

На правах рукописи



Гусев Александр Сергеевич

**КОНЦЕПЦИЯ И СРЕДСТВА ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – Электростанции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск – 2008

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный консультант: Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Ушаков Василий Яковлевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор **Баринов Валентин Александрович**
доктор технических наук, профессор **Горелов Валерий Павлович**
доктор технических наук, профессор **Литвак Валерий Владимирович**

Ведущая организация: ОАО «Федеральная сетевая компания
Единой энергетической системы»
(ОАО «ФСК ЕЭС»)

Защита состоится 16 декабря 2008 г. в 14 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д212.269.10 при Томском политехническом университете (ТПУ) по адресу:

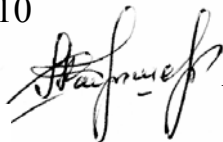
634050 г. Томск, пр. Ленина 30, Томский политехнический университет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 7 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций Д212.269.10

доктор технических наук, профессор

 А.В. Кабышев

Общая характеристика диссертационной работы

Проблема и ее актуальность. В силу единства, непрерывности и параллельности генерации, распределения и потребления электроэнергии все участвующее в данном процессе оборудование: первичные двигатели, генераторы, трансформаторы, линии электропередачи и др. постоянно связано между собой в нормальных и аварийных режимах их работы.

Поскольку подавляющее большинство этого оборудования представляет собой динамические элементы, к тому же преимущественно нелинейные и с весьма значительным диапазоном постоянных времени ($>10^3$), любая современная электроэнергетическая система (ЭЭС) образует большую, многопараметрическую, жесткую (отношение наибольшей постоянной времени к наименьшей $>10^1$), нелинейную, динамическую систему. Проектирование, исследование и эксплуатация таких систем, в отличие от статических, объективно являются несоизмеримо более сложными задачами, в значительной мере из-за трудностей получения, в том числе своевременного, полной и достоверной информации о протекающих в них процессах.

Применительно к ЭЭС эти трудности усугубляются еще недопустимостью, за редкими исключениями, натурных экспериментов и невозможностью, из-за чрезмерной сложности, полноценного физического моделирования. В результате основным путем получения названной информации служит математическое моделирование, полноту, достоверность и оперативность которого определяют два очевидных фактора:

- 1) адекватность математических моделей всех значимых элементов, образующих совокупную модель ЭЭС;
- 2) способность средств решения совокупной математической модели ЭЭС обеспечивать его реализацию с необходимой точностью и оперативностью.

Что касается первого фактора, то достигнутый уровень физико-математического представления и описания процессов в различных звеньях, оборудо-

вании и ЭЭС уже давно позволяет синтезировать все режимные модели для всех элементов ЭЭС, достаточно полно и достоверно воспроизводящие в них реальный непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов. Однако получающаяся при их использовании математическая модель ЭЭС, с учетом допустимого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит очень жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно высокого порядка, решение которой существующими средствами оказывается невозможным. Поэтому, осуществляемое в настоящее время с помощью многочисленных компьютерных программ численное моделирование ЭЭС производится с применением, несомненно в ущерб полноте и достоверности, ряда, известных по специализациям и характеристикам данных программ, упрощений и ограничений для математических моделей и условий их решения.

Необходимость этих упрощений и ограничений длительное время связывалась, главным образом, с несовершенством ЭВМ, развитие которых должно было их устранить. Между тем, стремительный и колоссальный прогресс компьютерной техники позволил практически полностью снять эту необходимость лишь для статических задач и далеко не пропорционально повлиял на принципиально значимые упрощения и ограничения для динамических задач и на оперативность их решения. В результате актуальная для надежного и эффективного решения многих важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС проблема полноты, достоверности и оперативности моделирования ЭЭС продолжает в значительной мере сохраняться и перспектива ее решения оказывается неопределенной.

В связи с этим, наряду с совершенствованием доминирующего в настоящее время численного моделирования ЭЭС, становится целесообразным и актуальным исследование данной проблемы и разработка альтернативного пути ее решения. С учетом особенностей физико-математических свойств и характеристик ЭЭС, а также проявившихся трудностей решения сформулированной выше проблемы сугубо численным путем, эвристически очевидно,

что эффективной альтернативой может быть только комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование. Представленные в данной диссертации результаты исследования проблемы, обоснования и разработки концепции и средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС подтверждают этот эвристический прогноз.

Аналогичная ориентация в решении проблемы моделирования больших динамических систем происходит в последние годы во многих промышленно развитых странах. Данное направление решения проблемы становится в последнее время актуальной темой международных симпозиумов по теории и применению больших систем. Создание новых инструментов моделирования больших динамических систем, в частности ЭЭС, является в настоящее время постоянной темой научно-технических программ Евросоюза. Начиная с 1998г. университетами и научно-исследовательскими центрами США и стран Европы инициирован и ежегодно проводится специализированный международный симпозиум «Гибридные системы: вычисление и управление» (HSCC): в Беркли, Калифорния, США (HSCC 1998); в Нимегене, Нидерланды (HSCC 1999); в Питсбурге, Пенсильвания, США (HSCC 2000); в Риме, Италия (HSCC 2001); в Паоло Альто, Калифорния, США (HSCC 2002); в Праге, Чехия (HSCC 2003); в Филадельфии, Пенсильвания, США (HSCC 2004); в Цюрихе, Швейцария (HSCC 2005); в Санта Барбара, Калифорния, США (HSCC 2006); в Пизе, Италия (HSCC 2007); в Сент-Луисе, Миссури, США (HSCC 2008).

Цель работы. Главной целью диссертационной работы является создание средств моделирования ЭЭС, позволяющих решить актуальную для электроэнергетики проблему получения, в том числе своевременного, достаточно полной и достоверной информации о реальном непрерывном спектре процессов в оборудовании и ЭЭС при нормальных и аварийных режимах их работы.

Для достижения этой цели разработаны концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС. При выполнении данной работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС.
2. Обоснование и разработка концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, исключающей необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математических моделей и условий их решения.
3. Разработка структуры средств осуществления концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, образующих специализированную многопроцессорную программно-техническую систему реального времени гибридного типа, состоящую из адаптируемой совокупности специализированных гибридных процессоров (СГП) моделируемых элементов ЭЭС и информационно-управляющей системы (ИУС).
4. Синтез всережимных математических моделей основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС: синхронных и асинхронных электрических машин, первичных двигателей и систем их регулирования, систем возбуждения, трансформаторов, линий электропередачи и др., адекватно воспроизводящих реальный непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов.
5. Разработка СГП, универсальных для соответствующих видов элементов ЭЭС и обеспечивающих в реальном времени, на неограниченном интервале и с необходимой точностью решение всережимных математических моделей элементов ЭЭС, а также преобразования форм представления информации и всевозможные трехфазные продольные и поперечные коммутации.
6. Разработка ИУС, включающей специализированное программное обеспечение (СПО), интерфейсы, локальную компьютерную сеть и обеспечивающей все виды автоматизированного и автоматического управления моделированием, в том числе в реальном времени: интерактивное, программное, комбинированное, а также представления

функциональной обработки, отображения информации и информационного взаимодействия в компьютерных сетях, в частности, с оперативно-информационными комплексами (ОИК) ЭЭС.

7. Практическая реализация концепции и средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, полностью ориентированная на интегральную микроэлектронику, микропроцессорную технику, программно-информационные технологии. Исследование и испытание функциональных, метрологических и эксплуатационно-технических свойств и возможностей разработанных средств.

Методы исследования. Сложная специфика разработанных средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС обусловила необходимость обоснования и применения рассмотренной в диссертации специализированной экспериментальной методики оценки метрологических характеристик этих средств. Данная методика основана на использовании свойств разработанных средств и позволяет надежно оцениваемые метрологические характеристики воспроизведения квазиустановившихся режимов для одного значения частоты распространять на весь рабочий частотный диапазон процессов в ЭЭС.

Для других решаемых в диссертации задач применяется широкий спектр теоретических и экспериментальных методов исследования: теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, теории автоматического регулирования и управления, теории нелинейных и линейных электрических цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами и др.

Научная новизна:

1. Предложена и обоснована концепция всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, исключающая необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математических моделей и условий их решения.
2. Разработана структура средств осуществления предложенной концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, представ-

ляющая собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему реального времени гибридного типа, состоящую из адаптируемой совокупности СГП и ИУС.

3. Синтезированы всережимные математические модели, универсальные для соответствующих видов элементов ЭЭС: синхронных и асинхронных эл. машин вместе с их вспомогательным оборудованием, трансформаторов, линий электропередачи и др., достаточно полно и достоверно описывающие в них реальный непрерывный спектр нормальных и аномальных процессов.
4. Разработаны СГП, универсальные для каждого вида элементов ЭЭС и обеспечивающие в реальном времени, на неограниченном интервале и с необходимой точностью решение всережимных математических моделей этих элементов, а также преобразование форм представления информации и моделирование всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций.
5. Разработана ИУС, включающая СПО, ориентированное на всережимное моделирование в реальном времени ЭЭС, в том числе с учетом релейной защиты и противоаварийной автоматики, и на полностью автоматизированное и автоматическое его осуществление.

Научно-техническая новизна наиболее значимых решений подтверждена патентом и рядом авторских свидетельств на изобретения.

Практическая ценность. Разработанные средства моделирования ЭЭС исключают необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математических моделей и условий их решения, что позволяет:

- 1) полностью отказаться от декомпозиции и ограничения интервала воспроизведения процессов;
- 2) использовать для всех элементов ЭЭС всережимные математические модели с полноценным учетом основного и вспомогательного оборудования, адекватно воспроизводящие в них реальный непрерывный

спектр всевозможных нормальных и анормальных процессов, включая трехфазные по мгновенным значениям;

- 3) осуществлять в реальном времени непрерывное всережимное моделирование ЭЭС, в том числе с учетом функционирования всевозможных средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики.

При этом обеспечиваются все потенциально необходимые автоматизированные и автоматические информационно-управляющие возможности моделирования:

- 1) интерактивный, программный и комбинированные режимы управления моделированием и отображением, функциональной обработкой и представлением информации и т.д.
- 2) информационное взаимодействие с внешними программными средствами, в том числе в компьютерных сетях, в частности с ОИК ЭЭС с целью автоматического установления и отслеживания квазиустановившихся схемно-режимных состояний моделируемой ЭЭС по текущим или ретроспективным данным телесигналов (ТС) и телеизмерений (ТИ).

В результате достигается возможность получения, в том числе в реальном времени, достаточно полной и достоверной информации о непрерывном спектре нормальных и анормальных процессов в оборудовании и ЭЭС при всевозможных нормальных и аварийных режимах их работы, необходимой для надежного и эффективного решения многих важнейших задач проектирования, исследования и эксплуатации ЭЭС, в частности: а) расчета, настройки и проверки существующих устройств и систем релейной защиты, противоаварийной автоматики, автоматического регулирования возбуждения (АРВ), а также систем регулирования котлоагрегатов, турбин и т.д.; б) моделирования и разработки модернизированных и новых средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики; в) анализа аварий в ЭЭС; г) исследования динамических свойств ЭЭС; д) анализа возможных ус-

ловий работы оборудования; е) советчика диспетчера; ж) тренажа и обучения персонала.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы реализованы в полном объеме в ряде НИР, выполненных при непосредственном ведущем участии автора диссертации и под его научным руководством, в частности:

1. В договорных НИР ТПУ с ОАО «Тюменьэнерго»: №№9-31/89, 9-24/98, 9-135/99, 9-27/01, 9-28/01, 9-175/02, связанных с разработкой, исследованием и изготовлением средств всережимного моделирования в реальном времени Тюменской энергосистемы (ТЭ), названных гибридным моделирующим комплексом (ГМК) ЭЭС и соответственно ГМК ТЭ, а также с авторскими сопровождением его опытной эксплуатации и с разработкой на базе ГМК ТЭ и ОИК ТЭ всережимного диспетчерского тренажера и советчика реального времени.

Использование представленных в диссертации результатов подтверждено соответствующим актом внедрения.

2. В договорной НИР ТПУ с ОАО «ФСК ЕЭС» № 9-105/04, связанной с разработкой проекта модернизированных средств всережимного моделирования в реальном времени ЕНЭС, названных всережимным моделирующим комплексом реального времени (ВМК РВ) ЕЭС.

В рамках выполнения этого проекта для представителей «ФСК ЕЭС» проведена в «Тюменьэнерго» на ГМК ТЭ натурная демонстрация свойств и возможностей разработанных средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС.

3. В НИР, выполненной по заказу Электротехнического института ТПУ, связанной с разработкой и изготовлением ВМК РВ ЭЭС в объеме эквивалентной схемы ЕНЭС Томской области для учебных и научно-исследовательских целей.

Реализация подтверждена актом внедрения.

Кроме этого результаты диссертации использовались в договорных НИР ТПУ с ТЭЦ Сибирского химического комбината №9-93/01, с Томским неф-

техимическим комбинатом №№9-93/01, 9-62/05, 7-55/06 и др., связанных со всережимным моделированием в реальном времени систем электроснабжения и исследованием условий работы АРВ турбогенераторов, мощных синхронных двигателей, с их оптимальной настройкой и модернизацией, а также с исследованием процессов пуска, выбега, самозапуска синхронных двигателей, функционирования средств релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Результаты исследований и разработок, обобщенных в диссертации, послужили стимулом и основой для создания в ОАО «Тюменьэнерго» на период опытной эксплуатации ГМК ТЭ сектора моделирования, учебно-исследовательской лаборатории гибридного моделирования ЭЭС на кафедре «Электрические сети и системы» ТПУ, а также открытия в Электротехническом институте ТПУ научно-исследовательской лаборатории «Моделирование ЭЭС», научным руководителем которой является автор диссертации.

Личный вклад автора. Лично автором диссертации выполнено исследование проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС, предложена и обоснована рассмотренная в диссертации концепция всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, разработана структура средств осуществления предложенной концепции в виде специализированной многопроцессорной программно-технической системы реального времени гибридного типа, состоящей из адаптируемой совокупности СГП и ИУС, синтезированы приведенные в диссертации всережимные математические модели основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС, разработаны функциональные и структурные схемы всех СГП.

Разработка ИУС осуществлялась при непосредственном участии автора и под его научным руководством коллективом научно-исследовательской лаборатории. Аналогично осуществлялась практическая реализация представленных в диссертации разработок, включавшая: изготовление, испытание, исследование и внедрение разработанных средств.

Работы, опубликованные в соавторстве, являются плодом коллективного труда при определяющей роли автора диссертации.

При консультативной помощи автора диссертации по темам, являющимся фрагментами рассмотренной в ней проблемы, подготовлены три кандидата технических наук и осуществляется подготовка аспирантов.

Основные результаты, выносимые на защиту. К защите представляются следующие результаты диссертационной работы:

1. Результаты исследования проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС.
2. Предложенная концепция всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС и ее обоснование.
3. Результаты разработки средств осуществления предложенной концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, а именно:
 - структурная схема специализированной многопроцессорной программно-технической системы реального времени гибридного типа, состоящей из адаптируемой совокупности СГП и ИУС;
 - результаты синтеза всережимных математических моделей основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС;
 - функциональные и структурные схемы СГП элементов ЭЭС;
 - структура ИУС и ее обоснование.
4. Результаты экспериментальных исследований функциональных, метрологических и эксплуатационно-технических свойств и возможностей практических реализаций разработанных средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались, обсуждались и демонстрировались на следующих научных мероприятиях, конкурсах и выставках:

1. Отраслевые научно-технические совещания «Разработка, изготовление и опытная эксплуатация ГМК ТЭ» (ОАО «Тюменьэнерго», г. Сургут, 1989-2003 гг.).
2. Всесоюзная научно-техническая конференция «Математическое моделирование в энергетике» (Институт проблем моделирования в энергетике АН УССР, г. Киев, 1990 г.).
3. Областная научно-техническая конференция «Повышение эффективности работы энергосистем» (КирПи, г. Киров, 1990 г.).
4. X Всесоюзная научная конференция «Моделирование электроэнергетических систем» (ИФТПЭ, КТУ, г. Каунас, 1991 г.).
5. Сибирская научно-техническая конференция «Микропроцессорные системы контроля и управления» (г. Новосибирск, 1992 г.).
6. Всероссийская научная конференция «Токи короткого замыкания в энергосистемах» (РАО «ЕЭС России», г. Москва, 1995 г.).
7. Всероссийские научно-технические семинары «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (ТПУ, г. Томск, 1994, 1996, 1997 гг.).
8. Межрегиональное научно-техническое совещание «Результаты разработки и использования ГМК ЭЭС для Тюменской энергосистемы» (ТПУ, г. Томск, 1997 г.).
9. Межрегиональная научно-техническая выставка-конференция «Энергосбережение» (Технопарк, г. Томск, 2001 г.).
10. Всероссийская политехническая и международная промышленная выставка «Сибполитех-2003» (ЦМТ, г. Новосибирск, 2003 г., разработка гибридного моделирующего комплекса электроэнергетических систем отмечена малой золотой медалью).
11. Третья Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (АмГУ, г. Благовещенск, 2003 г.).

12. Отраслевое научно-техническое совещание «Разработка проекта все-режимного моделирующего комплекса реального времени ЕНЭС» (ОАО «ФСК ЕЭС», г. Москва, 2004 г.).
13. Международная научно-техническая конференция «Электроэнергия и будущее цивилизации» (ТПУ, г. Томск, 2004 г.).
14. 4-ая Международная научно-техническая конференция «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях» (Казахстан, АИЭиС, г. Алматы, 2004 г.).
15. 8-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology “KORUS 2004” (Russia, Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2004).
16. The 10-th IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symposium in Large Scale Systems: Theory and Applications (Japan, Osaka, Osaka International Convention Center, 2004).
17. 9-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology “KORUS 2005” (Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2005).
18. Отраслевое научно-техническое совещание «Натурная демонстрация на ГМК ТЭ свойств и возможностей разработанных средств все-режимного моделирования в реальном времени ЭЭС.» (ОАО «Тюмень-энерго», ОАО «ФСК ЕЭС», г. Сургут, 2005 г.).
19. Отраслевой научно-технический семинар «Автоматизированные системы технологического управления ФСК ЕЭС» («МЭС Северо-Запада», ОАО «ФСК ЕЭС», г. Санкт-Петербург, 2005 г.).
20. 16-й Ежегодный международный конгресс «Новые высокие технологии газовой, нефтяной промышленности, энергетики и связи» (CITOGIC 2006 – Томск, ТНХК, 2006 г.).
21. Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии управления режимами энергосистем XXI века» (НГТУ, г. Новосибирск, 2006 г.)

22. Конкурс научно-исследовательских работ ТПУ 2006 г. (ТПУ, г. Томск, 2006 г., разработка «Многопроцессорная программно-техническая система реального времени гибридного типа для всережимного моделирования энергосистем» отмечена дипломом 1-й степени).
23. Международная выставка-конгресс «Высокие технологии, инновации, инвестиции» (г. Санкт-Петербург, 2006 г., разработка «Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем» отмечена серебряной медалью).
24. VIII Московский международный салон инноваций и инвестиций (ВВЦ, г. Москва, 2008 г., разработка «Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем» отмечена золотой медалью).

Публикации. По результатам выполненных исследований, разработок и их применения, связанных с тематикой диссертационной работы, опубликовано 55 научных работ, в том числе патент и 11 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем диссертации. Общий объем представленного диссертационного материала составляет 315 страниц и включает в себя: оглавление, введение, пять глав, заключение, 2 приложения и библиографический список из 227 наименований. Основной материал диссертационной работы содержит 285 страниц, 85 рисунков и 5 таблиц.

Основное содержание работы

Во введении кратко изложены суть и актуальность решаемой проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС. Отмечены подходы, мировые тенденции в решении данной проблемы и большой вклад в разработку различных ее аспектов отечественных ученых и специалистов. Сформулирована цель работы, заключающаяся в обеспечении возможности получения в реальном времени достаточно полной и достоверной информации о действительном непрерывном спектре процессов в оборудовании и ЭЭС при всевоз-

можных нормальных и аварийных режимах их работы. Обозначен рассматриваемый в диссертации путь достижения поставленной цели, посредством необходимых для этого концепции и средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС. Показана научная новизна выполненных исследований, разработок и их практическая ценность. Приведены сведения о реализации и внедрении результатов диссертационной работы, а также об апробации и публикации материалов диссертации.

Указаны результаты, выносимые на защиту. Представлены структура и объем диссертации.

В первой главе «Исследование проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС» исследованы и проанализированы причины возникновения и существования данной проблемы, перспективы ее решения.

В соответствии с указанными во введении факторами адекватности и оперативности моделирования ЭЭС определены и сформулированы два условия, выполнение которых позволяет успешно решить исследуемую проблему:

- 1) использование для всех моделируемых элементов ЭЭС всережимных математических моделей с полноценным учетом основного и вспомогательного оборудования, полно и достоверно воспроизводящих реальный непрерывный спектр процессов в этом оборудовании при всевозможных нормальных и аварийных режимах его работы;
- 2) осуществление в реальном времени с необходимой точностью решения совокупной всережимной математической модели ЭЭС в течении протекания всевозможных процессов в оборудовании и ЭЭС, которое априори следует считать неограниченным.

По-существу, эти условия представляют собой своего рода эталоны, необходимые для выявления и анализа причин, препятствующих решению проблемы, и для сравнения различных подходов к моделированию ЭЭС.

Методологически, при решении любой задачи, возможны два принципиально альтернативных подхода:

1. Первичными являются средства решения и соответственно их свойства и возможности.

Если параметры и характеристики решаемой задачи (в данном случае математической модели ЭЭС и условий ее решения) удовлетворяют свойствам и возможностям используемых средств, или, как трактуется в математике, хорошо обусловлены, то задача успешно решается с помощью этих средств. В противном случае неизбежна подгонка параметров и характеристик задачи под свойства и возможности средств решения, то есть необходимыми становятся упрощения и ограничения для математической модели и условий ее решения.

2. Первичной является решаемая задача и соответственно ее параметры и характеристики, а средства для ее успешного решения или подбираются среди известных, или создаются заново (возможны комбинации).

Данный подход исключает необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математической модели и условий ее решения, но его осуществление, в случае создания новых средств, определяется наличием соответствующих возможностей.

Доминирующее в настоящее время численное моделирование ЭЭС, безусловно, является классическим примером первого подхода и потому наследует все его свойства и возможности, соответственно отмеченную проблему решения плохо обусловленных задач, к которым относится охарактеризованная в эталонных условиях всережимная математическая модель ЭЭС и условия ее решения. Последнее следует из сравнения параметров и характеристик этой задачи с условиями применимости теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, объединяющей методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, неизбежно используемые во всех компьютерных программах данного назначения.

Определяющее большинство этих методов объединяется общим разностным уравнением:

$$\sum_{i=0}^k [a_i \tilde{y}_{n+i} - h \cdot b_i F(t_{n+i}, \tilde{y}_{n+i}, h)] = 0, \quad (1)$$

где k – порядок метода численного интегрирования, указывающий число начальных условий в виде значений предыдущих решений, необходимых для однозначного решения данного разностного уравнения; a_i, b_i, F – коэффициенты и функция, определяемые аппроксимирующим многочленом конкретного метода, причем если $a_i \neq 0, b_i \neq 0$, то метод неявный, если $a_i \neq 0, b_i = 0$, то метод явный; h – шаг дискретизации (интегрирования); $t_n = t_0 + nh$, ($n = 0, 1, \dots$) – точки дискретизации, а t_0 – точка начала интервала интегрирования; $\tilde{y}_{n+i}$ – дискретное значение решения в точке t_{n+i} .

Многочисленные исследования методов численного интегрирования дифференциальных уравнений подтверждают эвристический прогноз невозможности удовлетворительного численного решения дифференциальных уравнений в общем случае и его возможности при определенных идеализированных и ограничительных условиях:

1. Решения дифференциального уравнения должны удовлетворять условию Липшица:

$$|f(t, y_n) - f(t, y_j)| \leq L |y_n - y_j|, \quad (2)$$

где y_n, y_j – любая пара значений из области решения дифференциального уравнения $dy/dt = f(t, y)$, а L – константа Липшица.

2. Решения дифференциального уравнения должны быть разложимыми в ряд Тейлора в окрестности каждой точки дискретизации:

$$y(t) = \sum_{p=0}^n \frac{y^p(t_n)}{p!} (t - t_n)^p + r_n(t), \quad (3)$$

где $y^p(t_n) = d^p y / dt^p \big|_{t=t_n}$, а $r_n(t)$ – остаточный член ряда Тейлора при его усечении до члена степени p .

3. Методы дискретизации для дифференциальных уравнений должны быть согласованными: $d = \max |\tilde{y}(t_n) - y(t_n)| \rightarrow O(h^p)$, при $h \rightarrow 0$, (4)

где d – локальная ошибка аппроксимации; p – степень согласованности; $O(h^p)$ – ошибка за счет отбрасывания членов ряда Тейлора при его усечении.

4. Решения разностного уравнения (1) должны быть ограничены, как минимум, условием нуль–устойчивости, необходимым для сходимости дискретных методов при $h \rightarrow 0$. Согласно этому условию на коэффициенты уравнения (1) налагаются ограничительные условия, в соответствии с которыми корни ξ_i его характеристического полинома $\Pi(\xi) = \sum_{i=0}^k a_i \xi^i$ (5)

должны удовлетворять требованиям: для всех корней $|\xi_i| \leq 1$; корни $|\xi_i| = 1$ должны быть обязательно простыми.

5. Решения разностного уравнения (1), ограниченные условием п.4, ограничиваются также длиной интервала решения по условию теоремы Далквиста

$$|\tilde{y}(t_n) - y(t_n)| \leq \frac{G}{1 - \left| h \frac{b_k}{a_k} \right| \cdot M} \left[\left(1 + \left| h \frac{b_k}{a_k} \right| \cdot M \right) d + \frac{t_n}{|a_k|} \left(\frac{\sigma}{h} + Kh^p \right) \right] \cdot e^{Ght_n},$$

где G, M, K – постоянные, определяемые только конкретными коэффициентами формулы и решаемого дифференциального уравнения; $\sigma = \max |\sigma_n|$ – ошибка округления ЭВМ, которая при ее учете добавляется аддитивным членом в формулу.

6. Для обеспечения более сильной (теоретически абсолютной) устойчивости методов дискретизации для дифференциальных уравнений, область решений разностного уравнения ограничивается еще более значительно, чем в п.4, а именно: главный корень характеристического полинома (5) должен быть простым и иметь значение $\xi_1 = 1$, а все остальные корни должны удовлетворять условию $|\xi_i| < 1$; метод дискретизации должен быть только неявным: $a_i \neq 0, b_i \neq 0$; порядок обычно используемых многошаговых методов дискретизации ограничивается значениями $k \leq 2$.

Каждое из этих условий, подробно рассмотренное в данной главе в контексте с соответствующими параметрами и характеристиками всережимной математической модели ЭЭС и условиями ее решения, указывает на их чрезвычайно плохую обусловленность и следовательно на невозможность получения удовлетворительного решения. Единственным путем улучшения обусловленности является снижение жесткости, дифференциального порядка математической модели и ограничение интервала решения, то есть необходимы принципиально значимые для полноты и достоверности моделирования упрощения и ограничения для математической модели ЭЭС и условий ее решения. Однако даже при этом всегда неизвестной оказывается еще и действительная ошибка собственно решения, принципиально присущая численному интегрированию дифференциальных уравнений. В теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений проблема определения действительной ошибки численного интегрирования дифференциальных уравнений отнесена к разряду фундаментальных. Поэтому для ориентировочной оценки ошибки численного решения и соответственно приемлемости обусловленности математической модели и результатов ее численного решения применяются полуэмпирические формулы. Такого рода обоснованная, проверенная на практике и рекомендованная для использования формула приведена, в частности, в [Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М: Высш. шк., 1985.-536с.]

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^m e^{\lambda_n h_n} (d_n + \sigma_n), \text{ где } h_n - \text{значение } n\text{-го шага численного интегрирования; } \lambda_n - \text{коэффициент чувствительности к ошибке на } n\text{-ом шаге интегрирования, определяемый матрицей Якоби решаемой системы уравнений; } d_n - \text{ошибка аппроксимации на } n\text{-ом шаге интегрирования; } \sigma_n - \text{ошибка округления, определяемая разрядной сеткой используемого компьютера; } m - \text{общее число шагов (с учетом дифференциального порядка) на интервале решения.}$$

Данная формула позволяет также наглядно проиллюстрировать обоснован-

ность всех предыдущих выводов и заключений о причинах возникновения и существования проблемы адекватности моделирования ЭЭС. Для большей убедительности примера можно задать практически идеальные условия численного решения всережимной математической модели средней региональной ЭЭС, оценочный дифференциальный порядок которой составляет $N \approx 5 \cdot 10^3$, на ограниченном интервале $t_n = 20$ [с]: $h_n = \text{const} = 10^{-5}$ [с], $\lambda_n = 0$ (нежесткая система), $d_n = \text{const} = 10^{-10} \cdot 100\%$, $\sigma_n = 0$ (бесконечно большая разрядная сетка компьютера). Подставляя эти данные в формулу определения оценочного значения ошибки численного решения, получаем

$$\varepsilon = \frac{t_n}{h_n} \cdot N \cdot d_n \approx \frac{20}{10^{-5}} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-10} \cdot 100\% \approx 100\%.$$

Из приведенного примера видно, что, даже без учета снижения полноты и достоверности моделирования в результате необходимых для улучшения обусловленности упрощений и ограничений для математической модели ЭЭС и условий ее решения, совершенно неприемлемой оказывается ошибка собственно численного решения, для уменьшения которой нужны дальнейшие упрощения и ограничения для математической модели ЭЭС и условий ее решения, ведущие к еще большему снижению адекватности моделирования ЭЭС.

Анализ отмеченных в данной главе многочисленных работ, посвященных численному моделированию ЭЭС и численному интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений, включая известные распространенные компьютерные программы, показывает, что достигаемые по разным направлениям и для различных целей результаты в целом по-прежнему остаются в рамках существующей теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений и перспектива принципиальных положительных деформаций и изменений этих рамок не просматривается.

Что касается проблемы оперативности моделирования ЭЭС, эталоном которой служит реальное время, то в отличие от рассмотренной проблемы аде-

кватности, для осуществления численного решения достаточно обусловленной математической модели ЭЭС в реальном времени непреодолимых препятствий нет. Анализ характеристик современных программно-технических средств показывает, что такое моделирование в настоящее время и в обозримой перспективе возможно с помощью многопроцессорной супер-ЭВМ.

Вместе с тем, учитывая очень высокую стоимость и большое энергопотребление таких компьютеров, а также рассмотренную проблему адекватности численного моделирования ЭЭС, создание подобной программно-технической системы вряд ли является целесообразным.

Принимая во внимание рассмотренные результаты исследования проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС, в качестве наиболее целесообразного и перспективного пути ее решения выбран сформулированный выше альтернативный методологический подход.

Во второй главе «Концепция всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС» сформулированы и обоснованы общие и основные положения предложенной концепции, непосредственно определившие структуру средств ее осуществления и совокупность требований к ним.

В соответствии с целью работы и результатами исследования проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС, главными исходными условиями для разработки концепции служили:

- 1) первичность решаемой задачи, обозначенной в цели работы и конкретизированной в эталонных условиях решения проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС;
- 2) современное (с учетом перспективы) технологическое и информационное решение задачи, обеспечивающее вместе с тем достижение поставленной цели.

Данный методологический подход, как было отмечено в первой главе, в отличие от доминирующего в настоящее время, исключает необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математической модели ЭЭС и условий ее решения путем объединения необходимых для

достижения цели свойств и возможностей различных средств, включая создание новых, представляющего собой в широком смысле гибридное моделирование.

Очевидно, что рамки этого направления позволяют создавать множество разнообразных гибридных систем, в том числе для моделирования ЭЭС. Анализ известных, созданных в разное время и в разных странах, многочисленных гибридных систем для моделирования ЭЭС показал отсутствие, по ряду отмеченных в диссертации причин, единой обоснованной концепции, ориентированной на всережимное моделирование в реальном времени больших ЭЭС. Предложенная концепция, по мнению автора, восполняет этот пробел.

Концентрированным результатом рассмотренной концепции и ее основных положений, непосредственно определивших структуру средств ее осуществления и совокупность требований к ним, является приведенная на рисунке 1 специализированная многопроцессорная программно-техническая система реального времени гибридного типа.

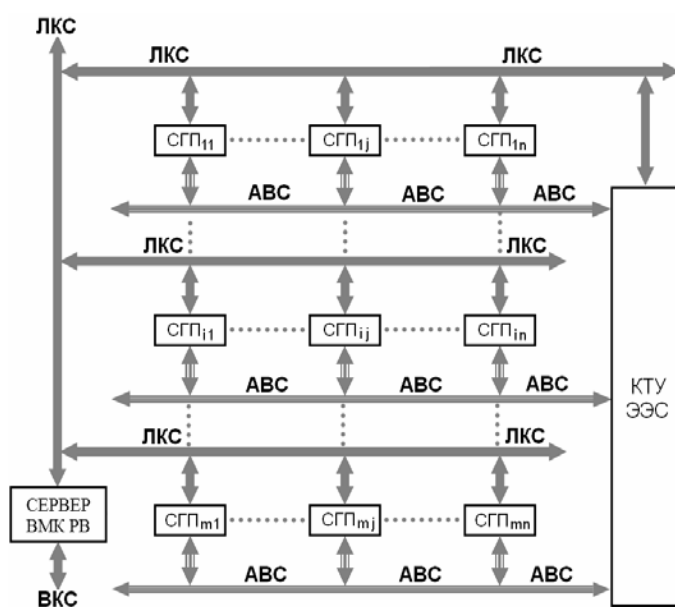


Рис. 1. Структурная схема многопроцессорной программно-технической системы гибридного типа для всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС

Разработанная структура состоит из адаптируемой совокупности функционально и информационно взаимосвязанных спе-

циализированных гибридных процессоров (СГП) моделируемых элементов ЭЭС, в которой функциональная трехфазная (АВС) взаимосвязь осуществляется, согласно топологии моделируемой ЭЭС, коммутатором трехфазных узлов (КТУ), а информационная взаимосвязь, обеспечивающая в реальном вре-

мени все необходимые автоматизированные и автоматические информационно-управляющие свойства и возможности, осуществляется посредством локальной компьютерной сети (ЛКС) и специализированного программного обеспечения (СПО) сервера. Последние в совокупности с микропроцессорами (МП) или интерфейсами СГП (ИГП) образуют информационно-управляющую систему (ИУС). Под адаптируемостью СГП имеется ввиду их универсальность для соответствующих видов элементов ЭЭС: энергоблоков, эл. двигателей, трансформаторов, линий электропередачи и других элементов, позволяющая моделировать различные типы и параметры основного и вспомогательного оборудования элементов данного вида.

Назначением всех СГП является осуществление в реальном времени, на неограниченном интервале и с необходимой точностью решения адекватных всережимных математических моделей основного и вспомогательного оборудования моделируемых элементов ЭЭС, в том числе с учетом всевозможных средств релейной защиты, технологической и противоаварийной автоматики, а также преобразования форм представления информации и моделирования всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций.

Для обеспечения представленной структурой всей совокупности указанных свойств и возможностей, необходимых для достижения поставленной цели, потребовалось следующее объединение средств:

- 1) для методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале адаптируемых всережимных математических моделей элементов ЭЭС применяется неявное непрерывное интегрирование дифференциальных уравнений и цифро-аналоговое управление параметрами моделей;
- 2) все, непосредственно не связанные с основным решением всережимных математических моделей, алгебраические, трансцендентные и логические операции выполняются цифровым способом, в том числе с необходимыми цифро-аналоговыми и аналого-цифровыми преобразованиями форм представления информации;

- 3) для адекватного моделирования всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций и физической адекватности входов-выходов моделируемых элементов и узлов ЭЭС, выходные-входные фазные непрерывные математические переменные моделируемых элементов преобразуются в соответствующие им модельные токи, напряжения и все коммутации осуществляются на физическом уровне аналого-цифровым способом;
- 4) все автоматизированные и автоматические информационно-управляющие возможности реализуются программно-цифровым способом с использованием цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразований форм представления информации;
- 5) необходимая инструментальная точность решения обеспечивается применением для всех схмотехнических решений интегральных цифровых, аналоговых, цифро-аналоговых и аналого-цифровых микросхем и микропроцессоров соответствующей прецизионности;
- 6) современные, с учетом перспективы, технологические и информационные свойства и возможности обеспечиваются применением новейших и перспективных технологий в схмотехнике и программно-информационных технологиях.

Состав и содержание этого объединения являются, по-существу, исходными условиями для разработки СГП и ИУС рассмотренной в данной главе структуры осуществления концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС. Первый экспериментальный образец этих средств назван «Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС» (ГМК ЭЭС), а модернизированный – «Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС» (ВМК РВ ЭЭС).

В третьей главе «Специализированные гибридные процессоры» в соответствии с рассмотренной концепцией и ее положениями сформулированы общие для всех видов СГП принципы их построения:

1. Основу каждого СГП_{ij} составляет сопроцессор, соответствующий виду моделируемых элементов ЭЭС и представляющий собой параллельную цифро-аналоговую структуру, предназначенную для непрерывного и методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале универсальной всережимной математической модели данного вида элементов ЭЭС и обеспечивающую автоматизированное управление всеми коэффициентами и параметрами этой модели, включая интерактивный, программный и комбинированный режимы управления.

В зависимости от функциональной сложности элементов конкретного вида, например энергоблока, указанный сопроцессор может быть составным и состоять из нескольких функционально взаимосвязанных сопроцессоров подобного рода. Например, сопроцессор СГП энергоблока целесообразно подразделять на функционально взаимосвязанные сопроцессоры первичного двигателя с учетом систем регулирования, генератора и системы возбуждения, а в общем случае и блочного трансформатора.

2. Для достижения наибольшей адекватности и внешнего физического подобия СГП моделируемому виду элементов ЭЭС, обеспечивающих их естественное взаимодействие между собой и возможность осуществления спектра продольных и поперечных коммутаций на физическом уровне, а также для естественного формирования узлов схем воспроизводимых ЭЭС и их наращивания, подключения, если нужно, разнообразных модельных физических элементов и различной аппаратуры, сопроцессор дополняется преобразователями напряжение-ток (u/i). Последние преобразуют входные-выходные непрерывные математические переменные в соответствующие им трехфазные модельные физические токи и напряжения.

3. Для обеспечения возможности осуществления полного спектра продольных и поперечных коммутаций, с учетом сопротивлений шунтов выключателей ($r_{ш}$) и переходных сопротивлений замыканий ($r_{п}$), трехфазные модельные физические входы-выходы сопроцессора оснащаются цифруправ-

ляемыми аналоговыми ключами и цифроуправляемыми сопротивлениями: ЦУАКВ, ЦУС $r_{ш}$ и ЦУАКЗ, ЦУС $r_{п}$, соответственно.

4. Для осуществления информационно-управляющего взаимодействия между СГП и сервером, каждый СГП_{ij} содержит соответствующую аппаратную часть ИУС, которая, кроме цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) сопроцессоров, включает в себя многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и интерфейс гибридного процессора (ИГП) или микропроцессор (МП). С помощью ЦАП обеспечиваются все указанные ранее режимы автоматизированного управления коэффициентами и параметрами математических моделей, а АЦП позволяет преобразовать непрерывные математические переменные в цифровую форму представления этой информации. Посредством ИГП или МП осуществляется согласование внутренних цифровых шин (ВЦШ) СГП с цифровыми магистралями локальной компьютерной сети (ЛКС) ИУС и адресное информационно-управляющее взаимодействие в структуре ГМК ЭЭС или ВМК РВ ЭЭС. В модификации с МП данный узел обеспечивает также моделирование релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗиПА) и др., различную функциональную обработку информации, а в случае наличия в моделируемом элементе микропроцессорных систем регулирования, то и моделирование этих систем.

5. Схемотехнические решения всех СГП ориентированны на применение исключительно интегральной микроэлектронной элементной базы и возможность их дальнейшей более глубокой интеграции.

На основе этих принципов и всестороннего анализа различных типов основного и вспомогательного оборудования для каждого вида элементов ЭЭС: энергоблоков, трансформаторов (автотрансформаторов), синхронных и асинхронных двигателей, линий электропередачи, реакторов, обобщенной нагрузки разработаны функциональные блок-схемы соответствующих видов СГП. На рисунках 2 и 3 приведены примеры функциональных блок-схем СГП энергоблока (ГПЭ) и линии электропередачи (ГПЛ).

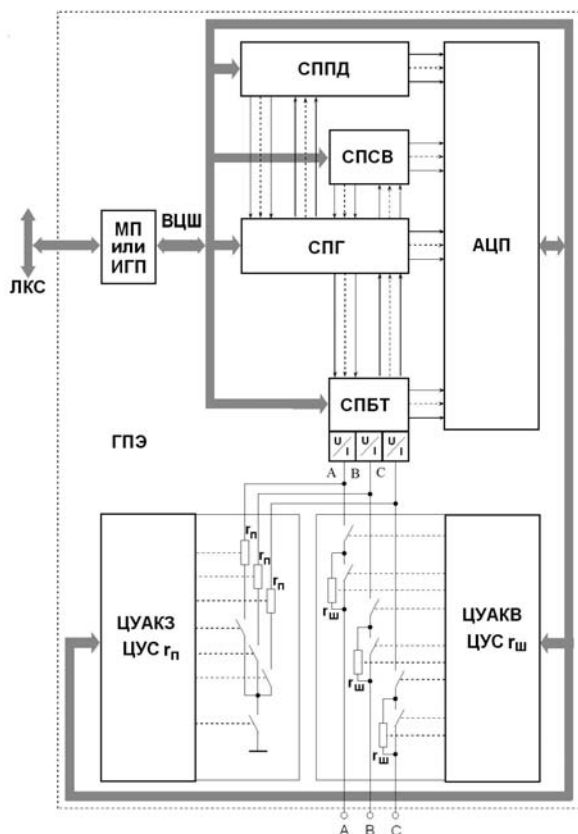


Рис. 2. Функциональная блок-схема СГП энергоблока: СППД – сопроцессор первичного двигателя; СПСВ – сопроцессор системы возбуждения; СПГ – сопроцессор генератора; СПБТ – сопроцессор блочного трансформатора

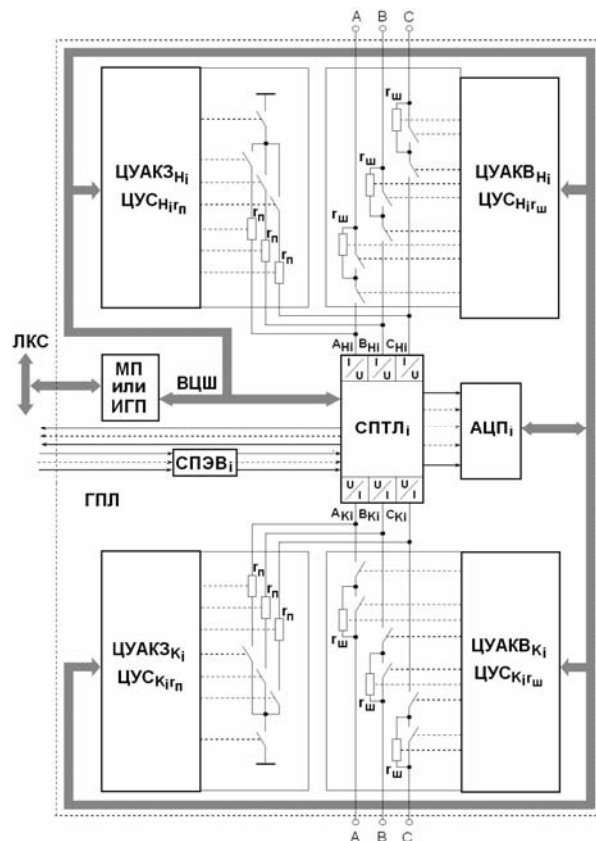


Рис. 3. Функциональная блок-схема СГП линии электропередачи: СПТЛ – сопроцессор трехфазной линии; СПЭВ – сопроцессор междуцепного электромагнитного взаимодействия

Для всех сопроцессоров каждого вида СГП синтезированы универсальные всережимные математические модели, позволяющие достаточно полно и достоверно воспроизводить в этом оборудовании и соответственно в элементах ЭЭС присущие им непрерывные спектры процессов при всевозможных нормальных и аварийных режимах работы. Модели составлены на основе детального и всестороннего анализа математических описаний процессов в обмотках и магнитопроводах электрических машин, трансформаторов (авто-трансформаторов), реакторов, в возбудителях и автоматических регуляторах различных систем возбуждения, в прямоточных и барабанных котлоагрегатах.

тах, трактах топливоподачи и автоматических регуляторах, в различных типах паровых и гидравлических турбин, паропроводах, гидروпроводах и системах автоматического регулирования, в разнообразных приводимых электродвигателями механизмах, в линиях электропередачи с распределенными и сосредоточенными параметрами с учетом междуфазного и междуцепного электромагнитного взаимовлияния, а также анализа и сопоставления опубликованных результатов математического моделирования основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС.

Согласно указанным принципам построения СГП и полученным всережимным математическим моделям основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС, разработаны приведенные в данной главе структурные схемы всех сопроцессоров и СГП в целом, а также последующие их схемотехнические реализации.

В четвертой главе «Информационно-управляющая система» рассмотрены разработанные в соответствии с положениями концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС и с учетом принципов построения СГП структура ИУС и ее аппаратные и программные составляющие. Отвечающая этим условиям ИУС может быть осуществлена в двух вариантах, согласно приведенной на рисунке 4 общей функциональной схеме ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС.

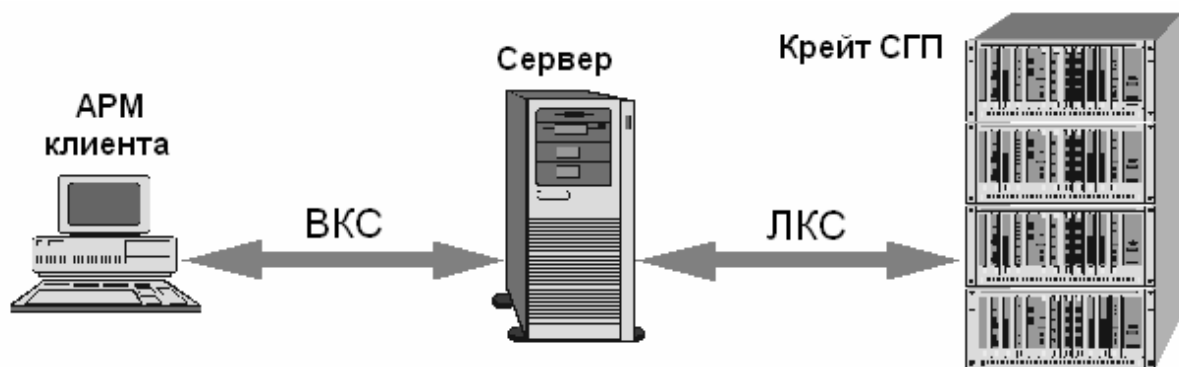


Рис. 4. Общая функциональная схема ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС

По одному из вариантов все СГП ГМК ЭЭС связаны с сервером посредством ЛКС через свои аппаратные ИГП, выполняющие только интерфейсные функции, а все программные информационно-управляющие функции, вклю-

чая моделирование РЗиА, функциональную обработку информации и т.п. для всех СГП выполняет сервер. При этом ЛКС может представлять собой параллельную физическую цифровую шину с адаптерами, а внешний порт приема-передачи серверного компьютера оснащается в этом случае специализированным контроллером.

В другом варианте у всех СГП ВМК РВ ЭЭС вместо ИГП используются МП, через которые, посредством ЛКС, выполненной с помощью стандартных приемо-передатчиков и сетевого кабеля, осуществляется взаимосвязь с сервером и между СГП. При этом все вышеупомянутые программные информационно-управляющие функции СГП выполняют их МП.

Необходимые для практики информационно-управляющие возможности обеспечивают оба варианта ИУС, но, учитывая тенденции в информационных технологиях, второй вариант является более перспективным. Кроме того, отмеченные различия между этими вариантами не оказывают существенного влияния на основную составляющую ИУС – специализированное программное обеспечение (СПО) сервера (СПО клиентов представляет собой, по-существу, ограничиваемую правами доступа пользователей копию СПО сервера).

Поскольку решение всережимной математической модели ЭЭС в ГМК и ВМК РВ осуществляется с помощью СГП, вычислительные возможности СПО сервера существенного значения не имеют. По этой же причине СПО сервера практически не оказывает влияния на результаты собственно моделирования ЭЭС.

Вместе с тем, метрологическая и временная адекватность программных информационно-управляющих свойств и возможностей ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС, а также уровень профессионально-ориентированного информационного сервиса, в том числе автоматизированного и автоматического, определяется в основном СПО сервера. Поэтому, с учетом реального масштаба времени и большого объема информации, главным образом из-за огромных массивов мгновенных значений трехфазных процессов, требования к СПО сервера ока-

зываются неординарными и весьма жесткими. Данное обстоятельство, а также специфика ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС и динамического моделирования больших систем в целом, исключают конструирование подобного программного обеспечения путем непосредственного использования известных программных оболочек и прикладных программ.

В связи с этим в СПО сервера не используются промышленные реляционные базы данных и в возможностях разработки оно полностью инкапсулировано. Последнее, также как и при разработке концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, позволяет при создании СПО сервера первичными считать указанные в положениях концепции информационно-управляющие возможности ГМК ЭЭС, ВМК РВ ЭЭС и для достижения данной цели объединять и создавать необходимые для этого программные средства. Единственным принципиально компромиссным условием при этом является выбранная для СПО сервера базовая программная среда, которая может быть любой, но ее свойства и возможности являются дополнительными исходными условиями. Для СПО сервера выбрана универсальная многоязыковая программная среда dot Net Framework, с которой работают широко распространенные операционные системы: Windows XP, Vista и др.

Структурно СПО сервера состоит из системного и прикладного ПО. Системное ПО является средой для прикладного, которое в свою очередь подразделяется на машинно-ориентированное ПО и профессионально-ориентированное ПО, соответственно содержит объектную базу данных и базу знаний.

Машинно-ориентированное ПО структурировано в соответствии со структурой ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС, отражающей естественное деление ЭЭС на элементы. Поэтому основу этого ПО составляет база программных объектов-заместителей всех СГП, обеспечивающая информационно-управляющее взаимодействие со всеми СГП ГМК ЭЭС или ВМК РВ ЭЭС, а также перевод машинных переменных в профессионально-ориентированные единицы измерения: относительные и соответствующие им именованные.

Профессионально-ориентированное ПО содержит базу знаний, объединяющую многочисленный и разнообразный программный инструментарий, необходимый для автоматизированного и автоматического осуществления всевозможных режимов моделирования: интерактивного, программного и комбинированного, а также различного представления, функционального отображения управлений и результатов моделирования в виде динамических схем, осциллограмм, диаграмм, графиков, таблиц, показаний цифровых и аналоговых приборов и т.д. Взаимодействие между профессионально-ориентированным и машинно-ориентированным ПО осуществляется в среде системного ПО.

Взаимодействие СПО сервера с внешними программными средствами: СПО клиент, ОИК ЭЭС и др. осуществляется с помощью соответствующих интерфейсных программ. Число аналогичных редактируемых профессионально-ориентированных баз знаний и соответственно клиентов не ограничено.

Для программирования различных процедур моделирования ПО содержит профессионально-ориентированный язык программирования высокого уровня, а также разнообразные программные трафареты диалогов, в частности для упрощенного программирования различных процедур динамики.

Для интерактивного режима моделирования одним из наиболее удобных инструментов профессионально-ориентированного ПО являются разработанные для этих целей разнообразные динамические панели наблюдения и управления (ДПНУ), на которых размещаются, в том числе самим пользователем, схемы и разнообразные динамические информационно-управляющие программные приборы. Примеры ДПНУ приведены на рисунке 5.

Визуально невоспринимаемые быстротекущие процессы буферизуются и записываются на жесткий диск сервера. Для их просмотра и анализа предусмотрена специальная ДПНУ «Визуализатор динамики», представляющий собой многолучевой и многофункциональный программный осциллограф-анализатор (рис. 6).

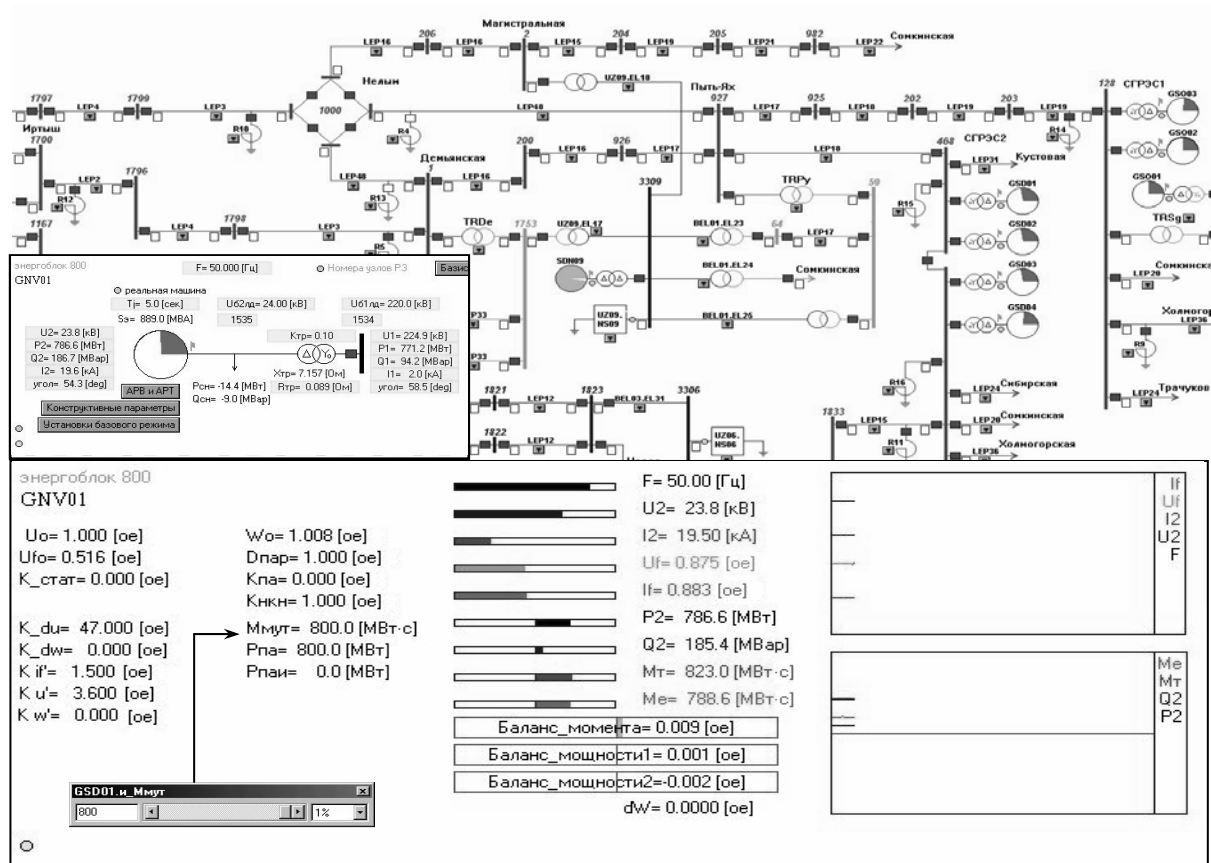


Рис. 5. ДПНУ одного из районов моделируемой ЭЭС и энергоблока

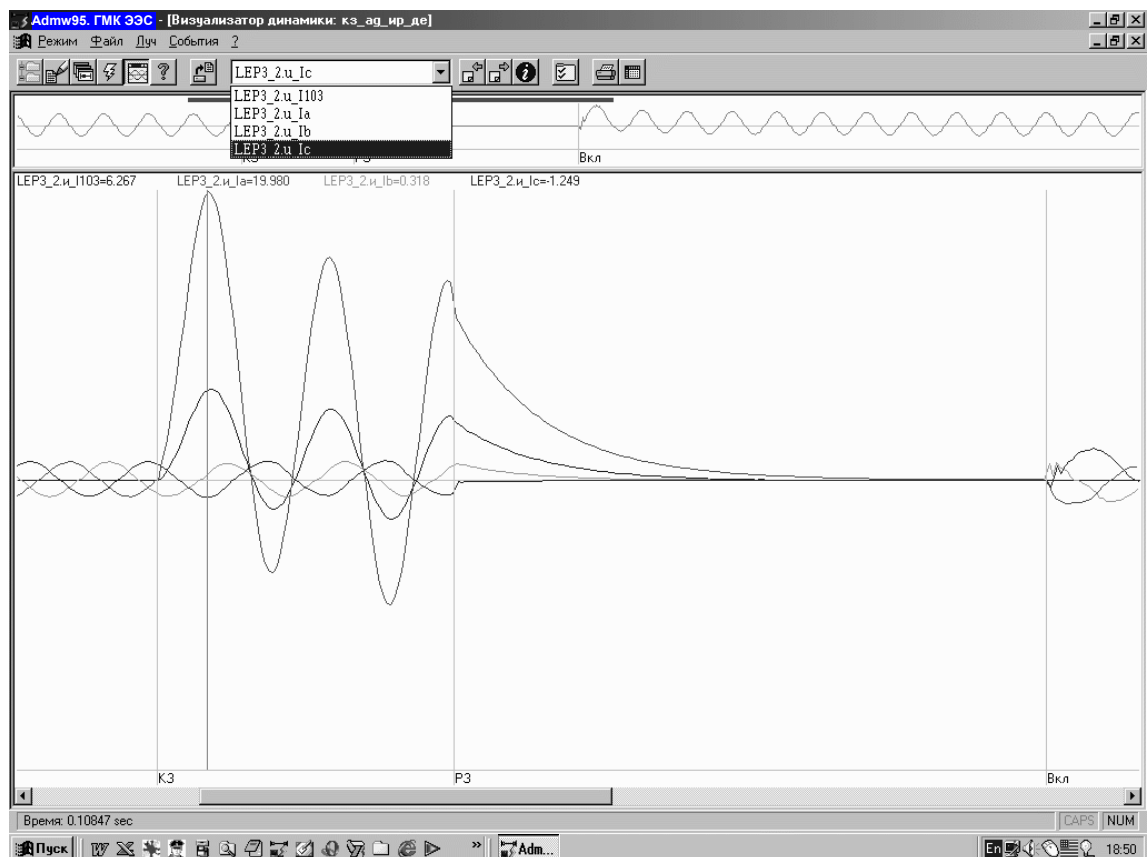


Рис. 6. Форма "Визуализатор динамики"

Для информационного взаимодействия по компьютерным сетям с ОИК ЭЭС с целью автоматизированного и автоматического установления и отслеживания на ГМК ЭЭС или ВМК РВ ЭЭС, в качестве исходных, текущих или ретроспективных квазиустановившихся схемно-режимных состояний моделируемой ЭЭС по данным телесигналов (ТС) выключателей, анцапф трансформаторов и телеизмерений (ТИ) загрузки генераторов, напряжений на шинах электростанций, а также напряжений и потоков мощностей в нагрузочных узлах, для базы знаний разработаны соответствующие алгоритмы и программные процедуры, активизируемые по необходимости пользователем.

В пятой главе «Реализация концепции и средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС» представлены результаты практического осуществления предложенной концепции в виде разработанных на ее основе средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС. Рассмотрены и проанализированы результаты исследований, испытаний и опытной эксплуатации в Тюменской энергосистеме (ТЭ) гибридного моделирующего комплекса ЭЭС (ГМК ТЭ), в лаборатории кафедры «Электрические сети и системы» Томского политехнического университета его учебно-исследовательской модификации, а также результаты экспериментальной проверки проектных решений модернизированного всережимного моделирующего комплекса реального времени ЕНЭС для «ФСК ЕЭС» (ВМК РВ ЕЭС).

Всесторонне рассмотрены и проанализированы следующие свойства, возможности и характеристики этих комплексов:

1. Практическая способность разработанных средств осуществлять в реальном времени и на неограниченном интервале всережимное моделирование большой ЭЭС.

Многочисленные и долговременные лабораторные испытания ГМК ТЭ в режиме непрерывного воспроизведения в реальном времени квазиустановившихся режимов ЭЭС, моделирования при этом различных возмущений и аналогичные условия его опытной эксплуатации являются нагляд-

ной и убедительной натурной демонстрацией способности разработанных средств осуществлять в реальном времени и на неограниченном интервале всережимное моделирование большой реальной ЭЭС.

Для анализа этой способности использовались данные разнообразных динамических программных приборов профессионально-ориентированного ПО ИУС ГМК ТЭ.

2. Метрологические характеристики.

Ввиду отсутствия методической ошибки решения всережимных математических моделей элементов и ЭЭС в целом, метрологию разработанных средств определяет только инструментальная погрешность СГП и серверного компьютера.

Пренебрегая компьютерной ошибкой округления, получаем, что точность решения всережимной математической модели ЭЭС полностью зависит от инструментальной погрешности СГП. Рассмотренная в данной главе, в соответствии с теорией точности и чувствительности вычислительных устройств, методика расчета этой погрешности показывает обоснованность ее применения при разработке СГП. Вместе с тем, с учетом ряда отмеченных обстоятельств, более надежной и достоверной оценкой инструментальной точности СГП и, безусловно, столь сложной многопроцессорной программно-технической гибридной системы реального времени, как ГМК ЭЭС или ВМК РВ ЭЭС, являются экспериментальные данные в диапазоне всевозможных нормальных и аварийных режимов работы моделируемого оборудования и ЭЭС. Согласно опубликованным данным и экспериментам на ГМК ТЭ, весь непрерывный спектр всевозможных нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС, 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 всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС.

Можно также обоснованно считать, что более высокочастотные процессы, связанные с грозовыми перенапряжениями и ударами молний, менее точно, но тоже могут воспроизводиться. Однако, такого рода исследований не проводилось и эта часть спектра исключена из обозначенного рабочего диапазона процессов, воспроизводимых на ГМК ЭЭС или ВМК РВ ЭЭС.

С учетом вышеизложенного рассмотрена и проанализирована экспериментальная точность воспроизведения различных квазиустановившихся схемно-режимных состояний ЭЭС на примере ТЭ; процессов при всевозможных к.з., в том числе с учетом РЗ и ПА; 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.

Для основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС и для элементов в целом можно получить расчетным путем достаточно надежные данные, которые могут служить эталонами для проверки достоверности экспериментальных результатов. Кроме того, такие расчетные и натурные данные, результаты физического моделирования и натурных экспериментов для подавляющего большинства оборудования ЭЭС известны и опубликованы. Поэтому проверка точности каждого из разработанных СГП затруднений не составляет и подобные эксперименты для всех СГП были проведены. Их результаты полностью подтвердили всережимную адекватность СГП в масштабе реального времени.

Что касается экспериментальной оценки точности всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, то, ввиду очевидного отсутствия необходимых для этого эталонных данных для указанного рабочего спектра всевозможных нормальных и аномальных процессов, эта задача, в общем случае, оказывается весьма сложной. Однако, важное свойство разрабо-

танных средств, полностью исключившее необходимость декомпозиции режимов и процессов в ЭЭС, позволяет успешно решить эту задачу.

Поскольку в ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС весь непрерывный спектр всевозможных нормальных и аномальных процессов в оборудовании и ЭЭС, независимо от какого-либо конкретного нормального или аварийного режима, воспроизводится в результате непрерывного решения в реальном времени и на неограниченном интервале всегда одной и той же всережимной модели ЭЭС, то и любой воспроизводимый квазиустановившийся режим (трактуемый обычно как установившийся), 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 ГМК ЭЭС и ВМК РВ ЭЭС интегральной микроэлектронной элементной базы не оказывают своего ощутимого влияния в рабочем диапазоне частот $0 \div 1000$ Гц, то можно обоснованно распространять экспериментальную точность воспроизведения квазиустановившихся режимов, например 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 всережимной математической модели ЭЭС, в частности ТЭ, использовалась главным образом рассмотренная методика.

При этом, экспериментальные данные сравнивались и с результатами расчетов таких же установившихся режимов, выполненных с помощью различных компьютерных программ (Растр, ДАКАР и др.), а также с ТИ ОИК ТЭ в режиме автоматизированного и автоматического установления и отслеживания квазиустановившихся режимов на ГМК ТЭ по данным ОИК ТЭ. Примеры некоторых табличных ДПНУ, иллюстрирующих данные этих экспериментов приведены на рисунке 7.

Наименование	Узел1	Uзад[кВ]	U[кВ]	U_оик[кВ]	dU_оик_гмк[кВ]
Демьянская	1	500.00	502.63	505	2.37
Магистральная	2	500.00	510.60	508	-2.60
СГРЭС1	128	500.00	516.43	516	-0.43
Сибирская	300	500.00	506.08	506	-0.08
Белозерная	462	500.00	500.33	502	1.67
СГРЭС2	468	500.00	518.02	518	-0.02
Трачюковская	497	500.00	506.46	508	1.54
Холмогорская	550	500.00	508.38	506	-2.38
Кустовая	893	500.00	499.56	500	0.44
Пыть_Ях	927	500.00	515.28	517	1.72
Сомкинская	983	500.00	512.98	515	2.02
Нелим	1000	500.00	501.49	504	2.51
РЭТ	1200	500.00	523.01	524	0.99
Тюмень	1201	500.00	504.93	505	0.07
НВГРЭС	1530	500.00	507.23	507	-0.23
Иртыш	1700	500.00	500.88	501	0.12
Ильково	1866	500.00	521.03	522	0.97
Тарко_Сале	1913	500.00	499.98	498	-1.98
Луговая	1916	500.00	503.03	503	-0.03
Беркут	1935	500.00	503.78	503	-0.78
Курган	1937	500.00	496.88	496	-0.88
Тюмень	8388	500.00	500.33	500	-0.33

подстанция	Имя	Тип	Узел1	Узел2	P2[МВт]	P2_оик	dP2_оик_гмк[МВт]
Демьянская	TR5_1	трансформатор	1	1753	257.44	256	-1.44
Магистральная	TR10_2	трансформатор	2	7	303.02	300	-3.02
СГРЭС1	TR8_1	трансформатор	128	122	-2.41	-1.87	0.54
Сибирская	TR1_1	трансформатор	300	294	218.78	214	-4.78
Белозерная	TR3_1	трансформатор	462	352	274.24	276	1.76
Трачюковская	TR2_1	трансформатор	497	532	391.86	388	-3.86
Холмогорская	TR6_2	трансформатор	550	165	495.04	500	4.96
Кустовая	TR1_2	трансформатор	893	895	127.55	129	1.45
Иртыш	TR2_2	трансформатор	898	2705	-118.52	-113	5.52
Пыть_Ях	TR4_1	трансформатор	927	59	339.14	341	1.86
Сомкинская	TR8_2	трансформатор	983	986	708.49	712	3.51
Тюмень	TR9_1	трансформатор	1201	2206	-113.45	-113	0.45
НВГРЭС	TR3_2	трансформатор	1530	1534	0.0	0.0	0.0
Иртыш	TR10_1	трансформатор	1700	2705	2.40	3.0	0.60
Ильково	TR4_2	трансформатор	1866	2968	327.16	325	-2.16
Тарко_Сале	TR6_1	трансформатор	1913	1912	235.02	238	2.18
Луговая	TR5_2	трансформатор	1916	1903	2.40	0.0	-2.40
Тюмень	TR9_2	трансформатор	2206	2212	31.25	32	0.75

Рис. 7. Табличные формы ДПНУ напряжений и перетоков мощностей через трансформаторы по данным ГМК ТЭ и ОИК ТЭ

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

Примеры воспроизведения некоторых из этих процессов на ГМК ТЭ приведены на рисунках 8, 9, 10.

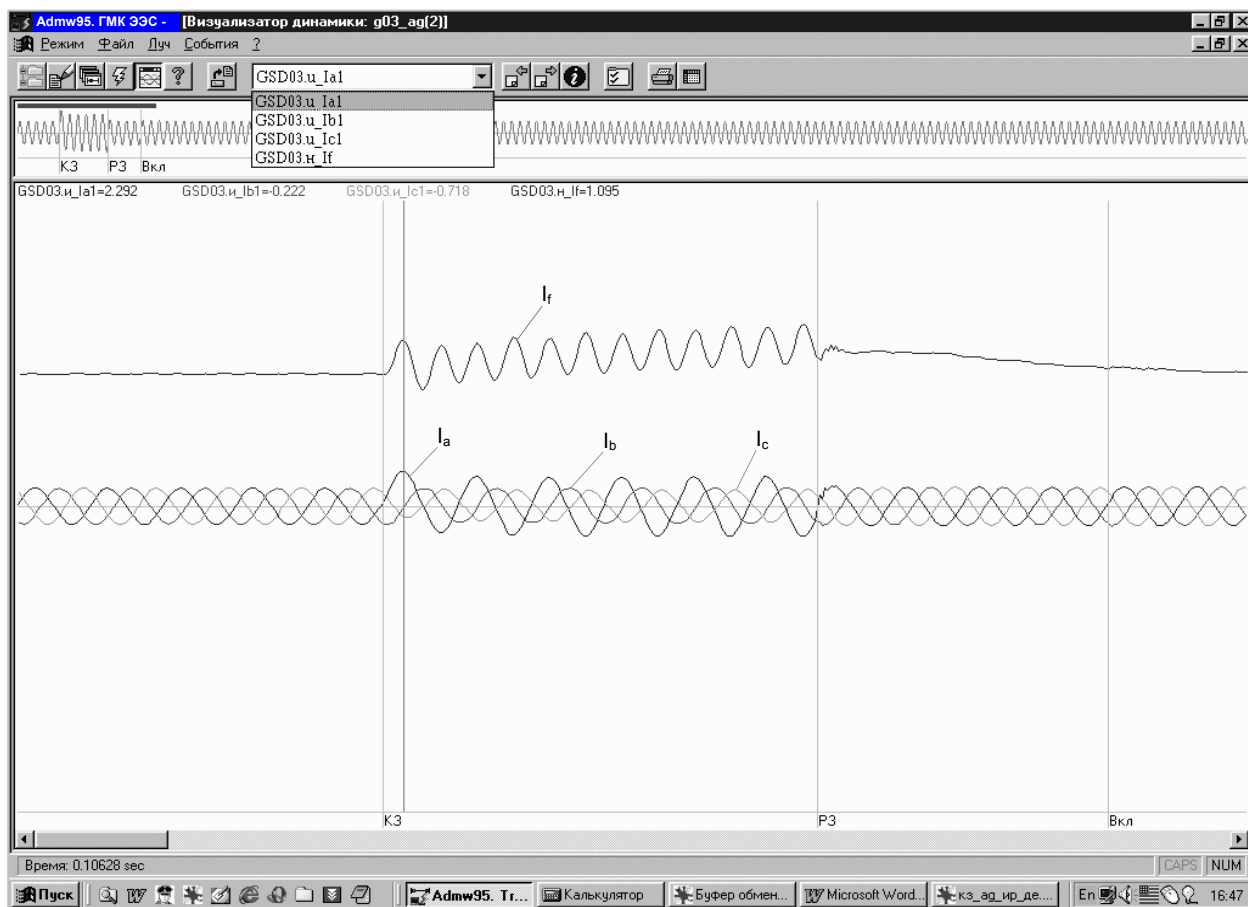


Рис. 8. Осциллограммы фазных токов и тока возбуждения энергоблока при однофазном к.з. в сети

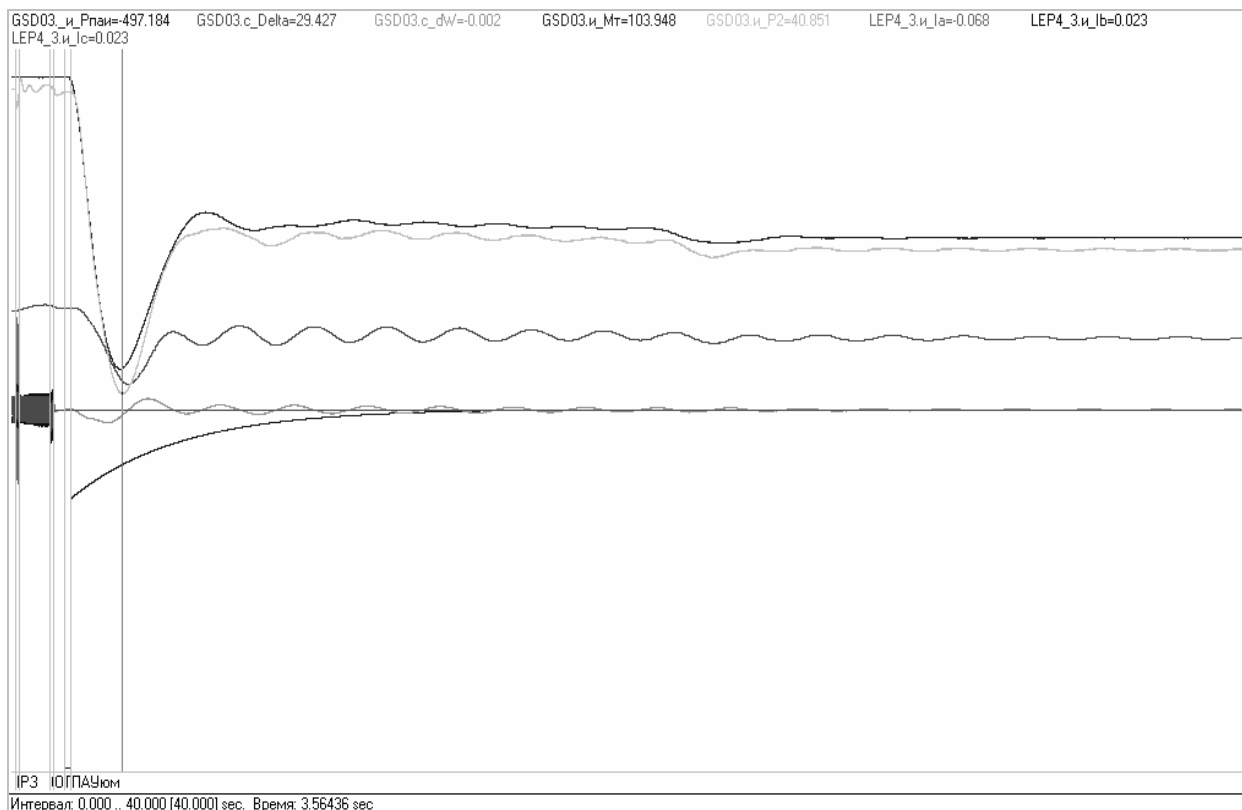


Рис. 9. Осциллограммы процессов противоаварийной разгрузки энергоблока

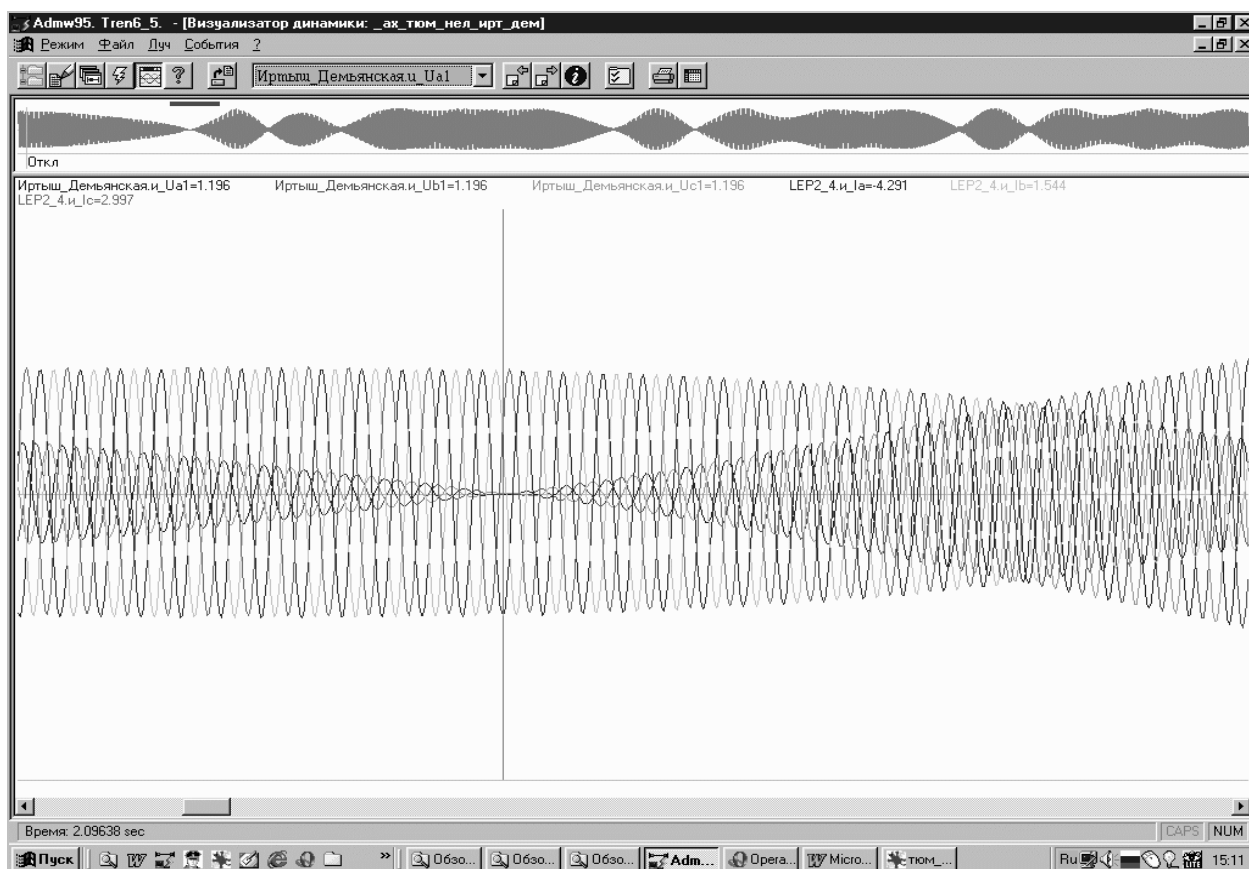


Рис. 10. Осциллограммы фазных токов и напряжений ВЛ-500 при асинхронном режиме

Результаты анализа поставленных экспериментов дают основания считать надежной оценкой точности всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, на примере первого экспериментального образца ВМК РВ ЭЭС, изготовленного для ТЭ – ГМК ТЭ, значение на уровне 1%.

3. Нарастиваемость размерности моделируемой ЭЭС.

Концепция всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС практически не накладывает никаких ограничений на размерность моделируемой ЭЭС. При этом без снижения свойств и возможностей ВМК РВ ЭЭС увеличивается, соответственно, лишь число СГП. Последнее полностью подтверждают результаты создания ГМК ТЭ, выполненного путем поэтапного наращивания моделируемой схемы ТЭ с полным комплексом испытаний и исследований на каждом этапе.

4. Информационно-управляющие свойства и возможности.

Длительные лабораторные испытания, исследования и опытная эксплуатация ГМК ТЭ позволили полностью проверить все, определенные положениями реализованной 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 форматах ЦДУ и Comtrade.

5. Результаты длительных лабораторных испытаний и опытная эксплуатация экспериментального образца разработанных средств всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС показали их достаточно высокую надежность и стабильность работы.

6. Сравнительные оценки свойств и возможностей экспериментальных и модернизированных средств.

Модернизированный ВМК РВ ЭЭС отличается от экспериментального ГМК ЭЭС в следующем: для СПО сервера и соответственно СПО клиен-

тов используется предназначенная для работы с применяемой базовой программной средой более совершенная операционная система; в СГП применены новейшие достижения в области прецизионной интегральной микроэлектроники и вместо ИГП используются МП; для ЛКС ИУС используются новейшие в этой области достижения; для крейтов СГП используется серийный конструктив евростандарта; для электропитания аппаратуры ВМК РВ ЭЭС используются высококачественные серийные блоки электропитания.

Отличия не затрагивают существа положений самой концепции и потому отмеченная модернизация лишь подтверждает долговременность и перспективность ее принципиальных основ. Вместе с тем, как это и предусмотрено положениями концепции, текущая модернизация программно-технической базы позволяет повышать метрологические и эксплуатационно-технические характеристики ВМК РВ ЭЭС.

Экспериментальные исследования указанной модернизации, выполненные в рамках проверки проектных решений ВМК РВ ЭЭС для ОАО «ФСК ЭЭС», показали возможность обеспечения точности решения все-режимной математической модели ЭЭС порядка 0,1%. При этом полностью снимаются, имеющиеся в экспериментальном образце некоторые ограничения на число одновременно обслуживаемых программным многолучевым осциллографом-анализатором высокочастотных процессов. Несколько увеличивается надежность и стабильность работы, снижается энергопотребление. Кроме этого, улучшаются различные сервисные функции СПО сервера и клиентов, а также дизайн ВМК РВ ЭЭС.

В заключении сформулированы основные результаты выполненных исследований и разработок, позволившие достичь поставленную в диссертации цель.

1. Выявлены и обоснованы источник и причина существования проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС, связанной, главным

образом, с доминирующим в настоящее время сугубо численным моделированием ЭЭС:

- для полного, достоверного и оперативного математического моделирования ЭЭС необходимо использовать ее всережимную математическую модель, адекватно воспроизводящую весь действительный непрерывный спектр процессов в оборудовании и ЭЭС при всевозможных нормальных и аварийных режимах их работы и обеспечить в реальном времени, на неограниченном интервале и с необходимой точностью решение этой модели, которое численным путем осуществить невозможно из-за чрезвычайно плохой обусловленности такой модели для методов численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений;
- единственным путем улучшения обусловленности математической модели ЭЭС является применение, необходимых для этого и принципиально значимых для полноты и достоверности моделирования, упрощений и ограничений для математической модели ЭЭС и условий ее решения;
- пошаговый, рекуррентный принципы численного интегрирования дифференциальных уравнений делают невозможным в обозримой перспективе осуществление моделирования в реальном времени больших ЭЭС на ПЭВМ и для такого моделирования необходима многопроцессорная супер-ЭВМ, что с учетом отмеченной проблемы адекватности и высокой стоимости, большого энергопотребления таких компьютеров вряд ли может быть целесообразным;
- ввиду отсутствия каких-либо обоснованных прогнозов принципиальных изменений условий применимости теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, объединяющей все практически используемые методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, перспектива радикального решения проблемы адекватности и оперативности моделирования ЭЭС сугубо чис-

ленным путем не просматривается, в связи с чем становится целесообразной и актуальной разработка альтернативного пути решения данной проблемы.

2. Разработана и обоснована концепция всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, исключающая необходимость принципиально значимых упрощений и ограничений для математических моделей и условий их решения и поэтому позволяющая радикально решить проблему адекватности и оперативности моделирования ЭЭС. Принципиальной основой предложенной концепции является альтернативный, по отношению к доминирующему в настоящее время, методологический подход к решению проблемы. При данном подходе первичной является задача и условия ее решения, в данном случае всережимная математическая модель ЭЭС и условия ее решения, а необходимые для ее решения средства создаются путем объединения различных известных и специально разработанных новых средств.
3. Разработаны средства осуществления концепции всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, представляющие собой специализированную многопроцессорную программно-техническую систему реального времени гибридного типа, состоящую из адаптируемой совокупности специализированных гибридных процессоров (СГП) элементов ЭЭС, коммутатора трехфазных узлов (КТУ) ЭЭС и информационно-управляющей системы (ИУС). Последняя включает в себя локальную компьютерную сеть (ЛКС) и специализированное программное обеспечение (СПО) сервера и клиентов.
4. Синтезированы всережимные математические модели, позволяющие достаточно полно и достоверно воспроизводить непрерывный спектр процессов при всевозможных нормальных и аварийных режимах работы основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС.
5. В соответствии с концепцией всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС и ее положениями, сформулированы общие для всех СГП

принципы их построения. На основе синтезированных всережимных математических моделей основного и вспомогательного оборудования элементов ЭЭС разработаны универсальные для каждого вида элементов СГП, обеспечивающие в реальном времени, на неограниченном интервале и с необходимой точностью решение этих моделей, преобразование форм представления информации и моделирование всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций, а также все необходимые автоматизированные и автоматические информационно-управляющие возможности.

6. Для осуществления всех потенциально необходимых для всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС и профессионально-ориентированных автоматизированных и автоматических информационно-управляющих свойств и возможностей разработано СПО сервера и клиентов.
7. Разработанные концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС реализованы в полном объеме, всесторонне испытаны и исследованы в лабораториях и в условиях опытной эксплуатации. Положительные результаты, в том числе представленные в диссертационной работе, свидетельствуют о достижении поставленной цели.

В приложениях представлены 2 акта внедрения результатов диссертационной работы, 4 диплома выставок и конкурсов, на которых демонстрировались разработанные в диссертации средства всережимного моделирования в реальном времени ЭЭС, и описание высокоуровневого языка программирования данных средств.

Наиболее значимый материал, связанный с выполнением диссертационной работы, и ее основное содержание отражены в следующих публикациях, расположенных в хронологическом порядке:

1. АС 488224 СССР. Логарифмический функциональный преобразователь / А.С. Гусев, В.В. Самокиш, А.В. Шмойлов. – БИ № 38, 1975.

2. АС 564643 СССР. Способ логарифмического преобразования напряжений / А.С. Гусев, В.В. Самокиш, А.В. Шмойлов. – БИ № 25, 1977.
3. Гусев А.С., Шмойлов А.В. Линейный преобразователь напряжения постоянного тока в переменное // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – №4. – С. 110-112.
4. АС 650082 СССР. Логарифмическое вычислительное устройство / В.В. Самокиш, А.С. Гусев, А.В. Шмойлов. – БИ № 8, 1979.
5. АС 734731 СССР. Тригонометрический функциональный преобразователь / А.С. Гусев. – БИ № 18, 1980.
6. АС 741283 СССР. Тригонометрический функциональный преобразователь / А.С. Гусев. – БИ № 22, 1980.
7. АС 746579 СССР. Тригонометрический функциональный преобразователь / А.С. Гусев, А.В. Шмойлов, Г.Ю. Максимов. – БИ №25, 1980.
8. АС 860089 СССР. Функциональный преобразователь / А.С. Гусев, С.И. Сергейчик. – БИ №32, 1981.
9. АС 934502 СССР. Функциональный преобразователь / С.И. Сергейчик, А.С. Гусев. – БИ №21, 1982.
10. АС 955113 СССР. Функциональный преобразователь / А.С. Гусев, С.И. Сергейчик. – БИ №32, 1982.
11. АС 962996 СССР. Функциональный преобразователь / С.И. Сергейчик, А.С. Гусев. – БИ №36, 1982.
12. АС 1003107 СССР. Устройство для формирования ординат эллипса / А.С. Гусев, С.И. Сергейчик. – БИ №9, 1983.
13. Патент РФ №2018953. Устройство для моделирования синхронной машины / А.С. Гусев, Р.А. Вайнштейн, С.В. Свечкарев. – БИ №16, 1994.
14. Гусев А.С. Анализ методов дискретизации для численного интегрирования дифференциальных уравнений в задачах моделирования ЭЭС // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов третьей Всеросс. науч.-техн. конф. с международным участием в 2т. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2003. –Т.1. –С. 187-192.

15. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС: результаты разработки, исследования и опытной эксплуатации // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов третьей Всеросс. науч.-техн. конф. с международным участием в 2т. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2003. –Т. 1. – С. 216-222.
16. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный тренажер и советчик диспетчера реального времени на базе гибридного моделирующего комплекса ЭЭС (ГМК ЭЭС) и оперативно-информационного комплекса ЭЭС (ОИК ЭЭС) // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов третьей Всеросс. науч.-техн. конф. с международным участием в 2 т. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2003. – Т.1. – С. 206-211.
17. Gusev A.S., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. The problem of power system modeling, the concept hybrid solution // The 10-th IFAC / IFORS / IMACS / IFIP Symposium in Large Scale Systems: Theory and Applications (LSS 2004). Japan, Osaka, Osaka International Convention Center, July26-28, 2004. Vol. 1. – P. 440-445.
18. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Математическая модель первичных двигателей синхронных генераторов //Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 216-222.
19. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Адаптируемая математическая модель систем возбуждения синхронных машин // Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 211-216.
20. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимные математические модели линий электропередачи //Известия Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 206-211.

21. Gusev A.S., Svetchkaryov S.V., Plodisty I.L. Basic Aspects Of Modeling Problem For Electrical Power Systems, Perspectives And Methods Of Their Solution // 9-th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS 2005): Russia, Novosibirsk, June 26 – July 2, 2005. Vol. 1, P. 322-326.
22. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Многопроцессорная программно-техническая система реального времени гибридного типа для всережимного моделирования энергосистем // Технологии управления режимами энергосистем XXI века: Сб. докладов Всеросс. науч.-практич. конф. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 125-131.
23. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Основные аспекты проблемы моделирования электроэнергетических систем, перспективы и средства их решения // Известия Вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 92-95.
24. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Универсальная математическая модель силовых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов // Известия Томского политехнического университета. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 77-81.
25. Гусев А. С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия Вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – №7-8/1.

Кроме этого различные аспекты и фрагменты диссертационной работы отражены в других 30 публикациях.

Подписано к печати 09.09.2008. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать RISO. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,52.

Заказ . Тираж 120 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сер-
тифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO
9001:2000



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