

Инструментальный комплекс имитационного моделирования разнородной распределенной вычислительной среды

Ю. А. Дядькин*, Е. С. ФЕРЕФЕРОВ

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Россия

*Контактный e-mail: dyadkin_ua@inbox.ru

Цель работы состоит в разработке инструментального комплекса для исследования проблемно-ориентированной распределенной вычислительной среды с использованием методов автоматизации построения имитационных моделей и проведения многовариантных расчетов. Важным компонентом инструментального комплекса является подсистема спецификации модели, предназначенная для создания и применения агрегированных многоуровневых моделей проблемно-ориентированных распределенных вычислительных сред пользователями различных категорий, а именно разработчиками моделей и конечными пользователями. Построение моделей осуществляется с высокой степенью привязки к предметной области.

В статье рассматриваются: свойства распределенной вычислительной среды, архитектура инструментального комплекса, язык спецификации модели, транслятор языка спецификации модели, программная система для динамического построения графического интерфейса пользователя. Приводится пример построения модели сети передачи данных распределенной вычислительной среды.

Ключевые слова: распределенная вычислительная среда, имитационное моделирование, инструментальный комплекс, интерфейс пользователя.

Введение

Сегодня особое внимание специалистов в области облачных инфраструктур и Grid-систем [1–3] уделяется развитию фундаментальных основ организации распределенных вычислений при решении крупномасштабных научных задач в различных предметных областях, а также разработке новых методов и алгоритмов управления вычислениями в разнородной вычислительной среде (РВС), узлы которой (кластеры) имеют сложную гибридную структуру.

Разнородность РВС, наличие в их составе гибридных узлов, широкий спектр решаемых задач и необходимость обеспечения масштабируемости вычислений актуализируют исследования, связанные с анализом эффективности и надежности вычислительных процессов. Традиционные средства управления распределенными вычислениями [4–6] и мониторинга ресурсов [7–9], используемые в РВС, не позволяют качественно

проводить такие исследования. В этом случае требуется разработка специальных инструментальных средств, обеспечивающих возможность исследования эффективности и надежности функционирования разнородных проблемно-ориентированных PBC.

Существует широкий спектр программных средств исследования процессов функционирования PBC [10]. В зависимости от способа воспроизведения процессов функционирования PBC эти средства делятся на два класса: эмуляторы и симуляторы. Эмулятор — это средство воспроизведения поведения реального устройства или программы в режиме реального времени [11]. Симулятор — это программное обеспечение, позволяющее моделировать реальные системы, отображая часть реальных явлений и свойств в виртуальной среде [12]. Другими словами, эмулятор заменяет свойства и функции оригинала, выполняя реальную работу, а симулятор лишь моделирует эти свойства и функции без реального функционирования.

К симуляторам PBC относятся, например, OptorSim [13], GridSim [14], Bricks [15] и CloudSim [16]. Эти системы дают возможность получить статистические данные о наиболее важных характеристиках моделируемой среды: использовании дисковых ресурсов, пропускной способности каналов, вероятности потерь данных и других свойствах процессов функционирования PBC. Системы имеют разные особенности и возможности для моделирования PBC.

Пакет моделирования OptorSim реализован на языке Java. Он позволяет оценивать различные алгоритмы оптимизации и стратегии обработки данных. Одним из достоинств пакета является наличие графического интерфейса для визуального отображения модели. Статистика в пакете OptorSim представлена как по каждому элементу в отдельности, так и по работе модели. Отчетная информация доступна в виде таблиц, графиков и диаграмм.

Система GridSim обеспечивает возможность моделирования поведения пользователей PBC, вычислительных ресурсов и брокеров ресурсов (планировщиков). С помощью этой системы можно проводить эксперименты, которые сложно реализовать в реальном окружении PBC. Основные возможности системы GridSim: моделирование характеристик ресурсов PBC, моделирование политик планирования задач на узлах вычислительных кластеров, использование данных о загрузке реальных кластеров для проведения экспериментов, поддержка механизма аукциона для планирования задач, моделирование конфигураций PBC для различных коммуникационных топологий.

Система моделирования Bricks предназначена для исследования клиент-серверной архитектуры как глобальной вычислительной системы. В этой системе предполагается централизованное глобальное планирование вычислений. Создатели системы руководствовались идеей, что в рамках PBC основу составляют пользователи, запускающие свои задания на общие ресурсы по сети.

Инструментарий CloudSim используется для имитационного моделирования облачных инфраструктур и сервисов.

В качестве примеров эмуляторов можно привести системы MicroGrid [17], Grid eXplorer [18] и AGNES [19].

Система MicroGrid представляет собой виртуальную инфраструктуру PBC, которая позволяет исследовать управление динамическими ресурсами и адаптивными приложениями с помощью итерационных вычислительных экспериментов. Система MicroGrid поддерживает взаимодействие с пакетом Globus Toolkit [20], обеспечивает эксперименты с реальными моделями PBC, поэтому может быть использована для изучения широкого спектра конфигураций ресурсов PBC и сценариев их использования.

Система Grid eXplorer предназначена для крупномасштабной эмуляции РВС. Этот эмулятор имеет базу данных, включающую экспериментальные режимы функционирования кластера, состоящего из тысяч персональных компьютеров, а также инструменты для контроля и анализа экспериментов.

Система AGNES реализована на основе инструментария Java Agent Development framework (JADE) [21] и воплощает мультиагентный подход к моделированию РВС. Данная система включает агенты создания и управления средой и функциональные агенты. В качестве атомарной, независимой частицы в модели вычислений выбран вычислительный узел и исполняемый на нем код алгоритма. Функциональные агенты эмулируют поведение вычислительных узлов кластера и приложений, выполняющихся в узлах. Вычисления представляются в виде набора примитивных операций (вычисление на ядре; запись/чтение данных в память; парный обмен данными; синхронизация данных между вычислителями) и временных характеристик каждой операции.

Ряд программных средств исследования процессов функционирования РВС ориентирован на получение оценок эффективности функционирования систем управления вычислениями на основе информации о вычислительной нагрузке ресурсов РВС, определяемой потоками заданий. Вычислительная история эмуляции, имитации или реального выполнения потоков заданий на кластерах, суперкомпьютерах или в вычислительных сетях сохраняется в виде архивов данных [21–23]. Информация о потоках специфицируется на основе стандартизированного формата Standard Workload Format (SWF) [24].

Современные симуляторы и эмуляторы ориентированы на проведение вычислительных экспериментов на основе парадигм параллельных и распределенных вычислений [25, 26]. Особенно актуально применение высокопроизводительных вычислений для анализа моделей РВС реального времени, размеры и сложность которых требуют проведения крупномасштабных ресурсоемких вычислений. В рамках этого направления исследований разработана среда моделирования ДИАНА-2012, обеспечивающая использование формальной модели функционирования и анализ различных аспектов поведения исследуемой РВС [27].

Однако есть ряд существенных недостатков, осложняющих применение рассмотренных выше средств для моделирования проблемно-ориентированных РВС. В их числе: отсутствие поддержки концептуального моделирования и, как следствие, невозможность учета специфики проблемных областей решаемых задач; слабая типизация заданий — не обеспечивается необходимая детализация вычислительных характеристик моделируемых процессов решения задач в различных проблемно-ориентированных программных комплексах (требуемая детализация заданий не обеспечивается в том числе и в стандартизированных форматах описания потоков заданий); реализация только одного отдельно взятого вида моделирования; отсутствие компонентов для автоматической настройки стандартизированных средств управления вычислениями в РВС на основе полученных результатов моделирования. Кроме того, рассмотренные средства моделирования РВС ориентированы на исследование отдельных аспектов функционирования РВС, а их комплексное применение осложняется необходимостью унификации и интерпретации данных, представленных в различных форматах, и отсутствием единого пользовательского интерфейса.

В данной работе рассматривается подход к разработке инструментального комплекса для спецификации агрегированных многоуровневых моделей РВС, обеспечивающего детальное описание всех аспектов решения задач в этих средах. Языковые средства спе-

цификации модели, разрабатываемые в рамках данного подхода, являются развитием исследований, представленных в [28, 29].

1. Проблемно-ориентированная распределенная вычислительная среда

Проблемно-ориентированные РВС предназначены для решения крупномасштабных фундаментальных и прикладных вычислительных задач и характеризуются рядом особенностей, представленных ниже.

В качестве узлов системы выступают вычислительные кластеры. Кластеры могут состоять из типовых программно-аппаратных компонентов (вычислительных элементов) разной архитектуры и конфигурации, поддерживающих различные технологии параллельного программирования.

На разных уровнях интеграции системы работают различные категории пользователей. Вычислительные кластеры используются как глобальными пользователями системы, так и локальными пользователями этих кластеров.

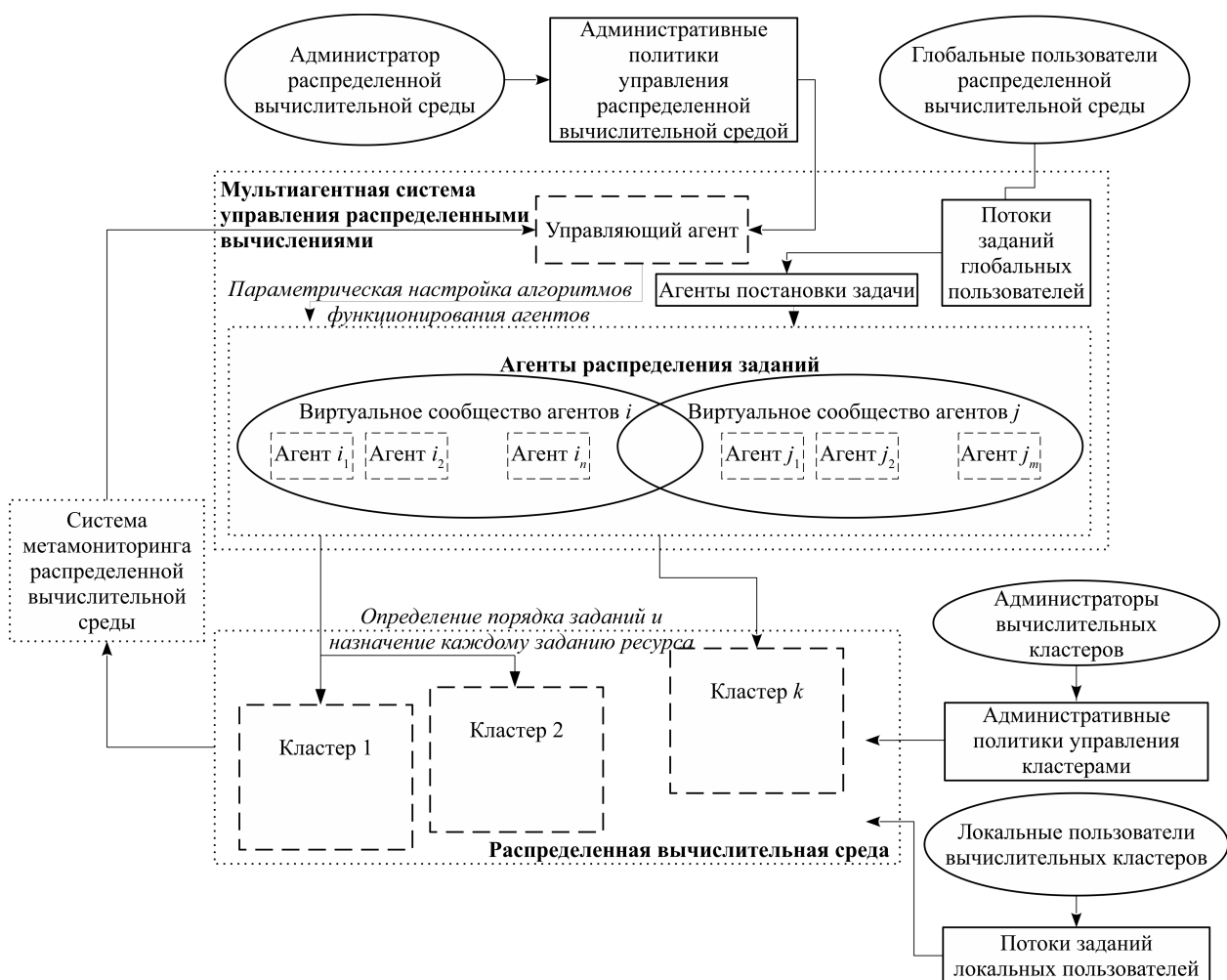


Рис. 1. Схема функционирования РВС

Для решения задачи пользователь должен сформировать задание системе. Задание представляет собой спецификацию процесса решения задач, содержащую информацию о требуемых вычислительных ресурсах, исполняемых прикладных программах, входных/выходных данных, а также другие необходимые сведения.

Специализированная мультиагентная система (МАС) для управления распределенными вычислениями используется при формулировании постановок задач, планировании схем решения задач и формировании заданий глобальных пользователей. Сформированные задания декомпозируются МАС в набор подзадач для кластеров. Эти подзадания и задания локальных пользователей управляются традиционными локальными менеджерами ресурсов на уровне кластера. Агенты МАС наблюдают за процессами выполнения подзаданий.

Свободных ресурсов кластеров недостаточно для одновременного обслуживания всех заданий, находящихся в очередях.

На рис. 1 представлена схема функционирования проблемно-ориентированной РВС [30]. Основными элементами схемы являются: вычислительные кластеры, администраторы и пользователи среды, потоки заданий, МАС для управления потоками заданий глобальных пользователей, система мониторинга РВС.

Иерархическая структура МАС может включать несколько уровней функционирования агентов. На каждом уровне могут функционировать агенты, играющие различные роли и соответственно выполняющие различные функции. Роли агентов могут быть постоянными и временными, возникающими в дискретные моменты времени в связи необходимостью организации коллективного взаимодействия. Уровни иерархии агентов отличаются объемом знаний агентов — агенты более высокого уровня иерархии обладают большим объемом знаний по сравнению с агентами более низкого уровня иерархии и, кроме того, могут обращаться к агентам любого ниже лежащего уровня с запросом на получение локальных знаний этих агентов. На каждом уровне иерархии агенты могут объединяться в виртуальные сообщества, кооперироваться и конкурировать в рамках этих сообществ.

2. Инструментальный комплекс имитационного моделирования

Для имитационного моделирования систем такого рода в ИДСТУ СО РАН разрабатывается специализированный инструментальный комплекс SIRIUS II, архитектура которого представлена на рис. 2.

Подсистема спецификации модели обеспечивает: описание имитационной модели с высокой степенью привязки к конкретной предметной области, трансляцию данного описания в термины языка SQL для получения файла базы данных, автоматическое построение пользовательского графического интерфейса для взаимодействия пользователей различных категорий с инструментальным комплексом и наполнения специфицированной модели реальными данными. Построение пользовательского графического интерфейса для подсистемы спецификации модели осуществляется с помощью системы ГеоАРМ [31, 32].

Пользовательский интерфейс обеспечивает работу с различными категориями пользователей: разработчиками моделей и конечными пользователями моделей.

Разработчик модели описывает имитационную модель на специальном языке. Затем модель транслируется в термины языка SQL. Описание модели на языке SQL передается системе ГеоАРМ для построения графического пользовательского интерфейса,

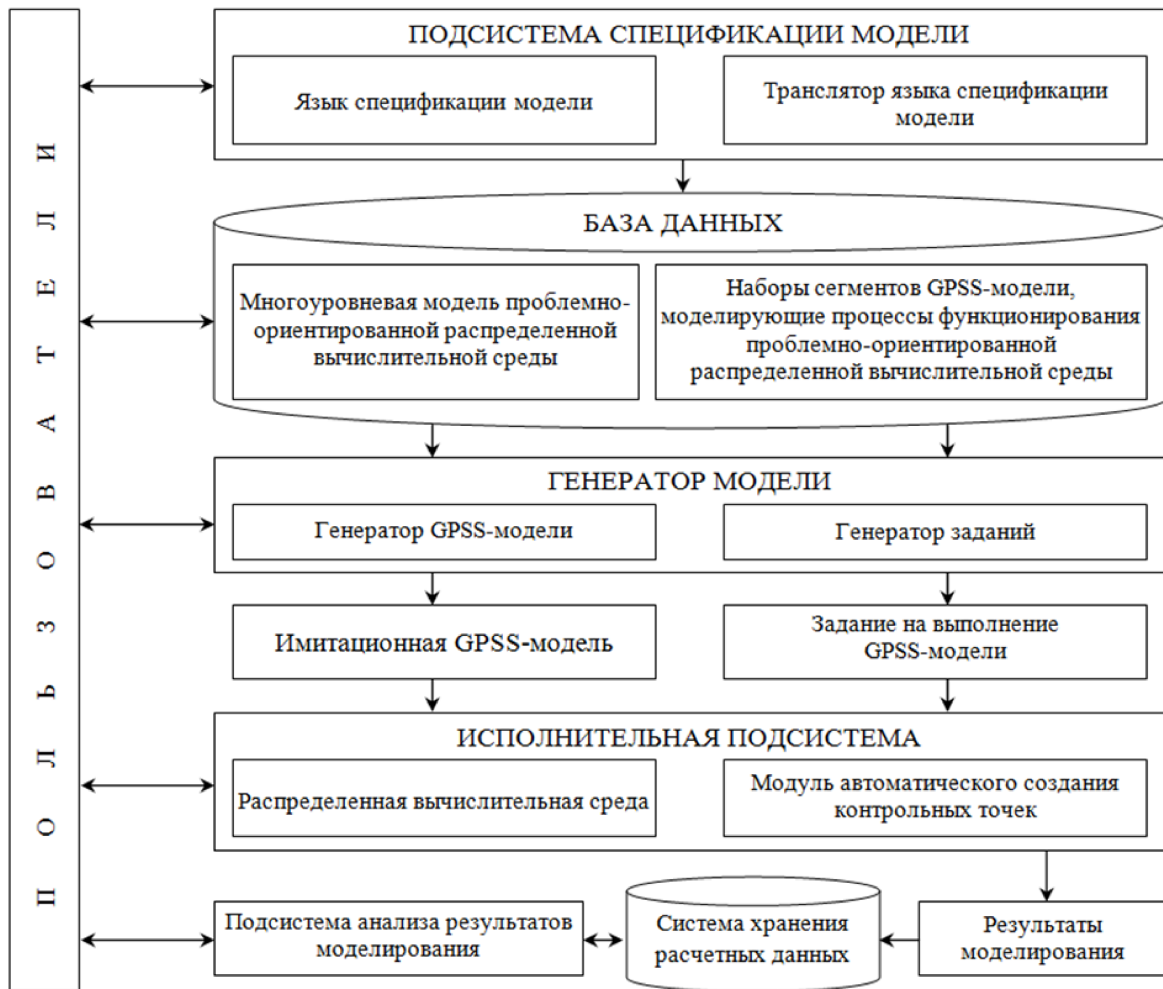


Рис. 2. Архитектура инструментального комплекса

после чего разработчик модели может наполнять ее необходимыми данными. Совокупность описаний (библиотека) имитационных моделей хранится в специальной базе данных (БД). Эта технология предполагает создание библиотеки моделей, которые впоследствии могут быть использованы другими специалистами предметной области для создания своих моделей. Существует возможность импорта данных из уже готовых моделей, обеспечивающая комплексирование по данным.

Язык спецификации модели предназначен для описания модели РВС. Он включает в себя набор базисных символов (символы входного алфавита, константы, имена операторов, специальные символы) и множество операторов. Операторы специфицируют операции создания, изменения и удаления элементов модели, а также задания отношений между этими элементами.

Разработка специализированного языка спецификации модели обусловлена тем, что описание такой модели с помощью языков аналогичного назначения [33], например языка Resource Description Framework (RDF), в 2–2.5 раза превышает объем текста модели рассматриваемого языка.

Генератор модели предназначен для автоматизации построения имитационной модели на языке GPSS [34] на основе каркасного подхода с использованием библиотеки готовых программных фрагментов, моделирующих процессы функционирования РВС.

Исполнительная подсистема обеспечивает параллельное проведение многовариантных имитационных расчетов на основе созданных моделей с поддержкой механизмов контрольных точек.

Подсистема анализа результатов моделирования использует традиционные для GPSS-моделей средства факторного и регрессионного анализа данных [34], а также реализует различные механизмы многокритериального выбора значений наблюдаемых переменных модели [35].

Ниже приведен пример применения инструментального комплекса для имитационного моделирования сети передачи данных (СПД) РВС.

3. Постановка задачи

Алгоритмы функционирования агентов МАС базируются на активном использовании системы передачи сообщений. Таким образом, во-первых, эффективность работы этих алгоритмов зависит от надежности функционирования СПД, и, во-вторых, алгоритмы, реализующие различные методы взаимодействия, показывают неодинаковую эффективность при одних и тех же характеристиках СПД. Постановку задачи моделирования функционирования СПД в общем случае можно представить следующим образом:

$$S = \langle n_y, n_c, n_a, D, t_c, t_w, t_0, t_1, t_2, t_3, k, \tau \rightarrow s, n, \nu, t_{avg} \rangle.$$

Здесь исходными данными являются: n_y — число узлов РВС, n_c — число концентраторов, n_a — число агентов, D — вероятностное распределение потока сообщений, t_c — задержка очередного сообщения на концентраторе, t_w — пауза на узле при коллизии, t_0 — время ожидания ответа узлом-отправителем, t_1 — время на передачу одного бита кадра, t_2 — выдержка перед выдачей кадра на узле, t_3 — время на передачу специальной jam-последовательности (особой последовательности из 32 бит, служащей для усиления ситуации коллизии) при возникновении коллизии, k — число попыток передачи сообщения при возникновении коллизии, τ — моделируемый промежуток времени передачи сообщений между агентами МАС.

Необходимо оценить надежность СПД с точки зрения безошибочной доставки сообщений между агентами МАС и определить: s — число передаваемых сообщений; m — число полученных ответов; ν — число коллизий, возникших в сети при передаче сообщений; t_{avg} — среднее время завершения группового обмена сообщениями при выполнении одной операции коллективного взаимодействия.

4. Описание модели

При описании модели на языке ее спецификации выделяются объекты предметной области, которые будут участвовать в модели: узлы сети (объект NODES); концентраторы, к которым подключены узлы (объект HUBS); подключение концентраторов между собой (объект HUB2HUB); подключение узлов к концентраторам (объект NODESHUB). Фрагмент текста модели на языке ее спецификации приведен на рис. 3.

Полученное описание транслируется в термины языка SQL, после чего передается системе ГеоАРМ. Данная система решает задачу автоматического размещения визуальных компонентов пользовательских интерфейсов прикладных программных систем,

```

new model 'C:\project\network';
create object NODES(ID_NODE INTEGER NOT NULL, NODE_NAME VARCHAR(20) NOT NULL);
create object HUBS(ID_HUB INTEGER NOT NULL, PORT_COUNT INTEGER NOT NULL);
create object HUB2HUB(HUB_NUM_IN INTEGER NOT NULL, HUB_NUM_OUT INTEGER NOT NULL);
create object NODESHUB(ID_HUB INTEGER NOT NULL, ID_NODE INTEGER NOT NULL);
change object NODES setPK(ID_NODE);
change object HUBS setPK(ID_HUB);
change object HUB2HUB setUNIQUE(HUB_NUM_IN,HUB_NUM_OUT);
change object NODESHUB setUNIQUE(ID_HUB, ID_NODE);
change object HUB2HUB setFK(HUB_NUM_IN) REF HUBS(ID_HUB);
change object HUB2HUB setFK(HUB_NUM_OUT) REF HUBS(ID_HUB);
change object NODESHUB setFK(ID_HUB) REF HUBS(ID_HUB);
change object NODESHUB setFK(ID_NODE) REF NODES(ID_NODE);

```

Рис. 3. Фрагмент текста модели на языке ее спецификации

обеспечивающих доступ к базам данных. Управление размещением компонентов позволяет более эффективно использовать пространство формы, а также автоматически адаптировать пользовательский интерфейс под различные разрешения мониторов. Менеджеры компоновки [36] (отвечающие за размещение компонентов на форме), реализованные в системе ГеоАРМ, получают из спецификаций приложений баз данных информацию о составе и взаимосвязи полей таблиц базы данных. Расстановка элементов управления на форме происходит по алгоритму, реализуемому выбранным менеджером с использованием выбора размера поля (вычисляется по определенному для каждого типа поля алгоритму) и с применением алгоритма оценки веса (важности) элемента управления формы. Менеджер компоует интерфейс так, чтобы пользователю были видны все необходимые данные из таблицы (если это возможно), при этом данные были читабельными. Система ГеоАРМ обеспечивает пользователя возможностью наполнения модели данными.

Использование системы ГеоАРМ для формирования пользовательского интерфейса в сравнении с другими средствами (например, системы управления базами данных MS Access) дает значительное преимущество, так как у разработчика отсутствует необходимость в разработке форм в ручном режиме и последующей их доработке (рис. 4).

При обработке файла БД системой ГеоАРМ построен графический пользовательский интерфейс, представленный на рис. 5.

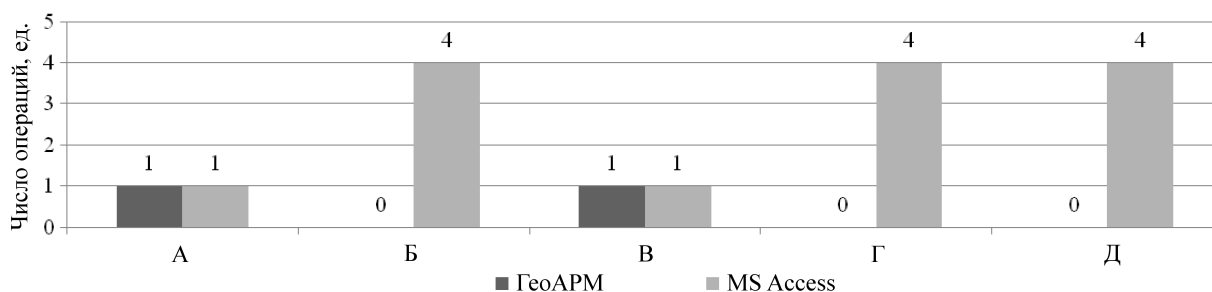


Рис. 4. Сравнение разработки пользовательского интерфейса в ГеоАРМ и MS Access по числу операций для каждого этапа работы: А — создание подключения к БД; Б — уточнение простых связей между таблицами БД; В — уточнение детализирующих связей между таблицами БД; Г — разработка форм; Д — доработка форм

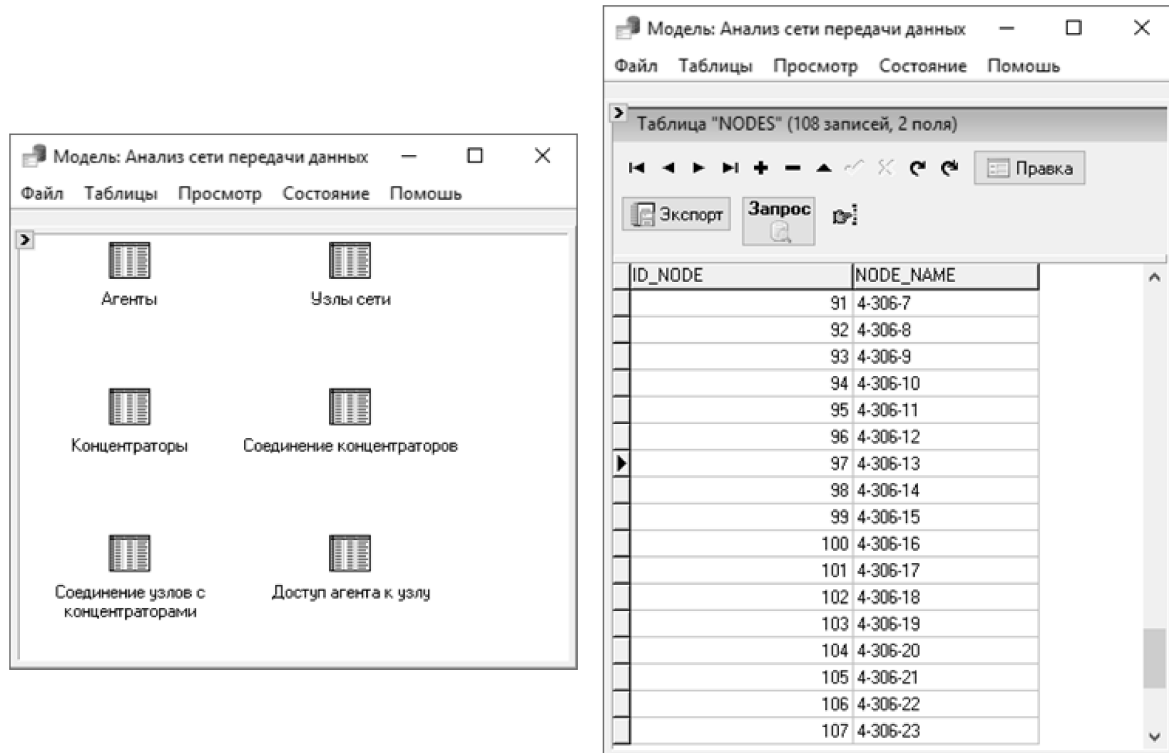


Рис. 5. Графический пользовательский интерфейс

На основе специфицированной модели РВС строится имитационная модель на языке GPSS. В инструментальном комплексе применяется каркасный подход к построению имитационных моделей. В рамках этого подхода в качестве модулей используются фрагменты имитационной модели (модули), представляющие процессы функционирования объектов исследуемой системы. При каркасном подходе любая формируемая из модулей пакета версия программы включает два компонента: постоянный компонент — каркас, не меняющийся от версии к версии и несущий в себе гнезда для размещения сменных модулей, и переменный — содержимое гнезд каркаса. Все многообразие формируемых версий достигается только за счет варьирования содержимого гнезд в разнообразных комбинациях.

Использование модульного подхода обеспечивает достаточно гибкую модификацию и “безболезненное” развитие математического и программного базиса для моделирования исследуемой РВС посредством добавления или замены модулей этого базиса новыми модулями, в том числе модулями уже разработанных библиотек шаблонов типовых объектов исследуемых РВС.

5. Вычислительные эксперименты

Первый вычислительный эксперимент проведен с целью оценки надежности СПД на основе технологии Ethernet. При проведении эксперимента входные переменные принимали следующие значения: $n_y = 106$, $n_c = 7$, $n_a = 50$, D — экспоненциальный закон распределения времени между пересылаемыми сообщениями, $t_c = 0.19$ мс, $t_w = 51.2$ мкс, $t_0 = 10$ с, $t_1 = 0.1$ мкс, $t_2 = 9.6$ мкс, $t_3 = 0.32$ мс, $k = 16$ мс, период моделирования $\tau = 1-7$ сут.

Результаты эксперимента представлены на рис. 6. Число коллизий, возникающих при пересылке сообщений между агентами в СПД, очень мало и не превышает 0.005 % от общего числа пересылаемых сообщений. Поэтому надежность СПД с заданными характеристиками с точки зрения доставки сообщений между агентами достаточно высока.

Во втором вычислительном эксперименте исследовались два разных алгоритма коллективного взаимодействия агентов. Первый алгоритм [37] реализует совмещение процессов выбора координатора агентом и проведения торгов по распределению вычислительных работ в РВС в рамках одной операции коллективного взаимодействия. Второй алгоритм осуществляет последовательное применение двух известных алгоритмов [38, 39], реализующих эти процессы в рамках такой же операции. При проведении эксперимента входные переменные принимали следующие значения: $n_y = 106$, $n_c = 7$, число агентов, участвующих в обмене, $n_a = \{10, 25, 40\}$, D — нормальный закон распределения времени между пересылаемыми сообщениями, $t_c = 0.19$ мс, $t_w = 51.2$ мкс, $t_0 = 10$ с, $t_1 = 0.1$ мкс, $t_2 = 9.6$ мкс, $t_3 = 0.32$ мс, $k = 16$ мс, $\tau = 1$ сут.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 7, показывают, что второй алгоритм уступает первому по среднему времени t_{avg} завершения группового обмена сообщениями при выполнении одной операции коллективного взаимодействия.

Анализ различных способов проведения вычислительных экспериментов показывает, что использование представленных в статье средств автоматизации построения и применения имитационных моделей позволяет на порядок ускорить время решения задачи исследования процессов функционирования РВС по сравнению с применением традиционных универсальных систем имитационного моделирования. Адекватное

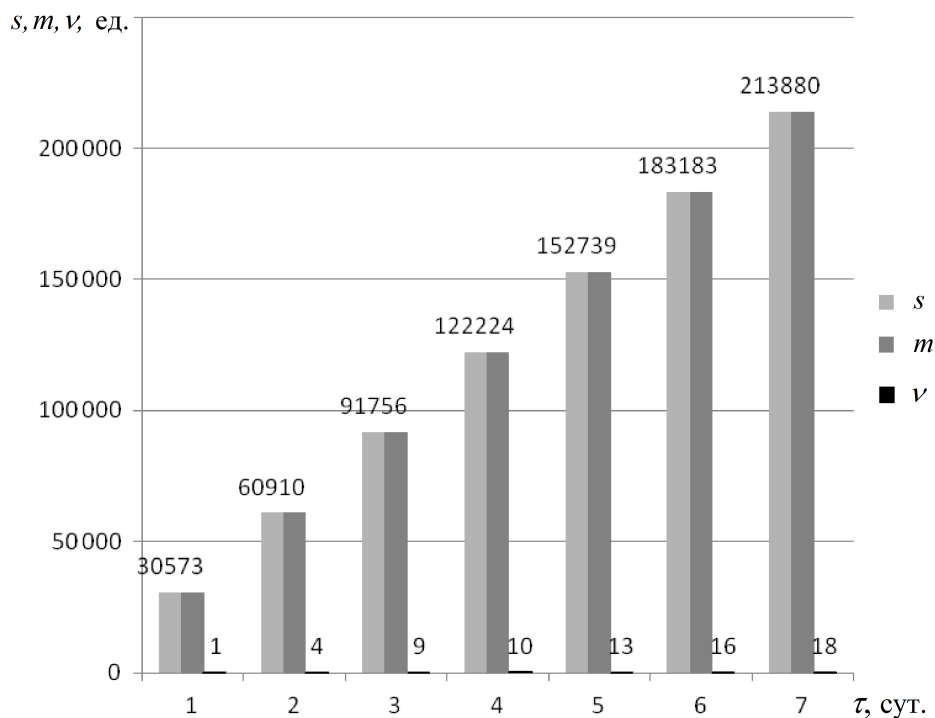


Рис. 6. Результаты первого вычислительного эксперимента: s — число передаваемых сообщений; m — число полученных ответов; ν — число коллизий, возникших в сети при передаче сообщений (1–18)

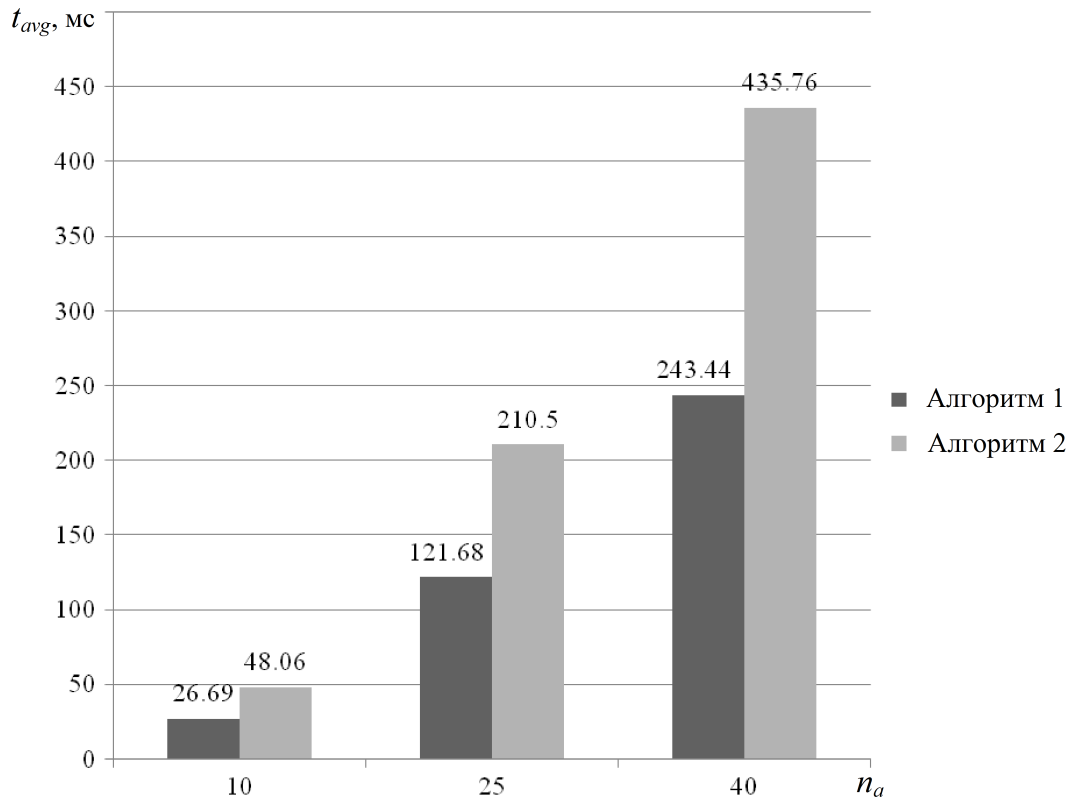


Рис. 7. Результаты второго вычислительного эксперимента

сравнение с другими специализированными инструментариями для имитационного моделирования провести достаточно сложно ввиду существенного их различия по функциональным возможностям.

Таким образом, рассмотрены свойства проблемно-ориентированных РВС, архитектура инструментального комплекса для исследования эффективности и надежности таких сред и язык спецификации моделей РВС. Данный инструментальный комплекс позволяет описывать имитационные модели РВС с высокой степенью привязки к предметной области. Важной особенностью рассмотренного инструментария является реализация в нем возможности автоматизированного описания и создания пользовательского интерфейса.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 15-29-07955-офи_м и 16-07-00931-а).

Список литературы / References

- [1] Бычков И.В., Корсуков А.С., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г. Инструментальный комплекс для организации гетерогенных распределенных вычислительных сред // Информационные технологии и вычислительные системы. 2010. № 1. С. 45–54.
 Bychkov, I.V., Korsukov, A.S., Oparin, G.A., Feoktistov, A.G. The toolkit for developing heterogenic distributed computing environments // Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy. 2010. № 1. P. 45–54. (In Russ.)

- [2] **Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Корсуков А.С.** Децентрализованное управление потоками заданий в интегрированной кластерной системе // Вест. НГУ. Информ. технологии. 2011. Т. 9, вып. 2. С. 42–54.
Buchkov, I.V., Oparin, G.A., Feoktistov, A.G., Korsukov, A.S. Decentralized job flow control in the integrated cluster system // NSU J. of Inform. Technologies. 2011. Vol. 9, iss. 2. P. 42–54. (In Russ.)
- [3] **Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Корсуков А.С.** Распределение заданий в интегрированной кластерной системе на основе их классификации // Вычисл. технологии. 2013. Т. 18, № 2. С. 25–32.
Buchkov, I.V., Oparin, G.A., Feoktistov, A.G., Korsukov, A.S. The distribution of jobs in the integrated cluster system on the basis of their classification // Comput. Technologies. 2013. Vol. 18, No. 2. P. 25–32. (In Russ.)
- [4] **Henderson, R.** Job scheduling under the portable batch system // Job Scheduling Strategies for Parallel Processing / Ed. Dror G. Feitelson. Berlin; Heidelberg: Springer, 1995. P. 279–294.
- [5] **Litzkow, M., Livny, M., Mutka, M.** Condor — a hunter of idle workstations // 8th Intern. Conf. of Distributed Computing Systems (ICDCS). Los Alamitos, CA, USA: IEEE CS Press, 1988. P. 104–111.
- [6] **Herrera, J., Huedo, E., Montero, R., Llorente, I.** Porting of scientific applications to grid computing on GridWay // Scientific Programming. 2005. Vol. 13, No. 4. P. 317–331.
- [7] **Massie, M., Li, B., Nicholes, V., Vuksan, V.** Monitoring with ganglia tracking dynamic host and application metrics at scale. O'Reilly Media, 2012. 256 p.
- [8] **Zanikolas, S., Sakellariou, R.** A taxonomy of Grid monitoring services // Future Generation Computer Systems. 2005. Vol. 21, No. 1. P. 163–188.
- [9] **Адинец А.В., Брызгалов П.А., Воеводин В.В.** Мониторинг, анализ и визуализация потока заданий на кластерной системе // Высокопроизвод. параллельные вычисления на кластерных системах: Матер. XI Всерос. конф. Нижний Новгород, 2011. С. 10–14.
Adinets, A.V., Bryzgalov, P.A., Voevodin, V.V. Monitoring, analysis and visualizing of tasks flow on cluster system // Parallel Computing on Cluster Systems: Proc. XI Intern. Conf. Nizhny Novgorod, Russia, Nov. 1–3, 2011. P. 10–14. (In Russ.)
- [10] **Самоваров О.И., Кузюрин Н.Н., Грушин Д.А., Аветисян А.И., Михайлов Г.М., Рогов Ю.П.** Проблемы моделирования GRID-систем и их реализации // Научный сервис в сети Интернет: решение больших задач: Тр. Всерос. науч. конф. М.: Изд-во МГУ, 2008. С. 83–88.
Samovarov, O.I., Kuzyurin, N.N., Grushin, D.A., Avetisyan, A.I., Mikhaylov, G.M., Rogov, Yu.P. The problem of Grid-system modelling and their implementation // Scientific Service on the Internet: Significant Tasks Solving. The Third All-Russian Conf. M.: Press MSU, 2008. P. 83–88. (In Russ.)
- [11] **Ковалев С.** Схемная эмуляция в основе системы графического программирования // Передовые технологии и технические решения. 2006. № 4. С. 16–20.
Kovalev, S. Circuit emulation as a basis of graphic programming environment // Advanced technology and technical solutions. 2006. No. 4. P. 16–20. (In Russ.)
- [12] **Емельянов А.** Симуляторы GPSS World и Actor Pilgrim: экономика и массовое обслуживание // Прикладная информатика. 2007. Vol. 9, № 3. С. 73–103.
Emel'ianov, A. GPSS World and Actor Pilgrim simulators: economics and queuing theory // Applied Informatics. 2007. Vol. 9, No. 3. P. 73–103. (In Russ.)
- [13] **Кореньков В.В., Нечаевский А.В.** Пакеты моделирования DATAGRID // Системный анализ в науке и образовании. 2009. № 1. С. 21–35.

- Koren'kov, V.V., Nechaevskiy, A.V.** DATAGRID simulation packages // *Sistemnyy Analiz v Nauke i Obrazovanii*. 2009. No. 1. P. 21–35. (In Russ.)
- [14] **Минухин С.В., Коровин А.В.** Моделирование планирования ресурсов Grid средствами пакета GridSim // *Системы обработки информации*. 2011. № 3(93). С. 62–69.
Minukhin, S.V., Korovin, A.V. Modeling of grid resources planning funds package GridSim // *Information Processing Systems*. 2011. No. 3(93). P. 62–69. (In Russ.)
- [15] **Aida, K., Takefusa, A., Nakada, H., Matsuoka, S., Nagashima, U.** Performance evaluation model for job scheduling in a global computing system // *Proc. of 7th IEEE Intern. Symp. on High Performance Distributed Computing*. Chicago: IL, 1998. P. 352–353.
- [16] **Calheiros, R.N., Ranjan, R., Beloglazov, A., De Rose, C.A., Buyya, R.** CloudSim: A toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms // *Software: Practice and Experience*. 2011. Vol. 41, iss. 1. P. 23–50.
- [17] **Xia, H.** The MicroGrid: Using online simulation to predict application performance in diverse grid network environments // *Proc. of the Workshop on Challenges of Large Applications in Distributed Environments (CLADE'04)*. IEEE Press, 2004. P. 52–61.
- [18] **Taura, K.** Grid explorer: A tool for discovering, selecting, and using distributed resources efficiently. Japan: Joho Shori Gakkai Kenkyu Hokoku, 2004. P. 235–240.
- [19] **Глинский Б.М., Родионов А.С., Марченко М.А., Подкорытов Д.И., Винс Д.В.** Агентно-ориентированный подход к имитационному моделированию суперЭВМ экзафлопной производительности в приложении к распределенному статистическому моделированию // *Вест. ЮУрГУ*. 2012. № 18(277), вып. 12. С. 93–106.
Glinskii, B.M., Rodionov, A.S., Marchenko, M.A., Podkorytov, D.I., Weins, D.V. Agent-oriented approach to simulate exaflop supercomputer with application to distributed stochastic simulation // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming & Computer Software*, 2012. No. 12. P. 93–106. (In Russ.)
- [20] **Foster, I.** Globus toolkit version 4: Software for service-oriented systems // *IFIP Intern. Conf. on Network and Parallel Computing*, Beijing, China. Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. P. 2–13.
- [21] **Bellifemine, F., Bergenti, F., Caire, G., Poggi, A.** Jade-A java agent development framework // *Multi-Agent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations: Multi-Agent Programming* / Eds R. Bordini, M. Dastani, J. Dix, A. El Fallax Seghrouchni. Berlin: Springer, 2006. Vol. 15. P. 125–147.
- [22] **Iosup, A., Li, H., Jan, M., Anoop, S., Dumitrescu, C., Wolters, L., Epema, D.H.J.** The grid workloads archive // *Future Generation Computer Systems*. 2008. Vol. 24, No. 7. P. 672–686.
- [23] **Feitelson, D.G., Tsafirib, D., Krakov, D.** Experience with using the Parallel Workloads Archive // *J. of Parallel and Distributed Computing*. 2014. Vol. 74, No. 10. P. 2967–2982.
- [24] **Chapin, S.J., Cirne, W., Feitelson, D.G., Jones, J.P., Leutenegger, S.T., Schwiegelshohn, U., Smith, W., Talby, D.** Benchmarks and standards for the evaluation of parallel job schedulers // *Lecture Notes Computer Science: Job Scheduling Strategies for Parallel Processing* / Eds D.G. Feitelson, L. Rudolph. Berlin; Heidelberg: Springer, 1999. Vol. 1659. P. 66–89.
- [25] **Fujimoto, R.M.** *Parallel and distributed simulation systems*. USA: John Wiley & Sons, 2000. 300 p.
- [26] **Sulistio, A., Yeo, C.S., Buyya, R.** A taxonomy of computer-based simulations and its mapping to parallel and distributed systems simulation tools // *Software: Practice and Experience*. 2004. No. 34. P. 653–673.

- [27] **Бахмуров А.Г., Волканов Д.Ю., Смелянский Р.Л., Чемерицкий Е.В.** Интегрированная среда для анализа и разработки встроенных вычислительных систем реального времени // Программирование. 2013. № 5. С. 35–52.
Bakhmurov, A.G., Volkanov, D.Yu., Smelianskiy, R.L., Chemeritskiy, E.V. Integrated environment for analysis and developing embedded true time systems // Programming and Computer Software. 2013. No. 5. P. 35–52. (In Russ.)
- [28] **Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Александров А.А.** Графическая инструментальная среда для описания модели распределенной вычислительной системы // Вест. Иркутского гос. техн. ун-та. 2006. № 2(26). С. 30–34.
Oparin, G.A., Feoktistov, A.G., Aleksandrov, A.A. Graphical toolkit environment for describing model of distributed computing environment // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2006. No. 2(26). P. 30–34. (In Russ.)
- [29] **Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Вартанян Э.К.** Входной язык объектно-ориентированной базы знаний Grid-системы // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 3–6.
Oparin, G.A., Feoktistov, A.G., Vartanian, E.K. Input language of the object-oriented knowledge base of grid-system // Software & Systems. 2012. No. 1. P. 3–6. (In Russ.)
- [30] **Bogdanova, V.G., Bychkov, I.V., Korsukov, A.S., Oparin, G.A., Feoktistov, A.G.** Multiagent approach to controlling distributed computing in a cluster grid system // J. of Computer and Systems Sci. Intern. 2014. Vol. 53, No. 5. P. 713–722. (In Russ.)
- [31] **Фереферов Е.С., Бычков И.В., Хмельнов А.Е.** Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычисл. технологии. 2014. Т. 19, № 5. С. 85–100.
Fereferov, E.S., Bychkov, I.V., Khmel'nov, A.E. Technology for database applications based on declarative specifications // Comput. Technologies. 2014. Vol. 19, No. 5. P. 85–100. (In Russ.)
- [32] **Фереферов Е.С., Хмельнов А.Е.** Автоматизация создания пользовательского интерфейса на основе модели приложения баз данных // Вест. Бурятского гос. ун-та. 2013. № 9. С. 100–109.
Fereferov, E.S., Khmel'nov, A.E. Automatization of user interface creation based on models of database application // The Buryat State University Bulletin. 2013. No. 9. P. 100–109. (In Russ.)
- [33] **Лапшин В.А.** Онтологии в компьютерных системах. М.: Научный мир, 2010. 224 с.
Lapshin, V.A. Ontologies in computer systems. Moscow: Nauchnyy Mir, 2010. 224 p. (In Russ.)
- [34] GPSS World tutorial manual (2001). Available at: http://www.minutemansoftware.com/tutorial/tutorial_manual.htm (accessed 20.06.2015).
- [35] **Феоктистов А.Г.** Управление сложной системой на основе методологии многокритериального выбора управляющих воздействий // Фундамент. исследования. 2015. № 9-1. С. 82–86.
Feoktistov, A.G. The management of complex systems based on the methodology of multi-criteria choice of control actions // Fundamental Research. 2015. No. 9-1. P. 82–86. (In Russ.)
- [36] **Фереферов Е.С., Ветров А.А.** Управляемые спецификациями менеджеры компоновки пользовательского интерфейса // Вест. Бурятского гос. ун-та. 2015. № 3. С. 49–55.
Fereferov, E.S., Vetrov, A.A. Specification controlled pack-managers of user interface // The Buryat State University Bulletin. 2015. No. 3. P. 49–55. (In Russ.)
- [37] **Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Кантер А.Н.** Мультиагентный алгоритм распределения вычислительных ресурсов на основе экономического механизма регулирования их спроса и предложения // Вест. компьютер. и информ. технологий. 2014. № 1. С. 39–45.

- Bychkov, I.V., Oparin, G.A., Feoktistov, A.G., Kanter, A.N.** Multiagent algorithm for resources allocation based on the economic mechanism of regulating their supply and demand // Herald of Computer and Information Technologies. 2014. No. 1. P. 39–45. (In Russ.)
- [38] **Тель Ж.** Введение в распределенные алгоритмы. М.: МЦНМО, 2009. 616 с.
Tel, Zh. Introduction to distributed algorithms. Moscow: MTsNMO, 2009. 616 p. (In Russ.)
- [39] **Николенко С.И.** Теория экономических механизмов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. 207 с.
Nikolenko, S.I. Economic mechanisms theory. Moscow: Binom. Knowledge Laboratoty, 2009. 207 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию 18 февраля 2016 г.

The toolkit for simulation modeling of heterogeneous distributed computing environment

DYADKIN, YURIY A.* , FEREFEROV, EVGENIY S.

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk, 664033, Russia

*Corresponding author: Dyadkin, Yuriy A., e-mail: dyadkin_ua@inbox.ru

The aim of the research is to create an integrated toolset for studies of problem-oriented distributed computing environment. The study is based on automation methods for the creating of simulation models and performing of multi-variant calculations. One of the most important part of the integrated toolset is the model specification subsystem intended for various categories of users ranging from model developers to the end users. The aim is to create and apply aggregate multilevel models for problem-oriented distributed computing environment. Creating simulation models is highly associated with the model knowledge domain. Properties of distributed computing environment, the architecture of the integrated toolset, the model specification language, the language specification model translator and the software of building dynamic graphic user interface are considered in the article. As an example, a model is created with the help of its specification language for analyzing the functioning data-communication network of distributed computing environment. The outcomes of two computational experiments are presented. The first one is aimed at obtaining of the estimation for data-communication network reliability. It is based on the Ethernet technology when information messages are sent between agents of the subsystems of integrated toolset. The second one is carried out to explore the operating efficiency of two different algorithms of collective interaction between agents.

Keywords: distributed computing environments, simulation, toolkit, user interface.

Acknowledgements. This research was partly supported by RFBR (grants No. 15-29-07955, 16-07-00931).

Received 18 February 2016