

УДК 004.4'2

Инструментальные средства имитационного моделирования предметно-ориентированных распределенных вычислительных систем

Феоктистов А. Г., Корсуков А. С., Дядькин Ю. А.

Актуальность. Стремительное развитие высокопроизводительных вычислений, в том числе распределенных вычислительных сред различного назначения, актуализирует исследование эффективности и надежности их использования при решении различных крупномасштабных задач. Имитационное моделирование является одним из основных инструментов такого исследования. **Целью работы** является анализ современного состояния в области исследования распределенных вычислительных сред на основе имитационного моделирования, определение эксплуатационных и функциональных требований к инструментальным средствам поддержки проведения имитационных экспериментов, а также развитие их инструментального базиса. Особое внимание уделено учету специфики предметных областей решаемых задач в процессе имитационного моделирования. **Используемые методы.** В статье представлены новые средства разработки имитационных моделей, интегрирующие методы концептуального программирования и автоматизации конструирования программ на основе каркасного подхода. Такая интеграция обеспечивает эффективную реализацию автоматизированного перехода от концептуальной модели распределенной вычислительной среды к ее имитационной модели. **Новизна.** Использование концептуальной модели распределенной вычислительной среды при создании и исследовании ее имитационных моделей позволяет расширить диапазон анализируемых архитектур среды по сравнению с известными инструментариями. Концептуальная модель включает в себя: вычислительные знания о программных модулях для решения задач в предметных областях и работы с объектами среды, включая планирование их действий; схемные знания о модульной структуре модели и алгоритмов; продукционные знания для поддержки принятия решений по выбору оптимальных алгоритмов в зависимости от состояния среды, а также знания о программно-аппаратной инфраструктуре среды и административных политиках в ее узлах. **Результат.** Сравнительный анализ известных инструментальных средств имитационного моделирования среды позволил определить актуальные направления развития существующего инструментального базиса. С учетом проведенного анализа разработан инструментальный комплекс SIRIUS II для имитационного моделирования предметно-ориентированной среды. Этот комплекс частично устраняет ряд недостатков рассмотренных средств. **Практическая значимость.** Результаты научной работы могут быть использованы специалистами в области параллельных и распределенных вычислений для анализа и оценки надежности и эффективности используемых ими вычислительных систем.

Ключевые слова: распределенная вычислительная среда, имитационное моделирование, инструментальные комплексы.

Введение

В настоящее время эффективное решение крупномасштабных научных задач требует применения высокопроизводительных вычислений, в том числе использования распределенных вычислительных сред (РВС) различного назначения [1-3]. РВС организуются, как правило, на основе интеграции разнородных ресурсов: суперкомпьютеров, вычислительных кластеров, компонентов облачных инфраструктур и центров обработки больших данных, высокопроизводительных серверов и персональных компьютеров. Для интеграции ресурсов используется широкий спектр коммуникационных технологий, а также разнообразное промежуточное программное обеспечение.

Тенденция развития современных РВС заключается в стремительном росте их производительности, который зачастую достигается путем увеличения числа их вычислительных элементов и приводит к существенному повышению степени сложности управления такими средами. Одним из приоритетных направлений в области развития и применения РВС является исследование эффективности и надежности их функционирования [4].

Ряд свойств РВС существенно усложняет процессы их построения, эксплуатации и исследования. К таким проблемным свойствам, например, относятся: организационно-функциональная разнородность, динамичность и неполнота описания интегрируемых в РВС ресурсов; наличие различных категорий пользователей, преследующих свои цели и задачи эксплуатации вычислительной среды. Другой важной проблемой организации и применения РВС является учет специфики предметных областей решаемых пользователями задач.

Стандартизированные средства управления распределенными вычислениями, используемые в РВС, не позволяют в полной мере решить указанные выше проблемы. В этой связи требуется разработка специальных инструментальных средств, обеспечивающих возможность исследования эффективности и надежности функционирования предметно-ориентированных РВС.

С точки зрения теории очередей РВС представляет собой систему массового обслуживания. В этом случае одним из эффективных подходов к ее изучению является имитационное моделирование [5].

Процесс построения моделирующей программы, адекватно отображающей исследуемую РВС, во многом является нетривиальной задачей и требует от ее разработчика наличия высокой математической и программисткой квалификации, тем более, если речь идет о параллельной или распределенной программе. Таким образом, возникает потребность в высокоуровневых инструментальных средствах автоматизации этого процесса, которые позволят максимально использовать потенциал высокопроизводительной вычислительной техники и обеспечат построение сложной технологической цепочки: от математика (эксперта-«предметника»), формализующего предметную область РВС, к программисту, создающему имитационную модель РВС и сервис-ориентированные средства доступа к этой модели и ее применения, и только затем – к конечным пользователям (сотрудникам профильной организации), которые занимаются непосредственно расчетами.

В настоящее время существует широкий спектр способов и инструментальных средств [6], предоставляющих возможность исследования различных аспектов функционирования РВС. Однако, как правило, они являются узкоспециализированными, в том смысле, что обеспечивают изучение вычислительной среды, в том числе ее программной или аппаратной надежности, путем имитационного или полунатурного моделирования со слабой привязкой к особенностям предметной области решаемых задач. В этой связи важным компонентом инструментальной поддержки имитационного

моделирования становится средство построения и способы исследования моделей предметно-ориентированных РВС.

Целью статьи является – сравнительный анализ отечественных и зарубежных исследований в области разработки и применения инструментальных программных средств автоматизации имитационного моделирования в РВС. Сформулированы системные и функциональные требования к разрабатываемому инструментальному комплексу имитационного моделирования. Предложен инструментальный комплекс (ИК) SIRIUS II для имитационного моделирования предметно-ориентированной РВС. Средства спецификации модели в ИК являются развитием исследований, изложенных в [7, 8]. Представлена распределенная сервис-ориентированная среда имитационного моделирования систем массового обслуживания на базе ресурсов Иркутского суперкомпьютерного центра коллективного пользования. Разработанные средства применены в задачах анализа и оценки эффективности и надежности решения задач масштабируемыми приложениями в РВС.

Предметно-ориентированная распределенная вычислительная среда

Предполагается, что в качестве узлов среды выступают вычислительные кластеры, в том числе гибридные кластеры с разнородными вычислительными узлами. Кластеры организуются на базе как выделенных, так и невыделенных вычислительных машин, и, следовательно, существенно различаются по степени надежности своих ресурсов. Вследствие усложнения инфраструктуры современных кластеров выделенных машин, вероятность сбоев в процессе решения задач существенно повышается. Сбои происходят в случайные моменты времени.

В ресурсах кластеров нуждаются как их локальные пользователи, так и глобальные пользователи среды.

Важными характеристиками решаемых в системе задач являются:

- способ решения задачи (применение готовой программы, построение алгоритма решения задачи на основе библиотек стандартных программ, исполнение программы в режиме интерпретации или компиляции);
- место размещения (в машине пользователя или в машине системы) программы, используемой для решения задачи; число прогонов программы; наличие взаимосвязанных подзадач;
- вид параллелизма алгоритма решения задачи (мелкозернистый, крупноблочный и смешанный параллелизм), степень ресурсоемкости вычислений (малые, средние и большие задачи, задачи вычислительные или обработки данных);
- необходимость управления процессом вычислений в пакетном или интерактивном режимах; срочность вычислений;
- другие особенности процесса решения задач.

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. Среда поддерживает обработку заданий разных классов: последовательных и параллельных, независимых и взаимосвязанных, локальных и удаленных, многовариантных (сериализуемых), а также различающихся по времени, требуемому для выполнения задания, размерам необходимой оперативной и дисковой памяти, соотношению вещественных и целочисленных операций и другим характеристикам. Множество заданий пользователей рассматривается с точки зрения теории очередей и представляется в виде совокупности потоков заданий с приоритетами.

В рамках системы функционируют распределенные предметно-ориентированные приложения, порождающие потоки заданий, поступающих в дискретные моменты времени.

Поток заданий в РВС характеризуется следующими свойствами:

- динамичностью (мощность и состав потока заданий изменяется во времени);
- стохастичностью (поток заданий предполагает возникновение случайных событий);
- неоднородностью (задания соответствуют разным классам задач и отличаются друг от друга по своей специфике);
- отсутствием обратной связи (число заданий, поступивших за один промежуток времени, не зависит от числа заданий, поступивших за другой промежуток времени);
- неординарностью (возможно поступление двух и более заданий в один и тот же момент времени);
- стационарностью (число событий, поступивших за определенный промежуток времени, зависит от длины этого промежутка и не зависит от момента его начала).

В общем случае в системе имеется программно-аппаратная вычислительная избыточность (приложение может быть размещено и выполнено в разных узлах среды, а одни и те же вычисления могут быть произведены с помощью различных приложений).

Управление заданиями осуществляется традиционными программными средствами – глобальными (на уровне РВС) или локальными (на уровне кластера) менеджерами ресурсов, а также мультиагентной системой (МАС) [9-11], функционирующей как на уровне РВС, так и на уровне приложений пользователей. МАС является надстройкой к традиционным средствам управления заданиями. Свободных ресурсов системы недостаточно для одновременного обслуживания всех заданий, находящихся в очередях.

В системе нет единой политики администрирования вычислительных ресурсов, на кластерах применяются различные дисциплины и механизмы обработки потоков заданий различных типов.

Таким образом, с точки зрения моделирования РВС является сложной, динамической, дискретно-событийной и стохастической системой массового обслуживания (СМО). Дисциплина обработки заданий в РВС, в общем случае, является многоканальной. При моделировании РВС следует учитывать:

- способы поступления заданий и их классы;
- механизмы обслуживания очередей заданий;
- характеристики аппаратных средств и коммуникационной сети;
- свойства системного и прикладного программного обеспечения, а также особенности его функционирования, включая специфику предметных областей решаемых задач;
- типы сбоев программно-аппаратных средств;
- способов обеспечения отказоустойчивости ресурсов среды;
- административные политики в отношении ресурсов и пользователей среды, а также другую важную информацию, связанную с организацией и выполнением распределенных вычислений.

Учет системного и прикладного программного обеспечения влечет за собой необходимость использования в системе имитационного моделирования соответствующих алгоритмов его функционирования и сторонних программных средств, реализующих эти алгоритмы. Требуется также настройка системы на работу с базами данных, поддерживающими работу алгоритмов.

Задача детального исследования процессов функционирования РВС характеризуется большой вычислительной сложностью и требует применения средств высокопроизводительных вычислений и проведения многовариантных расчетов. В этом случае возникает необходимость запуска экземпляров имитационной модели в различных узлах высокопроизводительной вычислительной системы, сбора, обработки и анализа распределенных результатов моделирования.

Выполнение имитационного моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений налагает также ряд требований по обеспечению отказоустойчивости самого процесса моделирования, включая наличие функциональных возможностей для сохранения/восстановления состояний модели.

Системы имитационного моделирования

Средства имитационного моделирования базируются на следующих видах программного обеспечения: системах имитационного моделирования, программных библиотеках и языках программирования (рис. 1).

Основными преимуществами применения систем имитационного моделирования, включающих специализированные языки имитационного моделирования, по сравнению с использованием программных библиотек и универсальных языков программирования являются:

- наличие языковых средств более высокого уровня, включающих готовые конструкции (блоки) для представления в модели исследуемых объектов и процессов;
- оперирование понятиями свойственными теории очередей, такими как заявки (запросы) на обслуживание, устройства (сервисы) обслуживания, дисциплины обслуживания очередей и др.;
- поддержка среды выполнения разрабатываемых моделей;

- обеспечение сбора и обработки статистических данных;
- простота, как правило, отладки, модификации и применения имитационных моделей.

При этом системы имитационного моделирования можно условно разделить на два класса:

- 1) системы общего назначения;
- 2) узкоспециализированные системы.

Особенности этих двух классов систем рассмотрены далее.



Рис. 1. Средства имитационного моделирования

Системы имитационного моделирования общего назначения

Системы имитационного моделирования общего назначения, в отличие от узкоспециализированных, могут быть использованы при моделировании любой предметной области, что делает систему более универсальной и в то же время более сложной в освоении и применении, так как требования к квалификации разработчика модели повышаются. Наиболее популярными системами общего назначения являются [12]: AnyLogic [13, 14], ExtendSIM [15-18], GPSS World [19, 20], Micro Saint [21], Simplex3 [22] и Simulink [23].

Система AnyLogic поддерживает различные парадигмы моделирования: методы системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования, а также гибридный подход к построению моделей (комбинацию различных методов моделирования в контексте одной модели). Система AnyLogic также поддерживает:

- возможность разработки многомерных имитационных моделей, которые при необходимости могут быть интегрированы с базами данных через специальный интерфейс JDBC;
- различные виды численных экспериментов (простой эксперимент, на основе метода Монте-Карло, путем варьирования параметров, оптимизацию и другие способы расчетов);
- 2D и 3D анимацию, позволяющую наблюдать процесс моделирования в режиме реального времени.

Как правило, модель в системе AnyLogic строится на основе базовых визуальных компонентов (объектов модели). Каждый объект модели

представляет собой Java-класс. Поэтому, дополнительные объекты и процессы их функционирования могут быть реализованы на языке Java путем расширения базовых классов новыми полями и методами, переопределением существующих методов базовых классов или добавлением новых классов.

AnyLogic широко применяется для создания моделей в различных предметных областях экономической, социальной и производственной сфер человеческой деятельности.

Система ExtendSIM позволяет моделировать непрерывные, дискретно-событийные, основанные на агентах, линейные, нелинейные и смешанного типа процессы. Она имеет достаточно мощный графический интерфейс, позволяющий конструировать схемы процессов и проводить эксперименты, а также поддерживает 2D и 3D анимацию. На этапе создания модели требуется частичное написание кода при задании свойств объектов на специализированном языке ModL.

Система ExtendSIM применяется для моделирования и анализа бизнес-процессов, представленных в виде блок-схем. В ней возможно построение дискретных, непрерывных и гибридных моделей для исследования динамических систем и процессов дискретно-событийного управления. Для построения моделей используется С-подобный язык программирования ModL. Этот язык позволяет разрабатывать дополнительные блоки модели с новой функциональностью, расширяя тем самым стандартные возможности системы. Дополнительной функциональной возможностью является взаимодействие с системой Microsoft Visio по импорту и экспорту данных.

Система GPSS World предназначена для моделирования как дискретных, так и непрерывных процессов. Данная система обладает следующими возможностями:

- обеспечение объектно-ориентированного пользовательского интерфейса;
- использование высокоуровневого языка имитационного моделирования и применение высокопроизводительного транслятора модели;
- пользовательский и программный ввод/вывод данных в процессе моделирования; наличие встроенного языка программирования PLUS;
- большое число функций, реализующих широкий спектр законов вероятностных распределений;
- поддержка программируемых экспериментов с автоматическим анализом данных;
- средства отладки кода и наблюдения за объектами в процессе моделирования; динамический вызов функций из внешних файлов;
- работа с внешними ASCII-файлами для импорта/экспорта данных.

К недостаткам системы GPSS World в первую очередь относятся отсутствие средств графического построения модели и подбора параметров вероятностных распределений по статистическим данным, а также примитивные возможности визуализации результатов моделирования.

Система Micro Saint является мощным средством имитационного моделирования дискретно-событийных процессов, поддерживает 2D и 3D-анимацию, операции импорта и экспорта данных программного продукта Microsoft Visio для представления диаграмм в виде имитационной модели и наоборот. Также в составе пакета имеются расширенные средства отладки модели и возможность экспорта результатов моделирования в электронные таблицы Microsoft Excel для их дальнейшего анализа.

Система Simplex3 предоставляет имитационную среду для проведения экспериментов, включая объектно-ориентированный язык Simplex-MDL. Данный язык используется для описания системно-динамических и дискретно-событийных моделей, систем массового обслуживания, ситуационных и транспортных моделей в виде базисных и мобильных компонентов, их взаимосвязей и динамики поведения, временных и условных событий, приоритетов и процедур. Язык содержит элементы логического программирования; расширяет объектно-ориентированный подход с помощью дополнительных механизмов связи между компонентами; делает возможным иерархическое структурирование моделей и пошаговую разработку модели, быстро собираемую из прототипов.

Система Simplex3 является многоплатформенной с возможностью подключения внешних модулей на языке C++.

Система Simulink пакета Matlab для моделирования и анализа широкого класса (линейных, нелинейных, непрерывных, дискретных и гибридных) динамических систем с помощью блок-диаграмм. Система включает такие важные компоненты как библиотеку стандартных блоков модели, средства для создания пользовательских библиотек блоков, графический инструментарий для проектирования сложных систем управления и генератор кода модели на языке C. К ее недостаткам относятся приближенные характеристики некоторых элементов блок-схемы, а также неточность вычислений с помощью функций пакета MATLAB, связанных с несовершенством методик и алгоритмов вычислений, заложенных в этот пакет.

В системе Simulink поддерживается создание отчетов по результатам моделирования в различных форматах, среди которых HTML, RTF, XML и SGML.

В таблице 1 приведен ряд наиболее важных эксплуатационных характеристик вышеперечисленных систем имитационного моделирования общего назначения.

Следует отметить, что блочная среда разработки моделей в ExtendSIM и GPSS World интуитивно понятней и проще, чем в Anylogic.

Представленная в таблице 1 информация позволяет сделать вывод о том, что подавляющее большинство систем имитационного моделирования преимущественно позволяют работать только под управлением операционных систем (ОС) семейства Windows. Однако в настоящее время имеется потребность в использовании систем имитационного моделирования под управлением ОС семейства Linux, так как существенная доля высокопроизводительных вычислительных систем ориентирована на такие ОС.

Для эффективного моделирования РВС требуются дополнительные системные функциональные возможности (таблица 2). Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет сделать вывод о том, что рассмотренные системы не в полной мере обладают необходимыми функциональными возможностями для того, чтобы их можно было напрямую использовать для эффективного моделирования РВС.

Таблица 1 – Характеристики систем имитационного моделирования общего назначения

Наименование системы	Тип лицензии (П – проприетарная, С – свободно распространяемая)	Поддерживаемые ОС			Графические возможности системы			Наличие бесплатной версии с ограниченным функционалом	Текущая версия программы
		Windows	Linux	Mac OS	Построение модели граф. средствами	Визуализация процесса моделирования	Представление отчетов с помощью диаграмм/графиков		
AnyLogic	П*	+	+	+	+	+	+	+	7.3
ExtendSIM	П**	+	–	+/-	+	+	+	+	9.2
GPSS World	П*	+	–	–	+	+	+	+	5.2.2
Micro Saint	П**	+	–	–	+	+	+	–	3.7
Simplex3	П	+	+	–	+	+	+	–	2005
Simulink	П**	+	+	+	+	+	+	–	8.6

В таблице 1 во втором столбце использованы следующие обозначения для проприетарного программного обеспечения: П – нет бесплатной версии; П* и П** – возможно использование бесплатной версии, ограниченной по функциональным возможностям, в течение соответственно ограниченного и неограниченного периода времени.

Таблица 2 – Функциональные возможности систем имитационного моделирования общего назначения

Наименование системы	Моделирование параллельных процессов	Распределенные и параллельные модели	Поддержка контрольных точек	Поддержка многовариантных расчетов	Средства описания предметной области для которой строится модель	Средства автоматизации настройки интерфейса на работу с базой данных предметной области	Средства автоматизации построения модели	Проведение эксперимента (факторный/регрессионный анализ)	Подбор вероятностного распределения	Средство генерации данных
AnyLogic	+	–	–	+	–	–	–	+	+	+
ExtendSIM	+	–	–	+	–	–	+	+	+	–
GPSS World	+	–	–	+	–	–	–	+	–	–
Micro Saint	+	–	–	–	+	–	+	+	–	+
Simplex3	+	–	–	–	+	–	–	+	–	–
Simulink	+	–	–	–	–	–	–	+	–	–

Узкоспециализированные системы имитационного моделирования

Системы данного класса направлены на решение конкретного класса задач или используются для моделирования строго определенных предметных областей, для которых они были созданы, что делает эти системы более доступными для изучения и использования. Интерфейс подобных программ ориентирован на пользователей, владеющих терминами моделируемой предметной области. Это позволяет разработчику модели не отвлекаться на особенности той или иной системы моделирования и ускорить процесс разработки модели.

На рис. 2 представлена классификация систем имитационного моделирования по сферам применения. Применительно к проблеме моделирования РВС наибольший интерес привлекают системы моделирования вычислительных систем и компьютерных сетей.



Рис. 2. Классификация систем по сферам применения

В качестве примеров систем моделирования компьютерных сетей рассмотрим системы SIMSCRIPT [24], NetSIM [25], QualNet [26], Riverbed Modeler [27], ns-3 [28] и EXata [29].

Система *SIMSCRIPT* симуляции сетевой архитектуры поддерживает дискретно-событийное и дискретно-непрерывное моделирование. Она предназначена для минимизации времени, требуемого для создания и запуска имитаторов сложных компьютерных систем и сетей. В системе используется модульный объектно-ориентированный язык программирования SIMSCRIPT для построения моделей с интерактивным графическим интерфейсом пользователя. Модели, написанные на языке SIMSCRIPT, могут быть запущены под различными ОС, такими как Windows или Linux/Unix. Система SIMSCRIPT включает в себя интерактивную среду проектирования, подсистему отладки, пакет статистики, пакет для построения диаграмм, 2D и 3D графиков во время работы модели, а также обеспечивает возможность работы с

различными базами данных: Microsoft Access, SQL Server, Oracle, IBM DB2, IBM Informix и MySQL.

Система NetSim используется для проектирования и анализа сетей, а также планирования защиты сети. Она имеет мощную графическую среду для создания моделей из набора графических элементов. Система NetSim поддерживает моделирование широкого спектра коммуникационных технологий. Библиотеки протоколов коммуникационных технологий доступны в виде исходных кодов на языке C.

Система QualNet – является мощным графическим инструментом для планирования, тестирования и изучения функционирования телекоммуникационных сетей, который позволяет имитировать поведение реальной сети. Используя данную систему и встроенную библиотеку компонентов, пользователи могут построить сеть любой сложности и оценить основные параметры поведения сети, протестировать различные комбинации сетевых функций. Система QualNet обеспечивает комплексную среду для разработки протоколов, создания и анимации сетевых сценариев, а также анализа их эффективности.

Система Riverbed Modeler реализует дискретно-событийное моделирование и обеспечивает:

- моделирование сети на основе различных технологий, включая VoIP, TCP, OSPFv3, MPLS и IPv6;
- анализ текущего состояния сети;
- повышение ее производительности;
- разработку и тестирование собственных технологий и протоколов;
- создание распределенных моделей, что значительно уменьшает время моделирования.

В системной библиотеке содержится более 400 компонентов для создания инфраструктуры сети. Система Riverbed Modeler поддерживает мощную среду визуализации процесса моделирования, включающую средства построения диаграмм, графиков, графов и таблиц.

Система ns-3 представляет собой бесплатное программное обеспечение под лицензией GNU GPLv2. Система ns-3 разработана по модульному принципу в виде набора библиотек, которые можно комбинировать с другими внешними библиотеками для взаимодействия со сторонним программным обеспечением. Система ns-3 изначально разрабатывалась для работы под управлением ОС Linux, однако существует и поддержка для ОС Windows. К недостаткам этой системы, существенно усложняющим процессы построения и анализа модели, можно отнести отсутствие визуальной среды проектирования, описание модели на C-подобном языке и построение графиков не производится в интерактивном режиме.

Система EXata широко используется для предсказания поведения сетей, возможности реального проектирования сетей, а также анализа процессов управления сетями. EXata предоставляет пользователям следующие возможности: проектирование новых сетевых технологий; проектирование беспроводных сетей в масштабах реального мира; проведение экспериментов

для анализа производительности сети и оптимизации сети с различными параметрами; эмуляцию передачи данных в сетях; захват потока данных и его анализ при помощи сторонних инструментов (Wireshark или Microsoft Network Monitor).

К сожалению, вышеперечисленные системы имитационного моделирования компьютерных сетей, как правило, не позволяют учитывать процессы работы приложений и управления ими при решении задач, а также специфику их предметных областей.

Для моделирования вычислительных систем, таких как РВС, используется особый класс программных средств. В зависимости от способа воспроизведения процессов функционирования РВС эти средства делятся на два класса:

- 1) эмуляторы;
- 2) симуляторы.

Эмулятор – это средство воспроизведения поведения реального устройства или программы в режиме реального времени [30].

Симулятор – это программное обеспечение, позволяющее моделировать реальные системы, отображая часть реальных явлений и свойств в виртуальной среде [31].

Другими словами, эмулятор заменяет свойства и функции оригинала, выполняя реальную работу, а симулятор лишь моделирует эти свойства и функции без реального функционирования.

К симуляторам РВС относятся, например, следующие системы: OptorSim [32], GridSim [33], Bricks [34], CloudSim [35], WorkflowSim [36], SimGrid [37], GridMe [38] и СИРИУС [7]. 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 РВС. Системы имеют разные особенности и возможности для моделирования РВС.

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

Симулятор GridSim обеспечивает возможность моделирования поведения пользователей РВС, вычислительных ресурсов и брокеров ресурсов (планировщиков). С помощью симулятора GridSim можно проводить эксперименты, которые сложно реализовать в реальном окружении РВС. Основные возможности симулятора GridSim: моделирование характеристик ресурсов РВС; 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 РВС для различных коммуникационных топологий.

Симулятор Bricks предназначен для исследования клиент-серверной архитектуры как глобальной вычислительной системы. В этом симуляторе предполагается централизованное глобальное планирование вычислений. Создатели симулятора руководствовались идеей, что в рамках РВС основу составляют пользователи, запускающие свои задания на общие ресурсы по сети.

Симулятор CloudSim является развитием системы GridSim и используется для моделирования облачных инфраструктур и сервисов.

Симулятор WorkflowSim предназначен для оптимизации выполнения потока заданий. Он обеспечивает формирование модельного потока заданий, моделирование накладных расходов и отказов в процессе выполнения этого потока. В WorkflowSim каркас (нижнего уровня) модели строится с помощью средств симулятора CloudSim. На верхнем уровне симулятор WorkflowSim добавляет следующие основные компоненты: регистратор потока заданий, механизм выполнения потока заданий, механизм распределения заданий, генератор и монитор отказов.

Симулятор SimGrid обеспечивает моделирование распределенных приложений в разнородных распределенных средах: вычислительных сетях P2P, облачных инфраструктурах, высокопроизводительных комплексах и Grid-системах. Данный симулятор поддерживает ряд интерфейсов прикладного программирования, таких как SimDAG, MSG и MPI, для создания различных типов приложений [37]. Для описания модели используется язык XML. Алгоритмы распределения заданий могут быть разработаны на языках C, Python, Ruby или Lua.

Симулятор GridMe ориентирован на оптимизацию стратегий управления потоками задач на основе оценки поведения РВС при изменяющихся условиях ее функционирования. В плане обеспечения возможностей исследования процессов управления распределенными вычислениями симулятор позволяет описывать потоки задач (workload) и алгоритмы распределения задач с помощью набора правил. Симулятор реализован на основе платформы Eclipse, с использованием только языка Java, что позволяет применять эту систему под управлением Linux, Windows, Solaris и других ОС.

Симулятор СИРИУС предназначен для моделирования и анализа эффективности функционирования интегрированных кластерных сред и ориентирован на комплексное исследование характеристик, как прикладного программного обеспечения, так и аппаратных средств таких сред. К особенностям данного симулятора можно отнести применение распределенного имитационного моделирования исследуемой среды с применением методов динамического анализа программ.

В качестве примеров эмуляторов можно привести системы MicroGrid [39], Grid eXplorer [40] и AGNES [41].

Эмулятор MicroGrid представляет собой виртуальную инфраструктуру РВС, которая позволяет исследовать управление динамическими ресурсами и

адаптивными приложениями с помощью итерационных вычислительных экспериментов. Эмулятор MicroGrid поддерживает взаимодействие с пакетом Globus Toolkit [42], обеспечивает эксперименты с реальными моделями PBC, поэтому может быть использован для изучения широкого спектра конфигураций ресурсов PBC и сценариев их использования.

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

Эмулятор *AGNES* реализован на основе инструментария Java Agent DEvelopment framework (JADE) [43] и воплощает мультиагентный подход к моделированию PBC. Эмулятор AGNES включает агентов создания и управления средой и функциональных агентов. 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 (вычисления на ядре; запись/чтение данных в память; парный обмен данными; синхронизация данных между вычислителями) и временных характеристик каждой операции.

Ряд программных средств исследования процессов работы PBC ориентирован на получение оценок эффективности функционирования систем управления вычислениями на основе информации о вычислительной нагрузке ресурсов PBC, определяемой потоками заданий. Вычислительная история эмуляции, имитации или реального выполнения потоков заданий на кластерах, суперкомпьютерах или в вычислительных сетях сохраняется в виде архивов данных [44, 45]. Информация о потоках специфицируется на основе стандартизированного формата Standard Workload Format (SWF) [46].

Современные симуляторы и эмуляторы ориентированы на проведение вычислительных экспериментов на основе парадигм параллельных и распределенных вычислений [47, 48]. Особенно актуально применение высокопроизводительных вычислений для анализа моделей PBC реального времени, размеры и сложность которых требует проведения крупномасштабных ресурсоемких вычислений. В рамках этого направления исследований разработана система моделирования ДИАНА-2012 [49], обеспечивающая использование формальной модели функционирования и анализ различных аспектов поведения исследуемой PBC.

Однако есть ряд существенных недостатков, осложняющих применение рассмотренных выше средств для моделирования предметно-ориентированных PBC. 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 предметно-ориентированных программных комплексах (требуемая детализация заданий не обеспечивается в том числе и в стандартизированных форматах описания потоков заданий);

- ограниченность моделируемых архитектур РВС;
- реализация только одного отдельно взятого вида моделирования;
- отсутствие компонентов для автоматической настройки стандартизированных средств управления вычислениями в РВС на основе полученных результатов моделирования;
- необходимость изучения специальных языков программирования.

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.

Инструментальные средства имитационного моделирования РВС также не в полной мере соответствуют ряду критериев их функционирования, предъявляемых пользователями [50]. К числу таких критериев относятся:

- поддержка автоматизации всех необходимых этапов разработки модели в рамках одной среды имитационного моделирования;
- интеграция и комплексное использование распределенных баз данных с описаниями (концептуальными моделями) предметных областей исследуемых систем и расчетных баз данных имитационных моделей этих систем;
- возможность использования кроссплатформенного программного комплекса для разработки и применения моделей;
- обеспечение взаимодействия с программными комплексами, предназначенными для управления исследуемыми системами и принятия решений, с целью оперативного получения требуемых данных либо для передачи результатов моделирования;
- быстрая и автоматизированная подготовка отчетов о результатах экспериментов с моделями, накапливаемых в базах данных.

Ниже рассматривается ИК, в котором частично решаются некоторые вышеперечисленные проблемы имитационного моделирования РВС.

Инструментальный комплекс SIRIUS II

ИК SIRIUS II предназначен для поддержки проведения вычислительного эксперимента с имитационными моделями, реализованными на языке GPSS. Этот комплекс включает в себя инструментальные средства построения имитационных моделей на основе шаблонов типовых объектов исследуемых систем (модулей), подготовки и проведения вычислительных экспериментов с имитационными моделями.

Использование модульного подхода обеспечивает ряд важных преимуществ. Во-первых, достаточно гибкую модификацию и “безболезненное” развитие математического и программного базиса для

моделирования исследуемой системы посредством добавления или замены модулей этого базиса новыми модулями, в том числе модулями уже разработанных библиотек шаблонов типовых объектов исследуемых систем. Во-вторых, быструю “точечную” реализацию дополнительных возможностей моделирования процессов функционирования системы, не представленных в используемых средствах управления этими системами. В-третьих, возможность реализации вспомогательных аналитических моделей в виде модулей.

Подход к построению концептуальной модели исследуемой системы базируется на общих принципах структурного анализа предметной области: выделении взаимодействующих между собой объектов и их атрибутов, определение их отношений и ограничений на эти отношения. Концептуальная модель является основой для построения имитационных моделей.

Архитектура инструментального комплекса включает следующие подсистемы (рис. 3):

- подсистему спецификации модели;
- конструктор имитационной модели;
- исполнительную подсистему;
- подсистему анализа.

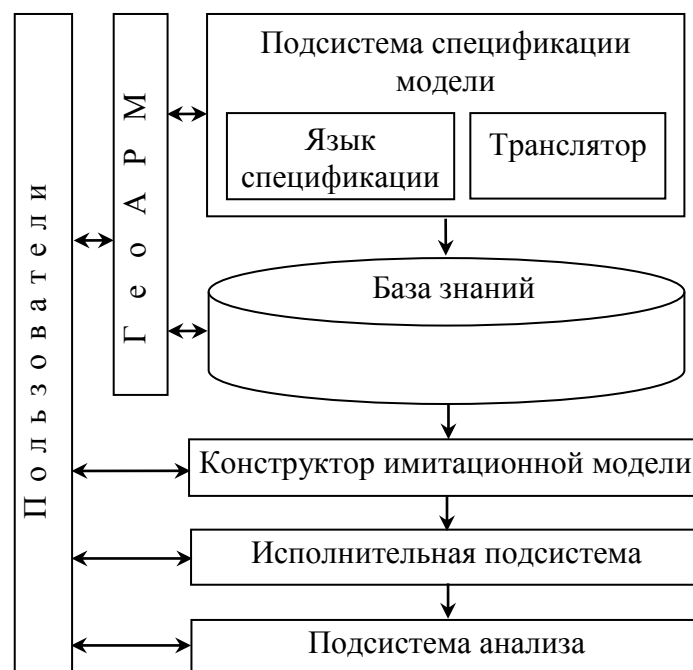


Рис. 3. Архитектура инструментального комплекса

Подсистема спецификации модели предоставляет разработчикам возможность описывать модель РВС на специальном языке спецификации модели. Язык позволяет с помощью специальных операторов определять объекты исследуемой предметной области, задавать их атрибуты, устанавливать типы данных атрибутов (как скалярные, так и структурированные) и отношения между объектами модели. Использование языка спецификации обеспечивает высокую степень привязки модели к соответствующей предметной области.

Модель включает вычислительные знания о программных модулях для решения задач в предметных областях и работы с объектами РВС схемные знания о модульной структуре модели и алгоритмов, продукционные знания для поддержки принятия решений по выбору оптимальных алгоритмов в зависимости от состояния среды, а также знания о программно-аппаратной инфраструктуре РВС и административных политиках в ее узлах. Модули для работы с объектами РВС обеспечивают планирование вычислений, формирование заданий, распределение ресурсов, мониторинг вычислительных процессов, динамическую декомпозицию потоков заданий. Важным компонентом знания о программно-аппаратной инфраструктуре РВС является информация о классах заданий и ресурсов среды, а также алгоритмах эффективного распределения заданий по ресурсам на основе их классификации [51].

Перечисленные знания представляются в виде концептуальной модели РВС [52], являющейся частным случаем семантической сети.

Описание концептуальной модели транслируется в термины языка SQL. Текст модели на языке SQL используется для конкретизации шаблона файла базы знаний с целью дальнейшего хранения и использования модели. Разработанный авторами язык спецификации модели относится к языкам описания онтологий [53], основанных на вычислительных моделях и являющихся частным случаем семантических сетей. Этот язык используется для построения концептуального ядра модели РВС.

Фрагмент текста концептуальной модели на языке спецификации приведен на рис. 4. Данный фрагмент включает описание объектов, составляющих коммуникационную среду РВС: узлов сети (NODES), концентраторов (HUBS), связей между концентраторами (HUB2HUB), связей между узлами и концентратором (NODESHUB), а также агентов, размещенных в узлах (AGENTS).

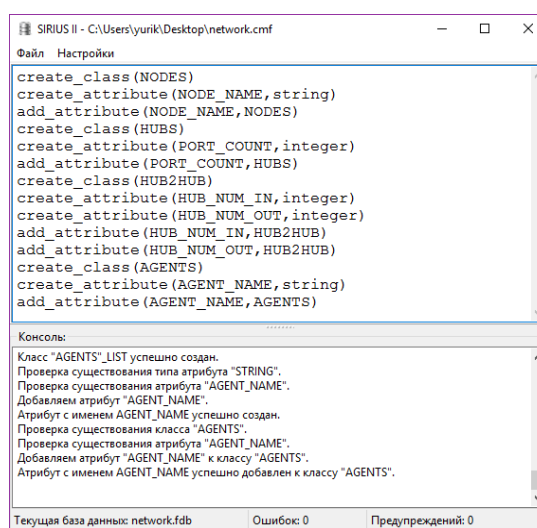


Рис. 4. Фрагмент текста модели на языке спецификации модели

На основе этого ядра могут быть созданы специализированные модели конкретных вычислительных сред с помощью системы ГеоАРМ [54, 55].

Данная система обеспечивает автоматизированное построение уникального графического интерфейса пользователя для каждой специализированной модели (рис. 5). Этот интерфейс используется в дальнейшем для наполнения модели данными пользователями различных категорий: специалистами в области имитационного моделирования и специалистами-предметниками.

Множество описаний концептуальных моделей хранятся в базе данных и представляют собой библиотеку, которая может быть использована для создания новых моделей.

На рис. 5 представлен графический интерфейс пользователя, который был построен системой GeoARM на основе файла базы данных, полученного в результате трансляции описания текста концептуальной модели на языке спецификации приведенного на рис. 4.

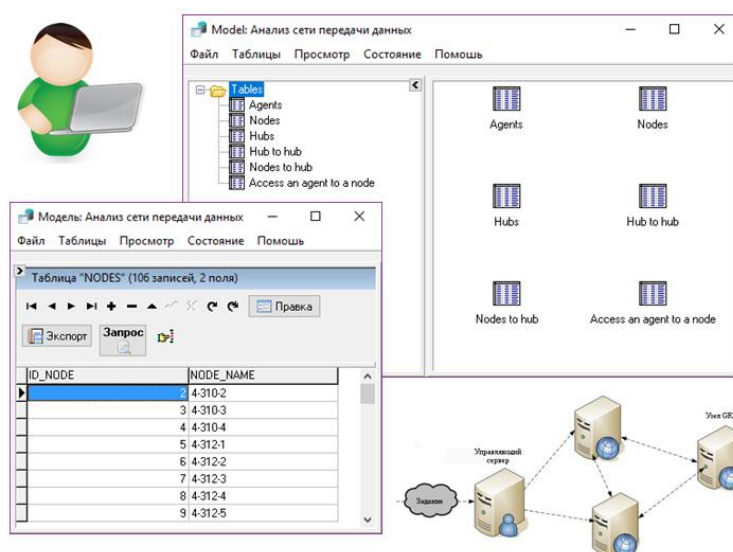


Рис. 5. Пример графического пользовательского интерфейса

Имитационная модель строится по концептуальной модели РВС с применением языка GPSS с использованием каркасного подхода [56] (рис. 6).

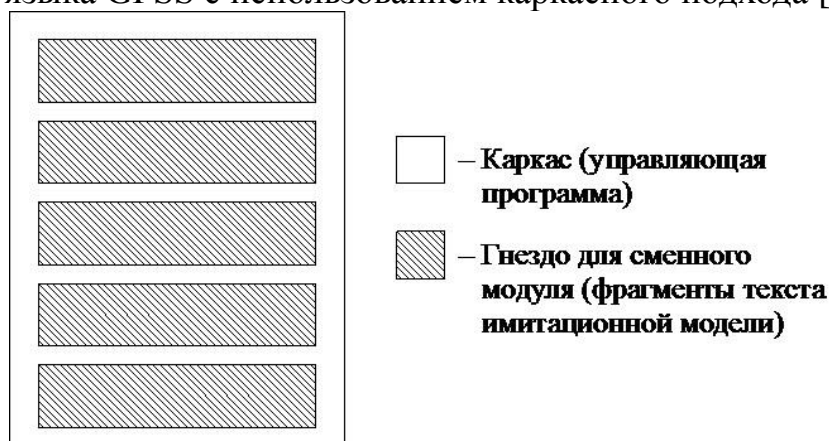


Рис. 6. Каркасный подход

В контексте данного подхода имитационная модель состоит из двух обязательных частей: каркаса и гнезд. Каркас имитационной модели представляет собой неизменяемую часть программы на GPSS и включает в себя

совокупность изменяемых частей – гнезд, в которые помещаются сменные модули. Сменные модули являются частью вычислительных знаний. Совокупность модулей представляет собой библиотеку фрагментов имитационной модели на GPSS, каждый из которых моделирует отдельный процесс функционирования РВС. Варьируя содержимым гнезд в различных комбинациях, достигается все многообразие формируемых версий модели.

Каркас модели и его гнезда создаются в конструкторе имитационной модели (рис. 7).

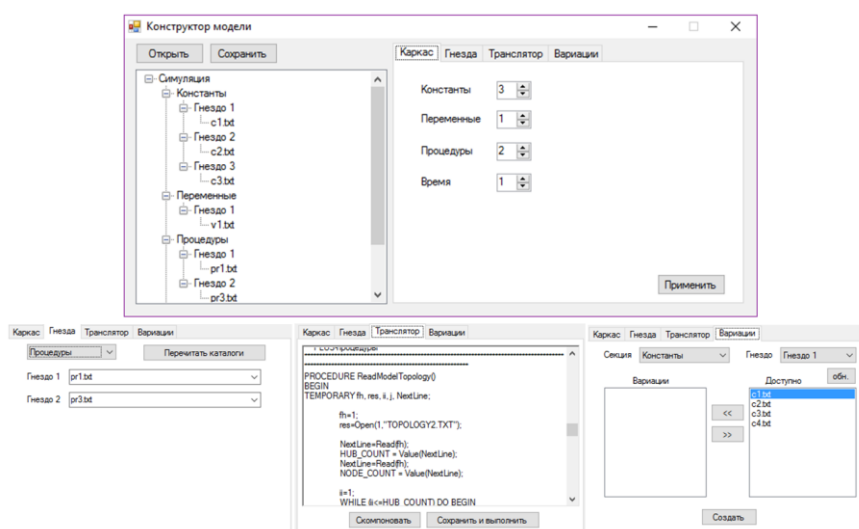


Рис. 7. Конструктор имитационной модели

На вкладке «Каркас» формируется каркас имитационной модели и определяется число гнезд различного назначения: для констант, переменных, пользовательских процедур и задания модельного времени. После того как каркас создан, на вкладке «Гнезда» можно подставить в выделенные гнезда соответствующие модули. Вкладка «Транслятор» предназначена для получения полного текста модели и его трансляции штатными средствами GPSS World. Вкладка «Вариации» используется для создания множества вариантов имитационной модели с различным наполнением гнезд. В качестве примера на рис. 8 приведен сменный модуль для вызова агента, определяющего класс задания.

```
PROCEDURE Define_class()
BEGIN
  return Call_String("lib.dll", "Def_class", "35");
END;
```

Рис. 8. Сменный модуль

Таким образом, сочетая модули в необходимом нам порядке, мы получаем отдельные версии имитационных моделей, каждая из которых может быть протестирована на отдельном узле РВС, что позволяет экономить время на прогонах.

В настоящее время подсистема анализа и исполнительная подсистема представлены сервис-ориентированной средой имитационного моделирования

СМО, организованной с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Иркутского суперкомпьютерного центра СО РАН» [57].

Эта среда [58] предоставляет следующие основные функции, реализованные в виде сервисов:

- создание и редактирование списка наблюдаемых переменных имитационных моделей, подлежащих дальнейшему анализу (сервис OPLE);
- подготовка исходных данных, проведение имитационного моделирования путем многовариантных расчетов, многокритериальный и статистический анализ его результатов (сервис SimQS);
- сбор, обработка и визуализация результатов моделирования (сервис Grapher).

ИК SIRIUS II позволяет частично устранить такие недостатки вышеперечисленных средств имитационного моделирования вычислительных систем, как, например, сложность учета специфики проблемных областей решаемых задач, слабую типизацию вычислительных заданий модели и ограниченность моделируемых архитектур.

Заключение

В статье рассмотрены свойства РВС и приведен краткий обзор инструментальных средств ее моделирования. Показано, что рассмотренные инструментальные средства не удовлетворяют всем необходимым требованиям для исследования предметно-ориентированных РВС. С учетом проведенного анализа разработан ИК SIRIUS II для имитационного моделирования таких сред, в котором особое внимание уделено учету специфики предметных областей решаемых задач в процессе имитационного моделирования.

Отличительными особенностями ИК SIRIUS II являются использование концептуальной модели среды при создании и применении ее имитационных моделей, позволяющее расширить диапазон исследуемых архитектур среды по сравнению с известными инструментариями, а также автоматизация разработки имитационных моделей на основе каркасного подхода к конструированию программ.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук Богдановой В.Г. и программисту Пашинину А.А. за помощь в программной реализации сервисов имитационного моделирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 15-29-07955-офи_м и № 16-07-00931-а, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН 1.33П, а также Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-8081.2016.9).

Литература

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.
2. Бычков И. В., Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Корсуков А. С. Децентрализованное управление потоками заданий в интегрированной кластерной системе // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9. № 2. С. 42-54.
3. Бычков И. В., Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Корсуков А. С. Распределение заданий в интегрированной кластерной системе на основе их классификации // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 2. С. 25-32.
4. Бычков И. В., Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Корсуков А. С. Испытание и оценка надежности интегрированных кластерных систем на основе их комплексного моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2013. № 3. С. 3-8.
5. Taha H. A. Operations Research: an Introduction (10th Edition). Pearson, 2016. 848 p.
6. Shah V. A. Analysis Perspective Views of Grid Simulation Tools // Journal of Grid Computing. 2015. Vol. 13. № 2. P. 177-213.
7. Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Александров А. А. Графическая инструментальная среда для описания модели распределенной вычислительной системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 2 (26). С. 30-34.
8. Опарин Г. А., Феоктистов А. Г., Вартамян Э. К. Входной язык объектно-ориентированной базы знаний Grid-системы // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 3-6.
9. 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 // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2014. Vol. 53. № 5. P. 713-722.
10. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Bogdanova V. G., Pashinin A. A. Service-oriented multiagent control of distributed computations // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76. № 11. P. 2000-2010.
11. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Sidorov I. A., Bogdanova V. G., Gorsky S. A. Multiagent control of computational systems on the basis of meta-monitoring and imitational simulation // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. Vol. 52. № 2. P. 107-112.
12. Девятков В. В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 448 с.
13. Grigoryev I. V. AnyLogic 7 in Three Days. Charleston, South Carolina.: CreateSpace, 2015. 202 с.
14. Инструмент многоподходного имитационного моделирования. 2016. URL: <http://www.anylogic.ru> (дата обращения: 29.10.2016).

15. Diamond B., Krahл D., Nastasi A., Tag P. ExtendSim Advanced Technology: Integrated Simulation Database // Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. 2010. P. 32-39.
16. Krahл D. ExtendSim 9 // Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. 2013. P. 4065-4072.
17. Krahл D., Nastasi A. Reliability Modeling with ExtendSim // Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. 2014. P. 4219-4225.
18. ExtendSim Simulation Software by Imagine That Inc. 2016. URL: <http://www.extendsim.com> (дата обращения: 29.10.2016).
19. Minuteman Software. 2016. URL: <http://www.minutemansoftware.com> (дата обращения: 29.10.2016).
20. Stahl I., Henriksen J. O. GPSS 50 Years Old, but Still Young // Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. 2011. P. 3952-3962.
21. Micro Saint – Adept Scientific. 2016. URL: <http://www.adeptscience.co.uk/products/mathsim/microsaint> (дата обращения: 29.10.2016).
22. Simplex3 – The Universal Simulation System. 2016. URL: <http://www.simplex3.net/Body/English/Home.html> (дата обращения: 29.10.2016).
23. Дьяконов В. П. SIMULINK 5/6/7. Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2008. – 784 с.
24. SIMSCRIPT Modeling & Simulation Solutions: Telecommunications. 2016. URL: <http://www.simscrip.com/solutions/telecommunications/telecommunications.html> (дата обращения: 29.10.2016).
25. NetSim: Network Simulator and Emulator. 2016. URL: http://tetcos.com/netsim_gen.html (дата обращения: 29.10.2016).
26. QualNet. SCALABLE Network Technologies. 2016. URL: <http://web.scalable-networks.com/content/qualnet> (дата обращения: 29.10.2016).
27. SteelCentral Network Performance Management. Riverbed Modeler – RU. Riverbed. 2016. URL: <http://ru.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/ru-network-simulation.html> (дата обращения: 29.10.2016).
28. ns-3. 2016. URL: <https://www.nsnam.org> (дата обращения: 29.10.2016).
29. EXata. SCALABLE Network Technologies. 2016. URL: <http://web.scalable-networks.com/content/exata> (дата обращения: 29.10.2016).
30. Ковалев С. Схемная эмуляция в основе системы графического программирования // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. 2006. № 4. С. 16-20.
31. Емельянов А. Симуляторы GPSS World и Actor Pilgrim: экономика и массовое обслуживание // Прикладная информатика. 2007. № 3 (9). С. 73-103.
32. Кореньков В. В., Нечаевский А. В. Пакеты моделирования DATAGRID // Системный анализ в науке и образовании. 2009. № 1. С. 21-35.
33. Минухин С. В., Коровин А. В. Моделирование планирования ресурсов Grid средствами пакета GridSim // Системы обработки информации. 2011. № 3 (93). С. 62-69.

34. Aida K., Takefusa A., Nakada H., Matsuoka S., Nagashima U. Performance Evaluation Model for Job Scheduling in a Global Computing System // Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing. 1998. P. 352-353.
35. Calheiros R., Ranjan R., Beloglazov A., De Rose C., 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. № 1. P. 23-50.
36. Chen W., Deelman E. Workflowsim: A Toolkit for Simulating Scientific Workflows in Distributed Environments // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on E-Science (e-Science). 2012. P. 1-8.
37. Casanova H., Giersch A., Legrand A., Quinson M., Suter F. SimGrid: a Sustained Effort for the Versatile Simulation of Large Scale Distributed Systems. URL: <http://arxiv.org/abs/1309.1630> (дата обращения: 29.10.2016).
38. Грушин Д. А., Поспелов А. И. Система моделирования Grid: реализация и возможности применения // Труды Института системного программирования РАН. 2010. Т. 18. С. 243-260.
39. Xia H. The MicroGrid: Using Online Simulation to Predict Application Performance in Diverse Grid Network Environments // Proceedings of the Workshop on Challenges of Large Applications in Distributed Environments (CLADE'04). IEEE Press. 2004. P. 1-10.
40. Taura K. Grid Explorer: A Tool for Discovering, Selecting, and Using Distributed Resources Efficiently // IPSJ SIG Technical Report. 2004. Vol. 2004. № 81 (HPC-99). P. 235-240.
41. Глинский Б. М., Родионов А. С., Марченко М. А., Подкорытов Д. И., Винс Д. В. Агентно-ориентированный подход к имитационному моделированию суперЭВМ экзафлопсной производительности в приложении к распределенному статистическому моделированию // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2012. № 18 (277). С. 93-106.
42. Foster I. Globus Toolkit Version 4: Software for Service-Oriented Systems // Proceedings of the IFIP International Conference on Network and Parallel Computing. Springer. 2006. P. 2-13.
43. Bellifemine F., Bergenti F., Caire G., Poggi A. Jade: A Java Agent Development Framework // Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations: Multi-Agent Programming. 2006. Vol. 15. P. 125-147.
44. 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. № 7. P. 672-686.
45. Feitelson D. G., Tsafir D., Krakova D. Experience with Using the Parallel Workloads Archive // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2014. Vol. 74. № 10. P. 2967-2982.

46. Chapin S. J., Cirne W., Feitelson D. G. and al. Benchmarks and Standards for the Evaluation of Parallel Job Schedulers // Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Springer-Verlag. Lecture Notes Computer Science. 1999. Vol. 1659. P. 66-89.
47. Fujimoto R.M. Parallel and Distributed Simulation Systems. Wiley, 2000. 300 p.
48. 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. № 34. P. 653-673.
49. 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.
50. Девятков В. В. Некоторые вопросы развития методологии имитационных исследований // Прикладная информатика. 2014. № 4 (52). С. 81-88.
51. Феоктистов А. Г. Методология концептуализации и классификации потоков заданий масштабируемых приложений в разнородной распределенной вычислительной среде // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 1-25.
52. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management // Programme and Abstracts of the 12th International Symposium on Intelligent Systems. Moscow, RUDN Publ., 2016, p. 30.
53. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах. – М.: Научный мир, 2010. – 224 с.
54. Фереферов Е. С., Бычков И. В., Хмельнов А. Е. Технология разработки приложений баз данных на основе декларативных спецификаций // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 85-100.
55. Фереферов Е. С., Хмельнов А. Е. Автоматизация создания пользовательского интерфейса на основе модели приложения баз данных // Вестник Бурятского государственного университета. 2013. № 9. С. 100-118.
56. Горбунов-Посадов М. М. Расширяемые программы. – М.: Полиптих, 1999. – 336 с.
57. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. 2016. URL: <http://hpc.icc.ru> (дата обращения: 15.11.2016).
58. Богданова В. Г., Пашинин А. А. Инструментальные средства автоматизации многовариантных расчетов при исследовании систем массового обслуживания // Фундаментальные исследования. 2016. № 9-3. С. 467-472.

References

1. Bychkov I. V., Korsukov A. S., Oparin G. A., Feoktistov A. G. Instrumental'nyj kompleks dlya organizatsii geterogennykh raspredelennykh vychislitel'nykh sred [The Toolkit for Developing Heterogenic Distributed Computing Environments]. *Informatsionnye Tekhnologii i Vychislitel'nye Sistemy*, 2010, no. 1, pp. 45-54 (in Russian).
2. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Korsukov A. S. Detsentralizovannoe upravlenie potokami zadaniy v integrirovannoi klasternoi sisteme [Decentralized job flow control in the integrated cluster system]. *Bulletin of the Novosibirsk State University, Series: Information Technologies*, 2011, vol. 9, no. 2, pp. 42-54 (in Russian).
3. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Korsukov A. S. Raspredelenie zadaniy v integrirovannoi klasternoi sisteme na osnove ikh klassifikatsii [The distribution of jobs in the integrated cluster system on the basis of their classification]. *Computational Technologies*, 2013, vol. 18, no. 2, pp. 25-32 (in Russian).
4. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Korsukov A. S. Ispytanie i otsenka nadezhnosti integrirovannykh klasternykh sistem na osnove ikh kompleksnogo modelirovaniya [Testing and evaluation of reliability integrated cluster systems based on complex modeling]. *Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii (Herald of Computer and Information Technologies)*, 2013, no. 3, pp. 3-8 (in Russian).
5. Taha H. A. Operations Research: an Introduction (10th Edition). Pearson, 2016. 848 p.
6. Shah V. A. Analysis Perspective Views of Grid Simulation Tools. *Journal of Grid Computing*, 2015, vol. 13, no. 2, pp. 177-213.
7. Oparin G. A., Feoktistov A. G., Aleksandrov A. A. Graficheskaya instrumental'naya sreda dlya opisaniya modeli raspredelennoi vychislitel'noi sistemy [The graphical environment for the description of model of the distributed computing system]. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, 2006, vol. 26, no. 2, pp. 30-34 (in Russian).
8. Oparin G. A., Feoktistov A. G., Vartanian E. K. Vkhodnoi iazyk ob'ektno-orientirovannoi bazy znanii Grid-sistemy [Input language of the object-oriented knowledge base of grid-system]. *Programmnyye Produkty i Sistemy*, 2012, vol. 1, pp. 3-6 (in Russian).
9. 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. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 5, pp. 713-722.
10. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Bogdanova V. G., Pashinin A. A. Service-oriented multiagent control of distributed computations. *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 11, pp. 2000-2010.

11. Bychkov I. V., Oparin G. A., Feoktistov A. G., Sidorov I. A., Bogdanova V.G., Gorsky S.A. Multiagent control of computational systems on the basis of meta-monitoring and imitational simulation. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 107-112.
12. Deviatkov V. V. *Metodologiya i tekhnologiya imitatsionnykh issledovaniy slozhnykh sistem: sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya* [Methodology and Technology of Simulation Studies of Complex Systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013, 448 p. (in Russian).
13. Grigoryev I. V. *AnyLogic 7 in Three Days*. Charleston, South Caroline, CreateSpace, 2015, 202 p.
14. Multimethod Simulation Software and Solutions. 2016. Available at: <http://www.anylogic.ru/> (accessed 29 October 2016).
15. Diamond B., Krah D., Nastasi A., Tag P. ExtendSim Advanced Technology: Integrated Simulation Database. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 2010, pp. 32-39.
16. Krah D. ExtendSim 9. *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, 2013, pp. 4065-4072.
17. Krah D., Nastasi A. Reliability Modeling with ExtendSim. *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 2014, pp. 4219-4225.
18. ExtendSim Simulation Software by Imagine That Inc. 2016. Available at: <http://www.extendsim.com> (accessed 29 October 2016).
19. Minuteman Software. 2016. Available at: <http://www.minutemansoftware.com> (accessed 29 October 2016).
20. Stahl I., Henriksen J. O. GPSS 50 Years Old, but Still Young. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, 2011, pp. 3952-3962.
21. Micro Saint – Adept Scientific. 2016. Available at: <http://www.adeptscience.co.uk/products/mathsim/microsaint> (accessed 29 October 2016).
22. Simplex3 – The Universal Simulation System. 2016. Available at: <http://www.simplex3.net/Body/English/Home.html> (accessed 29 October 2016).
23. Dyakonov V. P. *SIMULINK 5/6/7. Samouchitel'* [SIMULINK 5/6/7. Self-Teacher]. Moscow, DMK Publ., 2008, 784 p. (in Russian).
24. SIMSCRIPT Modeling & Simulation Solutions: Telecommunications. 2016. Available at: <http://www.simscrip.com/solutions/telecommunications/telecommunications.html> (accessed 29 October 2016).
25. NetSim: Network Simulator and Emulator. 2016. Available at: http://tetcos.com/netsim_gen.html (accessed 29 October 2016).
26. QualNet. SCALABLE Network Technologies. 2016. Available at: <http://web.scalable-networks.com/content/qualnet> (accessed 29 October 2016).
27. SteelCentral Network Performance Management. Riverbed Modeler – RU. Riverbed. Available at: <http://ru.riverbed.com/products/performance-management-control/network-performance-management/ru-network-simulation.html> (accessed 29 October 2016).
28. ns-3. 2016. Available at: <https://www.nsnam.org> (accessed 29 October 2016).

29. EXata. SCALABLE Network Technologies. 2016. Available at: <http://web.scalable-networks.com/content/exata> (accessed 29 October 2016).
30. Kovalev S. Skhemnaya emulyatsiya v osnove sistemy graficheskogo programmirovaniya [Circuit emulation as a basis of graphic programming environment]. *Promyshlennye izmereniia, control', avtomatizatsiia, diagnostika*, 2006, no. 4, pp. 16-20 (in Russian).
31. Emel'ianov A. Simuliatory GPSS World i Actor Pilgrim: ekonomika i massovoe obsluzhivanie [GPSS World and Actor Pilgrim simulators: economics and queuing theory]. *Applied informatics*, 2007, vol. 9, no. 3, pp. 73-103 (in Russian).
32. Koren'kov V. V., Nechaevskii A. V. Pakety modelirovaniia DATAGRID [Packets of modeling DATAGRID]. *Sistemnyi analiz v nauke i obrazovanii*, 2009, vol. 1, pp. 21-35 (in Russian).
33. Minukhin S. V., Korovin A. V. Modelirovanie planirovaniia resursov Grid sredstvami paketa GridSim [Modeling of grid resources planning funds package GridSim]. *Sistemy obrabotki informatsii*, 2011, vol. 93, no. 3, pp. 62-69 (in Russian).
34. Aida K., Takefusa A., Nakada H., Matsuoka S., Nagashima U. Performance Evaluation Model for Job Scheduling in a Global Computing System. *Proceedings of 7th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing*, 1998, pp. 352-353.
35. Calheiros R., Ranjan R., Beloglazov A., De Rose C., 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, no. 1, pp. 23-50.
36. Chen W., Deelman E. Workflowsim: A Toolkit for Simulating Scientific Workflows in Distributed Environments. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on E-Science (e-Science)*, 2012, pp. 1-8.
37. Casanova H., Giersch A., Legrand A., Quinson M., Suter F. SimGrid: a Sustained Effort for the Versatile Simulation of Large Scale Distributed Systems. *Preprint on Arxiv.org*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1309.1630> (accessed 29 October 2016).
38. Grushin D. A., Pospelov A. I. Sistema modelirovaniia Grid: realizatsiia i vozmozhnosti primeneniia [Grid modeling environment: implementation and application]. *Proceedings of the Institute for System Programming*, 2010, vol. 18, pp. 243-260 (in Russian).
39. Xia H. The MicroGrid: Using Online Simulation to Predict Application Performance in Diverse Grid Network Environments. *Proceedings of the Workshop on Challenges of Large Applications in Distributed Environments (CLADE'04)*, IEEE Press, 2004, pp. 1-10.
40. Taura K. Grid Explorer: A Tool for Discovering, Selecting, and Using Distributed Resources Efficiently. IPSJ SIG Technical Report, 2004, vol. 2004, no. 81 (HPC-99), pp. 235-240.

41. Glinskii B. M., Rodionov A. S., Marchenko M. A., Podkorytov D. I., Vins D. V. Agentno-orientirovannyi podkhod k imitatsionnomu modelirovaniu superEVM ekzaflopsnoi proizvoditel'nosti v prilozhenii k raspredelennomu statisticheskomu modelirovaniu [Agent-oriented approach to simulate exaflop supercomputer with application to distributed stochastic simulation]. *Bulletin of the South Ural state university, Series: Mathematical modelling, programming and computer software*, 2012, vol. 277, no. 18, pp. 93-106 (in Russian).
42. Foster I. Globus Toolkit Version 4: Software for Service-Oriented Systems. *Proceedings of the IFIP International Conference on Network and Parallel Computing*. Springer, 2006, pp. 2-13.
43. Bellifemine F., Bergenti F., Caire G., Poggi A. Jade: A Java Agent Development Framework. *Multiagent Systems, Artificial Societies, And Simulated Organizations: Multi-Agent Programming*, 2006, vol. 15, pp. 125-147.
44. Iosup A., Li H., Jan M., Anoep S., Dumitrescu C., Wolters L., Epema D. H. J. The Grid Workloads Archive. *Future Generation Computer Systems*, 2008, vol. 24, no. 7, pp. 672-686.
45. Feitelson D. G., Tsafirib D., Krakova D. Experience with Using the Parallel Workloads Archive. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2014, vol. 74, no. 10, pp. 2967-2982.
46. Chapin S. J., Cirne W., Feitelson D. G. and al. Benchmarks and Standards for the Evaluation of Parallel Job Schedulers. Job Scheduling Strategies for Parallel Processing. Springer-Verlag. *Lecture Notes Computer Science*, 1999, vol. 1659, pp. 66-89.
47. Fujimoto R. M. *Parallel and Distributed Simulation Systems*. USA, Wiley, 2000, 300 p.
48. 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, pp. 653-673.
49. Bakhmurov A. G., Volkanov D. Iu., Smelianskii R. L., Chemeritskii E. V. Integrated Environment for the Analysis and Design of Distributed Real-Time Embedded Computing Systems. *Programming and Computer Software*, 2013, vol. 39, no. 5, pp. 242-254.
50. Deviatkov V. V. Nekotorye voprosy razvitiia metodologii imitatsionnykh issledovaniy [Some issues of methodology simulation research development]. *Applied informatics*, 2014, vol. 52, no. 4, pp. 81-88 (in Russian).
51. Feoktistov A. G. Metodologiya kontseptualizatsii i klassifikatsii potokov zadaniy masshtabiruemykh prilozhenii v raznorodnoi raspredelennoi vychislitel'noi srede [The Methodology of Conceptualizing and Classifying Job Flows of the Scalable Applications in a Heterogeneous Distributed Computing Environment]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 1-25 (in Russian).
52. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management. *Programme and Abstracts of the 12th International Symposium on Intelligent Systems*, Moscow, RUDN Publ., 2016, p. 30.

53. Lapshin V. A. *Ontologii v kompiuternykh sistemakh* [Ontologies in Computer Systems]. Moscow, Scientific World Publishing House, 2010, 224 p.
54. Fereferov E. S., Bychkov I. V., Khmel'nov A. E. Tekhnologiya razrabotki prilozhenii baz dannykh na osnove deklarativnykh spetsifikatsii [Technology for database applications based on declarative specifications]. *Computational technologies*, 2014, vol. 19, no. 5, pp. 85-100 (in Russian).
55. Fereferov E. S., Khmel'nov A. E. Avtomatizatsiia sozdaniia pol'zovatel'skogo interfeisa na osnove modeli prilozheniia baz dannykh [Automatization of user interface creation based on models of database application]. *Bulletin of the Buryat state university*, 2013, no. 9, pp. 100-118 (in Russian).
56. Gorbunov-Posadov M. M. *Rasshiriaemye programmy* [Expanded programs]. Moscow, Poliptikh, 1999, 336 p. (in Russian).
57. Irkutsk supercomputer center SB RAS. 2016. Available at: <http://hpc.icc.ru> (accessed 15 November 2016).
58. Bogdanova V. G., Pashinin A. A. Instrumental'nye sredstva avtomatizatsii mnogovariantnykh raschetov pri issledovanii sistem massovogo obsluzhivaniia [Tools for Automation Multivariate Computations in the Study Queuing Systems]. *Fundamental research*, 2016, no. 9-3, pp. 467-472.

Статья поступила 15 ноября 2016 г.

Информация об авторах

Феоктистов Александр Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент. Старший научный сотрудник лаборатории параллельных и распределенных вычислительных систем. Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. Область научных интересов: концептуальное программирование, распределенные вычисления, имитационное моделирование, мультиагентные технологии. E-mail: agf65@yandex.ru

Корсуков Александр Сергеевич – кандидат технических наук. Научный сотрудник лаборатории параллельных и распределенных вычислительных систем. Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. Область научных интересов: распределенные вычисления, мультиагентные технологии, веб-программирование. E-mail: alexask@mail.ru

Дядькин Юрий Алексеевич – аспирант лаборатории параллельных и распределенных вычислительных систем. Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН. Область научных интересов: концептуальное программирование, распределенные вычисления, имитационное моделирование. E-mail: dyadkin_ua@inbox.ru

Адрес: 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 134.

Toolkits for simulation modeling of subject-oriented distributed computing systems

A. G. Feoktistov, A. S. Korsukov, Yu. A. Dyadkin

Relevance. The rapid development of high-performance computing, including distributed computing environments of different purposes, leads to the topicality of a study of their effectiveness and reliability in solving large-scale fundamental and applied problems. Simulation modeling is one of the main tools of such study. **The aim of this paper** is the analysis of the current state in the field of a study of the distributed computing environments based on the simulation modeling, the determination of operational and functional requirements to the tools for a model experiments support, and the expansion of the existing base of tools. The particular attention is paid to the use of a subject domains specificity for solved problems in the process of simulation modeling. **Methods.** In the paper, we present new tools for the development of simulation models. These tools integrate methods of conceptual programming and program design automation based on the framework-approach to programming. This integration provides the effective implementation of the automated transition from the conceptual model of the environment to its simulation model. **Novelty.** The use of a conceptual model of the environment in the creation and application of its simulation models allows to extend the range of studied architectures of the environment in comparison with known toolkits. The conceptual model includes the several components of comprehensive knowledge. The computational knowledge represents software modules for solving problems in subject domains and working with the environment objects, including planning of they actions. The schematic knowledge describes the modular structure of models and algorithms. The production knowledge is used to support decision-making on the select of optimal algorithms, depending on the environment state. The last component of knowledge is the information about the software and hardware infrastructure of the environment and administrative policies in its nodes. **Results.** The comparative analysis of the known tools for simulation modeling of the environment allowed us to determine the relevant directions of the expansion of the existing base of tools. We developed toolkit SIRIUS II for simulation modeling of the subject-oriented environment taking into account this analysis. This toolkit is partially eliminates a range of drawbacks of the analyzed tools. **Practical relevance.** Results of this study can be used by specialists in the field of parallel and distributed computing for the analysis and evaluation of the reliability and efficiency of computational systems used by them.

Key words: distributed computing environment, simulation modeling, toolkits.

Information about Authors

Feoktistov Aleksandr Gennadyevich – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Senior Research Officer of the Laboratory of Parallel and Distributed Computing Systems. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS. Field of research: conceptual programming, distributed computing, simulation modeling, multi-agent technologies. E-mail: agf65@yandex.ru

Korsukov Aleksandr Sergeevich – Ph.D. of Engineering Sciences. Research Officer of the Laboratory of Parallel and Distributed Computing Systems. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS. Field of research: distributed computing, multi-agent technologies, web programming. E-mail: alexask@mail.ru

Dyadkin Yuriy Alekseevich – Post-graduate Student of the Laboratory of Parallel and Distributed Computing Systems. Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS. Field of research: distributed computing, conceptual programming, simulation modeling. E-mail: dyadkin_ua@inbox.ru

Address: Russia, 664033, Irkutsk, Lermontov Str., 134.