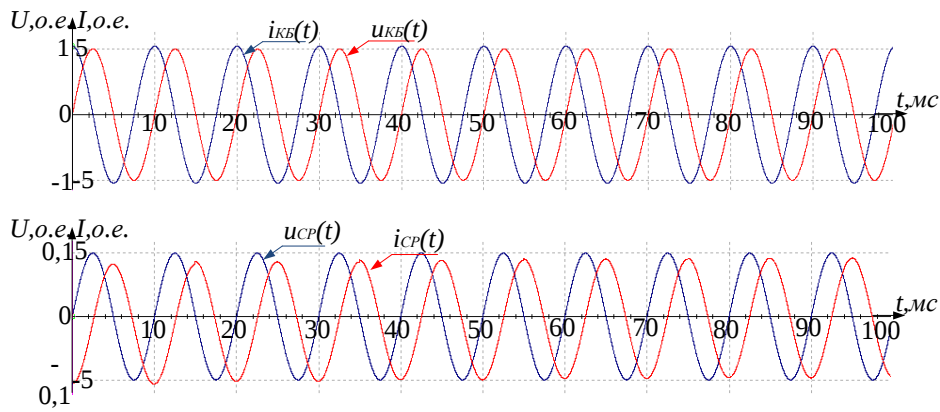


Рисунок 8 –  
а) Осциллограммы  
напряжения и тока,  
воспроизводимые  
компьютерными  
моделями КБ (а) и  
б) СР (б) одного из  
полюсов ГСП ЦПТ

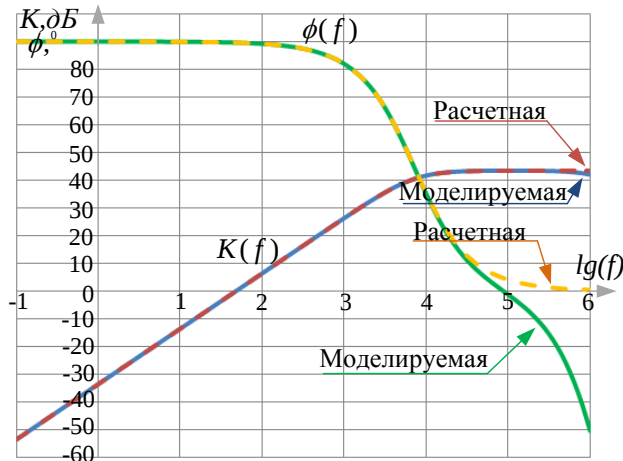


Рисунок 9 – Логарифмические амплитудно-  
частотные (ЛАЧХ) и фазо-частотные  
характеристики (ЛФЧХ) модели КБ ЦПТ при  
 $C_{KB} = 2240 мкФ$  и  $R_{KB} = 0,01 Ом$

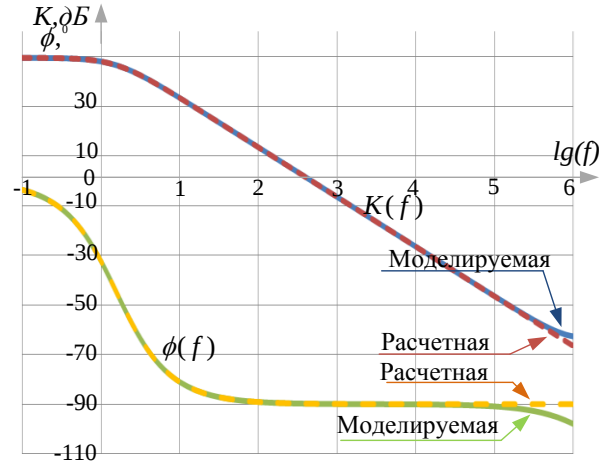
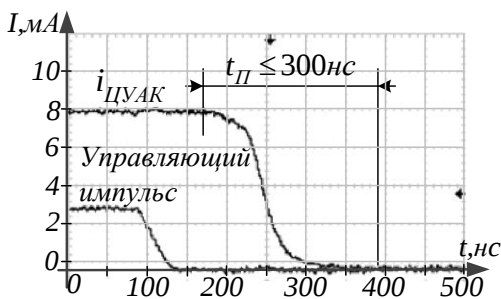
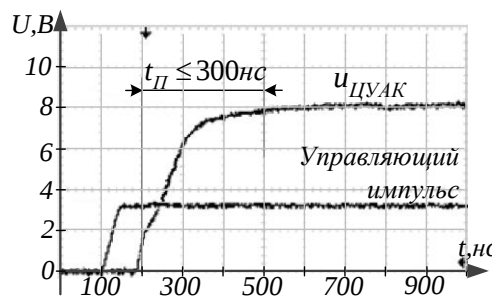


Рисунок 10 – ЛАЧХ и ЛФЧХ модели СР  
ЦПТ при  $L_{CP} = 500 мкГн$  и  $R_{CP} = 4,9 мОм$

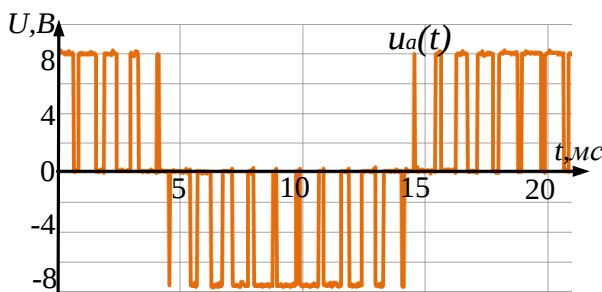


а)

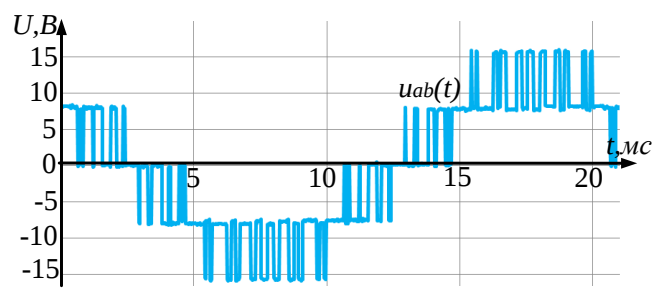


б)

Рисунок 11 –  
Осциллограммы  
процессов  
переключения  
тока (а) и  
напряжения (б)  
ЦУАК



а)



б)

Рисунок 12 – Осциллограммы фазного (а) и линейного (б) напряжений на выходе ЦУ  
ФМ СПН на базе ЦУАК, функционирующего в режиме инвертора

МПУ СГП ВПТ реализован в значительной мере подобно реальным средствам данного назначения с помощью интегральной микропроцессорной техники и поэтому целью его тестовых исследований является оценка соответствия времён формирования измеряемых режимных параметров и управляющих воздействий, а также выполнения алгоритмов САУ и определение запаса вычислительных ресурсов микроконтроллеров, обеспечивающего возможность усложнения реализованных и добавления новых контуров регулирования САУ ВПТ для различных конкретных целей (рис. 13–14).

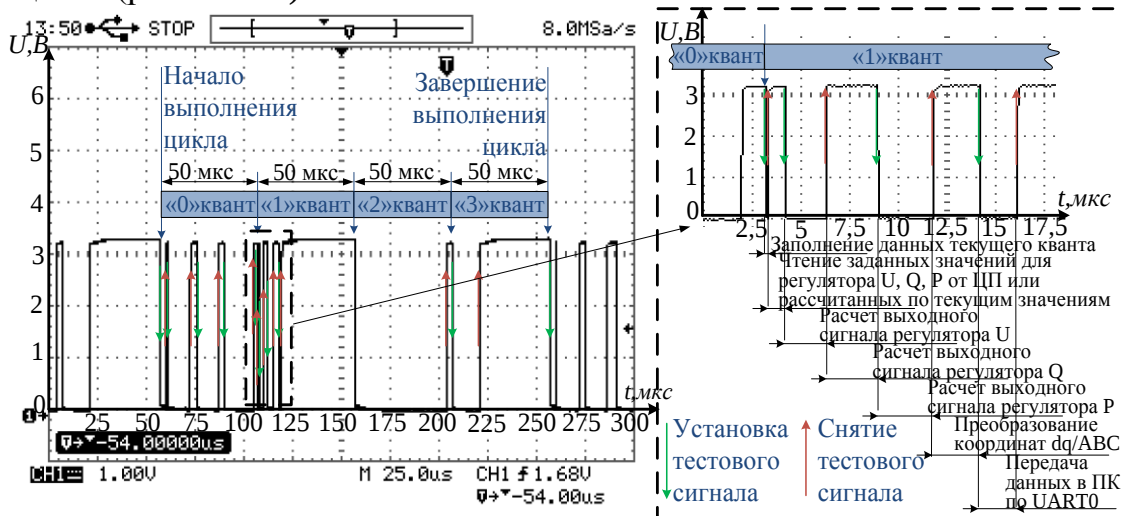


Рисунок 13 –  
Диаграмма  
распределения  
времени  
выполнения  
операций  
программы  
ПАЦП САУ

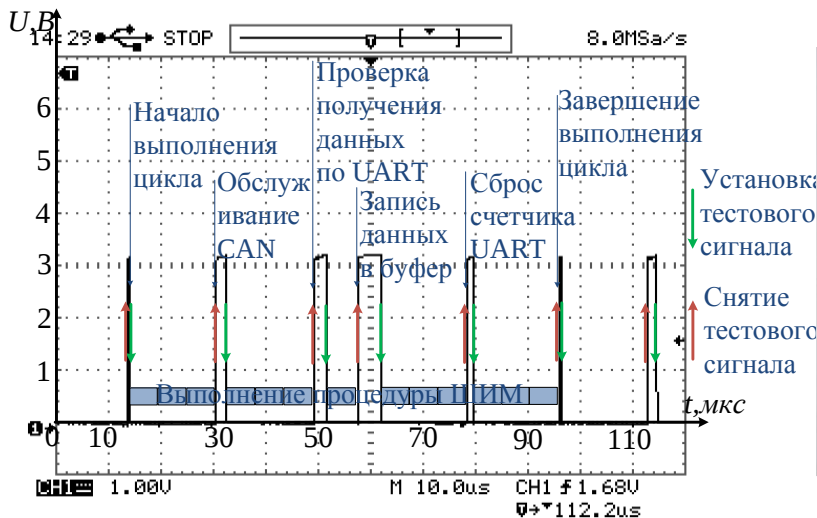


Рисунок 14 – Диаграмма распределения времени выполнения операций программы ПК ЦУ ФМ СПН

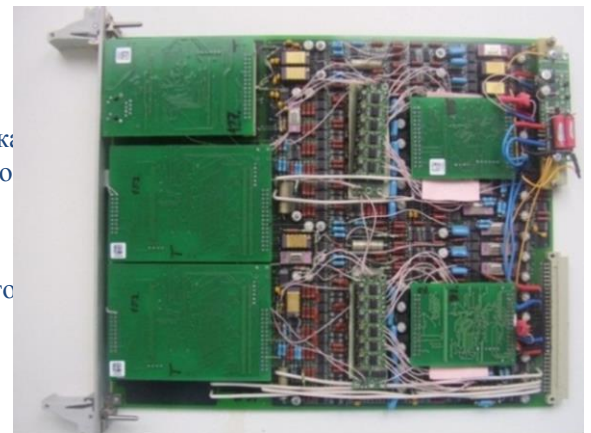


Рисунок 15 – Внешний вид СГП ВПТ

В пятой главе приведены результаты исследований воспроизведения процессов в реальной ЭЭС с ВПТ, полученные с помощью созданных на базе разработанного СГП ВПТ (рис.15) и ВМК РВ ЭЭС экспериментальных средств при объединении раздельно работающих частей Томской ЭЭС и регулировании, включая реверс, мощности через ВПТ между объединяемыми частями ЭЭС, а также влияния ВПТ на аварийные процессы.

Исследованиями установлено, что максимальное значение угла между напряжениями на шинах ПС Парабель (место разделения Томской ЭЭС), при котором возможно успешное объединение, составляет  $\delta \leq 47^\circ$ . Данное обстоятельство указывает на целесообразность и предпочтительность применения ВПТ, гарантирующей надежное объединение независимо от значения  $\delta$  и его изменения, включая предельное значение (рис. 16). Переток мощности через ВПТ в воспроизводимом квазиустановившемся режиме Томской ЭЭС отражает динамическая панель наблюдения и управления (ДПНУ) программного обеспечения экспериментальных средств всережимного моделирования ВПТ в ЭЭС (рис. 17), а процессы регулирования мощности, включая реверс, и положительное влияние ВПТ на аварийные процессы отображают приведенные на рисунках 18–20 осциллограммы.

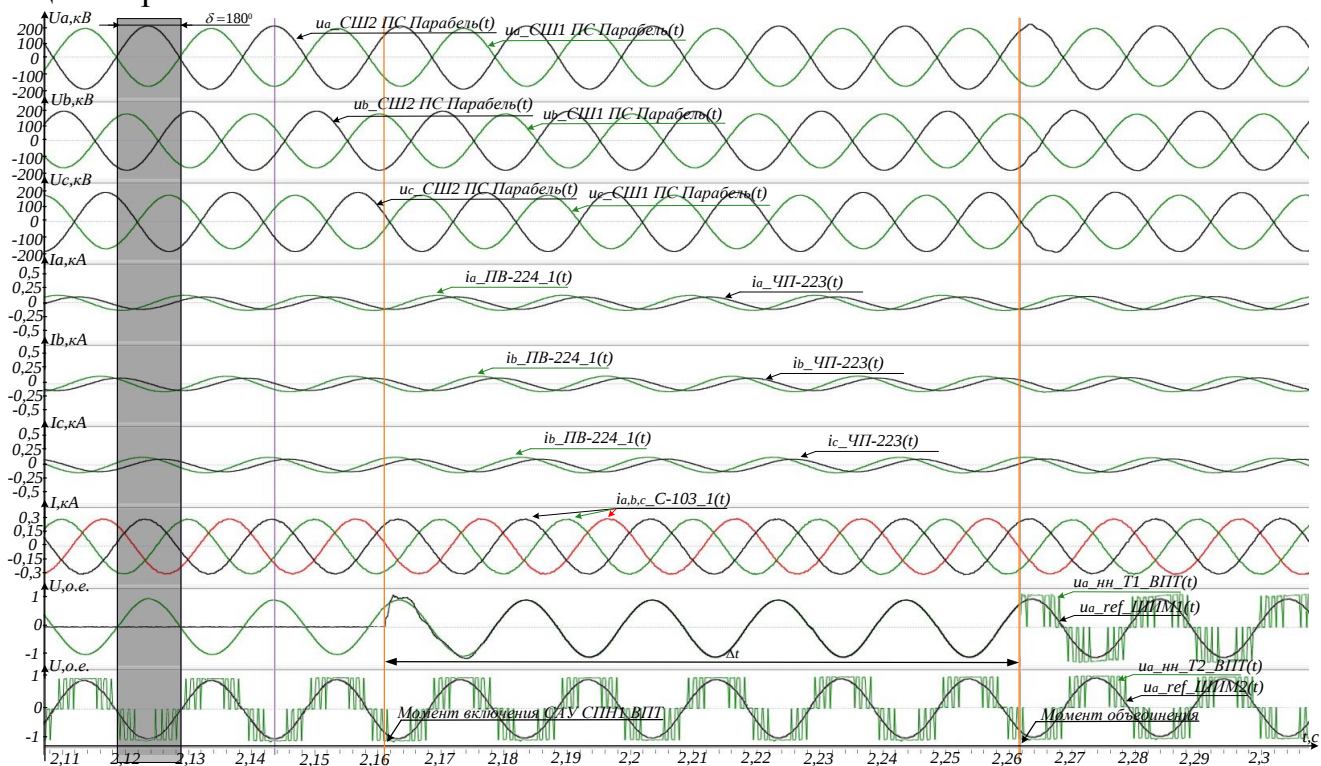


Рисунок 16 – Объединение раздельно работающих частей Томской ЭЭС с помощью ВПТ на ПС Парабель при  $\delta \approx 180^\circ$ , где  $\Delta t$  – время включения выключателя

ВПТ (Парабель)

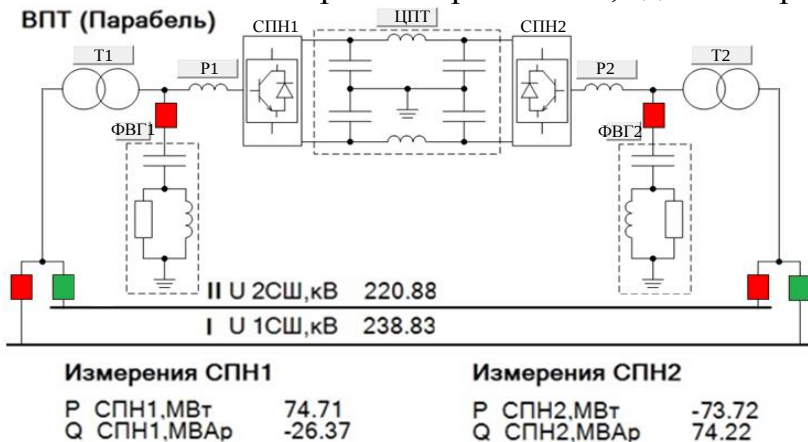
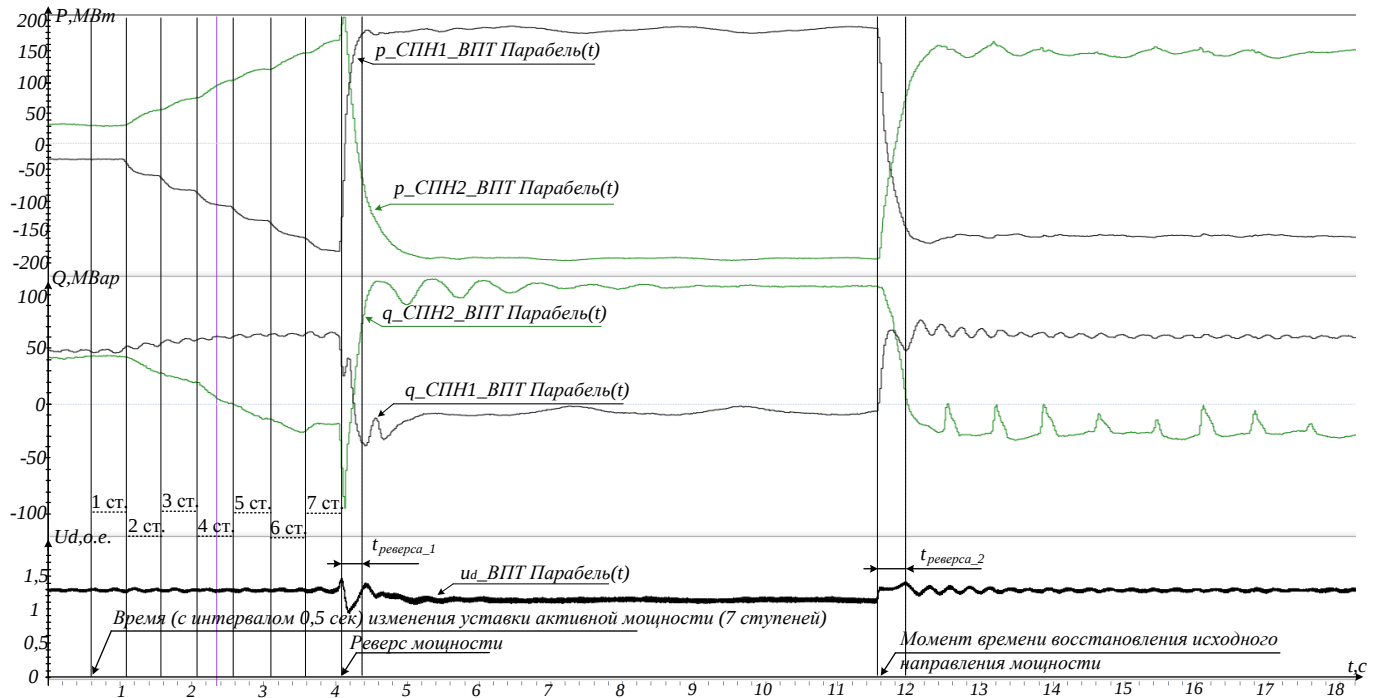


Рисунок 17 – ДПНУ СГП ВПТ, отражающая текущее схемно-режимное состояние



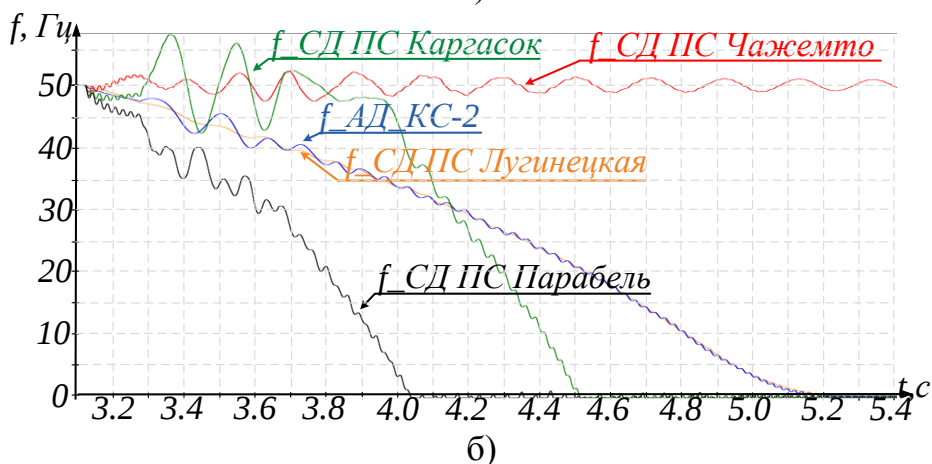
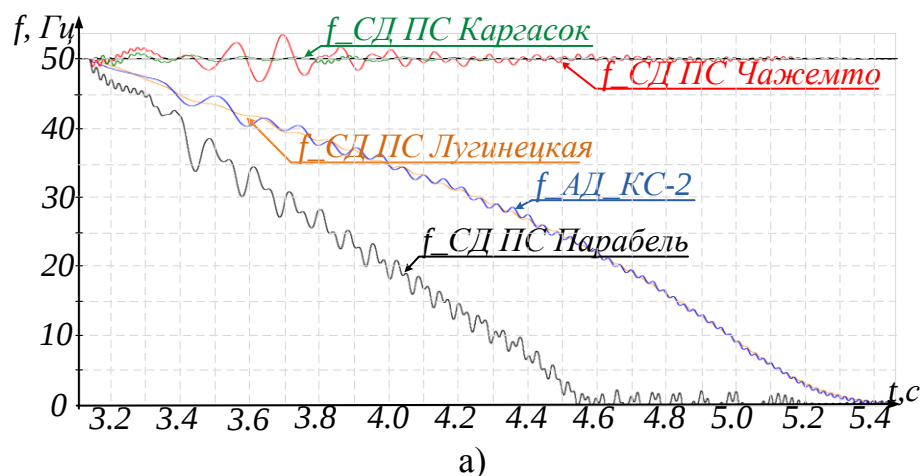


Рисунок 20 – Осциллограммы изменения частот вращений синхронных и асинхронных двигателей при трехфазном КЗ на ВЛ ЧП\_223 (ПС Каргасок – ПС Парабель) с ВПТ (а) и без ВПТ (б)

Результаты проведенного комплекса экспериментальных исследований, в том числе представленные их фрагменты, подтверждают свойства и возможности созданных средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в ЭЭС, обеспечивающие получение всей необходимой информации о процессах в ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом необходимой для надежного и эффективного решения различных задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ и ЭЭС с ВПТ.

#### Основные выводы:

1. Проведенные в рамках диссертационной работы исследования существующего сугубо численного подхода к моделированию ЭЭС позволили выявить и теоретически строго обосновать причины, препятствующие осуществлению адекватного моделирования всережимного функционирования ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом, реализуемому с помощью основанных на этом подходе, доминирующих в настоящее время многочисленных ПВК расчета режимов и процессов в ЭЭС.

2. Ввиду принципиальной неустранимости выявленных причин в рамках одностороннего сугубо численного подхода единственным путем решения обозначенной проблемы может быть только методологически альтернативный комплексный подход, в соответствии с которым предложена концепция всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в ЭЭС.

3. Предложенная концепция обеспечила возможность разработки структуры и принципов построения на её основе средств всережимного адекватного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале функционирования ВПТ в ЭЭС, образующих СГП ВПТ, адаптированных для применения в составе аналогично моделируемых ЭЭС;

4. Для подтверждения определяемых концепцией свойств и возможностей разработанного СГП ВПТ проведены тестовые компьютерные исследования моделей оборудования ВПТ, а также проведен комплекс экспериментальных исследований разработанных средств всережимного моделирования функционирования ЭЭС с ВПТ в целом, результатами которых полностью подтверждены свойства и возможности созданных средств, обеспечивающие получение полной и достоверной информации о квазиустановившихся и переходных процессах в ВПТ и ЭЭС с ВПТ в целом при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы, необходимой для надежного и эффективного решения широкого спектра задач проектирования, исследования и эксплуатации ВПТ и ЭЭС с ВПТ.

**Основные публикации по теме диссертации** отражены в следующих публикациях:

**Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Уфа Р.А., Гусев А.С., Васильев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А. Проблема адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах и средства её решения (часть 1) // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. – № 5. С 32–46.

2. Уфа Р.А., Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность. – 2017. № 5 (752). С. 18– 27.

3. Уфа Р.А., Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем // Газовая промышленность. 2017. № 6(753). С. 94–104.

4. Уфа Р.А., Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Рубан Н.Ю., Сулайманов А.О., Суворов А.А. Исследование влияния управляемых шунтирующих реакторов на режимы работы системы электроснабжения Эльгинского горнодобывающего комбината Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. – 2016. Т. 327. № 7. С. 46–57.

5. Уфа Р.А., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О. Программно-технические средства моделирования противоаварийной автоматики регулирования частоты и мощности турбин // Автоматизация в промышленности. – 2015. № 9. С. 6–9.

6. Уфа Р.А., Прохоров А.В., Васильев А.С., Рубан Н.Ю. Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2014. Т. 324. № 4. С. 123–133.

7. Уфа Р.А., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Андреев М.В. Полигон для отработки решений по построению активно-адаптивных сетей на базе Всережимного моделирующего комплекса реального времени // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. № 4. С. 292–296.

#### **Публикации в других изданиях:**

1. Ufa R.A., Borovikov Y.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Vasilev A.S., Andreev M.V., Ruban N.Y., Suvorov A.A. A hybrid simulation model for VSC HVDC // IEEE Transactions on Smart Grid. – Volume 7, Issue 5, September 2016, Pages 2242-2249.

2. Ufa R.A., Vasilev A.S., Gusev A.S., Suvorov A.A. Development of hybrid model of STATCOM // Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology. – Novosibirsk, Russia, 2017. – pp. 113-117.

3. Уфа Р.А., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Васильев А.С., Лозинова Н.Г., Суслова О.В. Гибридная модель вставки постоянного тока // Энергия единой сети. 2016. – № 2 (25). С. 52–61.

4. Ufa R.A., Borovikov Y.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O. Hybrid real-time simulator of power system for advanced simulation of the FACTS and HVDC system based on voltage source converter // 2014 2nd International Conference on Systems and Informatics. – Shanghai, China, 2014. – pp. 148–152.

5. Ufa R.A., Prokhorov A.V., Vasilev A.S. Synthesis of hybrid models for advanced simulation of HVDC systems // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2014. Vol. 3(2). pp. 207–213.

6. Уфа Р.А., Васильев А.С., Прохоров А.В., Гаврилов Е.Б. Разработка средств гибридного моделирования в реальном времени высоковольтных передач и вставок постоянного тока // Сборник научных трудов IV международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Новочеркасск, 2013. – pp. 1–4.

#### **Патент на изобретение:**

1. Пат. 2606308 С 1 Российская Федерация, МПК G06G 7/62. Устройство для моделирования вставки постоянного тока в энергетических системах / Уфа Р.А., Гусев А.С., Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Сулайманова В.А.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – 2015151402; заявл. 01.12.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.