

*На правах рукописи*



**Бессонов Алексей Владимирович**

**СИМВОЛЬНАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ  
ПРОГРАММНЫХ МОДЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ**

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

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

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

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

Официальные оппоненты: Сениченков Юрий Борисович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», профессор кафедры распределенных вычислений и компьютерных сетей.

Зюбин Владимир Евгеньевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации и электротехники» Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник, руководитель Тематической группы языковых средств проектирования информационных систем управления.

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

Защита состоится «29» сентября 2016 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего 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>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Фаддеенков Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Современное состояние и актуальность темы исследования.** Современные методы исследования явлений и изучения свойств объектов уже невозможно представить без численного эксперимента, выгодно отличающегося от натурального эксперимента минимальными затратами ресурсов и безопасностью проведения исследований в экстремальных условиях. Численный эксперимент предполагает использование специализированного набора инструментальных средств для моделирования сложных систем, описывающих объекты различной природы. Растущие вычислительные мощности современных ЭВМ создают возможности к применению новых численных методов и способов организации процесса вычисления. Это, а также растущие требования к адекватным моделям делают задачу разработки программного комплекса актуальной и востребованной.

Применение метода численного эксперимента обуславливает использование математического обеспечения, которое представлено численными методами и формализмами. Программно-управляемые технические системы и комплексы, системы автосопровождения космических и баллистических объектов, биосистемы, а также многие другие современные системы из различных предметных областей характеризуются сложными динамическими процессами. Для таких систем характерно наличие большого числа взаимодействующих и параллельно развивающихся элементов, поведение которых описывается непрерывными и дискретными процессами.

История исследования сложных систем насчитывает не одно десятилетие. В работах Н.П. Бусленко предлагается агрегативная система (1965), являющаяся сложной динамической системой с фиксированной структурой, обособленными состояниями и возможностью мгновенной смены параметров и поведения системы. В работах В.М. Глушкова приводится математическая модель непрерывно-дискретной системы (1973), использующая дискретный событийный подход с возможностью изменения структуры системы. В начале 1990-х годов достижения в области символьных вычислений и теории реактивных систем создали предпосылки к возникновению современной теории гибридных систем (ГС), разработанной исследователями D. Harel и A. Pnueli. Также фундаментальный вклад в становление и развитие этой теории внесли E.A. Lee, H. Zhenq, J. Esposito, V. Kumar, G.J. Pappas, и отечественные исследователи Ю.Г. Карпов, Ю.Б. Сениченков, Ю.Б. Колесов, Ю.В. Шорников, Е.А. Новиков. Формализм ГС успешно применяется для исследования объектов из множества областей науки и производства: физические, электрические, химико-технологические, биологические процессы, системы автоматического управления и т.д. В гибридных системах отличительной особенностью сложного поведения

является наличие нескольких качественно отличающихся и последовательно сменяющих друг друга поведений во времени. В традиционном представлении ГС непрерывное поведение описывается системой дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ). Дискретное поведение описывается разными методами, каждый из которых основан на теории графов. Процесс анализа гибридных систем специфичен наличием ограничения на применение аналитических методов, в виду размерности и существенно нелинейной правой части. Таким образом для гибридных систем компьютерное моделирование является единственным универсальным и эффективным методом исследования.

Рост потребностей в моделях сложных технических объектов и развитых сценариях моделирования обусловил возникновение подкласса ГС, описывающего динамику исследуемого объекта не только во временной, но и пространственной области. Данный этап является закономерным и необходимым шагом в развитии теории гибридных систем. Дискретно-непрерывное поведение в пространственно-временных задачах появляется в широком спектре предметных областей и обусловлено физической природой исследуемого объекта. Непрерывное поведение, как правило, описывается начально-краевыми задачами и формируется при помощи системы дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП). Для указанных систем уравнений существует развитая аналитическая база, представленная в виде математического обеспечения, а также программной реализации численных методов. Тем не менее, современные универсальные программные комплексы численного анализа не ориентированы на пространственно-временные системы с гибридным поведением (ПВГС). Более того, на текущий момент не существует общепринятого формализма, описывающего подобные системы универсальным образом. Из этого следует, что задача исследования и спецификации ПВГС является новой и актуальной.

Под руководством Ю.В. Шорникова и при участии автора разработана новая версия программного обеспечения инструментального анализа гибридных систем ИСМА\_2015. Математическое и программное обеспечение среды моделирования унифицировано для практических приложений: исследование динамических процессов в системах автоматического управления, процессов химической кинетики, переходных электромеханических процессов и др. В настоящей работе унификация выполнена к задачам спецификации, интерпретации и организации численного эксперимента над моделями ГС, включая ПВГС.

Решение данных задач предполагает:

- выбор математических моделей, корректно описывающих класс исследуемых объектов;
- разработку и исследование языка спецификации моделей;

- разработку и исследование средств унифицированного хранения и эффективного преобразования программных моделей;
- разработку и исследование средств отладки и интерпретации компьютерных моделей в формальные модели и вычислительные процедуры;
- разработку и модификацию компонентов инструментальной среды.

**Цель работы** заключается в разработке и исследовании средств спецификации определенного класса математических моделей, интерпретации программных моделей в унифицированный формат внутреннего представления.

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

1. Разработка и исследование символьного языка спецификации.
2. Разработка средств унифицированного хранения и эффективного преобразования внутренней модели в памяти ЭВМ.
3. Разработка интерпретатора символьных программных моделей в унифицированное внутреннее представление (семантика).
4. Разработка компонентов, обеспечивающих взаимодействие программной системы с библиотекой численных методов и решателем.

**Предмет и объект исследования.** Объектом исследования являются дискретно-непрерывные модели, расширенные подклассом пространственно-временных систем определенного вида. Предметом исследования являются язык спецификации, порождающая грамматика, методы лексического и синтаксического анализа, методы семантического анализа программных моделей, алгоритмы генерации унифицированного формата данных.

**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.

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

1. Разработан и исследован оригинальный формальный язык LISMA\_PDE и порождающая КС – грамматика спецификации гибридных систем, включая ПВГС.
2. Показана однозначность порождающей грамматики.
3. Предложена и реализована архитектура программного комплекса ИСМА\_2015, в которой центральным понятием является гибридная система, что выгодно отличает новую инструментальную среду от аналогов.
4. Разработано и реализовано унифицированное внутреннее представление программных моделей гибридных систем.

5. Разработаны и реализованы компоненты эквивалентного преобразования программных моделей для обеспечения численного эксперимента.

**Личный вклад.** Все основные результаты получены самостоятельно. Компоненты среды моделирования ИСМА\_2015, представленные в работе, разработаны и реализованы лично автором. Анализ полученных результатов и подготовка публикаций осуществлялись совместно с соавторами и научным руководителем. Постановка задачи выполнена совместно с научным руководителем.

**Практическая ценность работы и реализация результатов.** Разработанные методы и алгоритмы реализованы в комплексе программ ИСМА\_2015 (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 № 2015617235. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015; Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617191. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015).

Результаты исследований использованы 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, результаты исследования были поддержаны грантом РФФИ № 14-01-00047-а «Численный анализ дискретно-непрерывных процессов в электроэнергетических системах с использованием методологии гибридных систем».

Программный комплекс ИСМА используется в научных исследованиях и учебном процессе в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск), что подтверждено справкой об использовании результатов диссертационного исследования. Применение специализированных инструментальных средств в вычислительном эксперименте позволяет проводить гораздо более эффективные исследования с доминирующим акцентом на сущность решаемых задач исследования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Архитектура инструментальной среды ИСМА\_2015.
2. Унифицированное внутреннее представление моделей ГС.
3. Символьный язык *LISMA\_PDE* и порождающая КС – грамматика.
4. Методы 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\_2015 с приведенными в первоисточниках и с полученными в ведущих мировых средах моделирования.

Основные результаты работы докладывались на 7 международных и всероссийских конференциях: всероссийской конференции с международным участием «Индустриальные информационные системы» ИИС–2015, (Новосибирск, 2015); международной конференции МММАС 2014 «International Conference on Mathematical Models and Methods in Applied Sciences», (Санкт-Петербург, 2014); ежегодном международном семинаре «Компьютерное моделирование», (Санкт-Петербург, 2014); второй международной научной интернет-конференции «Математическое и компьютерное моделирование в биологии и химии. Перспективы развития», (Казань, 2013); VIII всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике», (Чебоксары, 2012); XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП–2012, (Новосибирск, 2012); XVI Международной открытой научной конференции «Современные проблемы информатизации в экономике и обеспечении безопасности», (Воронеж, 2011).

Также результаты работы докладывались на ежегодной всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2013 и 2011) и на ежегодной отчетной научной сессии НГТУ (Новосибирск, 2014 и 2015).

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе: 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ; 2 работы, зарегистрированные в Роспатент; 2 статьи опубликовано в рецензируемых научных журналах, индексируемых в РИНЦ и международной базе *Scopus*; 10 публикаций в материалах международных и российских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных обозначений и сокращений, списка использованных источников и пяти приложений. Общий объем диссертации – 164 страницы, включая 58 рисунков и 13 таблиц. Список использованных источников содержит 136 наименований.

## КРАТКОЕ 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 исторические предпосылки теории гибридных систем. Традиционно при описании непрерывного поведения ГС используют систему ДАУ с ограничениями

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x, y), \quad y = \varphi(t, x, y), \\ x(t_0) &= x_0, \quad y(t_0) = y_0, \quad t \in [t_0, t_k], \\ pr &: g(x, t) < 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x \in R^n$  – вектор фазовых переменных;  $y \in R^{n_y}$  – вектор алгебраических переменных;  $g(x, t): R \times R^n \rightarrow R^s, s = 1, 2, \dots$  – событийная функция, характеризующаяся предикатом  $pr : g(x, t) < 0, pr \in B = \{false, true\}$ ;  $t$  – независимая переменная (время);  $f : R \times R^n \times R^{n_y} \rightarrow R^n$ ,  $\varphi : R \times R^n \times R^{n_y} \rightarrow R^{n_y}$ .

Совместно с (1) исследуются ПВГС, ограниченные классом вида

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} &= \psi \left( z, t, p, \frac{\partial z}{\partial p}, \frac{\partial^2 z}{\partial p^2} \right), \\ pr &: g(z, t) < 0, \\ z(t_0, p) &= z_0, \quad z(t, p_0) = \delta(t, p_0), \quad z(t, p_m) = \delta(t, p_m), \\ \left. \frac{\partial z}{\partial p} \right|_{p_0} &= n(t, p_0), \quad \left. \frac{\partial z}{\partial p} \right|_{p_m} = n(t, p_m), \\ t &\in [t_0, t_k], \quad p \in [p_0, p_m], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $z \in R^{N_z}$  – вектор состояния;  $\psi : R^{N_z} \times R \times R^{N_p} \times R^{2N_p} \rightarrow R^{N_z}$  – нелинейная вектор-функция;  $p$  – вектор пространственных координат;  $z_0 \in R^{N_z}$  – вектор начальных условий;  $\delta$  – вектор краевых условий Дирихле на левой и правой границе;  $n$  – вектор краевых условий Неймана на левой и правой границе;  $g(z, t): R^{N_z} \times R \rightarrow R^s, s = 1, 2, \dots$  – событийная функция, характеризующаяся предикатом  $pr : g(z, t) < 0$ .

Впервые введена обобщенная классификация ГС с непрерывным поведением (1) – (2). Выделено 20 типов, классифицированных по области и характеру разрыва.

На примере модели концентрации озона в стратосфере рассмотрена ГС с непрерывным поведением из класса (2). Две переменные  $c^i(x, z, t)$  ( $i=1, 2$ ) описывают концентрацию атомарного кислорода ( $O_1$ ) и озона ( $O_3$ ) [моль/см<sup>3</sup>], причем  $z$  – вертикальная координата,  $30 \leq z \leq 50$  [км],  $x$  – горизонтальная,  $0 \leq x \leq 20$  [км],  $t$  – время,  $0 \leq t \leq 86400$  [сек]. Уравнения учитывают горизонтальную и неоднородную вертикальную диффузию, включая адвекцию так, что

$$\frac{\partial c^i}{\partial t} = K_h \frac{\partial^2 c^i}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v(z) \frac{\partial c^i}{\partial z} \right) + R^i(c^1, c^2, t), \quad (i=1, 2). \quad (3)$$

Переходя к сетке размером  $J \times K$  по координатам  $x$  и  $z$  соответственно, получаем  $\Delta x = 20/(J-1)$  и  $\Delta z = 20/(K-1)$  – шаг сетки,  $c_{jk}^i = c^i(x_j, z_k, t)$ , где  $x_j = (j-1)\Delta x$ ,  $z_k = 30 + (k-1)\Delta z$ ,  $1 \leq j \leq J$ ,  $1 \leq k \leq K$ . В результате аппроксимации методом конечных разностей получаем систему ОДУ размерностью  $N = 2JK$

$$\begin{aligned} \dot{c}_{jk}^i = & \frac{K_h}{\Delta x^2} (c_{j+1,k}^i - 2c_{jk}^i + c_{j-1,k}^i) + \\ & + \frac{1}{\Delta z^2} \left[ K_v \left( k + \frac{1}{2} \right) (c_{j,k+1}^i - c_{jk}^i) - K_v \left( k - \frac{1}{2} \right) (c_{jk}^i - c_{j,k-1}^i) \right] + R_{jk}^i, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $1 \leq i \leq 2$ ,  $1 \leq j \leq J$ ,  $1 \leq k \leq K$ ,  $R_{jk}^i = R^i(c_{jk}^1, c_{jk}^2, t)$ .

Краевые условия на сетке имеют вид:

$$c_{0,k}^i = c_{2,k}^i, \quad c_{J+1,k}^i = c_{J-1,k}^i, \quad \text{для } 1 \leq k \leq K, \quad c_{j,0}^i = c_{j,2}^i, \quad c_{j,K+1}^i = c_{j,K-1}^i, \quad \text{для } 1 \leq j \leq J.$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} c^1(x_j, z_k, 0) &= 10^6 \alpha(x_j) \beta(z_k), \quad c^2(x_j, z_k, 0) = 10^{12} \alpha(x_j) \beta(z_k), \\ \alpha(x_j) &= 1 - (0.1x_j - 1)^2 + (0.1x_j - 1)^4 / 2, \quad \beta(z_k) = 1 - (0.1z_k - 4)^2 + (0.1z_k - 4)^4 / 2. \end{aligned}$$

Для формирования соответствующей программной модели на языке LISMA для среды моделирования ИСМА был разработан специальный программный модуль. На вход подается размер сетки дискретизации пространственных переменных, после чего формируется программная модель, заданная системой ОДУ высокой размерности. Разработка такого модуля является трудоемкой задачей. Реализация требует от разработчика навыков программирования и

предварительно подготовленную математическую модель вида (4). Ошибки, допущенные при реализации модуля, трудно диагностируемы. Из-за объема сформированной модели и вида сгенерированных уравнений ручное редактирование в среде моделирование затруднительно. Поэтому работа над программной моделью должна производиться непосредственно в исходном коде модуля, что требует его повторной сборки. Работа с новой моделью вида (3) требует полного перепрограммирования модуля, что накладывает на пользователя ряд трудоемких действий, не связанных с анализом исходной задачи.

Поэтому весь процесс реализации алгоритма необходимо автоматизировать и скрыть от пользователя, как это решается в современных инструментальных средах. Для этого потребуются доработка языка *LISMA*, разработка специальной структуры данных для хранения внутреннего представления программной модели и управляющий компонент, реализующий алгоритм преобразования и управление процессом численного эксперимента.

Рассмотренные современные среды моделирования ГС продемонстрировали актуальность разработки средств описания и моделирования ПВГС обозначенного класса. В рамках выработанных требований проведен анализ существующих программных комплексов, позволяющих описывать модели, заданные системой ДУЧП. Проведенный анализ позволяет учесть достоинства решений при разработке эффективного и математически корректного языка. Для решения поставленных задач в первую очередь должна быть разработана архитектура программного комплекса, в которой центральным понятием, в отличие от рассмотренных, является гибридная система. Также необходимо разработать и реализовать оригинальные компоненты унифицированного хранения программных моделей ГС и компоненты, обеспечивающие процесс численного эксперимента и автоматизацию перехода от (2) к (1).

**Во второй главе** предложена новая архитектура инструментальной среды моделирования *ИСМА\_2015* (рисунок 1), которая была разработана в соответствии с современными требованиями европейского стандарта *CSSL*. Сконструированная архитектура придерживается принципов унификации, модульности, расширяемости и взаимозаменяемости компонентов. Такой подход позволяет настраивать среду на новые приложения с минимальными доработками. Каждая предметная область имеет свой собственный способ спецификации модели, редактор с входного языка и интерпретатор (рисунок 2). В рамках данной работы разработан язык символьной спецификации *LISMA\_PDE*, который подробно рассматривается в третьей главе.

Ключевую роль в задачи унификации играет разработанное и реализованное универсальное внутреннее представление (УВП) модели ГС. В его задачи входит обеспечение единообразного хранения гетерогенных программных

моделей ГС с различными входными языками, а также обеспечение эффективных средств анализа.

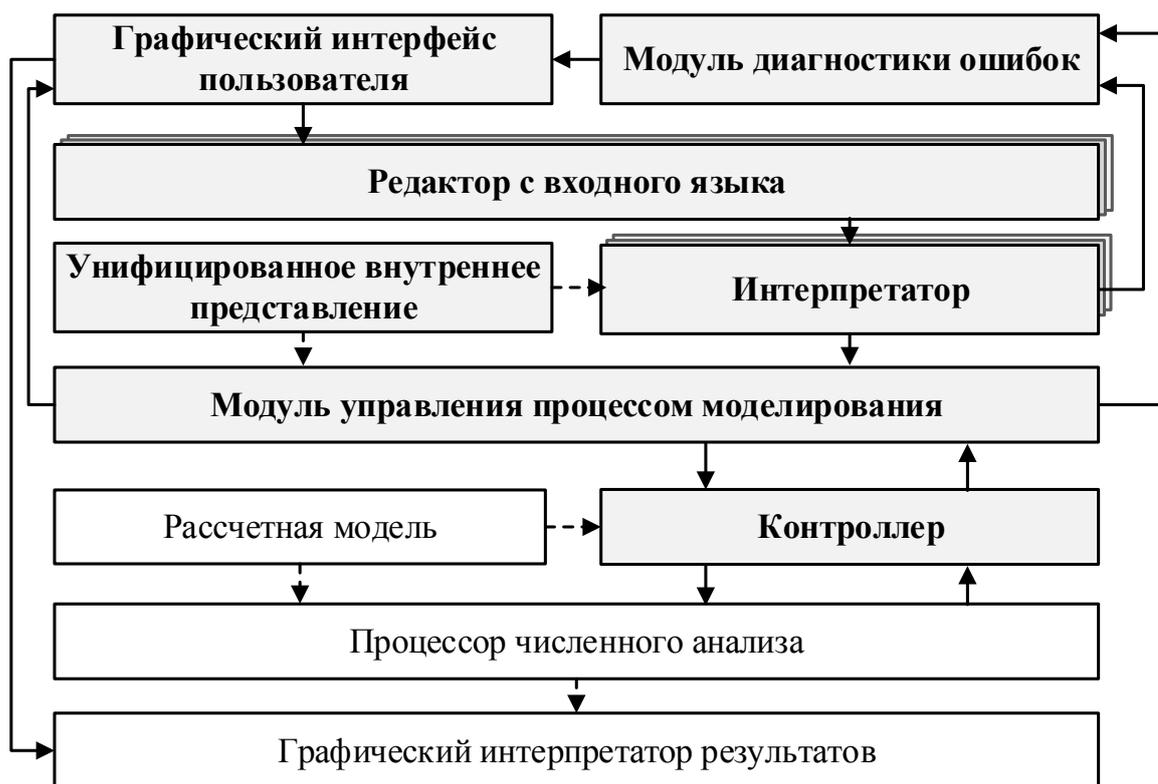


Рисунок 1 – Архитектура среды моделирования ISMA\_2015

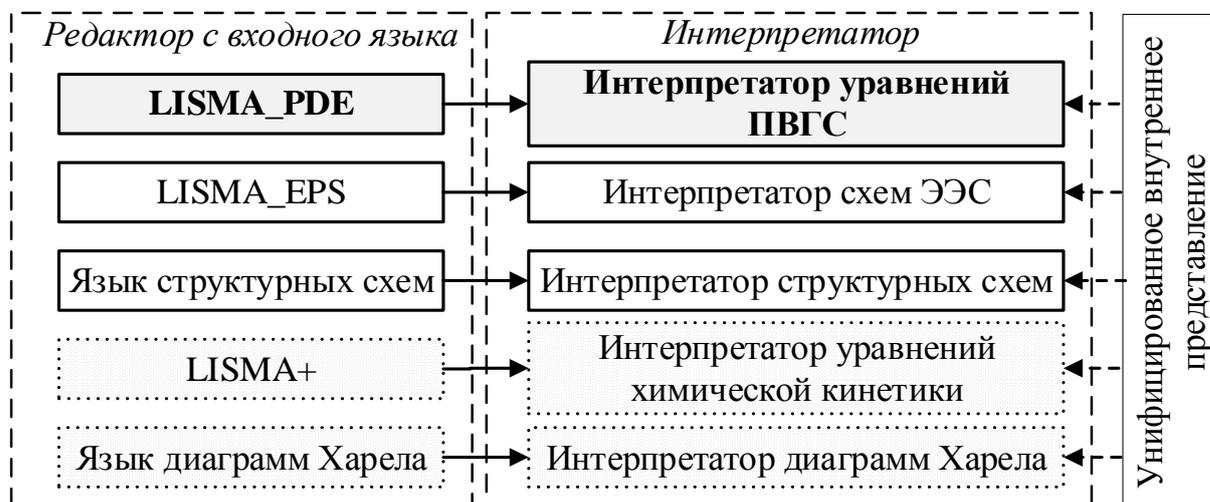


Рисунок 2 – Множество входных языков среды ISMA\_2015

Внутреннее представление формируется в результате работы интерпретатора с входного языка. УВП реализован с использованием парадигмы объектно-ориентированного программирования, в результате чего модель ГС представляет собой набор иерархически взаимосвязанных компонентов со связями агрегации, композиции и наследования. UML-диаграмма элементов УВП представлена на рисунке 3. Подробно рассматривается как общая архитектура

УВП, так и архитектура отдельных модулей. Работа с такими сложными компонентами, как УВП может быть эффективна лишь в случае наличия сопровождающего набора инструментов. В данном случае к ним относятся: сервисы преобразования выражений из инверсной записи в инфиксную и обратно, сервис диагностики и сервис вычисления значений констант, начальных и краевых условий.

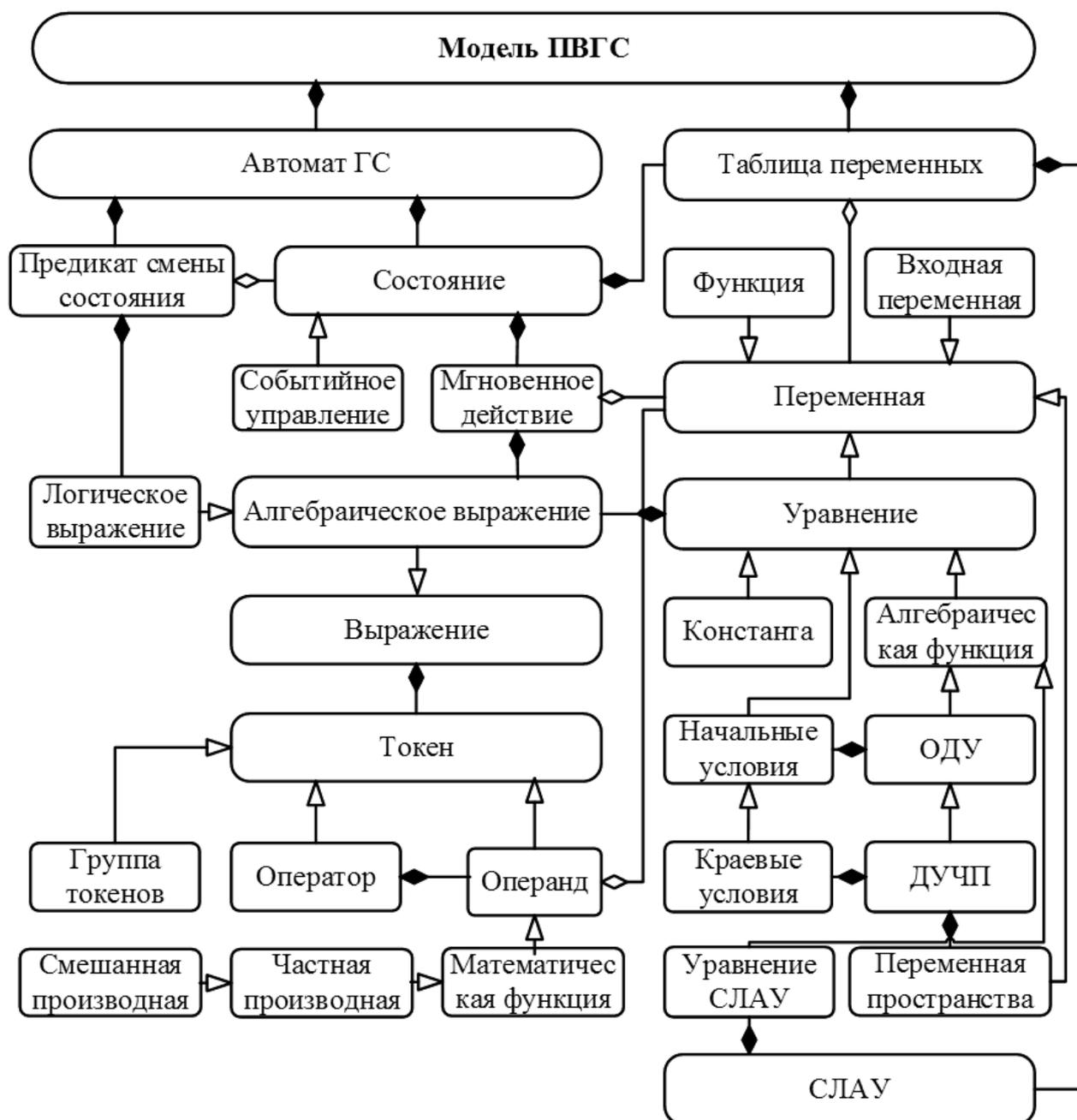


Рисунок 3 – UML-диаграмма элементов УВП

Добавлен модуль *MMWS*, реализующий метод приближения без насыщения. Для *MMWS* используется собственный формат *расчетной модели* и реализован специальный компонент контроллера. Контроллеры выполняют задачу интеграции решателя и библиотеки численных методов с остальной частью среды

моделирования, а также задачу запуска и управления процессом моделирования. Описан и реализован алгоритм преобразования модели из (2) в (1). Этот алгоритм освобождает пользователя от рутинной работы при дискретизации исходной задачи и ручного ввода полученной дискретной модели, которая в данной постановке формируется автоматически на этапе трансляции.

**Третья глава** посвящена разработке и реализации средств спецификации моделей ГС, включающих ПВГС. Разработан язык символьной спецификации программных моделей ГС *LISMA\_PDE*, являющийся расширением языка *LISMA*. Спецификация уравнений различных типов выполняется в соответствии с порождающей грамматикой  $G_{equation}$

$$\begin{aligned}
 equation &\rightarrow ae \mid ode \mid pde \\
 ae &\rightarrow variable '=' expression ';' \\
 ode &\rightarrow variable "'=' expression ';' \\
 pde &\rightarrow 'pde' variable "'=' expression ';' \\
 variable &\rightarrow Identifier
 \end{aligned} \tag{5}$$

В языке *LISMA\_PDE* обыкновенные дифференциальные уравнения первого порядка (*ode*) записываются разрешенными относительно производной. В гиперболических ДУЧП (*pde*), разрешенных относительно производной по времени, частные производные записываются в функциональном стиле. Например, запись  $D(c, x, 2)$  соответствует частной производной  $\partial^2 c / \partial x^2$ .

Рассмотрим грамматику  $G = (V_N, V_T, S, P)$ , где  $V_N$  – нетерминальный словарь,  $V_T$  – терминальный алфавит,  $S$  – начальный символ,  $S \in V_N$ ,  $P$  – множество продукций. Согласно классификации Хомского,  $G$  является контекстно-свободной (КС) грамматикой, если она содержит продукции вида  $A \rightarrow \beta$ , где  $A \in V_N$ ,  $\beta \in (V_N \cup V_T)^*$ . Проблема соответствий Поста ограничивает использование КС – грамматик. Поэтому при проектировании языковых процессоров подбираются подклассы КС – грамматик, для которых однозначность доказана. Например, строгие КС – грамматики типа  $LL(k)$ ,  $k \geq 1$ . Для доказательства принадлежности  $G$  к классу  $LL(k)$  – грамматик необходимо показать, что из существования двух левых выводов: 1)  $S \Rightarrow^* \omega A \alpha \Rightarrow \omega \beta \alpha \Rightarrow^* \omega x$  и 2)  $S \Rightarrow^* \omega A \alpha \Rightarrow \omega \gamma \alpha \Rightarrow^* \omega y$ , для которых  $FIRST_k(x) = FIRST_k(y)$ , следует  $\beta = \gamma$ . Здесь  $FIRST_k(x)$  – первые  $k$  символов терминальной цепочки  $x$  при  $|x| > k$ , либо сама цепочка  $x$ , если  $|x| \leq k$ . Таким образом, если в  $LL(k)$  – грамматике имеются альтернативные правила, то при заданном числе  $k$  строки  $FIRST_k(x)$  и  $FIRST_k(y)$  не совпадают. Применим этот вывод для

классификации  $G_{LISMA\_PDE}$ . Для сокращения записи введем новые обозначения символов грамматики  $G_{equation}$  в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Сокращенные обозначения

<i>equation</i>	<i>ae</i>	<i>ode</i>	<i>pde</i>	<i>variable</i>	<i>expression</i>	'='	','	"	'pde'	<i>Identifier</i>
<i>E</i>	<i>A</i>	<i>O</i>	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>X</i>	<i>e</i>	<i>s</i>	<i>a</i>	<i>p</i>	<i>i</i>

Обозначим грамматику  $G_{eq}$  и перепишем с учетом введенных обозначений. Тогда

$$G_{eq} = (\{E, A, O, P, V, X\}, \{e, s, a, p, i\}, \quad (6)$$

$$E, \{E \rightarrow A|O|P, A \rightarrow VeXs, O \rightarrow VaeXs, P \rightarrow pVaeXs, V \rightarrow i\})$$

Из (6) можно видеть, что  $G_{eq}$  соответствует определению КС – грамматик. Проверим подкласс грамматики. Первое правило (6) содержит три альтернативных части. Покажем выводимость цепочек: 1)  $E \Rightarrow A \Rightarrow VeXs \Rightarrow ieXs$ ; 2)  $E \Rightarrow O \Rightarrow VaeXs \Rightarrow iaeXs$ ; 3)  $E \Rightarrow P \Rightarrow pVaeXs \Rightarrow piaeXs$ . Найдем  $FIRST_1(x)$  и  $FIRST_2(x)$  для полученных строк (таблица 2).

Таблица 2 – Начальные символы строк

Строка	$FIRST_1$	$FIRST_2$
<i>ieXs</i>	<i>i</i>	<i>ie</i>
<i>iaeXs</i>	<i>i</i>	<i>ia</i>
<i>piaeXs</i>	<i>p</i>	<i>pi</i>

В двух случаях получились совпадающие  $FIRST_1(x)$ . Следовательно,  $G_{eq}$  не относится к классу  $LL(1)$ . При этом строки  $FIRST_2(x)$  различны. Таким образом,  $G_{eq}$  является грамматикой типа  $LL(2)$ , что и требовалось определить. Рассматривая все правила  $G_{LISMA\_PDE}$  и рассуждая аналогичным образом, можно доказать, что грамматика  $G_{LISMA\_PDE}$  также является однозначной типа  $LL(2)$ . Этот вывод позволяет строить безвозвратный анализатор с применением метода рекурсивного спуска.

Подробно представлены этапы анализа символьной модели. Рассмотрены основные элементы нового языка. Для описания пространственных задач введены конструкции объявления пространственных переменных. Также введены элементы описания пространственно-временной задачи: частные производные; ДУЧП, разрешенные относительно производной по времени; ДУЧП, разрешенные относительно производных по пространственным переменным; краевые и начальные условия и т.д. При этом ввод новых конструкций не нарушает приемственности исходного языка.

Разработаны средства анализа программных моделей. Представленные этапы разбора включают в себя: лексический анализ, синтаксический анализ, семантический анализ, формирование УВП. Лексический и синтаксический анализ реализованы с использованием технологии автоматического построения анализаторов. Рассмотрены два подхода к автоматизации. К первому относится разработанный универсальный языковой процессор (УЯП). Представлена архитектура (рисунок 4) и подробное описание элементов разработанного языкового процессора.



Рисунок 4 – Архитектура УЯП

Основная идея УЯП заключается в создании повторно используемых программных средств, принимающих на вход описание типов токенов лексического анализатора, описание грамматических правил и действий по анализу и интерпретации полученного синтаксического дерева. Последовательность действий УЯП при переходе от текстовой модели к унифицированному внутреннему представлению представлена на рисунке 5.

Второй подход заключается в использовании библиотек генераторов нисходящих анализаторов. Приведен обзор генераторов и проведен сравнительный анализ, в результате которого выбран генератор *Antlr4*. Для *Antlr4* разработана грамматика языка *LISMA\_PDE* в РБНФ (расширенная форма Бэкуса-Наура). На основе разработанной грамматики генерируется лексический и синтаксический анализатор. Результатом работы синтаксического анализатора является абстрактное синтаксическое дерево (АСД). Рассмотрены три метода обхода АСД и выбран метод «*Tree Visitor*» (рисунок 6).

В результате обхода синтаксического дерева производится семантический анализ и формирование УВП.

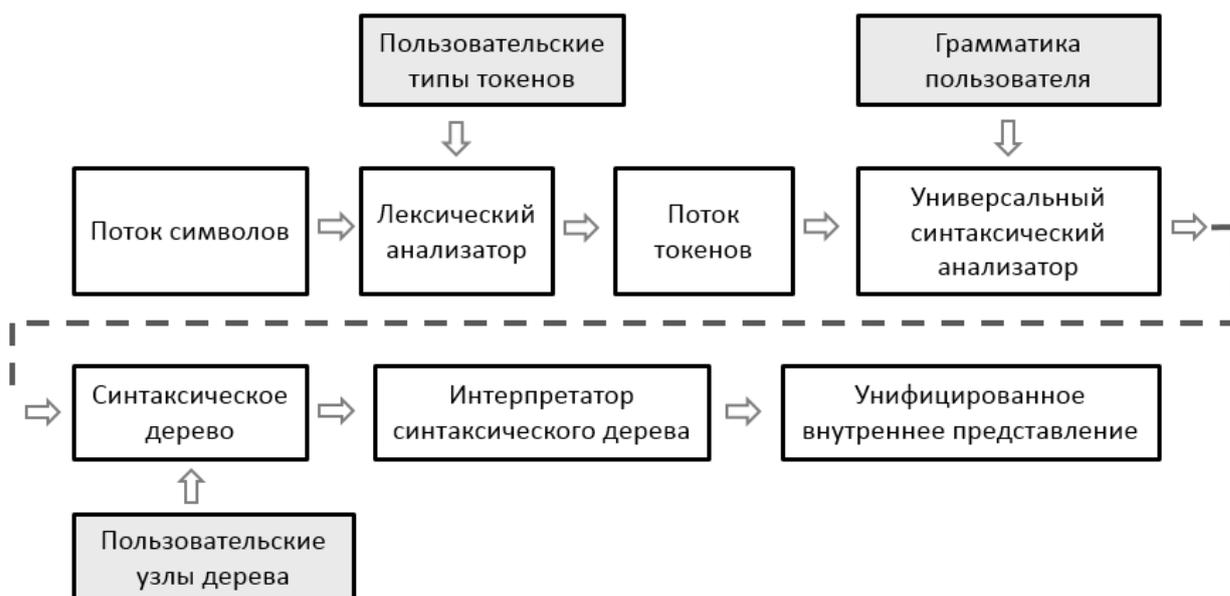


Рисунок 5 – Последовательность действий при переходе от текста модели к УВП

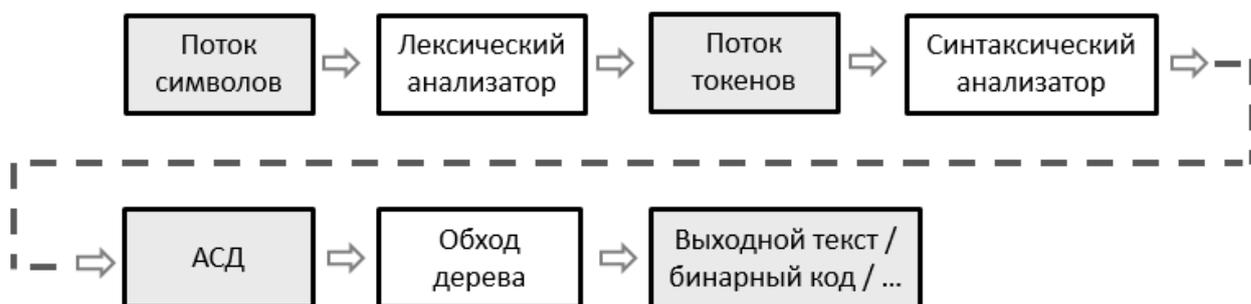


Рисунок 6 – Последовательность этапов анализа текстовой модели в *Antlr*

**В четвертой главе** для конструктивного доказательства преемственности новой среды ИСМА\_2015 приведен анализ ГС класса (1). Рассматриваемый тестовый пример модели двух баков демонстрирует возможность изучения непрерывных процессов, управляемых логическими контроллерами. Системы подобного рода широко распространены в технологических процессах промышленных предприятий. Унификация ПО ИСМА\_2015 к задачам из различных предметных областей достигается за счет оригинальной архитектуры, в которой центральным понятием является ГС, а также за счет разработанного и реализованного унифицированного внутреннего представления. Это выгодно отличает ИСМА\_2015 от аналогов. Тестовые испытания проводились на сложной электроэнергетической системе с событийным управлением, компактно записанной на разработанном языке. Принципиальная схема сложнотамкнутой энергосистемы с двумя уровнями напряжения и шестью синхронными машинами разных типов и мощностей представлена на рисунке 7.

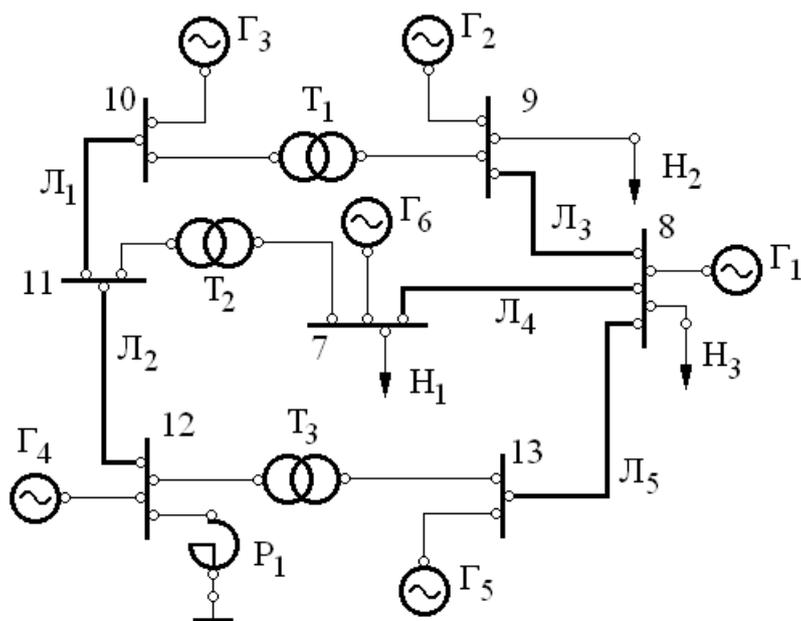


Рисунок 7 – Схема ЭЭС

Генератор  $G_1$  представляет мощную гидроэлектростанцию. Генераторы  $G_2$  и  $G_3$  моделируют тепловую электростанцию малой мощности, агрегаты которой работают на линии электропередачи разного номинального напряжения 500 и 220 кВ. Генераторы  $G_4$  и  $G_5$  моделирует мощную тепловую электростанцию, агрегаты которой также работают на линии электропередач разного напряжения. С помощью  $G_6$  моделируются синхронные компенсаторы, установленные на узловой подстанции.

Общая математическая модель содержит 279 нелинейных ДАУ. Соответствующая программная модель содержит 173 строки. Рассмотрены фрагменты программной модели, которые дают представление о конструкциях языка *LISMA\_PDE*, отражая компактность записи и соответствие математической форме. К примеру, уравнения синхронных машин  $G_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ , имеют вид

$$\frac{d\Psi_i}{dt} = -U_i - \omega_i \cdot \gamma \cdot \Psi_i, \quad \frac{d\Psi_{fi}}{dt} = E_{qei} \cdot \frac{r_{fi}}{x_{adi}} - r_{fi} i_{fi}, \quad \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{T_{Ji}} \cdot (M_{Ti} - M_i),$$

$$\Psi_{di} = \frac{1}{\omega_{ном}} \cdot x_{di} \cdot i_{di} + \frac{1}{\omega_{ном}} \cdot x_{adi} \cdot i_{fi}, \quad \Psi_{qi} = \frac{1}{\omega_{ном}} \cdot x_{qi} \cdot i_{qi}, \quad (7)$$

$$\Psi_{fi} = \frac{1}{\omega_{ном}} \cdot x_{fi} \cdot i_{fi} + \frac{1}{\omega_{ном}} \cdot x_{adi} \cdot i_{di}, \quad 0 = -M_i + i_{qi} \cdot \Psi_{di} - i_{di} \cdot \Psi_{qi}.$$

Фрагмент программной модели на языке *LISMA\_PDE* для уравнений (7) представлен на рисунке 8.

```

for i = 1:6 {
    Fd[i]' = -Ud[i] - w[i]*Fq[i];
    Fq[i]' = -Uq[i] + w[i]*Fd[i];
    Ff[i]' = Eqe[i]*rf[i]/xad[i] - rf[i]*if_[i];
    w[i]' = (MT[i] - M[i])/TJ[i];
    Fd[i] = xd[i]*id[i]/w_nom + xad[i]*if_[i]/w_nom;
    Fq[i] = xq[i]*iq[i]/w_nom;
    Ff[i] = xf[i]*if_[i]/w_nom + xad[i]*id_[i]/w_nom;
    M[i] = iq[i]*Fd[i] - id[i]*Fq[i];
}

```

Рисунок 8 – Фрагмент программной модели (уравнения генераторов)

Пространственно-временные гибридные системы проиллюстрированы моделью концентрации озона, моделью теплопроводности на одномерной балке и моделью проникновения радиоактивных антител в пораженную опухолью ткань. На рисунке 9 представлена программная модель суточной концентрации озона на языке *LISMA\_PDE*.

Возможность изучения поведения модели ПВГС в зависимости от внешнего воздействия рассмотрено на нестационарной модели теплопроводности для одномерной балки. с дискретно-непрерывным поведением на краях

$$\rho c \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, u(x,0) = f(x), u(0,t) = u(L,t) = \begin{cases} \varphi_1(t), \text{ при } t < 15 \\ \varphi_2(t), \text{ при } t \geq 15 \end{cases}$$

где  $0 < x < L$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\lambda > 0$ ;  $\rho$  – плотность материала балки;  $c$  – коэффициент теплоемкости. В модели решается задача Дирихле для уравнения теплопроводности имеющее следующий физический смысл: определение температуры внутри балки с учетом поддерживаемой на краях известной температуры. Рассматривается случай, когда в определенный момент времени краевые условия на обоих концах балки меняют значение с  $T_1 = 600K$  на  $T_2 = 100K$ . Программная модель на языке *LISMA\_PDE* представлена на рисунке 10. Результаты численного эксперимента представлены на рисунке 11 и позволяют оценить динамику изменения температуры на протяжении всей балки. Скачкообразное изменение температуры наиболее ярко выражена на краях балки и едва различимо по середине.

Рассмотрены вопросы расширения библиотеки численных методов. Корректность доказана конструктивно на примере интеграции программного модуля *NMWS* для решения стационарных задач Пуассона методом приближения без насыщения. Рассмотрена трехмерная модель деформации балки.

```

1 // Константы
2 const k1 = 6.031, k2 = 4.66*pow(10, -16);
3 // Пространственные переменные
4 var x[0, 20] step 5;
5 var z[30, 50] step 5;
6 // Уравнения
7 C1' = Kh * D(C1, x, 2) + D(DKV1, z) + R1;
8 C2' = Kh * D(C2, x, 2) + D(DKV2, z) + R2;
9 k3 = exp( - 22.62/sin(pi*TIME/43200));
10 k4 = exp( - 7.601/sin(pi*TIME/43200));
11 Kh = 4* pow(10, -6);
12 Kv = pow(10, -8) * exp(z/5);
13 DKV1' = Kv * D(C1, z);
14 DKV2' = Kv * D(C2, z);
15 R1 = -k1*C1 - k2*C1*C2 + 7.4*pow(10, 16)*k3 + k4*C2;
16 R2 = k1*C1 - k2*C1*C2 - k4*C2;
17 // Краевые условия
18 edge D(C1,z) = 0 on z both;
19 edge D(C1,x) = 0 on x both;
20 edge D(C2,z) = 0 on z both;
21 edge D(C2,x) = 0 on x both;
22 // Начальные условия
23 C1(t0) = pow(10, 6)*(1-pow(0.1*x-1, 2) + pow(0.1*x-1, 4)/2)
24           * (1 - pow(0.1*z - 4, 2) + pow(0.1*z - 4, 4)/2);
25 C2(t0) = pow(10, 12)*(1-pow(0.1*x-1, 2) + pow(0.1*x-1, 4)/2)
26           * (1 - pow(0.1*z - 4, 2) + pow(0.1*z - 4, 4)/2);
27 // Дискретное поведение
28 state st1 (TIME > 43200) {
29     k3 = 0; k4 = 0;
30 } from init;

```

Рисунок 9 – Программная модель суточной концентрации озона

```

1 // пространственная переменная
2 var x[0, 0.2] apx 21;
3 // константы
4 const a = 384, xc = 381,
5       p = 8800, рхс = p*xc;
6 // уравнения
7 T' = (a * D(T, x, 2))/рхс;
8 bc = 600;
9 // начальные условия
10 T(t0) = 323;
11 // краевые условия
12 edge T = bc on x both;
13 // дискретное поведение
14 state st1 (TIME >= 15) {
15     bc = 100;
16 } from init;

```

Рисунок 10 – Программная модель модели нестационарной теплопроводности

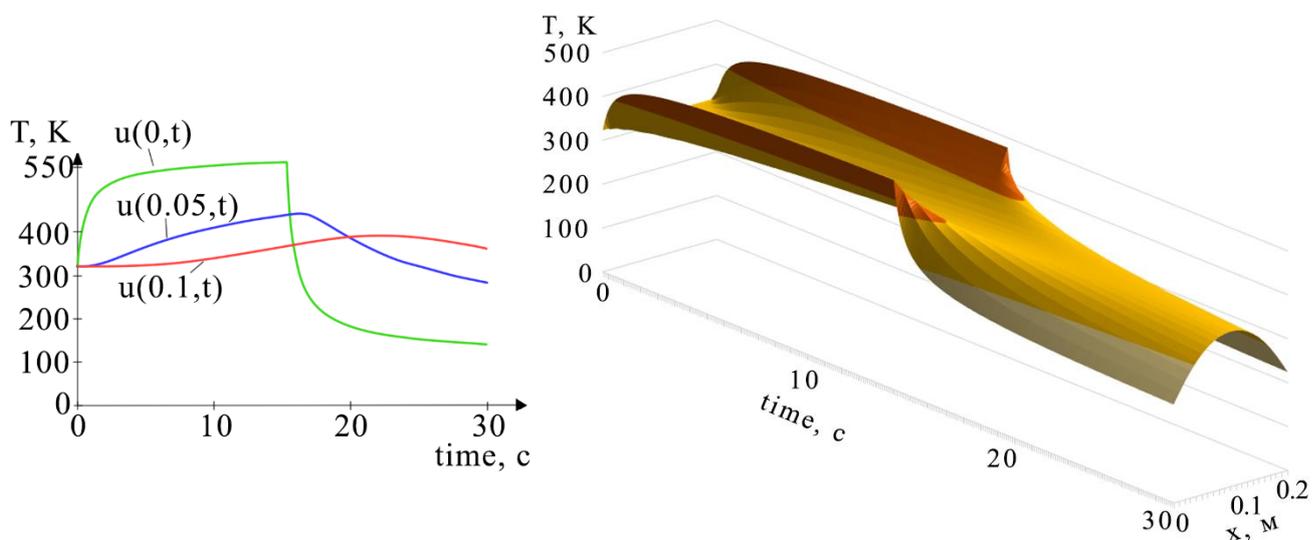


Рисунок 11 – Результаты численного эксперимента над моделью нестационарной теплопроводности со скачкообразным изменением краевых условий

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования разработаны и исследованы программные средства спецификации, интерпретации и анализа сложных динамических процессов, включая ПВГС обозначенного класса. Для конструктивного доказательства преимущества новой среды ИСМА\_2015 приведен анализ ГС класса (1). Пространственно-временные гибридные системы проиллюстрированы моделью концентрации озона, моделью теплопроводности на одномерной балке и моделью проникновения радиоактивных антител в пораженную опухолью ткань. Модульность и взаимозаменяемость компонентов новой среды ИСМА\_2015 конструктивно доказаны на задачах механики твердого деформируемого тела, для решения которых в иерархию компонентов ИСМА\_2015 была встроена реализация новых численных методов без перепрограммирования решателя. Наконец, тестовые испытания сложной электроэнергетической системы с событийным управлением компактно специфицированы на разработанном языке и успешно исследованы в рамках новой инструментальной среды.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Издания из Перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций:*

1. Бессонов, А. В. Спецификация и инструментальный анализ гибридных систем / Ю.В. Шорников, А.В. Бессонов, Д.Н. Достовалов // Научный вестник НГТУ. – 2015. – №4 (61). – С. 101–117.

2. Бессонов, А. В. Компьютерное моделирование пространственно-временных гибридных систем / А. В. Бессонов // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – №3.1(61). – С. 123–129.
3. Bessonov, A. V. Numerical Solution of Hybrid Systems with PDE in the ISMA Simulation Environment / Y. V. Shornikov, A. V. Bessonov, M. S. Nasyrova, D. N. Dostovalov // Humanities and Sciences University Journal. – 2014. – № 10. – P. 189–202.
4. Бессонов, А. В. Инструментальный анализ режимов электрических машин / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов, И. Н. Томилов // Доклады АН ВШ РФ. – 2012. – № 2(19). – С. 128–136.

*Международные рецензируемые издания:*

5. Бессонов, А. В. Унифицированный подход к компьютерному моделированию гибридных систем / Ю. В. Шорников, А. В. Бессонов // Информационные технологии моделирования и управления. – 2015. – №3(93). – С. 289–298.
6. Bessonov, A. V. Instrumental analysis of hybrid systems with PDE / Y. V. Shornikov, A. V. Bessonov, M. S. Myssak, D. N. Dostovalov // International Journal of Mathematics and Computers in Simulation. – 2015. – Vol. 9. – P. 85–93.

*Сборники научных трудов:*

7. Бессонов, А. В. Моделирование преобразователя постоянного тока в инструментальной среде ИСМА / А. В. Бессонов, Д. Н. Достовалов, М. С. Денисов // Современные проблемы информатизации в экономике и обеспечении безопасности: Сб. трудов по итогам XVI Международной открытой науч. конф. – Воронеж: «Научная книга», 2011. – № 16. – С. 88–92.
8. Бессонов, А. В. Модифицированный транслятор языка LISMA / А. В. Бессонов // Автоматизированные системы и информационные технологии: Сб. научных трудов Российской научно-практической конференции. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. – С. 21–26.

*Другие издания:*

9. Бессонов, А. В. Синтаксически-ориентированный анализ гибридных систем на примере шестимашинной ЭЭС / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов // Материалы международной научно-практической конференция «Современное состояние Науки и техники». Сочи, 4–9 февраля 2016. – Сочи: Типография «Оптима». – 2016. – С. 189–196.
10. Бессонов, А. В. Спецификация моделей электроэнергетических систем в ИСМА 2015 / А. В. Бессонов, Д. Н. Достовалов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 11-й Всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2015. – С. 103–106.

11. Bessonov, A. V. Using ISMA Simulation Environment for Numerical Solution of Hybrid Systems with PDE / Y. V. Shornikov, A. V. Bessonov, M. S. Myssak, D. N. Dostovalov // Computer Modeling and Simulation: тр. междунар. науч.-техн. конф. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 101–108.
  12. Bessonov, A. V. Specification and analysis of hybrid systems with PDE in ISMA simulation environment / Y. V. Shornikov, A. V. Bessonov, M. S. Myssak, D. N. Dostovalov // Recent advanced in mathematical methods in applied sciences: proc. of the 2014 intern. conf. on mathematical models and methods in applied sciences (MMMAS'14), proc. of the 2014 intern. conf. on economics and applied statistics (EAS'14). – Saint Petersburg, 2014. – P. 175–182.
  13. Бессонов, А. В. Моделирование систем ДУЧП расширенными языковыми средствами среды ИСМА / А. В. Бессонов // Наука технологии инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2013. – С. 7–10.
  14. Бессонов, А. В. Особенности исследования и спецификации многомерной гибридной модели в среде ИСМА / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов // «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике»: Материалы VIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 39–42.
  15. Бессонов, А. В. Гибридный подход в моделировании электротехнических устройств / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов, А. В. Бессонов // Материалы XI межд. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2012. – в 7 томах. Т.6 Моделирование и вычислительная техника. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2012. – С. 119–123.
  16. Бессонов, А. В. Унификация программного обеспечения ИСМА для моделирования электрических машин / А. В. Бессонов, Д. Н. Достовалов, Ю. В. Шорников // Наука технологии инновации: Материалы Всерос. науч. конф. молодых учёных. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. – С. 35–39.
- Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:*
17. Бессонов, А. В. Компонента спецификации моделей гибридных систем на языке LISMA\_PDE / Ю. В. Шорников, А. В. Бессонов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617191. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2015.
  18. Бессонов, А. В. Компоненты ядра программного комплекса «ИСМА 2015» / Ю. В. Шорников, А. В. Бессонов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617235. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2015.

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 № 876 подписано в печать «07» июня 2016 г.

