

*На правах рукописи*

**АЛЕКСАНДРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**Инструментальный комплекс  
распределенного имитационного моделирования  
кластерных систем модульного программирования**

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

05.13.18 – Математическое моделирование, численные  
методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте динамики систем и теории управления Сибирского отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Феоктистов Александр Геннадьевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Краковский Юрий Мечеславович**

доктор технических наук  
**Окольнишников Виктор Васильевич**

Ведущая организация: **Новосибирский государственный университет**

Защита состоится 17 сентября 2009 г. в 13.30 на заседании диссертационного совета Д 003.021.01 при Институте динамики систем и теории управления СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДСТУ СО РАН.

Автореферат разослан 14 августа 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

А.А. Щеглова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие компьютерных технологий, увеличение пропускной способности сетей передачи данных и постоянный рост требований к вычислительным ресурсам, диктуемых научно-исследовательскими приложениями, обусловили создание вычислительных кластеров, метакомпьютеров, сетей GRID и других распределенных вычислительных сред (PBC). Такие среды предназначены для решения целого класса задач, как правило не предполагающих тесного взаимодействия между параллельными процессами. Интеграция PBC и пакета прикладных программ, функциональные модули которого размещены в узлах этой среды, привела к появлению нового вида предметно-ориентированных вычислительных комплексов – кластерных систем модульного программирования (КСМП).

Проектирование КСМП сопряжено с решением ряда технических проблем, связанных с необходимостью выбора:

- программно-аппаратной архитектуры для функционирования КСМП;
- прикладного программного обеспечения, которое следует применить для решения задач в КСМП;
- критериев оценки производительности и надежности разрабатываемой КСМП;
- методов и средств организации распределенного имитационного моделирования для изучения работы КСМП.

Из-за значительного объема вычислений и большой сложности КСМП их исследование зачастую требует использования методов имитационного моделирования. Имитационное моделирование включает проведение многократных экспериментов с различными вариантами моделей КСМП с целью определения параметров эффективности функционирования системы. Размер моделей КСМП и особенности их организации требуют значительных вычислительных ресурсов при моделировании подобных систем, что влечет необходимость использования распределенного имитационного моделирования.

Для организации распределенных вычислений разработаны различные технологии, такие как COM/DCOM, CORBA, Java/RMI, PVM, MPI и др. Однако использование этих технологий в сфере распределенного моделирования сдерживается отсутствием в них средств синхронизации модельного времени между удаленными сегментами модели. Другим подходом к организации распределенного имитационного моделирования является использование архитектуры HLA. Но, исходя из анализа работ некоторых исследователей<sup>1</sup>, можно выделить ряд существенных недостатков этой архитектуры: сложный с точки зрения реализации стандарт, необходимость адаптации готовых моделей к HLA, проблемы с масштабируемостью и отказоустойчивостью распределенных моделей, отсутствие иерархического взаимодействия двух реализаций HLA.

---

<sup>1</sup> См., например, работы S. Strassburger, B. Liu, D. Chen, J. Lamberts, A. Kapolka и др.

На сегодняшний день разработаны разные модели, методы и средства распределенного имитационного моделирования<sup>2</sup>, в том числе такие известные системы, как Недис-Р, Мера, Диана, SLX и др. Однако применение этих систем для моделирования КСМП осложнено необходимостью представления и анализа дополнительного уровня описания модели – концептуальной схемы предметной области КСМП. Таким образом, необходима разработка коммуникационной библиотеки, являющейся средством поддержки высокоуровневой системы имитационного моделирования и обеспечивающей синхронное взаимодействие сегментов распределенной модели КСМП.

Запись моделирующего алгоритма на этапе проектирования при помощи элементарных операторов языка моделирования представляет значительные трудности и усложняет ориентировку в его структуре. Представление алгоритма в таком виде, который бы отражал особенности его структуры без излишних второстепенных деталей, выглядит предпочтительнее и требует использования средств автоматизации<sup>3</sup> построения модели по ее концептуальному описанию. Исследования в области технологий программирования<sup>4</sup> показывают преимущества графических сред перед текстовыми языками программирования. Обзор в области средств визуализации процессов предметно-ориентированных данных, планирования и выполнения вычислений показал, что существующие системы моделирования не обладают всеми необходимыми средствами для описания модели КСМП. Следовательно, необходима разработка и реализация графической инструментальной среды, предназначенной для решения следующих задач: определения множества функциональных отношений между объектами исследуемой предметной области; описания программно-аппаратной архитектуры создаваемой системы, включая коммуникационную среду; моделирования процессов формирования постановок исследовательских задач, построения и исполнения их планов решения.

Получение адекватных оценок времени решения задач при моделировании КСМП требует прогнозирования времени выполнения каждого из модулей, включенных в план решения задачи. Зачастую КСМП включает так называемые вторичные модули (скомпилированные программы), для которых отсутствуют исходные коды. Это актуализирует применение динамического анализа времени выполнения таких модулей путем определения статистики событий в их реальных прогонах.

Все вышесказанное обуславливает актуальность исследований, выполненных в рамках диссертационной работы.

**Цель работы** состоит в создании графического инструментального комплекса (ИК) СИРИУС для исследования КСМП с использованием методов ав-

---

<sup>2</sup> См., например, работы В.В. Окольнішнікова, Р.Л. Смялянского, Р.М. Fujimoto, S.Strassburger и др.

<sup>3</sup> Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1968. – 355 с.

<sup>4</sup> См., например, работы И.В. Вельбицкого, А.П. Ершова, Л.А. Калужнина, Э.Х. Тыгу, G.A. Raeder и др.

томатизации построения GPSS-моделей, распределенного имитационного моделирования и динамического анализа программ.

**Объектом исследования** являются технологии анализа распределенных вычислительных систем.

**Предмет исследования** составляют методы и инструментальные средства распределенного имитационного моделирования.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы системного программирования, характерные для автоматизации разработки больших программных комплексов, а также методы имитационного моделирования, организации распределенных вычислений и динамического анализа программ.

**Научная новизна.** Предложена технология анализа эффективности функционирования КСМП, обеспечивающая (в отличие от известных) комплексное исследование характеристик как прикладного программного обеспечения, так и аппаратных средств РВС. В основе этой технологии лежат разработанные автором методы и инструментальные средства, обеспечивающие распределенное имитационное моделирование КСМП с применением средств динамического анализа программ.

**Практическая значимость.** Применение разработанного в диссертации ИК СИРИУС дает возможность специалистам-предметникам самостоятельно, без участия высококвалифицированных системных программистов, описывать предметную область, программно-аппаратную архитектуру распределенной КСМП и проводить имитационные испытания с целью исследования эффективности работы проектируемой КСМП.

Разработанные средства зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [3, 4] и применяются для проведения экспериментальных расчетов по плановым научно-исследовательским работам в ИДСТУ СО РАН, а также в учебном процессе в Международном институте экономики и лингвистики Иркутского государственного университета.

Разработка и применение представленных в диссертации программных средств выполнялись в рамках интеграционного проекта № 3 СО РАН «Методы, технологии и инструментальные средства создания вычислительной инфраструктуры в Internet» (2003–2005 гг.); проекта СО РАН 3.2.6 «Интегрированные информационно-вычислительные и коммуникационные ресурсы: интеллектуальные методы организации, автоматизации разработки и применения» (2004–2006 гг.); проекта СО РАН «Разработка научных основ распределенной информационно-аналитической системы на основе ГИС и Веб-технологий для междисциплинарных исследований» междисциплинарной программы 4.5.2 (2007–2009 гг.) и проекта РФФИ № 04-07-90358 «Разработка и реализация распределенной вычислительной системы решения булевых уравнений большой размерности».

**Достоверность результатов** диссертации подтверждается успешным опытом практического применения ИК СИРИУС для моделирования процесса функционирования ряда КСМП, а также для проектирования архитектуры вычислительного кластера вуза.

**Апробация работы.** Основные результаты работы представлены на научно-практических конференциях «Ляпуновские чтения» (Иркутск, 2004 г., 2007 г.), на IV Всероссийской конференции «Математика, информатика, управление» (Иркутск, 2005 г.), на VI-VIII Школах-семинарах молодых ученых «Математическое моделирование, управление и информационные технологии» (Иркутск, весна 2005 г., осень 2005 г., 2006 г.), на V и VI Международных научно-практических конференциях «Моделирование. Теория, методы и средства» (Новочеркасск, 2005 г., 2006 г.), на V Школе-семинаре «Распределенные и кластерные вычисления» (Красноярск, 2006 г.), на Всероссийской конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы» (Энхалук, 2006 г.), на XII Байкальской всероссийской конференции с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск, 2007 г.), на Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии (ПАВТ)» (Челябинск, 2007 г.), на VI Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO)» (Москва, 2007 г.), на Международной конференции «Геоинформатика: технологии, научные проекты» (Иркутск, 2008 г.), на Всероссийской конференции «Математическое моделирование и вычислительно-информационные технологии в междисциплинарных научных исследованиях» (Иркутск, 2009 г.), а также на семинарах ИДСТУ СО РАН.

**Публикации и личный вклад автора.** По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, включая 2 статьи [1, 2] в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертации, 11 публикаций [5-15] в трудах региональных, всероссийских и международных конференций, 2 свидетельства [3, 4] об официальной регистрации программ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

В перечисленных работах все результаты, связанные с алгоритмизацией, программной реализацией и вычислительными экспериментами на ЭВМ, получены автором лично. Результаты по разработке моделей и методов организации распределенного имитационного моделирования вычислительных систем получены совместно с А.Г. Феоктистовым и являются неделимыми. Из совместных работ с В.И. Дмитриевым, А.С. Корсуковым, А.В. Лариной и Г.А. Опариним в диссертацию включены только те результаты, которые принадлежат лично автору.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования, списка сокращений, глоссария и 5 приложений. Общий объем работы 171 страница, из них 139 страниц основного текста, включающего 27 рисунков и 13 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** выполнен обзор основных теоретических подходов, существующих архитектур и инструментальных средств, предназначенных для построения и анализа КСМП. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведена структура работы.

**В первой главе** показана актуальность задачи моделирования КСМП, обоснована необходимость применения суперкомпьютерной вычислительной техники при моделировании сложных систем и использования распределенного имитационного моделирования как метода исследования сложных систем. Приведено понятие системы массового обслуживания (СМО) как разновидности сложной системы. Описаны базовые характеристики функционирования СМО. Задача исследования КСМП сведена к задаче моделирования СМО. Описаны преимущества специализированных языков моделирования с точки зрения реализации модели СМО по сравнению с языками общего назначения. Обоснована актуальность использования высокоуровневых систем имитационного моделирования СМО, таких как GPSS World и GPSS/H. Осуществлен анализ параллельных и распределенных технологий, таких как PVM, MPI, CORBA, RMI и др. Эти технологии обладают общим характерным недостатком: отсутствием методов синхронизации времени, что делает их применение для организации распределенного моделирования достаточно сложным. Рассмотрена архитектура HLA, предназначенная для распределенного моделирования. Анализ недостатков HLA с точки зрения решения поставленных в диссертации задач обуславливает необходимость разработки собственных программных средств для обеспечения взаимодействия удаленных сегментов модели. Представлены различные методы синхронизации времени в распределенных моделях, проанализированы их особенности, обоснован выбор консервативного алгоритма синхронизации для задачи моделирования КСМП. Приведены характеристики КСМП как объекта имитационного моделирования.

**Во второй главе** рассмотрены особенности организации распределенного имитационного моделирования и анализа КСМП.

В первом разделе главы приведена технология анализа КСМП, включающая следующую совокупность компонентов: методы автоматизации построения моделей, имитационного моделирования и распределенных вычислений; моделируемые вычислительные процессы научно-технического характера (процессов решения прикладных и фундаментальных исследовательских задач); инструментальные программные средства проектирования КСМП; программно-аппаратные средства, в рамках которых осуществляется моделирование КСМП. Перечисленные компоненты объединяются в единую технологическую цепочку для определения параметров проектируемой КСМП. Одним из средств исследования КСМП является использование методов динамического анализа программ с целью прогнозирования времени работы модулей на иссле-

дуемой архитектуре КСМП. Получение такого прогноза представляет собой сложную задачу<sup>5</sup> и требует оценки не только производительности узлов как эталонной, так и анализируемой архитектуры, но и исследования интенсивности использования аппаратных компонентов узлов модулями КСМП.

На основе обзора средств, используемых для оценки производительности вычислительных узлов<sup>6</sup>, предложено проведение анализа следующих характеристик компонентов узла КСМП: времени выполнения центральным процессором операций с целыми и вещественными числами, латентности и пропускной способности кэшей (уровни L1, L2) и оперативной памяти, времени доступа и скоростей передачи данных жесткого диска и сети передачи данных. Проведение динамического анализа работы модулей КСМП предложено выполнять с помощью таких программ, как oProfile, pfmon, valgrind, cachegrind, lperfex, Intel vTune и Windows Performance Monitor. Разработаны спецификации модулей КСМП по следующим параметрам: количеству тактов процессора, интенсивности использования процессорных кэшей и оперативной памяти, количеству сессий чтения с жесткого диска и среднему количеству записанных/считанных байт за сессию, общему количеству выполненных процессором инструкций, количеству операций с целыми числами, количеству операций с вещественными числами, количеству переданных и принятых по сети данных, количеству установленных сетевых соединений, количеству сессий приема/передачи данных и времени, необходимого для установки сетевого соединения.

Разработан алгоритм прогнозирования производительности модулей КСМП. Общее время работы модуля  $m_i$  на узле  $n_j$  выражается как сумма времени работы компонентов узла:

$$T(m_i, n_j) = T_P(m_i, n_j) + T_M(m_i, n_j) + T_N(m_i, n_j) + T_D(m_i, n_j),$$

где  $T_P(m_i, n_j)$ ,  $T_M(m_i, n_j)$ ,  $T_N(m_i, n_j)$ ,  $T_D(m_i, n_j)$  – время работы процессора, памяти, сети передачи данных и жесткого диска, соответственно. Время работы модуля  $m_i$  на узлах КСМП прогнозируется с учетом вклада каждого компонента в общее время работы этого модуля на эталонном узле.

Сформулирована постановка задачи моделирования КСМП, выделены входные вероятностно-временные характеристики моделируемой системы: поток задач, интенсивность поступления задач пользователей КСМП, вид надежности системы (восстанавливаемая с рестартом, отказоустойчивая с дублированием, с избыточными вычислениями), дисциплины обслуживания очередей (FIFO, LIFO и др.), вид механизма обслуживания очереди задач (с ожиданием, с отказами), интенсивность загрузки вычислительных ресурсов локальными и сторонними пользователями, интенсивность возникновения отказов вычислительных ресурсов.

---

<sup>5</sup> Французов Д. Оценка производительности вычислительных систем / Д. Французов // Открытые системы, 1996. – № 2. – С. 58-66.

<sup>6</sup> Таких как SPEC, LINPACK, Dhystone, Whetstone, MIPS, Ливерморские циклы (LFK), SYSmark, CPUmark32 и др.



Определены основные выходные показатели надежности и эффективности работы КСМП:  $K_t = T_e / T_q$  – коэффициент эффективности решения задачи, где  $T_e$  – время решения задачи,  $T_q$  – время ожидания задачи в очереди;  $K_p = (z - z_{cr}) / z$  – коэффициент решаемости задач, где  $z$  – число поступивших на решение задач,  $z_{cr}$  – число снятых с решения задач и  $K_g = (z_{df} - z_{cr}) / z_{df}$  – коэффициент восстанавливаемости процесса решения задачи после отказа вычислительного ресурса, где  $z_{cr}$  – число снятых с решения задач,  $z_{df}$  – число задач с отказами вычислительных ресурсов.

Выделены следующие этапы технологии анализа КСМП: описание схемы предметной области и программно-аппаратной архитектуры исследуемой КСМП, запуск КСМП на эталонной архитектуре, сбор вероятностно-временных характеристик КСМП на узлах эталонной архитектуры, определение производительности узлов эталонной и исследуемой архитектуры, составление спецификаций программных модулей и аппаратных узлов, запуск автоматического конструирования имитационной модели, проведение распределенного имитационного моделирования с использованием разработанной коммуникационной библиотеки и анализ результатов моделирования.

Во втором разделе представлена распределенная имитационная модель КСМП, формируемая из взаимосвязанных сегментов. Разработаны набор базовых сегментов GPSS-модели, составляющий ядро генерируемой имитационной модели КСМП, и набор дополнительных сегментов, позволяющий детализировать генерируемую имитационную модель с точки зрения выбора моделируемых источников отказов и сбоев программно-аппаратных средств.

В третьем разделе описана схема функционирования разработанной коммуникационной библиотеки, обеспечивающей взаимодействие между удаленными сегментами. Библиотека представляет собой клиент-серверное приложение, состоящее из набора компонентов, связанных в модули по функциональному назначению. Клиентская часть состоит из набора GPSS-сегментов, модулей создания контрольных точек (КТ), dll-библиотек и ActiveX сервера. Для обмена данными между собой GPSS-сегменты подключаются к ActiveX серверу, используя вызовы dll-библиотек. ActiveX сервер устанавливает единственное Socket-соединение с серверной частью коммуникационной библиотеки и обеспечивает асинхронный обмен данными между сегментами. ActiveX сервер имеет собственный буфер для хранения передаваемых данных и динамически формирует перечень сегментов модели, находящихся под его управлением. Такой подход позволяет избежать отправки данных на сервер в случае, если происходит обмен между сегментами, находящимися на одном вычислительном узле.

В четвертом разделе приведен разработанный автором алгоритм синхронизации времени между распределенными сегментами, который реализован на основе консервативного метода синхронизации.

В пятом разделе исследован вопрос повышения степени надежности процесса моделирования КСМП. Реализован модуль автоматического создания КТ.

В последнем разделе представлен алгоритм работы этого модуля.

В третьей главе разработана системная архитектура и алгоритмы функционирования ИК СИРИУС. Рассмотрены основные аспекты программной реализации.

В первом разделе главы приведена архитектура ИК СИРИУС, включающая (рис. 1) три основные подсистемы: *графическую инструментальную среду*, *генератор распределенной модели* и *исполнительную подсистему*.

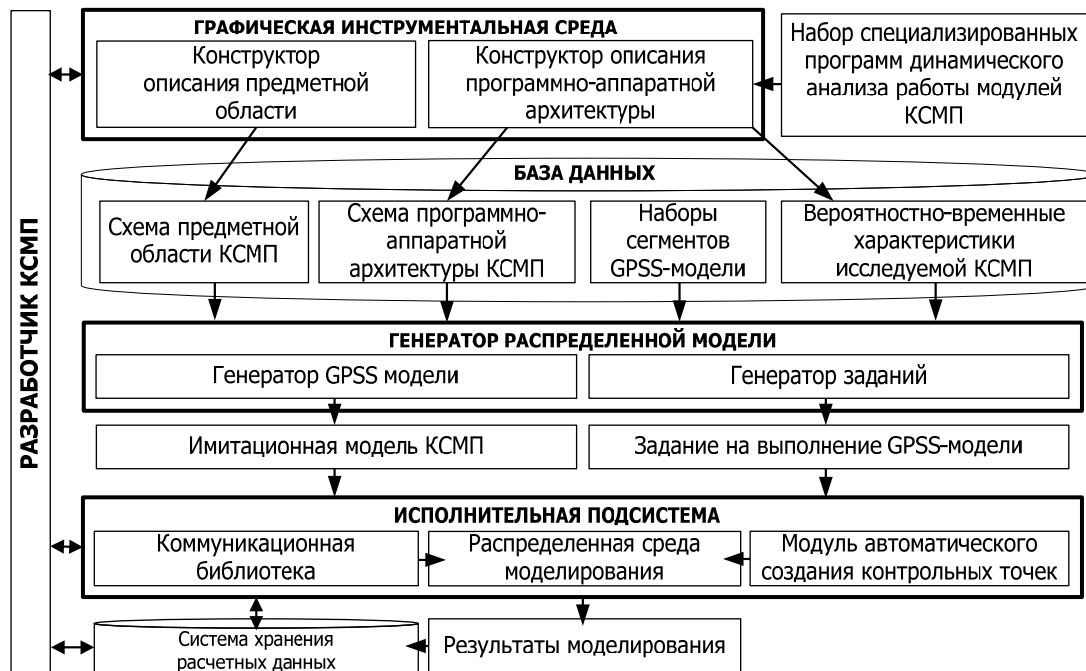


Рис. 1. Инструментальный комплекс СИРИУС

Назначение, принцип работы и функциональные возможности *конструктора описания предметной области* излагаются во втором разделе. Структурная схема предметной области представляет собой размеченный двудольный ориентированный граф, содержащий два типа вершин и два типа дуг. Входная дуга соединяет вершину-входной параметр с вершиной-операцией, выходная дуга соединяет вершину-операцию с вершиной-выходным параметром. Конструирование структурной схемы предметной области осуществляется «вручную» и ориентировано на предметные области с небольшим числом объектов.

На рис. 2 приведен пример описания предметной области КСМП для решения систем булевых уравнений<sup>7</sup> (СБУ) в виде структурной схемы. Параметры и операции предметной области представлены кружками и прямоугольниками, соответственно. На основе описания предметной области создаются структурные схемы постановок и планов решения задач. Пиктограммы (элементы управления соответствующей формы языка реализации) структурных схем снабжены соответствующими контекстными меню и процедурами обработки событий, обеспечивающими функционирование конкретной структурной схемы: разметку исходных и целевых параметров задачи на структурной схеме

<sup>7</sup> Распределенный решатель булевых уравнений большой размерности: методы и средства управления вычислениями / Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Новопашин А.П., Богданова В.Г. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. VII межд. конф. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2005. – С. 113-116.

непроцедурной постановки задачи, визуализацию процесса планирования вычислений и т.п.

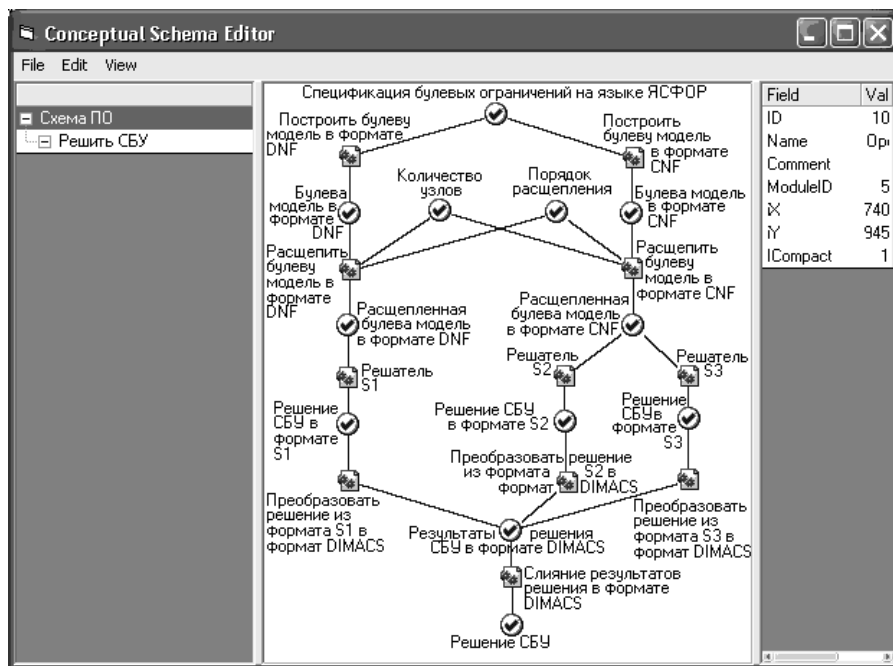


Рис. 2. Структурная схема предметной области КСМП для решения СБУ

Описание *конструктора программно-аппаратной архитектуры КСМП* приведено в третьем разделе. Элементы схемы программно-аппаратной архитектуры КСМП содержат следующие виды объектов КСМП: вычислительные узлы, коммуникационные элементы (концентраторы и маршрутизаторы коммуникационной сети), вычислительные модули и соединительные кабели коммуникационной сети. На рис. 3 приведен пример описания программно-аппаратной архитектуры КСМП для решения СБУ.

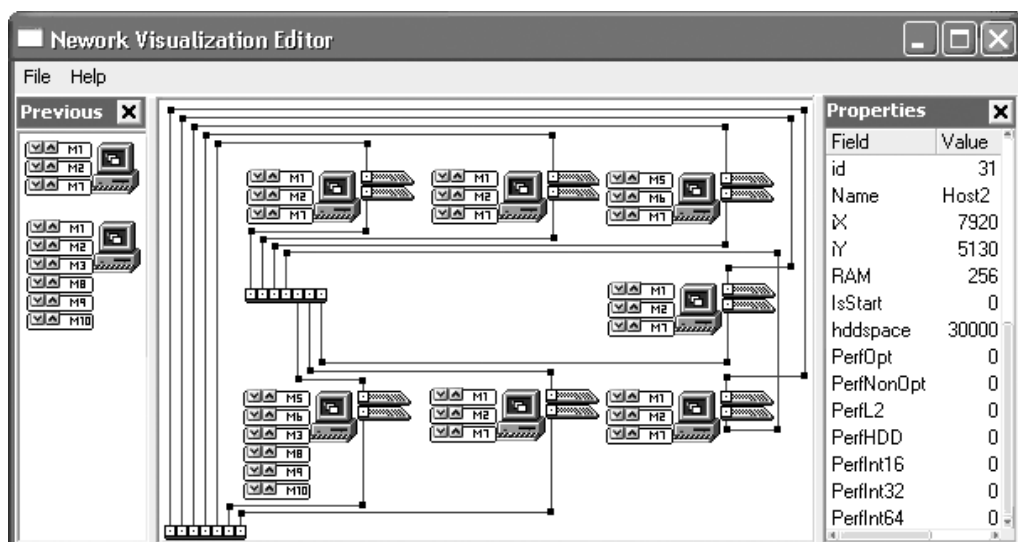


Рис. 3. Структурная схема программно-аппаратной архитектуры КСМП для решения СБУ

Описание *генератора распределенной имитационной модели и генератора заданий* приведено в четвертом разделе. Компоновка модели происходит на

языке имитационного моделирования системы GPSS World. Имитационная модель строится на основе наборов базовых и дополнительных сегментов GPSS-модели. Входные данные модели автоматически генерируются на основе описания предметной области, топологии сети передачи данных, базового набора сегментов GPSS-модели (моделирующих процессы возникновения, развития и взаимодействия различных событий в РВС) и вероятностно-временных характеристик моделируемых событий. Загрузчик входных данных в имитационную модель реализован на языке Plus системы GPSS.

Генератор заданий формирует файл задания, включающий перечень входных файлов распределенной модели и количество сегментов GPSS-модели, сведения о количестве требуемых вычислительных узлов, перечень сегментов модели, которые требуется совместить для запуска на одном вычислительном узле, информацию о необходимости запуска модуля создания КТ и входные параметры модуля КТ. Сформированное задание (запрос на выполнение распределенной GPSS-модели) передается системе управления узлами КСМП.

Описание *исполнительной подсистемы* и принципов ее работы изложено в пятом разделе. Подсистема включает механизмы передачи данных и синхронизации времени, реализованные с помощью разработанной коммуникационной библиотеки. Общая схема процесса выполнения имитационной модели (состоящей из  $M$  сегментов) на вычислительном кластере (включающем  $N$  узлов) представлена на рис. 4. Обмен и коммуникации между сегментами происходят через Socket-сервер, связывающий распределенные сегменты. Сервер представляет собой многопоточное асинхронное приложение, разработанное на языке Microsoft C#.

В серверной части реализованы методы синхронизации модельного времени между сегментами, а также пользовательский интерфейс, используя который пользователь может описывать цепь будущих событий всех сегментов распределенной модели. Разработан модуль генерации заданий, который принимает от пользователя файлы имитационной модели и передает их в систему управления заданиями, формируя корректный запрос.

Клиентская сторона включает три компонента: ActiveX сервер, который принимает данные от локальных моделей; DLL-библиотеки, обеспечивающие связь GPSS-модели и ActiveX сервера; GPSS-модели. Клиентский ActiveX-сервер реализован в виде windows-приложения, которое запускается в фоновом режиме и ожидает подключения сегментов GPSS-моделей через DLL-библиотеку. Библиотека реализована в виде windows-приложения, использующего соглашение о вызовах внешних функций в формате CDECL. Вызов коммуникационных функций из сегментов GPSS-моделей осуществляется на основе соглашения о вызовах внешних функций для GPSS/H и встроенных средств языка PLUS для GPSS World. Реализация данной архитектуры позволила использовать на каждом узле несколько сегментов GPSS-моделей, которые могут принимать и отправлять данные через ActiveX-сервер на Socket-

сервер. Для обеспечения отказоустойчивости распределенного процесса моделирования разработан модуль автоматического создания КТ.

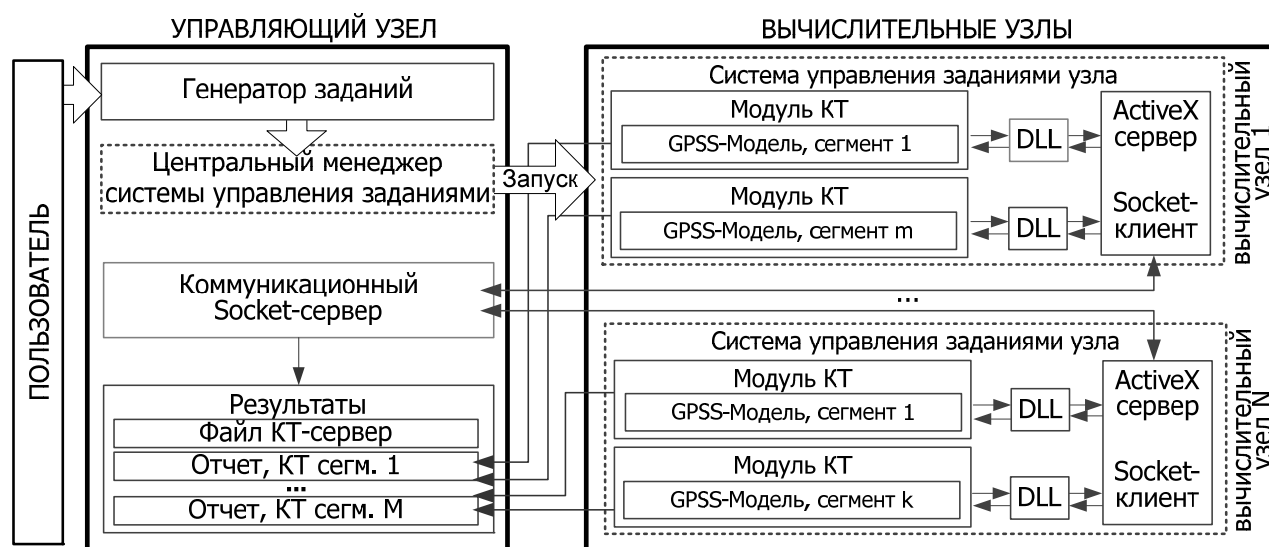


Рис. 4. Схема работы исполнительного подсистемы

В последнем разделе главы обоснован выбор языковых средств, сред и технологий, использованных при разработке и реализации ИК СИРИУС.

**В четвертой главе** продемонстрированы примеры применения разработанной архитектуры для решения практических задач.

В первом разделе главы приведены примеры построения математических распределений для учета таких характеристик вычислительных узлов, как загрузка процессоров и сетей передачи данных, необходимых в дальнейшем для проведения эксперимента имитационного моделирования. Выдвигаются гипотезы о распределениях, лежащих в основе полученных исходных данных, производится вычисление параметров математических распределений.

Во втором разделе описан вычислительный эксперимент по прогнозированию времени работы двух основных модулей КСМП для решения СБУ при переносе этих модулей с эталонной архитектуры на исследуемую. Для проведения эксперимента выбраны два решателя СБУ (модули  $m_1$  и  $m_2$ ) и 240 булевых моделей, доступных на сайте института Instituto de Engenharia de Sistemas and Computadores в Португалии, г. Лиссабон (<http://inesc-id.pt>) и ряде других источников. В качестве вычислительной базы использованы два узла со следующими характеристиками: Pentium-4, 2800 MHz, L1: 16 Kb, L2: 1024 Kb, HDD 250 Gb (эталонный узел); Pentium-4, 2800 MHz, L1: 8Kb, L2: 512Kb, HDD 80 Gb (исследуемый узел).

Постановка задачи сформулирована следующим образом: найти один выполняющий набор (или установить, что такого набора нет) на каждом из решателей для выбранных 240 булевых моделей при ограничении времени счета каждой 30 минутами.

В табл. 1 приведены характеристики эталонного и исследуемого узлов и значения, полученные экспериментальным путем, а также коэффициент ускорения производительности компонентов исследуемого узла.

Таблица 1. Производительность компонентов эталонного и исследуемого узла

Характеристики компонентов узла	Значения характеристик компонентов эталонного узла ( $n_1$ )	Значения характеристик компонентов исследуемого узла ( $n_2$ )	Коэффициент ускорения
Процессор, опер. с целыми числами	7726 MIPS	7710 MIPS	1
Процессор, опер. с веществ. числами	4471 Mflops	4410 Mflops	0,99
Кэш L1, латентность*	1,4 нс	1,1 нс	1,27
Кэш L1, пропускная способность	22300 Mb/s	22106 Mb/s	0,99
Кэш L2, латентность*	8 нс	5 нс	1,6
Кэш L2, пропускная способность	12800 Mb/s	11968 Mb/s	0,94
Память, латентность*	22 нс	39 нс	0,56
Память, пропускная способность	4471 Mb/s	3477 Mb/s	0,78
Жесткий диск, произвольный доступ	22 ms	20 ms	0,91
Жесткий диск, скорость чтения	52 Mb/s	49 Mb/s	0,94
Жесткий диск, скорость записи	32 Mb/s	30 Mb/s	0,94
Сеть, потребность в выч. мощности	20%	20%	1
Сеть, латентность*	16 ms	16 ms	1
Сеть, пропускная способность	4471 Kb/s	4471 Kb/s	1

Коэффициент ускорения рассчитывается как отношение значений характеристик компонентов исследуемого узла к значениям характеристик компонентов эталонного узла. Элементы, помеченные знаком «\*», рассчитываются в обратном соотношении.

Спецификации модулей  $m_1$  и  $m_2$ , полученные в ходе динамического анализа на эталонном узле, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Спецификация модулей  $m_1$  и  $m_2$

Параметр спецификации модуля	Модуль $m_1$	Модуль $m_2$
CPU_CLK_UNHALTED.CORE	3 082 428 099 668	4 005 158 239 725
INST_RETIRED.ANY	1 072 275 919 359	1 408 859 794 649
L1I_MISSES	40 329 413 833	87 397 645 506
L1D_CACHE_LD.MESI	320 967 117 799	505 189 980 716
L1D_CACHE_ST.MESI	231 959 667 895	388 209 800 016
L2_RQSTS.SELF.ANY.MESI	47 480 143 712	50 758 606 661
L2_RQSTS.SELF.ANY.I_STATE	3 676 625 688	4 352 637 443
L2_LINES_IN.SELF.ANY	6 277 805 018	6 276 653 421
L2_IFETCH.SELF.I_STATE	10 022 453 722	11 295 008 315
HDD, общее количество байт	620 000	820 000
HDD, количество байт считано	340 000	401 000
HDD, количество байт записано	280 000	220 000
Вычислений с плавающей запятой	0%	0%

Исходное время работы модулей  $m_1$  и  $m_2$  на узле  $n_1$  при вычислении одной из булевых моделей:

$$T(m_1, n_1) = 1062,9 \text{ сек}, T(m_2, n_1) = 1292,1 \text{ сек.}$$

Определен вклад каждого из элементов узла  $n_1$  в общее время работы модулей  $m_1$  и  $m_2$ :

$T_P(m_1, n_1) = 403,44$  сек,  $T_M(m_1, n_1) = 658,40$  сек,  $T_N(m_1, n_1) = 0,14$  сек,  $T_D(m_1, n_1) = 0,015$  сек;  
 $T_P(m_2, n_1) = 413,44$  сек,  $T_M(m_2, n_1) = 878,78$  сек,  $T_N(m_2, n_1) = 0,18$  сек,  $T_D(m_2, n_1) = 0,015$  сек.

Размер кэшей L1 и L2 на узле  $n_2$  вдвое меньше, чем на узле  $n_1$ . Поэтому количество промахов увеличится в  $k = \sqrt{2}$  раз для обеих кэшей<sup>8</sup>. Учитывая коэффициент ускорения производительности компонентов исследуемого узла, найдем время работы его компонентов:

$T_P(m_1, n_1) = 402,60$  сек,  $T_M(m_1, n_1) = 1024,11$  сек,  $T_N(m_1, n_1) = 0,14$  сек,  $T_D(m_1, n_1) = 0,015$  сек;  
 $T_P(m_2, n_1) = 412,16$  сек,  $T_M(m_2, n_1) = 1370,90$  сек,  $T_N(m_2, n_1) = 0,18$  сек,  $T_D(m_2, n_1) = 0,015$  сек.

Вычислим умножающий коэффициент, получаемый при переносе модулей  $m_1$  и  $m_2$  с узла  $n_1$  на узел  $n_2$ :

$A(m_1, n_1, n_2) = T(m_1, n_2) / T(m_1, n_1) = 1,34$ ;  $A(m_2, n_1, n_2) = T(m_2, n_2) / T(m_2, n_1) = 1,37$ .

Результаты проведения эксперимента для решения 240 булевых моделей приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнение результатов прогноза и реального эксперимента

Эксперимент	Модуль $m_1$	Модуль $m_2$
Исходное время решения задач на узле $n_1$ (суммарное)	244 608 сек	291 288 сек
Прогнозируемое время решения задач на узле $n_2$ (суммарное)	328 648 сек	401 952 сек
Реальное время решения задач на узле $n_2$ (суммарное)	300 864 сек	463 680 сек
Погрешность	9,2%	13,3%

На рис. 5 изображены показатели погрешностей прогнозов для модулей  $m_1$  и  $m_2$ , значения которых отображены треугольниками и квадратами, соответственно. Объем выборки для каждого модуля составил 20 прогнозов. Соответствующие графики трендов построены по степенным уравнениям регрессии.

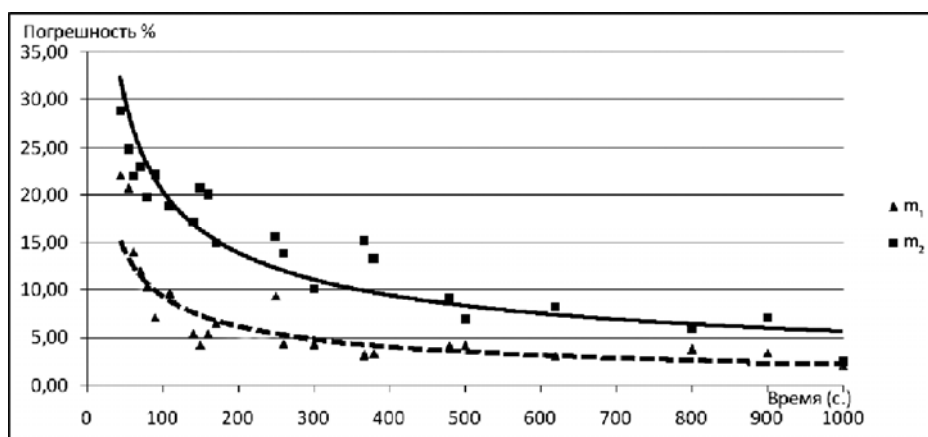


Рис. 5. Погрешность прогнозирования времени решения задач

В третьем разделе описан вычислительный эксперимент<sup>9</sup> по моделированию работы КСМП для решения СБУ продолжительностью 1 год. Цель экспери-

<sup>8</sup> См., например, работу Hartstein A. Cache miss behavior: is it  $\sqrt{2}$  / A. Hartstein, V. Srinivasan, T.R. Puzak, P.G. Emma // Proceedings of the 3rd conference on Computing frontiers. – USA: ACM, 2006. – P. 313-320.

<sup>9</sup> Планирование вычислительного эксперимента основано на методике, представленной в работе: Советов Б.Я. Моделирование систем. Пятое издание / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2007. – 344 с.

мента – определить выходные характеристики КСМП для решения СБУ. В качестве входных задач выбраны 2000 файлов булевых моделей, поступающих в систему в соответствии с равномерным законом распределения случайной величины в интервалах от 1 до 2 раз в сутки (вариант № 1), от 1 до 2 раз в час (вариант № 2) и от 2 до 5 раз в час (вариант № 3). Время решения каждой модели не более 30 минут. Каждый вариант включает в себя три плана решения задачи. Вероятности выбора планов 1–3 заданы следующим образом:  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = 0,5$ ,  $p_3 = 0,5$ . Тип системы: восстанавливаемая система с рестартом. Максимальное количество последовательных восстановлений на каждый модуль: 2. Интервал между восстановлениями: 12 часов. Общее время моделирования системы: 1 год. Количество экспериментов с моделью: 1000. Результаты показаны в табл. 4.

Таблица 4. Результаты моделирования КСМП для решения СБУ

Показатель	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Среднее $z$	538,36	13358,12	26470,00
Среднее $z_{df}$	8,41	244,18	488,36
Среднее $z_{cr}$	0	0	20,6
Среднее $T_e$	490 сек	490 сек	490 сек
Среднее $T_q$	675 сек	790 сек	797 сек
Максимальная длина очереди	3	48	112
$K_t$	0,73	0,62	0,61
$K_v$	1	1	0,96
$K_p$	1	1	0,99
Среднее количество отказов	6,2	6,2	6,2

Результаты эксперимента показывают, что при увеличении числа поступивших задач  $z$  число задач с отказами вычислительных ресурсов  $z_{df}$  увеличивается. При высокоинтенсивном поступлении задач (вариант № 3) исследуемая система не справляется с потоком задач, коэффициент восстанавливаемости процесса решения задачи  $K_v$  падает до 0,96 и среднее количество нерешенных задач достигает 20,6.

В четвертом разделе главы выполнен сравнительный анализ локального и распределенного процессов моделирования. Рассмотрена задача моделирования использования основных ресурсов узла вычислительного кластера (процессорного времени CPU и места на жестком диске HDD). Определены интенсивности обмена между сегментами, при которых применение средств и методов распределенного моделирования повышает производительность системы моделирования.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

**Приложения** включают исходные тексты алгоритмов функционирования модулей серверной и клиентской части коммуникационной библиотеки, исходные тексты имитационной модели на языке GPSS, пример экспериментальных данных о модулях КСМП для решения СБУ, а также другие дополнительные материалы.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложена технология анализа эффективности функционирования КСМП, базирующаяся на построении распределенной имитационной модели КСМП, которая обеспечивает (в отличие от известных) детальный учет как характеристик предметной области, так и особенностей программно-аппаратной архитектуры КСМП.

2. Разработана коммуникационная библиотека распределенного имитационного моделирования для систем семейства GPSS, включающая методы синхронизации времени, обмена данными и создания КТ. Реализованная библиотека применяется для разработки распределенных GPSS-моделей, предназначенных как для использования в составе ИК СИРИУС, так и для проведения независимых экспериментов.

3. Реализован ИК СИРИУС, обеспечивающий поддержку основных этапов анализа КСМП, включая графическое описание предметной области и программно-аппаратной архитектуры КСМП, а также автоматизацию построения и выполнения на вычислительных кластерах распределенных имитационных GPSS-моделей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Александров А.А. Коммуникационная библиотека для построения распределенной модели системы массового обслуживания / А.А. Александров // Вестник ТГУ. Приложение. – 2006. – № 18. – С. 258-261.
2. Опарин Г.А. Графическая инструментальная среда для описания модели распределенной вычислительной системы / Г.А. Опарин, А.Г. Феоктистов, А.А. Александров // Вестник ИрГТУ. – 2006. – Т. 3. – № 2 (26). – С. 35-40.
3. Александров А.А., Феоктистов А.Г., Дмитриев В.И. Распределенная имитационная модель вычислительного кластера: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009610134. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2009.
4. Александров А.А., Феоктистов А.Г. Коммуникационная библиотека для распределенного моделирования (КБРМ): Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007611626. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2007.
5. Александров А.А. Организация распределенного имитационного моделирования / А.А. Александров // Математическое моделирование и информационные технологии: Материалы VII Школы-семинара молодых ученых. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2005. – С. 6.
6. Александров А.А. Создание контрольных точек при моделировании в системе GPSS World / А.А. Александров // Математическое моделирование и информационные технологии: Материалы VIII Школы-семинара молодых ученых. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2006. – С. 10-13.
7. Инструментальные средства организации распределенных вычислений на кластерах невыделенных рабочих станций / Феоктистов А.Г., Александров

- А.А., Корсуков А.С., Ларина А.В. // Ляпуновские чтения: Материалы конф. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2007. – С. 37.
8. Феокистов А.Г. Обеспечение надежности распределенной вычислительной среды имитационного моделирования / А.Г. Феокистов, А.А. Александров // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2006. – Ч. 5. – С. 25-28.
  9. Феокистов А.Г. Организация распределенного имитационного моделирования в GRID-системе / А.Г. Феокистов, А.А. Александров, А.С. Корсуков // Параллельные вычислительные технологии: Тр. I Междунар. науч.-практ. конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – Т. 2. – С. 28-36.
  10. Феокистов А.Г. Оценка эффективности декомпозиции GPSS-моделей в распределенной вычислительной среде / А.Г. Феокистов, А.А. Александров, А.В. Ларина // Идентификация систем и задачи управления: Тр. VI Междунар. конф. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2007. – С. 771-775.
  11. Феокистов А.Г. Применение HLA для организации распределенной среды имитационного моделирования / А.Г. Феокистов, А.А. Александров // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Тр. XII Байкальской Всерос. конф. «Информационные и математические технологии в науке и управлении». – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2007. – Ч. 2. – С. 26-33.
  12. Феокистов А.Г. Распределенное имитационное моделирование в САТУРН-среде / А.Г. Феокистов, А.А. Александров // Ляпуновские чтения: Материалы конф. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2004. – С. 42.
  13. Феокистов А.Г. Распределенное имитационное моделирование вычислений в САТУРН-среде на основе системы взаимодействующих агентов / А.Г. Феокистов, А.А. Александров // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Новочеркасск: Изд-во ЮРГТУ, 2005. – Ч. 3. – С. 28-32.
  14. Феокистов А.Г. Распределенное имитационное моделирование систем модульного программирования / А.Г. Феокистов, А.А. Александров // Математическое моделирование и информационные технологии: Материалы VI Школы-семинара молодых ученых. – Иркутск: ИДСТУ СО РАН, 2005. – С. 38-39.
  15. Феокистов А.Г. Средства выполнения распределенной GPSS – модели на вычислительном кластере / А.Г. Феокистов, А.А. Александров, А.С. Корсуков // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы: Материалы II Всерос. конф. с междунар. участием. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского университета, 2006. – Т. 2. – С. 166-173.

Редакционно-издательский отдел  
Института динамики систем и теории управления СО РАН  
664033, Иркутск, Лермонтова, 134  
Подписано к печати 10.08.2009 г.  
Формат бумаги 60×84 1/16, объем 1 п.л.  
Заказ № 2. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в ИДСТУ СО РАН

