

На правах рукописи



БОРОВИКОВ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**МУЛЬТИПРОЦЕССОРНАЯ МОДЕЛИРУЮЩАЯ СИСТЕМА
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С
АКТИВНО-АДАПТИВНЫМИ СЕТЯМИ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

17 АПР 2014



005547240

Томск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**» (ФГБОУ ВПО «НИ ТПУ»)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Гусев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: **Воропай Николай Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН, Институт систем
энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
директор (г. Иркутск)

Гольдштейн Валерий Геннадьевич,
доктор технических наук, профессор, кафедра ав-
томатизированных электроэнергетических систем
ФГБОУ ВПО Самарский государственный техни-
ческий университет, профессор (г. Самара)

Паздерин Андрей Владимирович,
доктор технических наук, профессор, кафедра ав-
томатизированных электрических систем ФГАОУ
ВПО Уральский федеральный университет им.
первого Президента России Б.Н. Ельцина,
заведующий кафедрой (г. Екатеринбург)

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образо-
вательное учреждение высшего профессионально-
го образования **Сибирский федеральный уни-
верситет** (г. Красноярск)

Защита состоится 19 июня 2014 года в 14 часов (ауд. 227) на заседании диссертационного совета Д 223.008.01 при ФБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта» по адресу: 630099, г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, ФБОУ ВПО «НГАВТ» (тел./факс (383) 222-49-76; E-mail: ngavt@ngs.ru; ese_sovet@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта».

Автореферат разослан 07 апреля 2014 г.

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета



Горелов Сергей Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблема и актуальность. Сложность, протяженность, разветвленность электроэнергетических систем (ЭЭС) и единство, непрерывность, быстротечность протекающих в них процессов генерации, преобразования, передачи, распределения и потребления электроэнергии при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы составляют объективную совокупность факторов зависимости надежности и эффективности ЭЭС от уровня и качества их автоматизации. Поэтому одной из основных тенденций современного развития и совершенствования ЭЭС является радикальное повышение их целенаправленной автоматической управляемости. Причем, поскольку наименее автоматизированной в настоящее время остается электросетевая составляющая ЭЭС, акцентными в этой тенденции становятся электрические сети, а главными средствами ее реализации устройства и технологии FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems – Гибкие системы передачи электроэнергии переменным током) на базе силовой полупроводниковой электроники, которые совместно с внедрением микропроцессорной автоматики и информационно-управляющих систем, использующих новейшие достижения IT-технологий, позволяют преобразовывать существующие преимущественно пассивные электрические сети в активно-адаптивные (ААС) и, в конечном счете, создать ЭЭС с ААС. Однако, достижение этой цели связано с решением комплекса сложных и нестандартных задач проектирования, исследования и последующей эксплуатации ЭЭС с ААС, в частности:

- определение и обоснование наиболее эффективных состава и мест установки устройств FACTS;
- разработка и исследование законов и алгоритмов целенаправленного и системного управления конкретными устройствами FACTS, обеспечивающими регулирование напряжений и потоков реактивной мощности, увеличение пропускной способности линий электропередачи и распределение потоков мощности, демпфирование колебаний, минимизацию потерь, ограничение токов коротких замыканий, компенсацию гармоник, объединение несинхронно работающих энергорайонов и энергосистем;
- достаточно полный и достоверный бездекомпозиционный анализ условий работы и функционирования силового оборудования, включая устройства FACTS, все виды и типы релейной защиты и автоматики (РЗА), а также определение адаптированных и адаптируемых к конкретным условиям настроек этих средств;
- разработка и исследование создаваемых структур информационно-управляющих систем ЭЭС с ААС;
- обеспечение возможности достаточно полного и достоверного автоматизированного анализа, в том числе оперативного и в реальном времени, непрерывного спектра текущих, ретроспективных и других процессов, протекающих в оборудовании при различных режимах их работы для оценок

апериодической, колебательной, динамической устойчивости ЭЭС с ААС и других целей, а также создание обладающих данными свойствами и возможностями средств обучения и тренажа специалистов для работы в ЭЭС с ААС.

Если в обозначенных задачах исключить аспекты, присущие ЭЭС с ААС, то и в интерпретации для обычных ЭЭС однозначно прослеживается очевидное условие их надежного и эффективного решения – наличие необходимой для этого возможности получения, в том числе в реальном времени, полной и достоверной информации о процессах во всем значимом оборудовании и ЭЭС в целом при всевозможных нормальных и аномальных режимах их функционирования. Такая возможность, по вполне понятным причинам, может быть реализована только путем моделирования ЭЭС, причем преимущественно математического.

Большой вклад в развитие этой области науки внесли Арзамасцев Д.А., Аюев Б.И., Баринов В.А., Бартоломей П.И., Бушуев В.В., Веников В.А., Воропай Н.И., Гамм А.З., Гольдштейн В.Г., Горелов В.П., Гусев А.С., Дьяков А.Ф., Ерохин П.М., Жданов П.С., Зильберман С.М., Кочкин В.И., Кошечев Л.А., Кучеров Ю.Н., Лизалек Н.Н., Лоханин Е.К., Масленников В.А., Моржин Ю.И., Манусов В.З., Мисриханов М.Ш., Паздерин А.В., Рабинович М.А., Смоловик С.В., Соколов Н.Н., Строев В.А., Фишов А.Г., Хрущев Ю.В., Чебан В.М., Шакарян Ю.Г., Acha E., Andersson G., Hingorani N., Retanz C., Stychinski Z., Zhang X.-P. и др.

Между тем, во всех используемых в настоящее время для подобных целей многочисленных программах расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС постоянно применяются, несомненно в ущерб полноте и достоверности, нередко неприемлемые для сложных задач, известные по специализациям и характеристикам данных программ упрощения и ограничения для математических моделей ЭЭС и условий их решения. Главной причиной необходимости этих упрощений и ограничений является то, что достаточно полная и достоверная трехфазная математическая модель любой реальной ЭЭС, с учетом допустимого частичного эквивалентирования, всегда содержит очень жесткую и чрезвычайно высокого порядка нелинейную систему дифференциальных уравнений, плохо обусловленную, согласно теории методов дискретизации для дифференциальных уравнений, на ограничительных условиях применимости методов их численного интегрирования, неизбежно составляющих вычислительное ядро программ этого назначения. Поэтому ее удовлетворительное решение маловероятно, а для улучшения обусловленности необходимо снижать жесткость, дифференциальный порядок, нелинейность и ограничивать интервал решения, осуществимые только за счет декомпозиции режимов и процессов ЭЭС, осуществления математических моделей оборудования и ЭЭС в целом, а также сокращения интервала воспроизведения процессов. Кроме того, безотносительно к конкретным методам численного интегрирования дифференциальных уравнений, упрощениям и ограничениям, всегда неизвестной остается присущая им действи-

тельная методическая ошибка решения, которая может накапливаться, и ее определение в теории этих методов отнесено к разряду фундаментальных проблем.

В силу методического характера рассмотренной причины, определяемые ею указанные негативные следствия возникают при сугубо численном моделировании любых больших динамических систем, независимо от используемой компьютерной техники, и в рамках этого одностороннего подхода принципиально неустранимы. Единственной методологической альтернативой, позволяющей радикально решать проблему адекватного моделирования больших динамических систем, может служить комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное (аналоговое, цифровое и физическое) моделирование, открывающий возможность для каждого значимого аспекта сложной проблемы подобрать и создавать наиболее эффективные методы и средства, агрегированная совокупность которых обеспечивает требуемый уровень решения проблемы в целом.

Данный подход изучается и обсуждается во многих развитых странах. В 1998 году в США инициирован и ежегодно проводится в разных странах международный симпозиум «Hybrid Systems: Computation and Control» (HSCC) (Гибридные системы: вычисление и управление).

Известные результаты разработки на основе комплексного подхода средств гибридного моделирования традиционных ЭЭС подтверждают эффективность этой методологической альтернативы. Вместе с тем, максимально достигаемый в соответствии с этим направлением технико-экономический результат всегда зависит от концепции, ориентированной на решение конкретной проблемы и всех ее значимых аспектов, определяющей создаваемые и агрегируемые для ее реализации средства, что исключает их невостребованную избыточность и связанные с этим усложнение и удорожание. Поскольку состав оборудования, функционирование и задачи проектирования, исследования и эксплуатации обычных ЭЭС и ЭЭС с ААС, значительно различаются, указанные средства концептуально не ориентированы на решение проблемы адекватного моделирования ЭЭС с ААС. Значительность этого различия определяется, прежде всего, наличием в ЭЭС с ААС быстродействующих устройств FACTS на базе управляемых полупроводниковых силовых ключей, непрерывно функционирующих, в том числе междуфазно, при различных режимах работы ЭЭС с ААС: статических тиристорных компенсаторов (СТК), управляемых шунтирующих реакторов (УШР), статических синхронных компенсаторов (СТАТКОМ), объединенных регуляторов потоков мощности (ОРПМ), управляемых продольных компенсаторов (УПК), фазоповоротных устройств (ФПУ), ограничителей токов коротких замыканий (ОТКЗ), вставок несинхронных связей (ВНС) и др., которые существенно изменяют и усложняют процессы в оборудовании и ЭЭС в целом, соответственно режимы и условия их работы, в том числе РЗА. Отмеченная специфика ЭЭС с ААС, особенно связанная с малоисследованными новыми динамическими свойствами такого рода электрических

сетей и энергосистем, не только радикально усложняет собственно проблему адекватного моделирования ЭЭС, но и порождает взаимосвязанную с ней проблему аналогичного моделирования информационно-управляющих систем целенаправленного и системного автоматического регулирования режимов и процессов в ЭЭС с ААС с помощью устройств FACTS, от решения которых зависит наличие указанной ранее возможности получения, в том числе оперативного и в реальном времени, полной и достоверной информации о всевозможных процессах в оборудовании и ЭЭС с ААС в целом, необходимой для их надежного и эффективного проектирования, исследования и эксплуатации. Рассмотренная актуальность реализации этой возможности определяет цель данной работы.

Целью работы является создание средств моделирования, позволяющих надежно и эффективно решать задачи исследования, проектирования и эксплуатации ЭЭС с ААС.

Для достижения этой цели разработана и реализована концепция адекватного моделирования ЭЭС с ААС. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

1 Исследование проблемы и актуальности адекватного моделирования ЭЭС с ААС.

2 Обоснование и разработка концепции непрерывного трехфазного моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС при различных режимах их работы, исключающей необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математических моделей оборудования, ЭЭС с ААС в целом и условий их решения и реализации.

3 Разработка структуры и принципов построения средств реализации концепции непрерывного трехфазного моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС, агрегируемую в специализированную мультипроцессорную программно-техническую систему гибридного типа, образующую мультипроцессорную моделирующую систему реального времени ЭЭС с ААС (далее **Моделирующая система**).

4 Обоснование и синтез полных и достоверных математических моделей значимого основного и вспомогательного оборудования ЭЭС с ААС: устройств FACTS, синхронных и асинхронных электрических машин, первичных двигателей и систем возбуждения, трансформаторов, линий электропередачи и других элементов ЭЭС с ААС.

5 Разработка специализированных процессоров для всех видов основного оборудования ЭЭС с ААС, адаптируемых для их возможных типов и обеспечивающих непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале математических моделей соответствующих видов и типов этого трехфазного оборудования с адекватным учетом функционирования вспомогательного и сопутствующего оборудования, в том числе средств РЗА, и осуществление всевозможных полностью управляемых продольных и поперечных трехфазных, пофазных коммута-

ций, а также все формы представления информации и ее функциональное преобразование.

6 Разработка структуры и принципов реализации программного обеспечения Моделирующей системы, обеспечивающих все виды современных автоматизированных и автоматических информационно-управляющих возможностей, необходимых для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС.

7 Практическая реализация разработанных концепции и средств ее осуществления на базе новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий.

8 Экспериментальное исследование функциональных и эксплуатационно-технических свойств и возможностей созданной Моделирующей системы.

Методы исследования. Решение поставленных в диссертации задач обусловило необходимость применения широкого спектра теоретических и экспериментальных методов и способов исследования: теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, теории линейных и нелинейных электрических цепей с сосредоточенными и распределенными параметрами, теории автоматического управления, теории точности и чувствительности вычислительных устройств, непрерывного неявного методически точного интегрирования дифференциальных уравнений, схемотехники на интегральных микросхемах, IT-технологий, технологий FACTS и пр. Кроме этого, специфика, свойства и возможности разработанных средств непрерывного моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС обусловили и позволили обосновать и применить специализированную экспериментальную методику оценки функциональных характеристик этих средств. Данная методика основана на указанных особо выделенных свойствах и возможностях: непрерывности и бездекомпозиционности, использовании для воспроизведения всего спектра нормальных и аномальных процессов одних и тех же методически точно решаемых достаточно полных и достоверных всережимных математических моделей оборудования и ЭЭС с ААС в целом, которые в совокупности обеспечивают возможность названной оценки для всего спектра процессов по результатам моделирования квазиустановившихся процессов основной частоты 50 Гц, надежно проверяемых с помощью реальных данных оперативно-информационных комплексов (ОИК), SCADA ЭЭС.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1 Предложена концепция, позволяющая реализовать непрерывное бездекомпозиционное трехфазное моделирование в реальном времени электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями.

2 Разработаны принципы и структура построения средств трехфазного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем с актив-

но-адаптивными сетями, образующие специализированную мультипроцессорную программно-техническую систему гибридного типа.

3 Впервые на основе гибридного моделирования разработаны модели устройств гибких электропередач, позволяющие достоверно воспроизводить процессы при различных режимах их работы.

4 Разработаны и усовершенствованы специализированные процессоры, обеспечивающие методически точное решение синтезированных математических моделей элементов электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями.

5 Предложена структура и принципы построения программного обеспечения, позволяющие реализовать гибкое управление мультипроцессорной системой моделирования электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями.

Научно-техническая новизна ряда выполненных значимых разработок подтверждена патентами РФ на изобретения № 2469393, 2469394, 2479025, 2494457, 2500028.

Практическая ценность. Разработанная концепция адекватного моделирования ЭЭС с ААС и образующие специализированную мультипроцессорную моделирующую систему реального времени гибридного типа программно-технические средства ее осуществления, в отличие от используемых в настоящее время средств сугубо численного моделирования ЭЭС, исключают необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений применяемых моделей ЭЭС с ААС и условий их реализации, что позволяет:

- полностью отказаться от декомпозиции режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС с ААС в целом, существенно снижающей адекватность их моделирования;

- разрабатывать и применять для моделирования всех видов и типов оборудования ЭЭС с ААС, в том числе устройств FACTS, высокоадекватные динамические математические модели, полно и достоверно описывающие весь реальный непрерывный спектр значимых процессов в моделируемом оборудовании и ЭЭС с ААС в целом при различных режимах их работы;

- выполнять непрерывное в реальном времени и на неограниченном интервале методически точное решение жесткой нелинейной системы дифференциальных уравнений высокого порядка адекватной математической модели трехфазной ЭЭС с ААС практически неограниченной размерности;

- осуществлять интерактивный, программно-процедурный и комбинированные режимы управления параметрами, настройками и моделированием в целом, а также отображением, функциональными преобразованиями и представлением информации в различных ее формах и видах;

- реализовывать информационное и физическое взаимодействие с внешними программными и техническими средствами, в том числе по компьютерным сетям, в частности с реальными оперативно-информационными

комплексами ЭЭС, устройствами РЗА, системами автоматического управления (САУ) FACTS, информационно-управляющими системами ЭЭС с ААС, с целью автоматизированного и автоматического установления и отслеживания моделируемых квазиустановившихся режимов ЭЭС с ААС по текущим или ретроспективным данным телесигналов и телеизмерений, а также разработки, исследования и тестирования настроек, алгоритмов и законов целенаправленной локальной и системной работы этих средств;

- обеспечивать, в том числе в реальном времени, все потенциально необходимые и профессионально ориентированные автоматизированные и автоматические информационно-управляющие свойства и возможности, необходимые для надежного и эффективного решения сложных задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС, а также подготовки и переподготовки инженерных кадров для данных энергосистем.

В результате достигается возможность получения, в том числе в реальном времени, достаточно полной и достоверной информации о непрерывном спектре нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС с ААС в целом при различных режимах их работы и обеспечиваются все, включая потенциально востребованные, информационно-управляющие свойства, которые в совокупности с указанной возможностью образуют условия, необходимые для надежного и эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы реализованы в полном объеме в ряде научно-исследовательских работ, выполненных при непосредственном участии автора диссертации и под его научным руководством:

1 В НИР «Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем» по государственному контракту № П537 от 17.05.2010 г. в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ФЦП «Кадры») на 2009–2013 годы, (Министерство образования и науки РФ (МОН РФ)).

2 В НИР «Разработка методов и средств управления интеллектуальными энергосистемами на Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем» по государственному контракту № 16.513.11.3123 от 13.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» МОН РФ (ФЦП «Исследования»).

3 В НИР «Информационно-телекоммуникационная моделирующая система реального времени интеллектуальных энергосистем» по государственному контракту № 07.514.11.4075 от 01.10.2011 г. в рамках ФЦП «Исследования».

4 В НИР «Разработка и экспериментальные исследования программно-аппаратных элементов блока моделирования автоматизированной системы интеллектуального управления высоковольтного преобразовательного

комплекса на базе вставки постоянного тока» по государственному контракту № 14.В37.21.1506 от 03.10.2013 г. в рамках ФЦП «Кадры».

5 В НИР «Разработка и создание гибридной модели энергоблока электростанции» по государственному заданию № 7.2826.2011 от 01.01.2012 г. (МОН РФ).

6 В НИР для ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»: х/д № 7-584/10у от 01.10.2010 г. «Разработка технических предложений по применению Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем «Томск» в составе активно-адаптивной сети МЭС Сибири и разработка моделируемой схемы режимов работы электрической сети напряжением 220 кВ и выше объединенной энергосистемы Сибири».

7 В НИР для ЗАО «НОВИНТЕХ»: х/д № 2-496/2011у от 03.10.2011 г. «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».

Практическая реализация представленных в диссертации разработок и Моделирующей системы в целом, а также их испытание, исследование и внедрение осуществлялась под руководством автора диссертации его аспирантами и коллективом научно-исследовательской лаборатории «Моделирование электроэнергетических систем» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Личный вклад автора. Диссертация является результатом личных исследований автора, которые проводились под его руководством или при непосредственном участии. Результаты, определяющие научную новизну и практическую значимость работы, получены соискателем лично. В опубликованных в соавторстве работах, автору принадлежит постановка задачи, научное обоснование предложенных технических решений, разработка математических моделей и структурных схем, обобщение и анализ результатов исследований.

Под руководством автора диссертации по темам, являющимся фрагментами решаемой в ней проблемы, подготовлены два кандидата технических наук и осуществляется обучение аспирантов.

Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту:

1 Результаты исследования проблемы адекватного моделирования ЭЭС с ААС.

2 Предложенный альтернативный комплексный подход к решению проблемы адекватного моделирования ЭЭС с ААС, обеспечивающий надежное и эффективное решение сложных и актуальных задач их проектирования, исследования и эксплуатации.

3 Сформулированная и обоснованная концепция непрерывного адекватного моделирования в реальном времени трехфазных ЭЭС с ААС практически неограниченной размерности.

4 Результаты разработки средств реализации предложенной концепции радикального решения проблемы адекватного моделирования ЭЭС с ААС:

- структурная схема мультипроцессорной программно-технической системы гибридного типа для достаточно полного и достоверного моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС практически неограниченной размерности при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их функционирования, в которой для достижения поставленной цели агрегированы функционально и информационно адаптируемая совокупность необходимых для этого специализированных процессоров и программного обеспечения;

- единые принципы построения и структурные схемы универсальных для каждого вида оборудования специализированных процессов, обеспечивающих непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений полных трехфазных моделей всех видов и типов оборудования ЭЭС с ААС и адекватное моделирование всевозможных трехфазных и пофазных продольных и поперечных коммутаций, средств РЗА, САУ FACTS, все формы представления, преобразования информации, включая функциональные, а также автоматизированное и автоматическое управление всеми параметрами и настройками;

- структура и принципы реализации специализированного программного обеспечения Моделирующей системы, ориентированные на применение современных IT-технологий и эффективное решение задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС;

5 Результаты практической реализации разработанных средств адекватного моделирования ЭЭС с ААС на базе новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий;

6 Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие свойства и возможности созданной Моделирующей системы, необходимые для решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на международных, всероссийских, отраслевых и региональных симпозиумах, конференциях, выставках и конкурсах: The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST'2012 (Tomsk, 2012); 5-ой международной конференции «Либерализация и модернизация электроэнергетических систем: Smart-технологии для совместных операций в электрических сетях» (Иркутск, 2012); международной научно-практической конференции и выставке «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: Релавэкспо-2012» (г. Чебоксары, 2012); III международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи» (г. Екатеринбург, 2012); 4-ой научно-технической конференции «Повышение эффективности функционирования релейной защи-

ты и противоаварийной автоматики в ОЭС Сибири» (г. Кемерово, 2012); IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe (Copenhagen, Denmark, 2013); International Conference on Smart Grid and Clean Technologies – ICSGCE (Kuala Lumpur, Malaysia, 2013); 59-ом всемирном салоне инноваций, научных исследований и новых технологий «Брюссель – Инно-ва/Эврика 2010» (серебряная медаль) (г. Брюссель, Бельгия, 2010); выставках "Электрические сети России» 2011 и 2012 (г. Москва); X московском международном энергетическом форуме «ТЭК РОССИИ В XXI ВЕКЕ» (г. Москва, 2012); 41-ой международной выставке изобретений «INVENTIONS GENEVA» (золотая медаль) (г. Женева, Швейцария, 2013); международном электроэнергетическом форуме UPGrid «Электросетевой комплекс. Инновации. Развитие» (г. Москва, 2012).

Публикации. По результатам выполненных исследований, разработок и их применения, связанных с темой диссертационной работы, опубликовано 35 научных работ, в том числе 5 патентов РФ на изобретение и 15 статей в рецензируемых изданиях перечня ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Общий объем представленного диссертационного материала составляет 273 страницы и включает в себя: оглавление, введение, пять глав, заключение, приложение и список литературы из 200 наименований. Основной материал диссертационной работы содержит 268 страниц, 171 рисунок и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе краткого анализа специфики создаваемых ЭЭС с ААС и связанных с их проектированием, исследованием и эксплуатацией сложных и нестандартных задач, а также причин, препятствующих их эффективному решению в рамках существующего в настоящее время одностороннего сугубо численного подхода к моделированию ЭЭС, изложены и обоснованы суть и актуальность решаемой в диссертации проблемы адекватного моделирования ЭЭС с ААС. Отмечены общность данной проблемы с всеобщей проблемой адекватного моделирования больших динамических систем и направления ее решения в диссертационной работе с намечающейся и обсуждаемой в последние годы мировой тенденцией, а также участие в разное время и большой вклад в ее формировании отечественных и зарубежных ученых. Стремление радикального решения рассмотренной проблемы определило идею диссертационной работы – создание средств непрерывного адекватного моделирования в реальном времени трехфазных ЭЭС с ААС практически неограниченной размерности, обеспечивающих возможность своевременного получения полной и достоверной информации о процессах, протекающих во всем значимом оборудовании и ЭЭС с ААС в целом, при всевозможных режимах их работы, необходимой для надежного и эффективного решения сложных и актуальных задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС.

Основываясь на объективной методологической альтернативе существующему одностороннему подходу к проблеме моделирования ЭЭС и ЭЭС с ААС, направлением ее радикального решения обозначен комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование. Теоретическое и практическое осуществление этого подхода связано с разработкой, обоснованием и исследованием соответствующей концепции и средств ее реализации. Для достижения этой цели в рамках диссертации представлена аргументированная совокупность задач и их теоретически и экспериментально подтвержденные решения. Полученные при этом принципиально новые результаты определили сформулированную научную новизну диссертационных исследований, значительная часть которых подтверждена патентами на изобретения. Поскольку решенная в диссертации проблема актуальна не только методологически и теоретически, но и имеет большое практическое значение, в рамках данного раздела определена также конкретная практическая ценность диссертационной работы. Кроме этого, приведены сведения об апробации и публикации материалов диссертации, а также о внедрении результатов данной диссертационной работы, представлены выносимые на защиту сформулированные положения и результаты диссертации, приведены данные о ее структуре и объеме.

В первой главе сформулированы и обоснованы необходимые для этого эталонные условия непрерывного достаточно полного и достоверного воспроизведения в реальном времени и на неограниченном интервале процессов, протекающих во всем значимом оборудовании и трехфазных ЭЭС с ААС практически любой размерности в целом, при всевозможных режимах их работы. В силу отмеченных во введении и подробно рассмотренных в данном разделе специфики и особенностей ЭЭС, а тем более ЭЭС с ААС главными условиями являются:

- применение для моделирования трехфазных ЭЭС с ААС адекватных бездекомпозиционных математических моделей всего значимого оборудования;
- обеспечение непрерывного в реальном времени на неограниченном интервале и с приемлемой для всех задач точностью решения дифференциальных уравнений адекватной совокупной математической модели трехфазной ЭЭС с ААС практически любой размерности;
- наличие у средств моделирования ЭЭС с ААС необходимых и профессионально ориентированных для решения сложных задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС автоматизированных и автоматических информационно-управляющих свойств и возможностей: интерактивное, программно-процедурное и комбинированное управление, включая функциональное, всеми параметрами, настройками и моделированием в целом; все формы и виды представления и отображения информации; функционирование и взаимодействие в компьютерных сетях; информационное и физическое взаимодействие с реальными станциями систем автома-

тического управления устройств FACTS, средствами РЗА, ОИК, различными информационно-управляющими системами ЭЭС с ААС.

Что касается первого условия, то современный уровень физико-математического представления и описания реального непрерывного спектра нормальных и аномальных процессов в различных звеньях оборудования ЭЭС, ЭЭС с ААС позволяет синтезировать высокоадекватные математические модели для всего значимого оборудования и соответственно ЭЭС. Однако получающаяся при этом совокупная математическая модель ЭЭС, а тем более ЭЭС с ААС, ввиду отмеченной их специфики, неизбежно содержит, с учетом допустимого частичного эквивалентирования, очень жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно высокого, кратно превышающего 10^3 , порядка. Согласно приведенным в этом разделе диссертации результатам оценочного анализа, такие математические модели плохо обусловлены на ограничительных условиях применимости методов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений и, в соответствии с определяющей эти условия теорией методов дискретизации данных уравнений, их удовлетворительное решение маловероятно. Этот теоретически обоснованный вывод полностью подтверждается характеристиками используемых длительное время многочисленных компьютерных программ расчета режимов и процессов в реальных ЭЭС, в которых постоянно применяются, несомненно в ущерб полноте и достоверности моделирования, известные по их характеристикам упрощения и ограничения для математических моделей ЭЭС и условий их решения, действительные последствия которых определить, как правило, невозможно.

Рассмотренный доминирующий в настоящее время подход к моделированию ЭЭС и ЭЭС с ААС, при котором первичными являются не сама проблема адекватного моделирования ЭЭС и ее значимые аспекты, а используемые средства решения: численные методы интегрирования дифференциальных уравнений и реализующие их компьютерные программы, методологически объективно является односторонним. При таком подходе уровень решения проблемы неизбежно определяется и в данном случае значительно ограничивается свойствами и возможностями этих средств. Поскольку обозначенные ограничения и достигаемый уровень нередко оказываются неприемлемыми и, соответственно, неудовлетворительным является решение базирующихся на этих результатах задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС, то необходимым и целесообразным становится методологически альтернативный комплексный подход к решению данной проблемы, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование ЭЭС с ААС. Согласно этому подходу первичной является решаемая проблема, на основе анализа основных аспектов которой обосновываются, создаются и затем агрегируются средства для ее эффективного решения.

Разработка и обоснование в рамках данного направления концепции непрерывного адекватного моделирования в реальном времени трехфазных

ЭЭС с ААС практически неограниченной размерности и структуры средств ее реализации, ориентированных на надежное и эффективное решение сложных и актуальных задач проектирования, исследования и эксплуатации, составляют суть и содержание следующего раздела диссертации.

Во второй главе для каждого рассмотренного в предыдущем разделе условия адекватного моделирования ЭЭС с ААС и связанного с этим надежного и эффективного решения задач их проектирования, исследования и эксплуатации определены обоснованные методы, принципы и способы их выполнения, которые в сформулированном виде образуют положения, а в совокупности концепцию радикального решения проблемы адекватного моделирования ЭЭС с ААС и связанных с него указанных задач.

В соответствии с положениями и концепцией в целом, учитывая опыт создания в разное время и в разных странах разнообразных гибридных систем различного назначения, в том числе для моделирования ЭЭС, а также современные технологические и информационные тенденции и перспективы, разработана структура средств реализации предложенной концепции, образующая специализированную мультипроцессорную систему гибридного типа для адекватного моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС (рисунок 1).

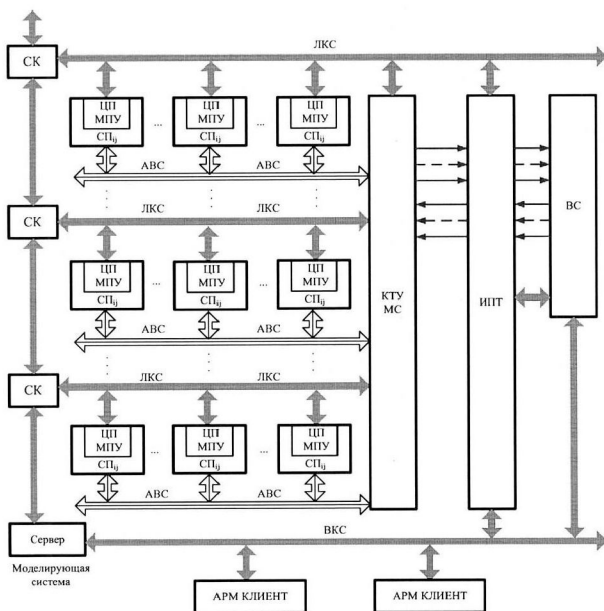


Рисунок 1 – Структурная схема Моделирующей системы

Основу разработанной структуры составляют адаптируемая совокупность специализированных процессоров (СП) и многоуровневая информа-

ционно-управляющая система на базе специализированного программного обеспечения (ПО), объединяющая через сетевые коммутаторы (СК) локальной компьютерной сети (ЛКС) центральные процессоры (ЦП) микропроцессорных узлов (МПУ) всех СП и Сервер Моделирующей системы.

Соответствующие топологии моделируемой ЭЭС с ААС автоматизированные и автоматические функциональные трехфазные взаимосвязи конкретной совокупности СП реализуются посредством коммутаторов трехфазных узлов (КТУ).

Все СП строятся по единым принципам и специализированы по видам моделируемого оборудования: электрическая машина, трансформатор, линия электропередачи, статический синхронный компенсатор и т.д., в рамках которых обеспечивается полная универсальность адекватного моделирования всех возможных типов с учетом соответствующих первичных двигателей, систем возбуждения, приводимых механизмов, средств РЗА и другого сопутствующего оборудования, а также осуществление всевозможных продольных и поперечных трехфазных, включая пофазные, коммутаций данного вида оборудования и всех потенциально необходимых автоматизированных и автоматических информационно-управляющих функций, диапазон времени выполнения которых представлен на рисунке 2.

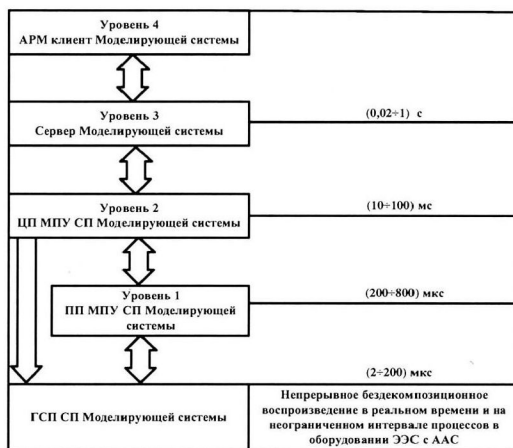


Рисунок 2 – Информационно-управляющие уровни Моделирующей системы

Для пользователей Моделирующей системы в ПО предусмотрено автоматизированное рабочее место клиента (АРМ Клиент), устанавливаемое на Сервере и на компьютерах пользователей во внешних компьютерных сетях (ВКС) без ограничений. Взаимодействие Моделирующей системы с различными указанными ранее внешними средствами (ВС) осуществляется с помощью соответствующих интерфейсов: программных и технических

устройств сопряжения (ИПТ), а также специализированных АРМ Клиент. Общую схему взаимодействия Моделирующей системы с ВС отражает рисунок 3.

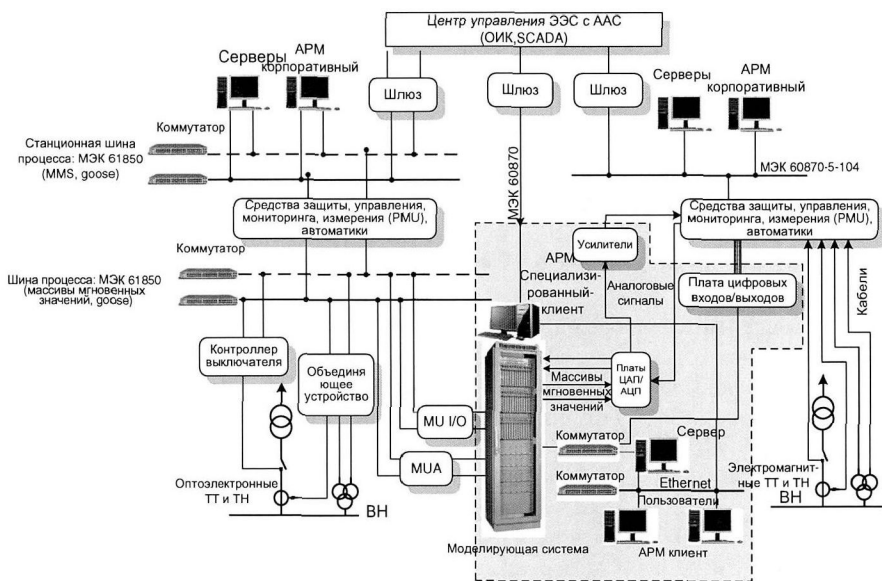


Рисунок 3 – Общая схема взаимодействия Моделирующей системы с внешними средствами

Согласно рассмотренным в данной главе концепции и структуре средств адекватного моделирования ЭЭС с ААС главную функцию в решении этой проблемы выполняют СП Моделирующей системы, результатам разработки которых посвящена следующая глава диссертации.

В третьей главе на основе соответствующих положений предложенной концепции адекватного моделирования ЭЭС с ААС определены и обоснованы единые принципы построения всех видов СП Моделирующей системы. Единство принципов построения СП обусловлено общностью целей, достигаемых осуществлением этих положений концепции:

- обеспечение универсальности математического моделирования в рамках каждого вида основного оборудования, позволяющего моделировать все его конкретные типы, а также различные виды дополнительного и вспомогательного оборудования: системы возбуждения, первичные двигатели, приводимые механизмы, средства РЗА, САУ устройств FACTS, различные информационно-управляющие системы и др.;

- применение для моделирования всех без исключения основных элементов трехфазных ЭЭС с ААС: электрических машин, трансформаторов, линий электропередач, устройств FACTS и других элементов, матема-

тических моделей, достаточно полно и достоверно описывающих в них реальный непрерывный спектр процессов при всевозможных режимах работы;

- обеспечение непрерывного и методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале с приемлемой для всех задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС инструментальной точностью жестких, нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого порядка математических моделей всех основных элементов трехфазных ЭЭС с ААС;

- наличие всех потенциально необходимых автоматизированных и автоматических современных информационно-управляющих свойств и возможностей: управления параметрами и коэффициентами математических моделей, а также продольными и поперечными трехфазными и пофазными коммутациями; представления и отображения, экспорта и импорта информации;

- обеспечение адекватного функционального и эффективного информационного взаимодействия всех СП в моделируемых трехфазных ЭЭС с ААС практически неограниченной размерности;

- ориентация в реализации разработок всех СП на новейшие и перспективные достижения интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и информационных технологий.

В соответствии с обозначенными положениями и целями концепции сформулированы общие для всех СП принципы их построения:

1 Основу каждого СП составляет соответствующий адекватной математической модели вида моделируемого элемента ЭЭС с ААС гибридный сопроцессор (ГСП), в общем случае составной, представляющий собой параллельную интегральную микроэлектронную цифро-аналоговую структуру, позволяющую непрерывно и методически точно решать в реальном времени и на неограниченном интервале систему дифференциальных уравнений этой модели.

2 Для осуществления всех потенциально необходимых автоматизированных и автоматических информационно-управляющих свойств, возможностей и адекватного моделирования средств РЗА, другого вспомогательного и сопутствующего оборудования все СП содержат микропроцессорный узел, состоящий из центрального процессора и периферийных процессоров (ПП): процессора аналого-цифровых преобразований (ПАЦП), процессора управления коммутациями (ПК), других функционально необходимых процессоров.

3 Каждый СП содержит интегральные микроэлектронные преобразователи «напряжение-ток» (ПНТ), посредством которых входные-выходные непрерывные математические переменные ГСП СП преобразуются в соответствующие им модельные физические токи и напряжения, благодаря чему обеспечивается возможность адекватного естественному взаимодействию моделируемых элементов, осуществления различных коммутаций и практи-

чески неограниченного наращивания размерности воспроизводимых ЭЭС с ААС.

4 Трехфазные «входы-выходы» СП (А, В, С) оснащаются интегральными микрoeлектронными цифрoуправляемыми униполярными продольно-поперечными коммутаторами (ППК) и всевозможные коммутации осуществляются на модельном физическом уровне, на котором, соответственно, в КТУ формируются трехфазные узлы согласно топологии моделируемой ЭЭС с ААС.

5 Реализация всех структурных элементов и СП в целом ориентируется на применение новейших и перспективных достижений интегральной микрoeлектроники, микропроцессорной техники и ИТ-технологий, а их изготовление на современные автоматизированные производства и использование стандартизированных серийных конструктивов.

В соответствии с рассмотренными принципами разработаны представленные в данном разделе диссертации структурные и функциональные схемы всех СП Моделирующей системы (МС), обобщенная структура которых приведена на рисунке 4.

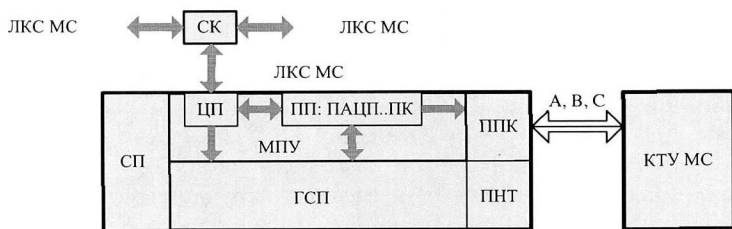


Рисунок 4 – Обобщенная структура построения специализированных процессоров Моделирующей системы

При этом для каждого вида СП синтезированы универсальные математические модели основного и сопутствующего оборудования достаточно полно и достоверно воспроизводящие реальный непрерывный спектр процессов в этом оборудовании при всевозможных режимах их работы.

Кроме этого, с целью предварительной проверки синтезированных моделей и разработанных для их реализации СП, проведены тестовые исследования путем компьютерного моделирования в программной среде Multisim 11, подтвердившие соответствие свойств и возможностей созданных СП принципам их построения и положениям концепции МС. В рамках формата автореферата результаты создания СП отражены рядом соответствующих фрагментов для СТАТКОМ с трехуровневым статическим преобразователем напряжения (СПН) на полностью управляемых силовых ключах (VT_i), представляющего собой одно из основных и базовых устройств FACTS ЭЭС с ААС, принципиальная схема которого показана на рисунке 5.

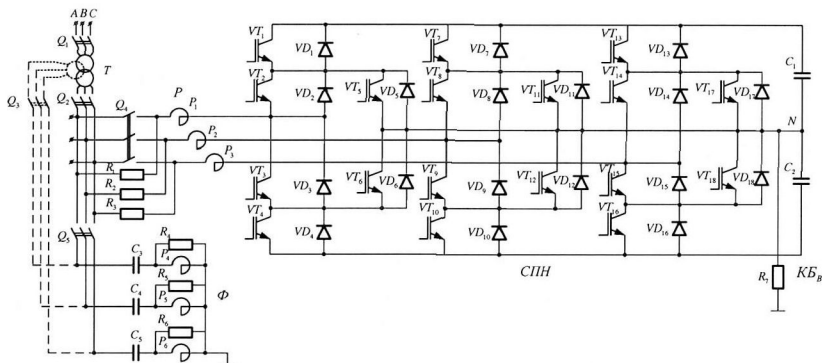


Рисунок 5 – Принципиальная схема СТАТКОМ с трехуровневым СПН на полностью управляемых ключах: Т – трансформатор присоединения, Р – реактор токоограничивающий (сглаживающий), Φ – фильтр, КБ_в – конденсаторная батарея цепи выпрямленного напряжения

Согласно единым принципам построения СП коммутации в СПН и продольно-поперечные в ППК₁, ППК_і воспроизводятся в СП СТАТКОМ (СПС) на модельном физическом уровне в помощь цифруправляемых униполярных аналоговых ключей (ЦУК), а процессы в остальном оборудовании: Т, Р, Φ , КБ_в путем непрерывного и методически точного решения в реальном времени дифференциальных уравнений их безкомпозиционных математических моделей в одноименных гибридных сопроцессорах: ГСТ, ГСР, ГСФ, ГСК. При этом непрерывное взаимодействие между математическим и физическим уровнями осуществляется посредством ПНТ и повторителей напряжения (ПН). Структурная схема специализированного процессора СТАТКОМ представлена на рисунке 6.

Входящий в данную структуру ГСТ идентичен рассмотренному в диссертации СП для моделирования трехфазных трансформаторов, автотрансформаторов (СПТ) и воспроизводит аналогичную математическую модель:

- уравнения контуров обмоток $W_{i\xi}$, магнитосвязанных потоками Φ_{ξ}

$$W_{i\xi} \frac{d\Phi_{\xi}}{dt} + L_{i\xi} \frac{di_{i\xi}}{dt} + r_{i\xi} \cdot i_{i\xi} + u_{i\xi} = 0,$$

в которых $W_{i\xi}$ – число витков i -ой обмотки ($i = 1 \div n$) фазы $\xi = A, B, C$; Φ_{ξ} – мгновенное значение основного магнитного потока фазы ξ ;

$L_{i\xi}$ – индуктивность рассеяния i -ой обмотки фазы ξ ($W_{i\xi}$); $r_{i\xi}$ – активное сопротивление $W_{i\xi}$; $i_{i\xi}$ – мгновенное значение тока в $W_{i\xi}$; $u_{i\xi}$ – мгновенное значение напряжения $W_{i\xi}$,

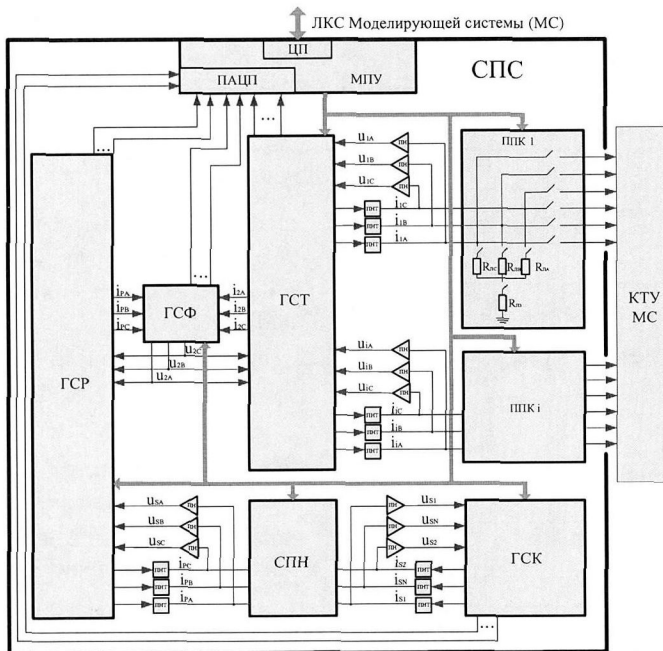


Рисунок 6 – Структурная схема СПС

- уравнения баланса магнитодвижущих сил для каждой фазы ξ

$$\sum_{i=1}^n i_{i\xi} W_{i\xi} = F_{\mu\xi} = K_{\mu\xi} \cdot i_{\mu\xi} \text{ и функции } \Phi_{\xi} = f(K_{\mu\xi} \cdot i_{\mu\xi}),$$

где $F_{\mu\xi}$ – намагничивающие силы электромагнитных систем фаз ξ ; $i_{\mu\xi}$ – мгновенное значение тока намагничивания фаз ξ , а $K_{\mu\xi}$ – коэффициент размерности, определяющий $F_{\mu\xi} = i_{\mu\xi}$, в которых для адекватного непрерывного воспроизведения кривых намагничивания используется эффективно адаптируемая для данной цели гиперболическая аппроксимация с пропорциональной $i_{\mu\xi}$ аддитивной составляющей $K_4 i_{\mu\xi}$, позволяющей дополнительно посредством K_4 изменять наклон кривой намагничивания на участке насыщения магнитопровода

$$\Phi_{\xi} = \frac{K_1 i_{\mu\xi}}{K_2 + K_3 i_{\mu\xi}} + K_4 i_{\mu\xi},$$

где $K_1 = \frac{K_{\mu\xi}}{K_{IT}}$, $K_{IT} = \frac{W_{1\xi}}{W_{i\xi}}$, а K_2 и K_3 определяют аппроксимируемую

кривую намагничивания и наклон ее участка до насыщения.

Моделирование в разработанном СПС оборудования собственно СТАТКОМ: P_{ξ} , КБ_В и СПН, а также Φ , реализуемое соответствующими ГСР, ГСК, ГСФ на математическом и ЦУК на модельном физическом уровнях, осуществляется согласно приведенным на рисунках 7 и 8 схемам замещения этого оборудования и математическим моделям P_{ξ} , КБ_В и Φ , где

$K_{SAi}, K_{SBI}, K_{SCI}, i=1 \div 6$ – ЦУК, замещающие силовые ключи СПН; R_{S1}, R_{S2} – активные сопротивления емкостей КБ_В цепи выпрямленного напряжения; C_{S1}, C_{S2} – емкости КБ_В в цепи выпрямленного напряжения; $L_{P\xi}, \xi = A, B, C$ – индуктивности токоограничивающих (сглаживающих) реакторов P_{ξ} , R_{SN} (R_7 на рисунке 5), а K_{S1}, K_{S2} и K_{SN} позволяют моделировать различные коммутации и режимы нулевой цепи КБ_В; $R_{P\xi}$ – активные сопротивления P_{ξ} , в которых при включении СТАТКОМ в течение заряда КБ_В учитываются ограничивающие ток заряда значения резисторов R_1, R_2, R_3 (рисунок 5),

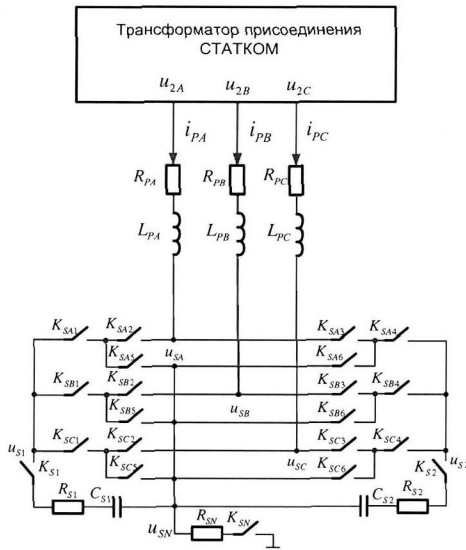


Рисунок 7 – Схема замещения СТАТКОМ

$$\frac{di_{P\xi}}{dt} = \frac{1}{L_{P\xi}} (u_{2\xi} - u_{S\xi} - i_{P\xi} R_{P\xi});$$

$$\frac{du_{CSj}}{dt} = \frac{1}{C_{Sj}} i_{CSj}; i_{CSj} = \frac{1}{R_{Sj}} (u_{SN} - u_{CSj}),$$

в которых i_{CSj} – ток в j -ой $j=1, 2$ цепи КБ_В; R_{Sj}, C_{Sj} – активное сопротивление и емкость j -ой цепи КБ_В; u_{Sj} – напряжение j -го полюса СПН, $R_{\Phi\xi}$ – активные сопротивления резисторов фильтра; $K_{\Phi\xi i}, i = 1, 2, 3$, – ЦУК, позволяющие адаптировать ее для различных типов фильтров и их комбинаций,

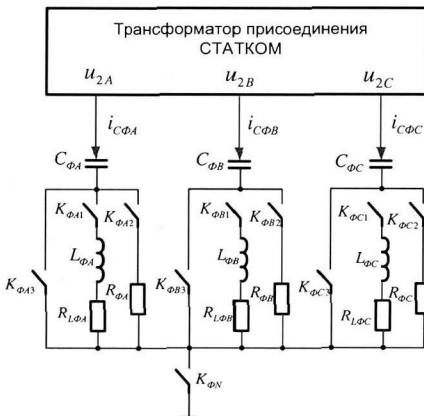


Рисунок 8 – Схема замещения фильтра СТАТКОМ

обеспечивающих приемлемый уровень гармоник в формируемых напряжениях СТАТКОМ,

$$\frac{du_{C\Phi j}}{dt} = \frac{1}{C_{\Phi\xi}} i_{C\Phi\xi}, i_{P\Phi\xi} = i_{C\Phi\xi} - i_{L\Phi\xi}, u_{P\Phi\xi} = i_{P\Phi\xi} R_{\Phi\xi},$$

$$\frac{di_{L\Phi j}}{dt} = \frac{1}{L_{\Phi\xi}} (u_{P\Phi\xi} - i_{L\Phi\xi} R_{L\Phi\xi}), u_{2\xi} = u_{P\Phi\xi} + u_{\Phi N} + u_{C\Phi\xi},$$

в которых $i_{L\Phi\xi}$ – токи в реакторах фильтра; $i_{P\Phi\xi}$ – токи в резисторах фильтра; $u_{C\Phi\xi}$ – напряжения на емкостях КБ_ф фильтра; $u_{P\Phi\xi}$ – напряжения на резисторах фильтра.

В четвертой главе рассмотрены разработанные в соответствии с положениями предложенной концепции и структурной схемой средств ее реализации программно-техническая структура многоуровневой информационно-управляющей системы (рисунок 9) и ее программные и аппаратные составляющие.

Согласно структурной схеме МС ее аппаратная многоуровневая информационно-управляющая система объединяет микропроцессорные узлы всех СП, через центральные процессоры которых посредством ЛКС, осуществляется взаимодействие между всеми СП и Сервером МС, а также управление функционально ориентированными периферийными процессорами в микропроцессорном узле каждого СП.

Структура аппаратной составляющей многоуровневой информационно-управляющей системы определяет преимущественно и общую структуру

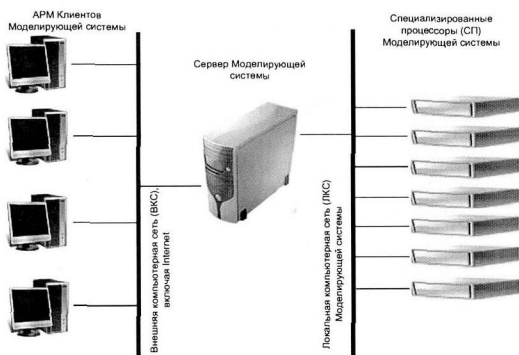


Рисунок 9 – Структура сетевого информационного взаимодействия программного обеспечения Моделирующей системы

ПО Моделирующей системы, имеющего три основных уровня, связанных непосредственно с аппаратной структурой: ПО Сервера, ПО центральных процессоров и ПО периферийных процессоров, кроме которых ПО Моделирующей системы содержит еще четвертый уровень, взаимосвя-

занный только с ПО Сервера – АРМ Клиента, размещаемые без ограничений на компьютерах пользователей МС и взаимодействующие с Сервером МС по ВКС, включая Internet.

В рамках данного раздела диссертации рассмотрены и обоснованы результаты разработки всех структурных элементов многоуровневой информационно-управляющей системы: МПУ СП (ЦП и ПП), ЛКС и ПО (Сервера, ЦП, ПП), АРМ Клиента. При этом, поскольку непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале адекватных математических моделей основного оборудования ЭЭС с ААС выполняется в гибридных сопроцессорах СП, а вычислительные функции многоуровневой информационно-управляющей системы сравнительно незначительны, ее основное назначение связано с собственно информационно-управляющими свойствами и возможностями, включая взаимодействие с внешними реальными программными и программно-техническими средствами: САУ устройств FACTS, РЗА, ОИК и др. Реализацию всех потенциально необходимых пользователям Моделирующей системы свойств и возможностей обеспечивает ПО АРМ Клиента. Для этого в ПО АРМ Клиента, разработан разнообразный программный инструментарий, профессионально ориентированный для эффективного решения задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС: динамические панели наблюдения и управления (ДПНУ) (рисунки 10 и 11) с множеством различных программных приборов цифрового, шкального, табличного, векторного и диаграммного типа, а также многолучевые и многофункциональные осциллографы и др.

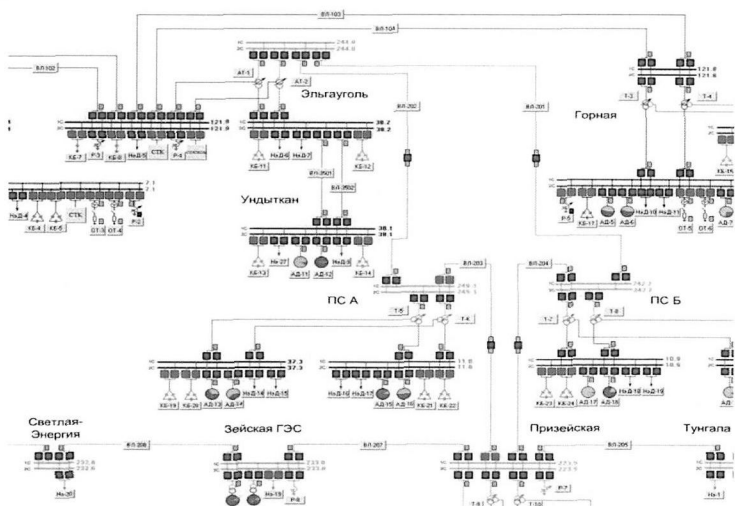


Рисунок 10 – Фрагмент формы ДПНУ ЭЭС с ААС, включающий проектируемый интеллектуальный энергокластер «Эльгауголь» и прилегающий район ЭЭС

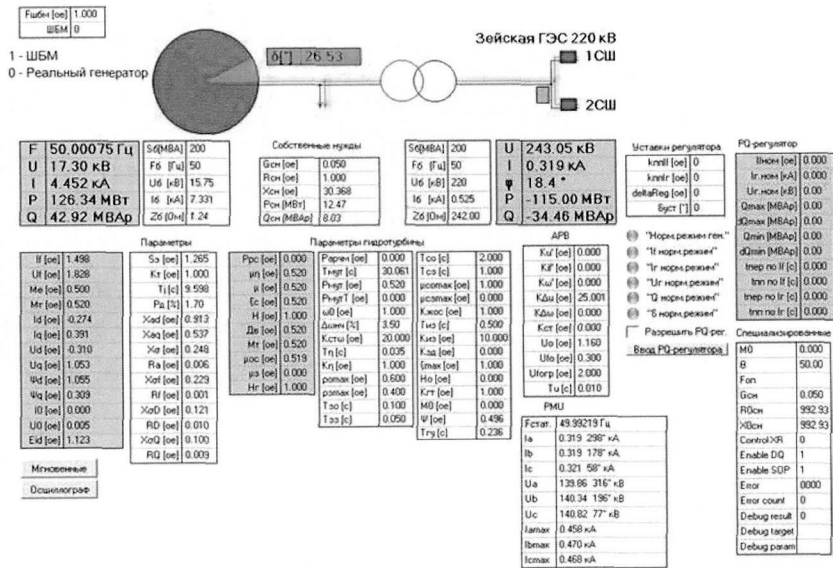


Рисунок 11 – Форма ДПУ Г-1 Зейская ГЭС

Динамические панели наблюдения и интерактивного управления основных элементов ЭЭС с ААС, а также любые другие, пользователь может создавать по своему усмотрению с помощью редактора, предусмотренного в ПО АРМ Клиента.

Пятая глава содержит диссертационный материал, связанный с практическим осуществлением разработанных концепции и средств адекватного моделирования ЭЭС с ААС, образующих созданную Моделирующую систему, и экспериментальными результатами их применения, в том числе для решения ряда задач проектирования, исследования и эксплуатации внедряемых устройств FACTS в реально планируемом энергорайоне и действующей ЭЭС.

В рамках практического осуществления реализованы в конструктиве евростандарта фирмы Rittal скомпонованные в унифицированные модули (рисунок 12) все виды разработанных СП и Моделирующую систему в целом (рисунок 13), с использованием которых проведены представленные в диссертации результаты многочисленных экспериментальных исследований, включая связанные с решением указанных конкретных задач применения элементов ААС для автоматического регулирования напряжения в проектируемом энергорайоне и объединения несинхронно работающих частей действующей ЭЭС.

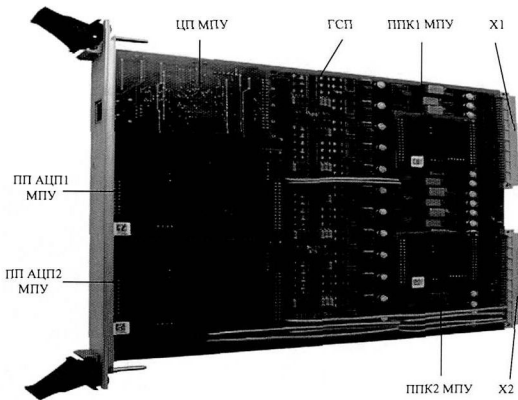


Рисунок 12 – Модуль специализированных процессоров Моделирующей системы

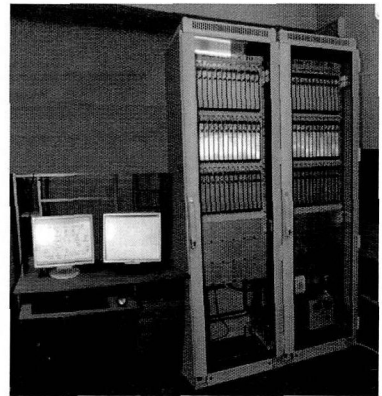


Рисунок 13 – Экспериментальный образец Моделирующей системы

Отдельные фрагменты результатов проведенных экспериментальных исследований свойств и возможностей Моделирующей системы для решения задач автоматического регулирования напряжения в проектируемом в ОЭС Востока энергокластере приведены на рисунках 14–17.

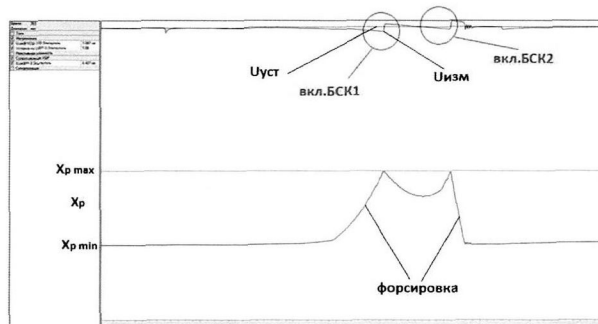


Рисунок 14 – Процессы автоматического поддержания напряжения с помощью УШР, коммутируемых конденсаторных батарей (БСК) и САУ на шинах 110кВ ПС Эльгауголь моделируемого энергокластера с использованием форсировки УШР

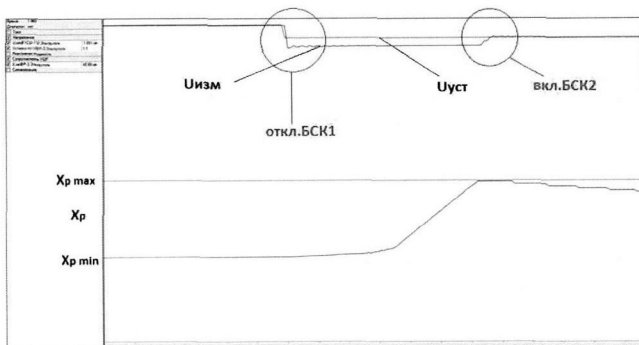


Рисунок 15 – Процессы автоматического поддержания напряжения на шинах 110кВ ПС Эльгауголь с помощью УШР и БСК без применения форсировки УШР

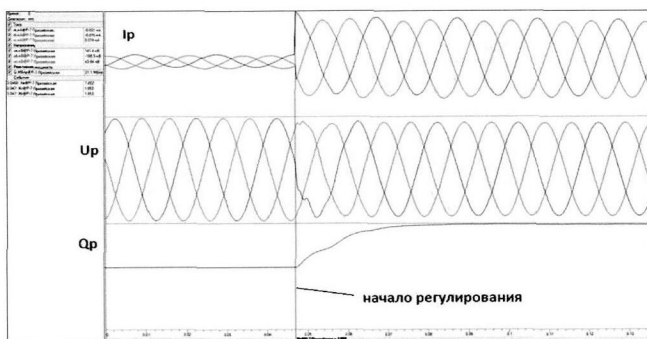


Рисунок 16 – Динамика процессов в УШР в режиме поддержания напряжения в узле подключения

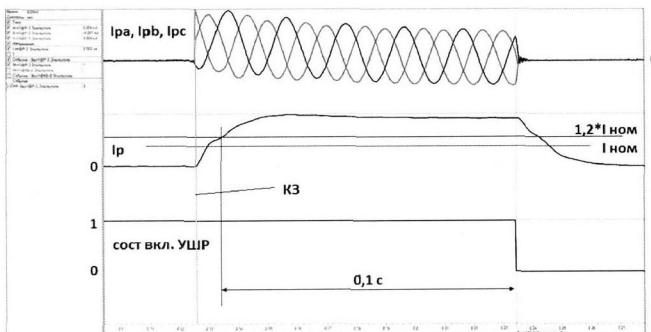


Рисунок 17 – Осциллограммы процессов функционирования защиты УШР от перегрузки при работе САУ в режиме регулирования напряжения в узле подключения

На рисунках 18 и 19 представлены переходный процесс и осциллограммы фазных токов и напряжений при функционировании специализированного процессора СТАКОМ при реверсе реактивной мощности (РМ).

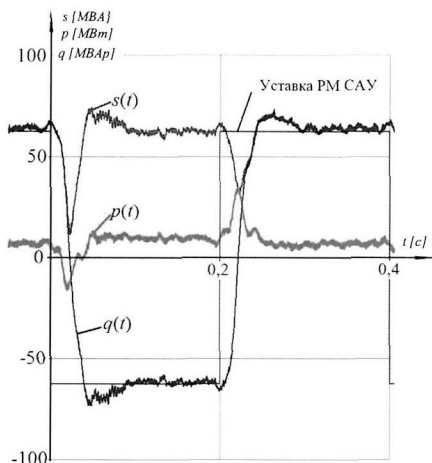


Рисунок 19 – Переходный процесс при реверсе РМ

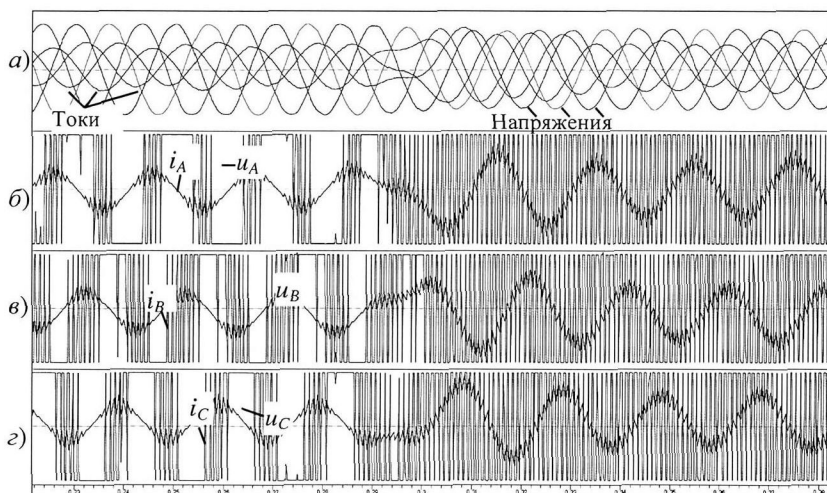


Рисунок 18 – Осциллограммы фазных токов и напряжений: а) – в узле подключения СПС; б), в), з) – фаз ξ СПН при реверсе РМ

Приведенные фрагменты результатов экспериментального исследования свойств и возможностей СПС в составе Моделирующей системы соответствуют реальному функционированию СТАТКОМ и САУ и иллюстрируют эффективность их применения для решения задач автоматического управления режимами исследуемого энергокластера, в том числе аварийными и послеаварийными.

Не менее убедительными и наглядными являются значимые для конкретных практических целей, представленные в работе результаты исследований Моделирующей системы, в частности с использованием специализированного процессора фазопоротного устройства для воспроизведения процессов объединения на ПС Парабель несинхронно работающих частей Юга и Севера Томской энергосистемы (рисунок 20) с различными фазовыми углами φ между напряжениями несинхронно функционирующих частей этой энергосистемы на указанной ПС.

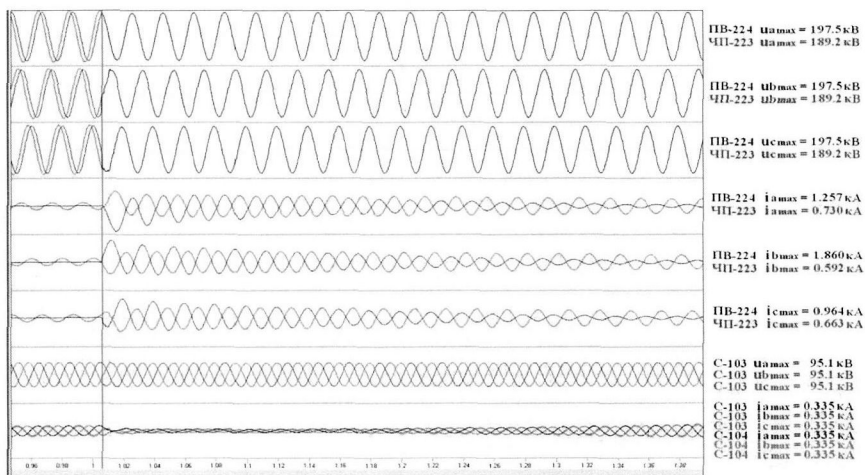


Рисунок 20 – Включение несинхронно работающих частей ЭЭС на параллельную работу при $\varphi = 43,2^\circ$ между напряжениями на ПС объединения – граничный режим

Данные исследования, в условиях отсутствия в настоящее время на ПС Парабель планируемого фазопоротного устройства имеют большое практическое значение для нештатных случаев возможного вынужденного аварийного и послеаварийного объединения штатно несинхронно функционирующих частей ЭЭС.

Совокупностью результатов проведенных исследований экспериментально подтверждено наличие у созданных средств моделирования свойств

и возможностей, соответствующих разработанной концепции адекватного моделирования ЭЭС с ААС, необходимых для надежного и эффективного решения задач их проектирования, исследования и эксплуатации:

1 Практическая способность разработанных средств моделирования ЭЭС с ААС осуществлять методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с приемлемой инструментальной точностью жестких, нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого порядка математических моделей трехфазных ЭЭС с ААС практически любой размерности с адекватным учетом функционирования конкретных реализаций видов и типов РЗА, САУ устройств FACTS и др.

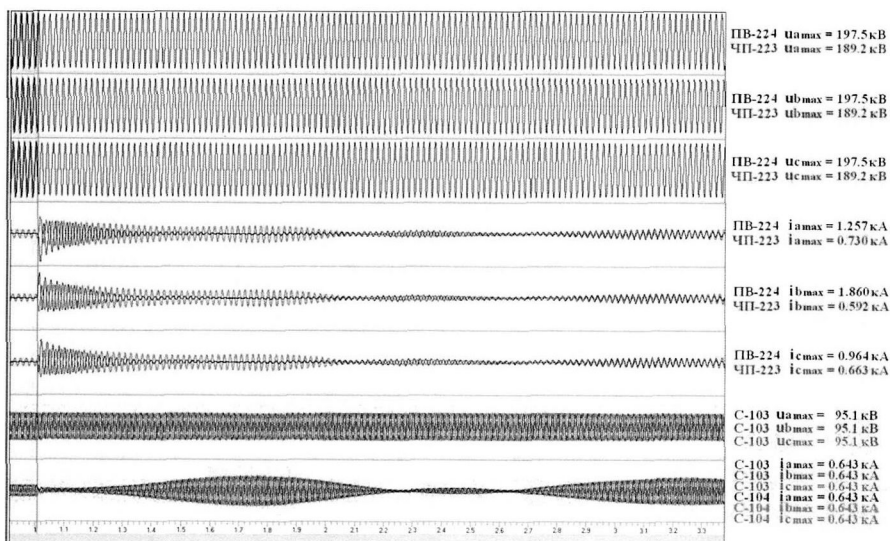


Рисунок 20 – Продолжение

Многочисленные и долговременные лабораторные испытания Моделирующей системы в режиме непрерывного воспроизведения в реальном времени квазиустановившихся и переходных процессов в ЭЭС, моделирования при этом различных возмущений и аналогичные условия ее опытной эксплуатации служат наглядной и убедительной натурной демонстрацией способности разработанных средств осуществлять в реальном времени и на неограниченном интервале достаточно полное и достоверное моделирование реальных ЭЭС с ААС. Для анализа этой способности использовались данные разнообразных динамических программных приборов профессионально ориентированного ПО Моделирующей системы.

2 Гарантированность известной и приемлемой для всех задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС с ААС инструментальной погрешности созданной Моделирующей системы.

Ввиду отсутствия методической ошибки решения математических моделей элементов и ЭЭС с ААС в целом, метрологию разработанных средств определяет только инструментальная погрешность СП и разрядность серверного компьютера МС, которые при использовании современной интегральной микроэлектронной, микропроцессорной и компьютерной техники составляют в совокупности менее 1%.

Однако более надежной и достоверной оценкой инструментальной точности СП и столь сложной многопроцессорной программно-технической гибридной системы реального времени, как Моделирующая система, являются экспериментальные данные в диапазоне всевозможных нормальных и аварийных режимов работы моделируемого оборудования и ЭЭС с ААС. Согласно опубликованным данным и экспериментам на Моделирующей системе, весь непрерывный спектр всевозможных нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС с ААС, включая коммутационные перенапряжения, составляет $0 \div 800$ Гц, который с учетом некоторого запаса может быть принят $0 \div 1000$ Гц. Этот спектр частот считается основным рабочим диапазоном для разработанных средств моделирования в реальном времени трехфазный ЭЭС с ААС.

С учетом вышеизложенного, рассмотрена и проанализирована экспериментальная точность воспроизведения различных квазиустановившихся схемно-режимных состояний ЭЭС энергорайона «Эльгауголь» и прилегающей части ОЭС Востока, Томской энергосистемы ОЭС Сибири, а также процессов при всевозможных коротких замыканиях и других аномальных режимах, в том числе с учетом РЗА; синхронных качаний и асинхронных режимов; самовозбуждения генераторов, автономно включаемых на длинные ненагруженные линии электропередачи; процессов возникновения колебательной неустойчивости; процессов противоаварийной разгрузки турбин; выбега и самозапуска синхронных и асинхронных двигателей; различных коммутационных перенапряжений и др.

Ввиду очевидного отсутствия необходимых эталонных данных для указанного спектра всевозможных нормальных и аномальных процессов, эта задача, в общем случае, оказывается весьма сложной. Вместе с тем важное свойство разработанных средств, полностью исключившее необходимость декомпозиции режимов и процессов в ЭЭС с ААС, позволяет ее успешно решить. Поскольку в созданной Моделирующей системе весь непрерывный спектр всевозможных нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС с ААС в целом, независимо от какого-либо конкретного нормального или аварийного режима, воспроизводится в результате непрерывного методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной инструментальной точностью всегда одной и той же модели ЭЭС с ААС, то и любой воспроизводимый ква-

зиустановившийся процесс (трактуемый обычно как установившийся режим), являющийся результатом решения этой модели, представляет собой одну из составляющих данного спектра процессов, в частности при $f \approx 50$ Гц. Поэтому, если частотные характеристики используемой в Моделирующей системе интегральной микроэлектронной элементной базы не оказывают ощутимого влияния в диапазоне частот $0 \div 1000$ Гц, то можно обоснованно распространять экспериментальную точность воспроизведения квазиустановившихся процессов при $f \approx 50$ Гц на весь указанный диапазон. Так как параметры и характеристики применяемой в разработанных средствах элементной базы с запасом перекрывают этот диапазон, для экспериментальной оценки точности решения математической модели ЭЭС с ААС использовалась главным образом рассмотренная методика. При этом экспериментальные данные сравнивались с данными телеизмерений ОИК ОЭС Востока и Томской энергосистемы ОЭС Сибири, в режиме автоматизированного и автоматического установления и отслеживания квазиустановившихся режимов на Моделирующей системе по данным ОИК и контрольных диспетчерских замеров.

Для большей надежности оценок остальной части частотного диапазона произведено сравнение результатов воспроизведения имевших место и фрагментарно записанных аварийными регистраторами процессов различных коротких замыканий, противоаварийной разгрузки энергоблоков и др.

Результаты анализа проведенных экспериментов и опытной эксплуатации дают основания считать надежной оценкой точности моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС на экспериментальном образце Моделирующей системы, изготовленном для этих целей, значение погрешности менее 1%.

3 Нарастиваемость размерности моделируемой ЭЭС с ААС.

Предложенная в диссертации концепция моделирования в реальном времени трехфазных ЭЭС с ААС практически не накладывает никаких ограничений на размерность моделируемой ЭЭС с ААС. При этом без снижения свойств и возможностей Моделирующей системы, увеличивается лишь число СП. Последнее полностью подтверждают результаты создания экспериментального образца Моделирующей системы, выполненного путем поэтапного наращивания моделируемой схемы ЭЭС с ААС с полным комплексом испытаний и исследований на каждом этапе.

4 Информационно-управляющие свойства и возможности.

Всесторонние лабораторные испытания и широкий спектр выполненных экспериментальных исследований Моделирующей системы позволили полностью проверить все определяемые положениями разработанной концепции режимы автоматизированного и автоматического управления моделированием: интерактивный, программный и комбинированный, а также разнообразные формы представления, преобразования и отображения информации. Также надежно проверено информационное взаимодействие с

ОИК ЭЭС и другими внешними программными средствами, в том числе в формате Comtrade и др.

5 Результаты длительных лабораторных испытаний и исследований, а также опытная эксплуатация экспериментальных образцов Моделирующей системы при выполнении НИР по хозяйственным договорам, государственным контрактам и в центре управления реальными электрическими сетями подтверждают надежность и эффективность созданных средств.

В заключении приведены основные результаты исследований и выводы по работе.

В приложении представлены четыре акта о внедрении результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований созданы средства моделирования, позволяющие надежно и эффективно решать задачи исследования, проектирования и эксплуатации электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями.

Наиболее значимые научные и практические результаты работы состоят в следующем:

- 1 Обоснована методологическая неразрешимость проблемы достаточно полного и достоверного моделирования, в том числе в реальном времени, ЭЭС с ААС в рамках доминирующего в настоящее время одностороннего сугубо численного моделирования ЭЭС и целесообразность решения этой проблемы на основе комплексного подхода, представляющего собой в широком смысле гибридное моделирование.
- 2 Предложена соответствующая комплексному подходу концепция радикального решения проблемы достаточно полного и достоверного непрерывного и бездекомпозиционного трехфазного моделирования в реальном времени ЭЭС с ААС.
- 3 Разработаны структура и принципы построения средств реализации предложенной концепции, образующих специализированную мультипроцессорную программно-техническую систему гибридного типа, состоящую из адаптируемой совокупности специализированных процессоров для адекватного моделирования всех видов и типов оборудования ЭЭС с ААС, объединенных информационно-управляющей системой и трехфазными функциональными связями, согласно топологии моделируемой ЭЭС с ААС.
- 4 Разработаны специализированные процессоры, обеспечивающие непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной всегда приемлемой инструментальной точностью жестких нелинейных дифференциальных уравнений полных трехфазных моделей всех видов и типов оборудования ЭЭС с ААС и адекватное моделирование всевозможных трехфазных и пофазных

- продольных и поперечных коммутаций, средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики, систем автоматического управления устройств FACTS, а также все формы представления, преобразования информации, включая функциональные, автоматизированное и автоматическое управление всеми параметрами и настройками.
- 5 Разработаны структура и принципы реализации специализированного программного обеспечения мультипроцессорной моделирующей системы реального времени ЭЭС с ААС, обладающего всеми необходимыми для решения задач их исследования, проектирования и эксплуатации информационно-управляющими свойствами и возможностями.
 - 6 Подтверждены многочисленными результатами проведенных экспериментальных исследований и опытной эксплуатацией изготовленных образцов свойства и возможности созданной мультипроцессорной моделирующей системы реального времени ЭЭС с ААС, основные из которых получены на конкретных примерах реальных энергообъектов и ЭЭС.

Совокупность вышеизложенных теоретических и экспериментальных результатов служит основанием для заключения о достижении поставленной в диссертационной работе цели.

Список научных трудов по теме диссертации

Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК

- 1 **Боровиков, Ю.С.** Всережимный диспетчерский тренажер реального времени электроэнергетических систем / А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, А.Ф. Прутик, Ю.С. Боровиков // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2010. – № 3–4. – С. 140–146.
- 2 **Боровиков, Ю.С.** Концепция адекватного моделирования интеллектуальных энергосистем // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 86–91.
- 3 **Боровиков, Ю.С.** Роль адекватного моделирования процессов самозапуска электродвигателей / Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, А.С. Гусев // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 77–80.
- 4 **Боровиков, Ю.С.** Принципы формирования схем моделирования для построения всережимных моделирующих комплексов электроэнергетических систем / Ю.В. Хрущев, Ю.С. Боровиков, К.И. Заповодников, А.О. Сулайманов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – № 1. – С. 411–417.
- 5 **Боровиков, Ю.С.** Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени статического синхронного компенсатора / Ю.С. Боровиков, А.С. Васильев, А.С. Гусев // Электричество, 2012. – №. 6 – С. 29–33.
- 6 **Боровиков, Ю.С.** Гибридная модель линии электропередачи / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2012. – № 2. – С. 264–268.

7 **Боровиков, Ю.С.** Специализированный гибридный процессор для всережимного моделирования в реальном времени статического синхронного компенсатора / А.С. Васильев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов // Известия Томского политехнического университета, 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 101–107.

8 **Боровиков, Ю.С.** Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов // Электричество, 2012. – №. 6 – С. 10–13.

9 **Боровиков, Ю.С.** Адаптируемая математическая модель гидравлических и паровых первичных двигателей и генераторов энергосистем / Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов // Электричество, 2012. – № 12. – С. 66–72.

10 **Боровиков, Ю.С.** Информационно-управляющая система мультипроцессорного комплекса моделирования в реальном времени энергосистем / Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов // Электротехника, 2013. – № 5. – С. 56–63.

11 **Боровиков, Ю.С.** Моделирование всережимного функционирования в реальном времени реального района энергосистемы // Электричество, 2013. – № 2. – С. 60–63.

12 **Боровиков, Ю.С.** Методика и средства адекватной настройки дистанционных защит / Ю.С. Боровиков, И.С. Гордиенко, А.О. Сулайманов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки, 2013. – № 2(38). – С. 145–151.

13 **Боровиков, Ю.С.** Гибридное моделирование линии электропередачи с распределенными параметрами с учетом электромагнитного взаимодействия / А.О. Сулайманов, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев // Электричество, 2013. – № 3. – С. 63–69.

14 **Боровиков, Ю.С.** Усилители сигналов для моделей реального времени / Ю.С. Боровиков, А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, А.О. Сулайманов, А.И. Темчук, В.А. Федотов // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники, 2013. – № 2 (28). – С. 70–80.

15 **Боровиков, Ю. С.** Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей [Электронный ресурс] / М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков // Современные проблемы науки и образования, 2013 – №. 3. – С. 1–4. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/109-9343/>.

Патенты на изобретения

16 **Пат. 2469393** Российская Федерация, МПК7 G 06 G 7/62. Устройство для моделирования трехфазной линии электропередачи с сосредоточенными параметрами [Текст] / **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 Томск. политех. ун-т. – № 2011143567/08; заявл. 27.10.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

17 Пат. 2469394 Российская Федерация, МПК7 G 06 G 7/62. Устройство для моделирования трехфазной линии электропередачи с распределенными параметрами [Текст] / 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 Томск. политех. ун-т. – № 2011146618/08; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

18 Пат. 2479025 Российская Федерация, МПК7 G 06 G 7/62. Устройство для моделирования трехфазного трехобмоточного трансформатора [Текст] / Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О., Андреев М.В., Гусев А.С., Прутик А.Ф., Гордиенко И.С.; заявитель и патентообладатель Томск. политех. ун-т. – № 2011146496/08; заявл. 16.11.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.

19 Пат. 2494457 Российская Федерация, МПК7 G 06 G 7/62. Устройство для моделирования статического синхронного компенсатора [Текст] / Боровиков Ю.С., Васильев А.С., Гусев А.С.; заявитель и патентообладатель Томск. политех. ун-т. – № 2012124175/08; заявл. 09.06.2012; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.

20 Пат. 2500028 Российская Федерация, МПК7 G 06 G 7/62. Устройство для моделирования объединенного регулятора потока мощности [Текст] / Боровиков Ю.С., Васильев А.С., Гусев А.С.; заявитель и патентообладатель Томск. политех. ун-т. – 2012135611/08; заявл. 21.08.2012; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.

Статьи, опубликованные в российских изданиях; материалы международных и всероссийских конференций

21 Borovikov, Yu. S. Information and Control System for Use in the Real Time Multiprocessor Simulation of Power Equipment [Text] / Yu. S. Borovikov, A. O. Sulaimanov // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Vol. 84. – № 5. – P. 290–295.

22 Боровиков, Ю.С. Всережимный моделирующий комплекс реального времени и его использование для решения задач управления в ИЭС ААС [Текст] / Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, А.В. Прохоров // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – №. 1 – С. 54–59.

23 Borovikov, Yu. Real Time Hybrid Simulation of Electrical Power Systems: Concept, Tools, Field Experience and Smart Grid Challenges [Text] / A. Prokhorov, Yu. Borovikov, A. Gusev // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2012. – P. 67–78.

24 Боровиков, Ю.С. Инженерно-исследовательская платформа средств построения, анализа и эксплуатации интеллектуальных энергосистем [Текст] / Ю.С. Боровиков, А.В. Прохоров, А.С. Васильев, С.В. Лутовинов // Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России: Материалы докладов международной научно-практической конференции и выставки «Релавэкспо-2012», – Чебоксары, 17-20 апреля 2012. – 150 с. – С. 102–108.

25 Васильев, А.С. Специализированные гибридные процессоры для всережимного моделирования в реальном времени устройств FACTS [Текст] / А.С. Васильев, Ю.С. Боровиков, А.В. Прохоров // Энергетика глазами молодежи: Научные труды III международной научно-технической конференции – Екатеринбург, 22-26 октября 2012 г. – С. 156–161.

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

27 **Borovikov, Yu.** Application of Hybrid Real Time Simulator for solution of Smart Grid tasks on the example of Elgaugol energy cluster pilot project [Text] / Yu. Borovikov, A. Prokhorov, M. Andreev // The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012 – September 17-21, 2012 Tomsk Polytechnic University, Vol. II, P. 604–608.

28 **Borovikov, Yu.** Application of Hybrid Real-Time Power System Simulator for Setting up and Close Loop Testing of Protection and Control Equipment [Text] / Yu. Borovikov, A. Prokhorov, M. Andreev // The 7th International Forum on Strategic Technology IFOST 2012 - September 17-21, 2012 Tomsk Polytechnic University, Vol. II, P. 609–612.

29 **Боровиков, Ю.С.** Решение задач построения активно-адаптивных сетей на базе всережимного моделирующего комплекса реального времени [Текст] / Ю.С. Боровиков, А.В. Прохоров, М.В. Андреев // Материалы докладов III международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи». В 2 т. – 22-26 октября 2012г, Екатеринбург: УрФУ, Том 1. 732 с. – С. 464–469.

30 **Боровиков, Ю.С.** Всережимное моделирование дистанционной защиты в реальном времени [Текст] / Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, И.С. Гордиенко // Материалы докладов III международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи». В 2 т. – 22-26 октября 2012г, Екатеринбург: УрФУ, Том 1. 732 с. – С. 100–105.

31 Prokhorov, A. Hybrid Real-Time Power System Simulator Capabilities for Hardware-in-the-Loop Field Testing [Text] / A. Prokhorov, **Yu. Borovikov** // Proceedings the 5TH International Conference LIBERALIZATION AND MODERNIZATION OF POWER SYSTEMS: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grids – August 06-10, 2012, Russia, Irkutsk, P. 324–328.

32 **Borovikov, Yu.** Hybrid Real Time Simulator Application for Active Adaptive Control Systems Design and Testing Tasks [Text] / Yu. Borovikov, A. Prokhorov, A. Andreev. // Proceedings the 5TH International Conference LIBERALIZATION AND MODERNIZATION OF POWER SYSTEMS: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grids – August 06-10, 2012, Russia, Irkutsk, – P. 310–315.

33 Prokhorov, A. Hardware-in-the-Loop Testbed Based on Hybrid Real Time Simulator [Text] / A. Prokhorov, **Yu. Borovikov**, A. Gusev // IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe, Copenhagen, 2013. – P. 1–5.


34 **Боровиков, Ю.С.** Моделирование статических режимов работы преобразователей напряжения в устройствах FACTS [Текст] / Ю.С. Боровиков, А.С. Васильев // Сборник докладов 4-ой научно-технической конференции «Повышение эффективности функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики в ОЭС Сибири», 4 декабря 2012 г., Кемерово, 89 с. – С. 21–26.

35 Андреев, М.В. Повышение эффективности и надежности функционирования устройств релейной защиты за счет оптимизации их настроек с помощью всережимных математических моделей [Текст] / М.В. Андреев, **Ю.С. Боровиков**, А.О. Сулайманов // Сборник докладов 4-ой научно-технической конференции «Повышение эффективности функционирования релейной защиты и противоаварийной автоматики в ОЭС Сибири», 4 декабря 2012 г., Кемерово, 89 с. – С. 62–69.

Подписано к печати 05.03.2014. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 2,21. Уч.-изд. л. 2,0.

Заказ 151-14. Тираж 100 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru