

**Достовалов Дмитрий Николаевич**

**СПЕЦИФИКАЦИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МОДЕЛЕЙ  
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

05.13.11 – «Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологический институт вычислительной техники Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Шорников Юрий Владимирович.

Официальные оппоненты: Касьянов Виктор Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем информатики им. А.П. Ершова Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник.

Сениченков Юрий Борисович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», профессор.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Защита состоится «19» июня 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru/science/dissertation>.

Автореферат разослан «    » апреля 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Чубич Владимир Михайлович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Современный уровень развития вычислительной техники и программного обеспечения обуславливает широкие возможности детального и качественного компьютерного анализа систем различной природы. В работах Н.Н. Моисеева и Н.Н. Яненко подчеркивается важность разработки программных комплексов компьютерного моделирования и указывается, что эта задача является фундаментальной. Одним из множества приложений является исследование переходных электромагнитных и электромеханических процессов в системах энергетики. Расчетами переходных процессов и анализом синхронной работы в электроэнергетической системе (ЭЭС) занимались А.А. Горев, Р. Парк, В.А. Веников, Е.И. Ушаков. Отдельно следует отметить проблему обеспечения устойчивости ЭЭС, которая рассматривалась П.С. Ждановым, С.А. Лебедевым с позиции общей теории устойчивости А.М. Ляпунова. Работы указанных авторов посвящены преимущественно аналитическим методам исследования. В настоящее время широко применяются вычислительные эксперименты, результаты которых могут быть использованы при планировании и реализации мероприятий по энергоэффективности и энергосбережению – приоритетным направлениям, определенным федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы». Для обеспечения эффективного безаварийного функционирования ЭЭС необходимо проанализировать работу в условиях постоянной смены режимов в результате наступления различных событий (коммутация, короткое замыкание, изменение нагрузки). Таким образом, динамическую модель невозможно представить в виде неизменной однорежимной структуры. Поэтому предлагается применение современной теории гибридных систем (ГС) для описания и исследования ЭЭС.

Методология ГС предполагает описание и исследование совокупного дискретно-непрерывного поведения сложных динамических систем из множества областей науки и производства (физические, электрические, химические, химико-технологические, биологические процессы, системы автоматического

управления). Исследуемые объекты могут быть гетерогенными, то есть состоящими из подсистем различной природы. Фундаментальный вклад в становление и развитие теории ГС внесли Е.А. Lee, Н. Zhenq, J. Esposito, V. Kumar, G.J. Pappas, D. Harel и отечественные исследователи Ю.Г. Карпов, Ю.Б. Сениченков, Ю.Б. Колесов, Ю.В. Шорников, Е.А. Новиков. Непрерывные состояния объекта или режимы описываются системами дифференциальных или алгебро-дифференциальных уравнений с ограничениями. Спецификация дискретного поведения выполняется различными способами на основе теории графов, например, диаграммами состояний. Применение аналитических методов анализа ГС возможно только для узкого класса задач из-за ограничений на порядок системы уравнений модели и вид правой части. Поэтому компьютерное моделирование является единственным универсальным и эффективным методом исследования ГС.

Новые формализмы и методологии анализа сложных динамических систем более эффективны для предметного специалиста, если они окружены проблемно-ориентированными инструментальными средствами с множеством сервисов и методов для проведения вычислительных экспериментов. Передовые отечественные (RastrWin, АНАРЭС) и зарубежные (EUROSTAG, DIgSILENT PowerFactory, PSS®E) программные комплексы широко используются для расчета установившихся и переходных процессов в ЭЭС. Однако в них применяются традиционные модели и методы анализа. Современная методология гибридных систем практически не используется специалистами в электроэнергетике, которые проектируют наследуемые в старых формализмах программные системы. Поэтому задача разработки специализированных инструментальных средств, имеющих предметно-ориентированный интерфейс и входной язык, новые формализмы, а также оригинальные механизмы интерпретации, является новой и актуальной.

Программное обеспечение инструментального анализа ГС ИСМА (Инструментальные средства машинного анализа), разработанное под руководством Ю.В. Шорникова и при участии автора, унифицировано к задачам различной природы: исследованию простых динамических процессов, автоматическому управлению, химической кинетике, электромеханике. В

настоящей работе унификация выполнена к задачам машинного анализа переходных процессов в системах энергетики.

**Цель работы** заключается в разработке средств спецификации математических моделей и интерпретации программных моделей переходных процессов в системах электроэнергетики.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработка предметного графического языка спецификации систем электроэнергетики.

2. Разработка методов интерпретации графических программных моделей в гибридные модели (семантика).

3. Разработка, реализация и тестирование программных компонентов нового приложения ISMA\_EPS для анализа переходных процессов электроэнергетики и их взаимодействие с программной системой ИСМА.

**Объектом исследования** является методология гибридных систем при анализе переходных процессов в ЭЭС. **Предметом исследования** являются язык спецификации ЭЭС, методы интерпретации программных моделей в ГС и алгоритмы анализа ГС.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались теория систем, теория графов, теория множеств, теория языков и формальных грамматик. В экспериментальной части применялись методы структурного и объектно-ориентированного программирования, метод компьютерного моделирования, графоаналитический метод.

**Научная новизна.** В диссертационном исследовании получены следующие результаты:

1. Впервые предложено использование гибридного подхода для спецификации и анализа переходных процессов в электроэнергетических системах.

2. Разработан новый графический язык LISMA\_EPS и созданы методы интерпретации программных моделей в гибридные системы.

3. Предложена новая архитектура инструментальной среды для исследования сложных динамических и гибридных систем.

4. Выполнено расширение библиотек решателя программной системы ИСМА для эффективных вычислительных экспериментов с моделями нового приложения и организации взаимодействия компонентов программной системы.

**Личный вклад.** Все основные результаты получены самостоятельно. В совместных работах соавторам принадлежат постановка задачи и обсуждение результатов исследований. Программная реализация пакета моделирования ИСМА проводилась коллективом исследователей при непосредственном участии автора.

**Практическая ценность работы и реализация результатов.** Разработанные методы и алгоритмы реализованы в комплексе программ ИСМА (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610126. – М: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2005; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617771. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2013).

Результаты исследований используются в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Конструкторско-технологическом институте вычислительной техники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск) при выполнении проекта Президиума РАН № 15.4 «Математическое моделирование, анализ и оптимизация гибридных систем».

Кроме того, исследования были поддержаны грантом РФФИ № 11-01-00106-а «Численное моделирование динамических процессов в больших электрических сетях» и Программой стратегического развития НГТУ, проект 2.6.1 «Выполнение интеграционных проектов, организация и проведение научных мероприятий международного и российского уровня на базе НГТУ», научно-исследовательские работы С2-26, С-18 «Компьютерное моделирование переходных электромеханических процессов в электроэнергетических системах», выполненные в 2012 – 2013 гг. Также результаты исследований использованы при выполнении гранта Минобрнауки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы» по лоту «2011-1.4-502-004» по теме: «Разработка математических моделей, алгоритмов и Web-

приложений для поддержки стратегического управления инновационной организацией (государственный контракт № 14.740.11.0965 от 05.05.11 г.).

Программный комплекс ИСМА используется в научных исследованиях и учебном процессе в Институте математики и фундаментальной информатики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск) и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск), что подтверждено справками об использовании результатов диссертационного исследования.

**На защиту выносятся следующие результаты:**

1. Архитектура инструментальной среды с предметно-ориентированными входными интерфейсами для исследования динамики сложных динамических и гибридных систем.

2. Графический язык LISMA\_EPS для спецификации моделей электроэнергетических систем.

3. Интерпретатор графической программной модели на языке LISMA\_EPS.

4. Алгоритмы библиотеки решателя системы ИСМА для эффективных вычислительных экспериментов с моделями нового приложения и организации взаимодействия компонентов программной системы.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Теоретические аспекты базируются на строгих методах и алгоритмах и не противоречат известным положениям науки. Достоверность результатов проведенных исследований подтверждается сравнением решений ряда тестовых задач в системе ИСМА с приведенными в первоисточниках и с полученными в ведущих отечественных и мировых аналогах.

Основные результаты работы докладывались более чем на 10 международных и всероссийских конференциях: 7-й международной конференции IFAC «Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM–2013)» (Санкт-Петербург, 2013); международной конференции «International Conference on Simulation, Control and Automation (CSCA2013)» (Пекин, 2013); ежегодном международном семинаре «Компьютерное

моделирование», (Санкт-Петербург, 2013); XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП–2012 (Новосибирск, 2012); международной конференции «Математические и информационные технологии» МИТ–2011 (Сербия, Черногория, 2011); X всероссийской научно-технической конференции «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» ДНДС–2013 (Чебоксары, 2013); VIII всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2012); XVII Байкальской всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск, 2012); российской школе-семинаре «Модели и методы исследования гетерогенных систем» (Геленджик, 2012); российской научно-практической конференции «Автоматизированные системы и информационные технологии» (Новосибирск, 2011).

Также промежуточные результаты работы докладывались на ежегодной отчетной научной сессии НГТУ и научной сессии КТИ ВТ СО РАН.

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе: 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 1 работа, зарегистрированная в Роспатент; 9 статей в материалах международных и российских конференций; 3 работы опубликованы в научных журналах.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Объем работы составляет 136 страниц основного текста, включая 55 рисунков и 5 таблиц. Список использованных источников содержит 96 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель работы и поставленные задачи, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлены существующие в отечественной науке постановки задач анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов в ЭЭС. Выполнен обзор современных отечественных и зарубежных программных комплексов компьютерного моделирования ЭЭС и определены характеристики, которые необходимо учитывать при разработке новых пакетов программ. К таким характеристикам относятся: предметно-ориентированный пользовательский интерфейс с графическим редактором принципиальных схем; единый интерфейс для решения различных расчетных задач; обширные библиотеки типовых элементов с возможностью включения пользовательских моделей; расширяемость системы, добавление модулей для новых задач; исследование многорежимных динамических систем с возмущениями и другие. Перечисленные характеристики определяют функциональные требования к инструментальной среде. В реализации системы предложено использование методологии гибридных систем для спецификации и исследования моделей ЭЭС.

В работах, посвященных анализу ГС, как правило, рассматриваются системы, режимное поведение которых определяется на решении дифференциально-алгебраических уравнений с ограничениями вида

$$\begin{aligned} y' &= f(x, y, t), \quad x = \varphi(x, y, t), \\ pr : g(x, y, t) &< 0, \\ t &\in [t_0, t_k], \quad x(t_0) = x_0, \quad y(t_0) = y_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x \in R^{NX}$ ,  $y \in R^{NY}$ ,  $f : R^{NX} \times R^{NY} \times R \rightarrow R^{NY}$ ,  $\varphi : R^{NX} \times R^{NY} \times R \rightarrow R^{NX}$ ,  $g : R^{NX} \times R^{NY} \times R \rightarrow R$ . Скалярная функция  $g(x, y, t)$  называется событийной функцией или предохранителем. Условие существования системы в соответствующем режиме или состоянии определяет предикат  $pr$ . Неравенство  $g(x, y, t) < 0$  означает, что фазовая траектория в текущем режиме не должна пересекать границу  $g(x, y, t) = 0$ . События, происходящие при нарушении этого условия и приводящие к переходу в другой режим без пересечения границы, называют односторонними. Именно такие события практически интересны. Например, вследствие изменения конфигурации ЭЭС, режим функционирования ЭЭС может быть не определен в момент возникновения события.

В результате проведенного анализа современного состояния проблемы спецификации и интерпретации переходных процессов в ЭЭС поставлены задачи исследования.

Во второй главе предложена новая архитектура инструментальной среды ИСМА (рисунок 1) для анализа задач из различных предметных областей. Сконструированная архитектура позволяет настроить среду на новое приложение с минимальными доработками в рамках организации взаимодействия имеющихся модулей и библиотек с предметно-ориентированным графическим редактором и интерпретатором моделей. Модули, разработанные и модифицированные в рамках диссертационной работы, выделены на рисунке 1 серым цветом.

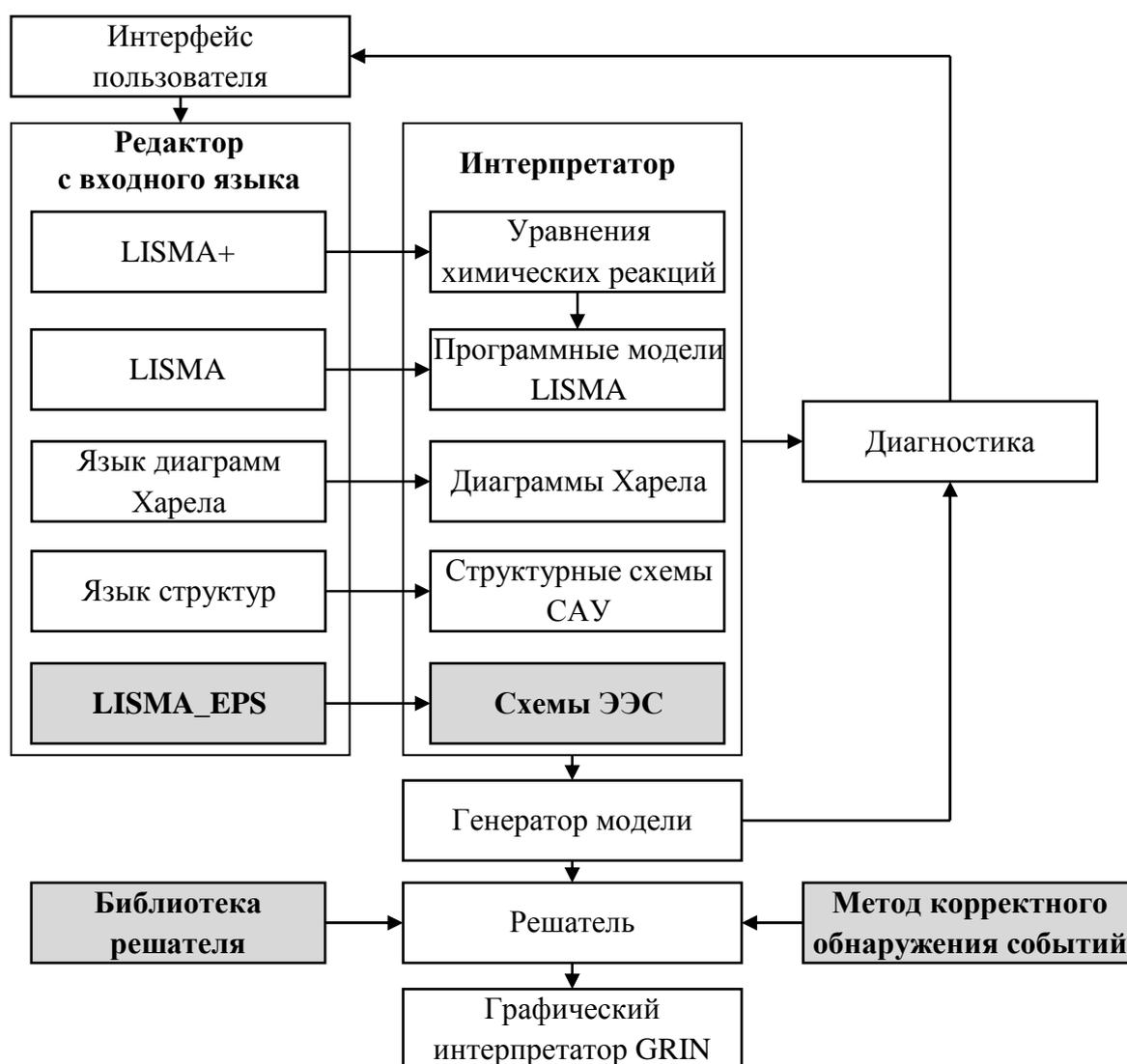


Рисунок 1 – Архитектура программного комплекса ИСМА

Инструментальные средства ИСМА реализуют пять различных языков для компьютерного анализа с применением методологии гибридных систем. Это универсальный символьный (LISMA) и графический (диаграммы Харела) языки, а также предметные языки структурных схем систем автоматического управления (САУ) и уравнений химической кинетики (LISMA+). Новым предметным языком являются принципиальные схемы ЭЭС (LISMA\_EPS). В отличие от предшествующих разработок, в предложенной архитектуре предметно-ориентированные интерфейсы взаимодействуют с вычислительным ядром системы через новое промежуточное внутрисистемное представление гибридных моделей, универсальное для всех входных языков. Внутреннее представление ГС разработано и реализовано с открытым интерфейсом программирования (API), что позволяет вводить новые программные модули без перепрограммирования системы в целом. Этим обеспечивается преемственность разработанного программного обеспечения к новым приложениям со своими особенностями.

Рассмотрены возможности имеющихся в инструментальной среде структурно-символьных средств для спецификации и исследования простых ЭЭС. Поскольку переход от практических задач к программным моделям может вызывать затруднения у предметного пользователя, а встроенные средства не предоставляют возможность спецификации режимного поведения в форме ДАУ, не разрешенных относительно производной, сделан вывод о необходимости дополнения инструментальной среды предметным графическим редактором принципиальных схем систем электроэнергетики.

Выполненный анализ особенностей моделей переходных процессов ЭЭС и гибридных систем показал, что им присущи общие свойства – жесткость и высокая размерность математических моделей, многорежимность и наличие односторонних событий. Таким образом, для решения задач спецификации, интерпретации и анализа моделей переходных процессов в ЭЭС, выполняется унификация средств математического и программного обеспечения машинного анализа ГС.

**Третья глава** посвящена разработке и реализации средств спецификации ЭЭС. Языковые средства для создания программных моделей должны отражать как непрерывные режимы, так и дискретные события. Предложен графический

язык LISMA\_EPS принципиальных схем ЭЭС. В нем использованы общепринятые изображения элементов. Отличие состоит в семантическом наполнении элементов языка и языковых конструкций, ориентированном на анализ с использованием методологии гибридных систем. Каждый элемент ЭЭС представляется как гибридная система со следующими атрибутами: 1) диаграмма состояний с выделенным начальным состоянием; 2) уравнения режимов; 3) условия переходов; 4) мгновенные действия, выполняемые при смене режима. Энергосистема в выбранном формализме относится к ГС, режим которой определяется совокупностью состояний и поведений элементов.

Редактирование программных моделей на языке LISMA\_EPS выполняется по технологии «drag and drop» в интерфейсе редактора (рисунок 2), встроенного в инструментальную среду ИСМА. Библиотека элементов может быть дополнена примитивами, разработанными пользователем. После композиции принципиальной схемы необходимо в свойствах элементов задать схемы замещения, параметры и начальные условия. На рисунке 2 представлено окно редактирования параметров линии электропередачи (ЛЭП). Библиотека схем замещения также может быть дополнена пользовательскими моделями.

Композиция гибридной модели (ГМ) выполняется автоматически в две стадии. На первой стадии проводится анализ графической модели для проверки корректности исходных данных. Второй этап – синтез математической модели, в ходе которого выполняется интерпретация исходной программной модели в гибридную систему. Полученное внутреннее представление, однозначно соответствующее математическому описанию режимов и событий, является унифицированным для всех входных языков ИСМА. Основные этапы интерпретации представлены в схеме на рисунке 3.

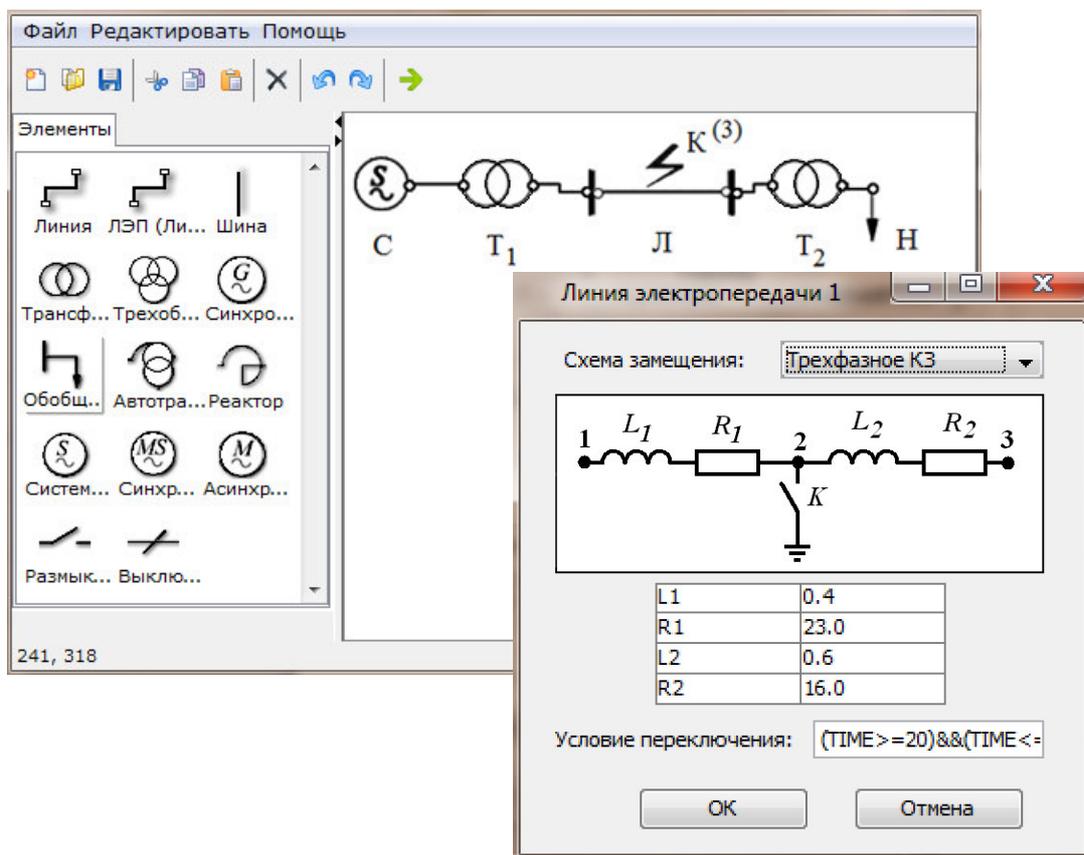


Рисунок 2 – Графический редактор электрических схем

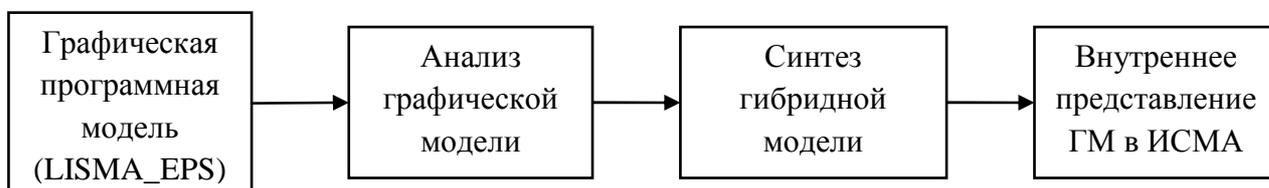


Рисунок 3 – Интерпретация схемы ЭЭС

Анализ графического представления и синтез математической модели выполняется графоаналитическим методом с использованием трех типов графов. Граф  $G_1$  описывает топологию схемы и является внутренним представлением принципиальной схемы. Для каждого элемента ЭЭС определена используемая в текущем вычислительном эксперименте схема замещения. Граф схемы замещения  $G_2$  komponуется из подграфов схем замещения отдельных элементов в соответствии со схемой соединения  $G_1$ . Пример схемы замещения и подграфа  $G_2^L$  для ЛЭП представлен на рисунке 4. На рисунке обозначены точки подключения ЛЭП к элементам ЭЭС – 1 (А) и 2 (С). Вершина N относится к

нулевой точке схемы (заземление). Дуга  $\alpha$  соответствует элементу  $L$ ,  $\beta$  – элементу  $R$ , а  $\gamma$  и  $\delta$  – элементам  $Y/2$ . Направления дуг соответствуют направлению тока в ветвях.

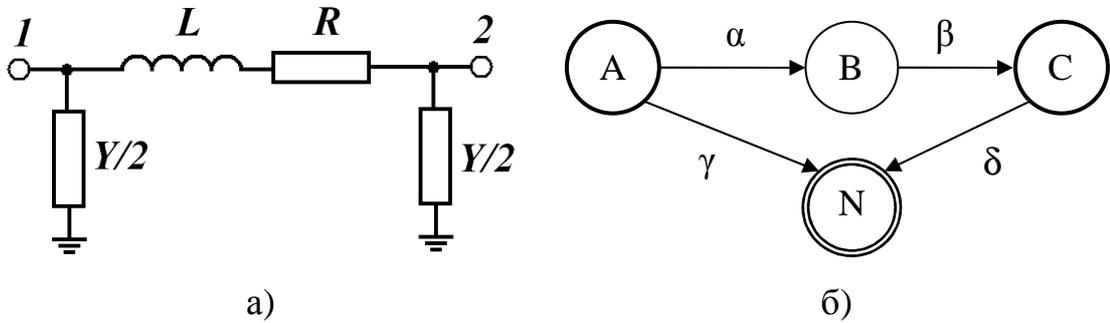


Рисунок 4 – Схема замещения (а) и подграф  $G_2^{II}$  для ЛЭП (б)

Математическая модель формируется по схеме замещения  $G_2$  с учетом законов Кирхгофа методом контурных токов. Графы математической модели  $G_3$  являются внутренним представлением арифметических выражений в среде ИСМА, и в дальнейшем транслируются в исполняемый код для численного анализа. Пример графа  $G_3^{II}$  представлен на рисунке 5 для уравнения ветви 1–2 представленной выше схемы замещения  $U_{Ad} = U_{Cd} + Ri_{12d} + L(di_{12d}/dt - i_{12q})$ .

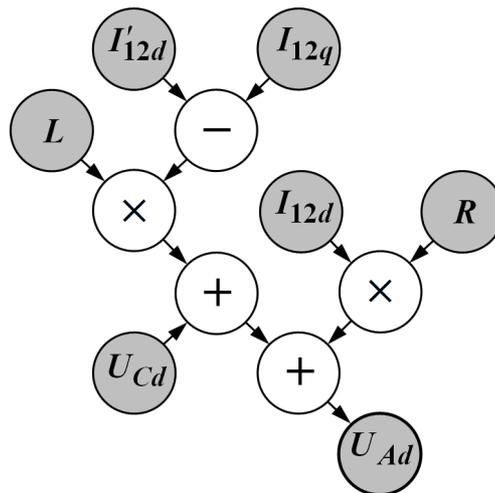


Рисунок 5 – Граф арифметического выражения

Начальные узлы графа, выделенные серым цветом, соответствуют переменным ( $U_{Cd}$ ,  $I_{12d}$  и  $I_{12q}$ ) и параметрам ( $R$ ,  $L$ ) математической модели. В промежуточных узлах выполняются примитивные операции, исключая интегрирование. Конечная вершина  $U_{Ad}$ , выделенная жирным, содержит результат вычисления выражения. Графы  $G_3$  для системы электроснабжения компонуются из подграфов элементов в соответствии с законами Кирхгофа и методом контурных токов. Анализ  $G_3$  дает искомое значение правой части системы уравнений или промежуточный результат вычислений, используемые процессором численного анализа инструментальной среды.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы взаимодействия компонентов программного комплекса и выполнено тестирование нового приложения.

Исследование моделей переходных процессов в ЭЭС потребовало применения нового класса систем. Это ГС, режимы которых заданы неявными системами дифференциальных уравнений с ограничениями

$$\begin{aligned} F(x, x', t) &= 0, \\ pr : g(x, x', t) &< 0, \\ t \in [t_0, t_k], x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x \in R^N$ ,  $F : R^N \times R^N \times R \rightarrow R^N$ ,  $g : R^N \times R^N \times R \rightarrow R$ . Здесь для упрощения рассуждений, не нарушая общности, опущены алгебраические уравнения, однако они могут присутствовать. Приведение задачи (2) к виду (1) может потребовать существенных вычислительных затрат. Поэтому для решения неявных задач в ИСМА реализован алгоритм МК11F. Из результатов расчетов представленным алгоритмом в среде моделирования ИСМА следует, что вычислительные затраты для алгоритмов решения разрешенных и не разрешенных относительно производной задач практически совпадают. Это подтверждает эффективность реализованного метода.

Корректность анализа гибридных моделей, наряду с точностью расчетов, определяется правильностью локализации моментов смены локальных состояний. Поэтому дополнительно необходимо учитывать динамику событийной функции. Пусть расчеты выполняются по численной схеме, вида  $x_{n+1} = x_n + h_n \varphi_n$ , где

функция  $\varphi_n$  вычислена в точке  $t_n$ . В монографии<sup>1</sup> Е.А. Новикова и Ю.В. Шорникова доказана теорема, в соответствии с которой выбор шага по формуле

$$h_{n+1} = (\gamma - 1) \frac{g_n}{\frac{\partial g_n}{\partial x} \cdot \varphi_n + \frac{\partial g_n}{\partial t}}, \quad \gamma \in (0, 1), \quad (3)$$

обеспечивает поведение событийной динамики как устойчивой линейной системы, решение которой приближается к поверхности  $g(x, t) = 0$  асимптотически. В теореме, однако, не учитывалось направление движения событийной функции. Сформулируем алгоритм управления шагом с учетом динамики и направления движения событийной функции. Пусть решение  $x_n$  в точке  $t_n$  вычислено с шагом  $h_n$ . Кроме того, алгоритмом интегрирования вычислен новый шаг  $h_{n+1}^{int}$  исходя из требований точности и, возможно, устойчивости вычислений. Тогда выбор шага интегрирования осуществляется по следующему алгоритму.

**Шаг 1.** Вычислить  $g_n = g(x_n, t_n)$ ,  $\partial g_n / \partial x = \partial g(x_n, t_n) / \partial x$ ,  $\partial g_n / \partial t = \partial g(x_n, t_n) / \partial t$ .

**Шаг 2.** Вычислить  $g'_n = (\partial g_n / \partial x) \cdot \varphi_n + \partial g_n / \partial t$ .

**Шаг 3.** Если  $g'_n < 0$ , принять  $h_{n+1} = h_{n+1}^{ac}$  и перейти на шаг 6.

**Шаг 4.** Вычисляется событийный шаг  $h_{n+1}^{ev}$  по формуле  $h_{n+1}^{ev} = (\gamma - 1) g_n / g'_n$ .

**Шаг 5.** Вычисляется новый шаг  $h_{n+1} = \min(h_{n+1}^{ev}, h_{n+1}^{int})$ .

**Шаг 6.** Выполняется следующий шаг интегрирования.

На шаге 3 определяется направление движения событийной функции. При приближении к границе режима знаменатель (3) будет положительным, а при удалении от границы  $g(x, t) = 0$  он становится отрицательным. Тогда, определив направление движения событийной функции, можно не накладывать дополнительные ограничения на шаг интегрирования, если событийная функция

---

<sup>1</sup> Новиков, Е. А. Компьютерное моделирование жестких гибридных систем [Текст]: монография / Е. А. Новиков, Ю. В. Шорников. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 451 с.

удаляется от границы режима. Результаты тестирования алгоритма подтверждают точное обнаружение момента смены режима и корректное решение задачи.

Рассмотрим модель трехфазного короткого замыкания (КЗ) в электрической сети, представленной в интерфейсе редактора на рисунке 2. Схема состоит из питающей системы  $G$ , трансформаторов  $T_1$ ,  $T_2$ , линии  $L$  и нагрузки  $H$ . На рисунке 6 приведена соответствующая схема замещения.

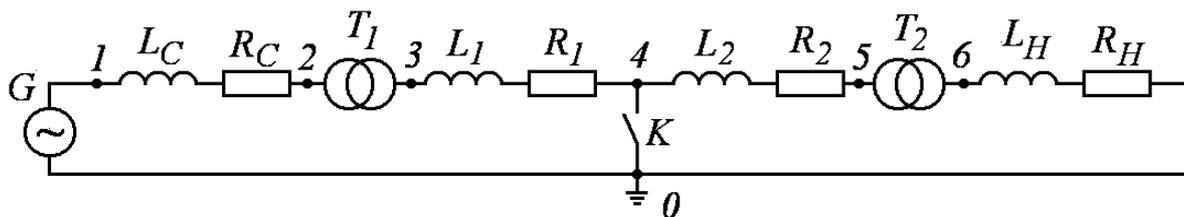


Рисунок 6 – Схема замещения

Переходный процесс инициируется замыканием контакта  $K$ . При этом происходит смена ранее установившегося режима энергосистемы на новый режим, соответствующий КЗ и другой конфигурации системы. Через некоторое время КЗ отключается. Таким образом, рассматриваемая модель является двухрежимной гибридной системой. Дискретное поведение гибридной системы иллюстрируется диаграммой состояний, представленной на рисунке 7. Состояние «init» соответствует функционированию ЭЭС без короткого замыкания. Переход в режим «short», соответствующий состоянию КЗ, выполняется, когда  $pr_1 = true$ . Обратный переход осуществляется при истинности предиката  $pr_2$ .

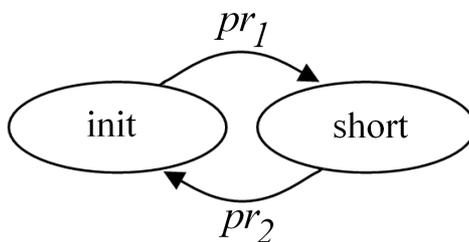


Рисунок 7 – Карта поведения

Математическая модель составлена по полным уравнениям Парка-Горева в системе вращающихся координат, связанной с ротором генератора  $G$ . Система

состоит из семи уравнений, не разрешена относительно производных, и в автореферате не приводится ввиду громоздкости.

Приведем более сложный пример расчета переходного процесса в электроэнергетической системе, представленной на рисунке 8.

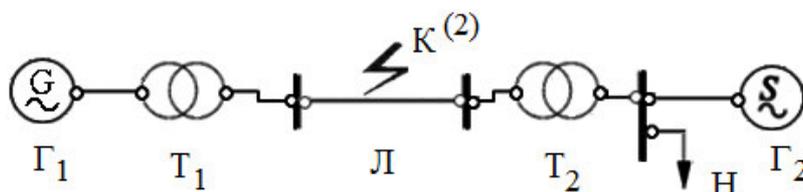


Рисунок 8 – Принципиальная схема электрической системы

Особенность данной задачи состоит в том, что здесь рассматривается переходной процесс при двухфазном коротком замыкании в начале ЛЭП. Такому режиму соответствует специальная схема замещения ЛЭП в режиме КЗ. Кроме того, при небольших изменениях в принципиальной схеме, почти в три раза возросла размерность системы – она состоит из 23 дифференциальных и алгебраических уравнений. Это дает основания предполагать, что в более сложных схемах размерность системы ДАУ возрастет многократно, и повысится жесткость задачи. Диаграммы некоторых токов генератора  $\Gamma_1$ , полученные в результате анализа динамики ЭЭС, приведены на рисунке 9.

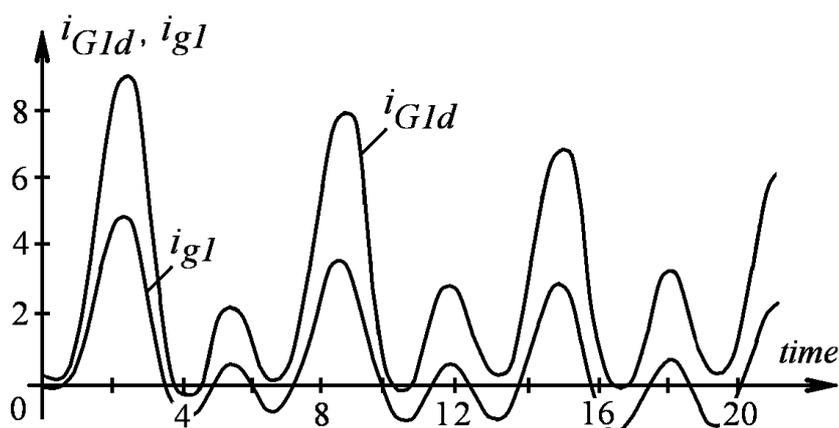


Рисунок 9 – Результаты моделирования ЭЭС

Расчеты представленных задач выполнялись в ИСМА и MATLAB. Результаты полностью совпадают в обеих системах и с результатами публикаций

в первоисточниках. Это подтверждает состоятельность предложенного подхода и корректность решения задач исследования.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации разработано и исследовано математическое и программное обеспечение для спецификации, интерпретации и анализа моделей динамических процессов в системах электроэнергетики. Используемый в инструментальной среде гибридный подход к моделированию выгодно отличает ISMA EPS от известных передовых отечественных (RastrWin, АНАРЭС) и зарубежных (EUROSTAG, DIgSILENT PowerFactory, PSS®E) систем компьютерного исследования ЭЭС. Предметно-ориентированный входной язык LISMA\_EPS, оригинальный механизм интерпретации, обеспечивающий построение корректных гибридных моделей, и библиотека оригинальных алгоритмов анализа, повышают доступность новых методов исследования для предметного пользователя.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1. Достовалов, Д. Н. Компьютерное моделирование и алгоритмы численного анализа гибридных систем [Текст] / Д. Н. Достовалов // Системы управления и информационные технологии. – 2013. – №3.1(53). – С. 128–133.**
- 2. Dostovalov, D. N. Simulation of Hybrid Systems with Implicitly Specified Modal Behavior in the ISMA Environment [Text] / Yu. V. Shornikov, D. N. Dostovalov, M. S. Myssak // Университетский научный журнал. – 2013. – №5. – С. 171–178. – [Моделирование гибридных систем с неявно заданным режимным поведением в среде ИСМА].**
- 3. Достовалов, Д. Н. Компьютерное моделирование дискретно-непрерывных систем инструментальными средствами [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, Д. С. Задворнов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2013. – № 6. – С. 36–41.**

4. Достовалов, Д. Н. Инструментально-ориентированный анализ гибридных систем различной природы [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, И. Н. Томилов // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №3. – С. 102–110.
5. Достовалов, Д. Н. Инструментальный анализ режимов электрических машин [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов, И. Н. Томилов // Доклады АН ВШ РФ. – 2012. – № 2(19). – С. 128–136.
6. Достовалов, Д. Н. Унификация программного обеспечения инструментального моделирования [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 3(48). – С. 191–196.
7. Достовалов, Д. Н. Математическое и программное обеспечение численного анализа режимов электрических машин [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, И. Н. Томилов, В. В. Пастухов // Системы управления и информационные технологии. – 2011. – №3.1(45). – С. 204–208.
8. Достовалов, Д. Н. Численное моделирование динамических процессов в электроэнергетических системах как инструмент стратегического управления [Текст] / Ю. В. Шорников, И. Н. Томилов, Д. Н. Достовалов, М. С. Денисов // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 4(45). – С. 129–134.
9. Достовалов, Д. Н. Программа графического редактора схем электроэнергетических систем ISMA EPS (ISMA Electric Power Systems) [Текст] / Ю. В. Шорников, А. Н. Комаричев, Д. Н. Достовалов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013617771. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2013.
10. Dostovalov, D. Specification and Analysis of Discrete Behavior of Hybrid Systems in the Workbench ISMA [Text] / Yu. Shornikov, D. Dostovalov, M. Myssak, A. Komarichev, A. Tolokonnikov // Open Journal of Applied Sciences. – 2013. – Vol. 3, № 2B. – P. 51–55. – [Спецификация и анализ дискретного поведения гибридных систем в среде ИСМА].
11. Dostovalov, D. Visual Modeling of Dynamical Systems by Instrumental Facilities [Text] / Yu. Shornikov, E. Novikov, D. Dostovalov, M. Myssak // 7th IFAC

- Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control, June 19–21, 2013. Saint Petersburg State University and Saint Petersburg ITMO University. – Saint Petersburg, 2013. – Vol. 7, Part 1. – P. 2185–2190. – [Визуальное моделирование динамических систем инструментальными средствами].
12. Достовалов, Д. Н. Моделирование гибридных систем с неявно заданным режимным поведением в среде ИСМА [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. М. Толоконников // Компьютерное моделирование 2013: тр. Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 3–5 июля 2013 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 100–105.
  13. Достовалов, Д. Н. Особенности спецификации и исследования электроэнергетических систем в среде ИСМА [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. Н. Комаричев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 10-й Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 6–8 июня 2013г. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 316–320.
  14. Достовалов, Д. Н. Унификация математического и программного обеспечения компьютерного анализа сложных динамических и гибридных систем [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, М. Г. Гриф, А. Н. Комаричев // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2013. – № 2(72). – С. 109–120.
  15. Достовалов, Д. Н. Особенности исследования и спецификации многомерной гибридной модели в среде ИСМА [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 8–9 июня 2012г. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 39–42.
  16. Достовалов, Д. Н. Спецификация и моделирование жестких гибридных систем инструментальными средствами [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов // Информационные и математические технологии в науке и управлении: тр. XVII Байкальской Всероссийской конференции, Иркутск, 30 июня – 9 июля 2012г.– Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2012. – Часть I. – С. 244–251.

17. Достовалов, Д. Н. Гибридный подход в моделировании электротехнических устройств [Текст] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2012, Новосибирск, 2–4 октября 2012г. – в 7 томах. Т.6 Моделирование и вычислительная техника. – Новосибирск, Изд-во НГТУ. – 2012. – С. 119–123.
18. Достовалов, Д. Н. Математическое и программное обеспечение компьютерного моделирования гибридных систем [Электронный ресурс] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов // Программные системы: теория и приложения: электрон. научн. журн. – 2012. – Т. 3, № 5(14). – С. 45–58. – Режим доступа: [http://psta.psir.ru/read/psta2012\\_5\\_45-58.pdf](http://psta.psir.ru/read/psta2012_5_45-58.pdf), свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 17.02.2014).
19. Достовалов, Д. Н. Компьютерное моделирование режимов электроэнергетических систем как инструмент стратегического управления подсистемами топливно-энергетического комплекса [Текст] / И. Н. Томилов, Д. Н. Достовалов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2011. – №3(68). – С. 319–328.
20. Достовалов, Д. Н. Особенности численного моделирования гибридных систем в ИСМА [Электронный ресурс] / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, М. С. Денисов // Доклады Международной конференции «Математические и информационные технологии, МИТ-2011» (IX конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»), Врнячка Баня, Сербия, 27–31 августа 2011 г., Будва, Черногория, 31 августа – 5 сентября 2011 г. – Режим доступа: [http://conf.nsc.ru/files/conferences/МИТ-2011/fulltext/49854/66423/Shornikov\\_Dostovalov\\_Denisov5.pdf](http://conf.nsc.ru/files/conferences/МИТ-2011/fulltext/49854/66423/Shornikov_Dostovalov_Denisov5.pdf), свободный. – Загл. с экрана (дата обращения: 17.02.2014).
21. Достовалов, Д. Н. Компьютерный анализ режимов электроэнергетических систем в ИСМА [Текст] // Автоматизированные системы и информационные технологии: Сборник научных трудов Российской научно-практической конференции, Новосибирск, 22–23 сентября 2011 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 83–91.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел./факс: (383) 346-08-57  
формат 60x84/16, объем 1,5 п.л., тираж 100 экз.  
Заказ №      подписано в печать      .04.2014 г.