

УДК 004.942+004.272

Дата подачи статьи: 07.05.15

DOI: 10.15827/0236-235X.111.075-079

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

### **В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ**

*(Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-29-07955-офи\_м)*

*А.Г. Феоктистов, к.т.н., доцент, agf65@yandex.ru*

*(Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,  
ул. Лермонтова, 134, г. Иркутск, 664033, Россия);*

*О.Ю. Башарина, к.т.н., ст. преподаватель, basharinaolga@mail.ru*

*(Иркутский государственный университет,  
ул. Карла Маркса, 1, г. Иркутск, 664003, Россия)*

Одним из наиболее эффективных подходов к анализу процессов функционирования сложных систем является имитационное моделирование. Построение моделирующей программы, адекватно отображающей исследуемый объект, во многом является нетривиальной задачей и требует от ее разработчика высокой математической и программистской квалификации, тем более, когда 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 специалиста-предметника, формулирующего задачу, к математику, создающему модель, затем к программисту и только потом – к тем, кто занимается непосредственно вычислениями. В статье рассматриваются новые инструментальные средства автоматизации процесса имитационного моделирования сложных систем, базирующиеся на использовании распределенной вычислительной среды для выполнения моделей. Приводится технология применения инструментальных средств при решении задач исследования сложных систем. Процесс моделирования осуществляется путем многовариантных распределенных вычислений, что позволяет существенно сократить время решения задачи. В качестве распределенной вычислительной среды предлагается использовать вычислительные кластеры, организованные на базе персональных компьютеров учебно-образовательных и научных организаций, объединенных локальной сетью. Приводятся примеры применения инструментальных средств в процессе решения ряда важных практических задач. Принципы работы, технология применения, способы и средства реализации рассмотренных инструментов обеспечивают широкий спектр использования их функциональных возможностей для имитационного моделирования сложных систем в самых различных сферах человеческой деятельности.

**Ключевые слова:** *сложная система, автоматизация имитационного моделирования, инструментальные средства, распределенная вычислительная среда.*

Одной из важных проблем в области системного анализа является исследование динамики функционирования сложных технических и экономических систем на различных этапах их проектирования, испытания и эксплуатации. Система представляет собой совокупность каких-либо объектов, функционирующих и взаимодействующих между собой для достижения определенной цели [1]. Фактором повышения сложности системы является наличие у нее таких свойств, как большое число и неоднородность объектов, динамичность и стохастичность процессов их взаимодействия, отсутствие унифицированного математического формализма для описания любого объекта системы с требуемой степенью детализации его свойств и невозможность проведения полномасштабных натурных экспериментов с этой системой. Зачастую в процессе комплексного анализа сложных систем возникают задачи исследования отдельных видов оборудования и аппаратуры, входящих в их инфраструктуру, а также технологических процессов эксплуатации этих устройств. В этом случае применение имитационного моделирования позволяет качественно решить эти задачи.

Создание и исследование имитационных моделей сложных систем требует значительных усилий высококвалифицированных специалистов, а их выполнение – ресурсоемких вычислений. В числе сложностей, возникающих перед исследователем при алгоритмизации логики функционирования исследуемой системы, можно выделить выбор языка или системы программирования и программно-аппаратной платформы для проведения вычислительного эксперимента (тем более, если речь идет о распределенной вычислительной среде), разработку и реализацию модели исследуемой системы, планирование и проведение вычислительного эксперимента, анализ результатов моделирования. Эффективное выполнение перечисленных работ обоснованно требует применения средств их автоматизации [2].

В этих целях авторами статьи разработан программный комплекс поддержки проведения вычислительного эксперимента для имитационных моделей, реализованных на языке General Purpose Simulation System (GPSS) [3]. Комплекс включает инструментальные средства построения имитационных моделей на основе шаблонов типовых объектов исследуемых систем (модулей), подго-

товки 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 комплексами.

Рассматриваемый программный комплекс ориентирован на вычислительные кластеры, организованные на базе персональных компьютеров учебно-образовательных и научных организаций. На кластерах должна быть установлена *система управления прохождением задач* (СУПЗ) Condor [4]. Данная система обладает следующими преимуществами: ориентируется на объединение совокупности персональных компьютеров в единый вычислительный кластер на базе любой имеющейся локальной сети, что требует минимальных финансовых и временных затрат; функционирует под управлением различных операционных систем, включая ОС Windows; распространяется свободно, с открытым кодом.

Использование вычислительных кластеров, организованных на базе персональных компьютеров, имеет высокую практическую значимость прежде всего для проведения многовариантных расчетов и вследствие этого дает возможность выполнять имитационное моделирование с большой эффективностью, сравнимой с высокопроизводительными вычислениями на суперкомпьютерах. Под высокопроизводительными вычислениями понимается процесс применения программно-аппаратных средств для решения ресурсоемкой задачи, позволяющий ускорять получение решения пропорционально увеличению числа используемых вычислительных единиц (например узлов или ядер). Основным препятствием к такому ускорению являются накладные расходы на запуск заданий и обмен данными между ними. В рамках предложенного подхода осуществляются многовариантные расчеты, не предполагающие обмен данными между отдельными заданиями, а накладные расходы на запуск сравнимы с соответствующими накладными расходами на суперкомпьютерах. Более того, при существенном увеличении времени прогона модели разница между долями накладных расходов на запуск заданий на кластере из персональных компьютеров и на суперкомпьютере практически нивелируется.

Технология проведения вычислительного эксперимента с использованием разработанного про-

граммного комплекса и кластера под управлением СУПЗ Condor включает следующие этапы.

*Планирование эксперимента* [5]: определение числа прогонов модели для ее перехода в рабочий режим и функционирование непосредственно в рабочем режиме, выбор основных факторов и наблюдаемых переменных модели, проведение факторного анализа. В программном комплексе реализованы средства проведения факторного анализа, которые в отличие от стандартных средств GPSS World [6] позволяют использовать неограниченное число факторов и их уровней, обеспечивают возможность параллельного проведения частичного факторного эксперимента, автоматизацию процессов его планирования и выполнения.

*Подготовка исходных данных*, необходимых для проведения эксперимента: выбор модели GPSS, подключение файлов с дополнительными фрагментами модели и указание файлов с вариантами исходных данных.

*Подготовка задания* для прогона модели в распределенной вычислительной среде. Задание представляет собой спецификацию процесса решения задачи, содержащую информацию о требуемых вычислительных ресурсах, исполняемой прикладной программе, вариантах входных/выходных данных, критериях качества выполнения задания, а также другие необходимые сведения.

*Планирование выполнения задания*. Выбор узлов вычислительного кластера, в которых будет выполняться задание, осуществляется с помощью логико-вероятностного алгоритма многоуровневого конкретизирующего планирования заданий с заданными критериями качества (показателями надежности, времени и стоимости) их выполнения. Процесс планирования осуществляется в четыре этапа специальной системой программных агентов, представляющих узлы вычислительного кластера. Этапы процесса планирования: формирование всего множества доступных узлов; конкретизация сформированного множества путем исключения из него перегруженных узлов (относительно текущей средней загрузки узлов с учетом имеющихся очередей заданий); построение поливариантного плана выполнения задания в узлах; извлечение из построенного поливариантного плана специализированного плана, удовлетворяющего заданным критериям качества выполнения задания с учетом текущего состояния вычислительной среды и назначение узлов вычислительного кластера для выполнения этого задания. Построение специализированного плана осуществляется на основе экономического механизма регулирования спроса и предложения вычислительных ресурсов [7].

*Выполнение задания* в назначенных узлах вычислительного кластера и передача результатов моделирования в узел, с которого производился

запуск. В случае выхода из строя назначенных узлов или изменения состояния вычислительной среды система агентов конкретизирует поливариантный план выполнения задания с учетом произведенных вычислений и извлекает из него новый специализированный план, по которому и продолжается вычислительный процесс.

*Сбор отчетов* системы GPSS о результатах моделирования, полученных в ходе вычислительного эксперимента, и извлечение из них актуальных данных для дальнейшего анализа.

*Анализ данных* на основе многокритериальной оптимизации. Для решения задачи многокритериального выбора оптимальных вариантов значений показателей эффективности функционирования исследуемой системы применяется метод лексикографического упорядочения или мажоритарный метод выбора. Эти методы выбраны вследствие простоты их использования для специалистов предметной области и программной реализации по сравнению с другими подобными методами [8].

Все рассмотренные этапы работы полностью или частично автоматизированы.

Приведем ряд задач складской логистики, решенных с помощью рассмотренной технологии. *Логистический складской комплекс* (ЛСК) представляет собой сложно организованный хозяйственный объект, ориентированный на управление грузопотоками большой емкости, в том числе на дистрибуцию товаров, и, вследствие этого, играет важную роль в экономической сфере деятельности. Особое внимание привлекают региональные складские комплексы, так как сегодня значительное число крупных российских производственных компаний, торговых сетей и иностранных ритейлеров выбирают расширение сбыта продукции в регионах в качестве основного направления своего развития и остро нуждаются в качественных масштабных услугах складской логистики. В этой связи важнейшими задачами складского менеджмента становятся анализ и оптимизация организационно-функциональной структуры как эксплуатируемых, так и проектируемых ЛСК. В качестве основных показателей функционирования ЛСК в задачах складской логики использовались показатели качества функционирования ЛСК, уровня стабильности функционирования ЛСК и производительности склада [9, 10]. Эти показатели положены в основу оценки качества логистического сервиса, эффективности выполнения логистических операций и функционирования исследуемой системы.

*Моделирование процесса погрузочно-разгрузочных работ* (ПРР) (на примере Иркутского хладокомбината). Исследуемый складской комплекс осуществляет операции с входными и выходными материальными потоками как по плановым, так и по случайным заявкам. В плановых заявках, формирующихся ежесуточно, содержится информа-

ция о времени поступления/убытия груза, времени обслуживания заявки, об объеме груза и требуемых для проведения работ ресурсах. Интенсивность поступления случайных заявок различна, поступление/убытие транспортных средств различной грузоподъемности подчиняется определенному вероятностному распределению. Для обслуживания заявок используются технические и человеческие ресурсы: электропогрузчики, водители электропогрузчиков, грузчики и кладовщики. Специфической особенностью проведения ПРР, как правило, не реализуемой в современных автоматизированных системах управления складом, является необходимость учета этажности складского комплекса и использования лифтов. Задача решалась путем многовариантных расчетов с последующим многокритериальным выбором вариантов исходных данных. Результаты моделирования были использованы в управленческих службах хладокомбината при разработке методики формирования плановых и учета случайных заявок клиентов, формировании состава и графика работ бригад грузчиков и кладовщиков, планировании технического обслуживания и обновления парка электропогрузчиков. В перечисленных задачах вспомогательная подзадача построения вариантов расписаний различных работ решалась с помощью инструментальных средств решения булевых уравнений [11].

*Моделирование уровня обслуживания ПРР*. Исследуемый складской комплекс предоставляет услуги по проведению ПРР при использовании авто- и железнодорожного транспорта различной грузоподъемности. Существуют нормативы проведения ПРР с учетом вида грузового транспорта, вида и категории груза. Невыполнение данных нормативов влечет за собой штрафные санкции. Необходимо определить такое количество ресурсов на складе (человеческих и технических), чтобы среднее время ожидания транспортом ПРР было меньше заданного значения  $a$ , процент времени простоя персонала склада не превышал заданного значения  $b$ , а показатели процесса ПРР оставались в допустимых пределах. Задача решалась путем многовариантных расчетов с последующим выбором вариантов исходных данных, соответствующих значениям наблюдаемых переменных, которые удовлетворяют заданным ограничениям. Результаты моделирования были использованы в управленческих службах хладокомбината при разработке нормативов ПРР и определении категорий «лояльных» клиентов.

*Анализ фондоемкости выпускаемой продукции* (на примере завода «Родник»). Исследуемый производственный объект осуществляет выпуск напитков с использованием различных технологических линий и ряда складских объектов для хранения выпускаемой продукции. Спецификой решения данной задачи является необходимость

моделирования как складских, так и производственных процессов. Комплексное моделирование производственно-складских процессов выполнялось с использованием вспомогательной аналитической модели [12] учета фондоемкости продукции и применением регрессионного анализа. На основании результатов исследования управленческими службами производственного объекта были внесены коррективы в ассортимент и объем выпускаемой продукции, а также проведена оптимизация схемы складирования товаров, что привело к снижению фондоемкости продукции и повышению ее рентабельности.

Имитационные модели разработаны в системе GPSS World Student Version, функционирующей под управлением ОС семейства Windows. Имитационное моделирование выполнялось на кластере разнородных персональных компьютеров с ОС Windows NT и СУПЗ Condor (при решении различных задач число доступных компьютеров кластера изменялось от 4 до 20 единиц) и кластере из 12 однородных персональных компьютеров с ОС Windows XP и СУПЗ Condor. Общее число доступных ядер изменялось от 8 до 64. Число вариантов данных в вычислительных экспериментах изменялось от 100 до 10 000. Для обработки одного варианта данных генерировалось индивидуальное задание для СУПЗ Condor.

В заключение отметим, что в статье предложены средства и технология автоматизации проведения имитационного моделирования для GPSS-моделей с использованием кластера под управлением СУПЗ Condor. Разработанный программный комплекс позволяет запускать задания, в том числе и многовариантные, а также проводить дисперсионный анализ модели, используя неограниченное число факторов и их уровней. Возможно расширение функционала программного комплекса путем реализации инструментов проведения регрессионного анализа. Разработанные инструментальные средства обеспечивают дополнительные функциональные возможности для систем управления складскими комплексами и ориентированы на подготовку и проведение экспериментов с помощью высокопроизводительных вычислений с целью ускорения получения результатов для принятия эффективных логистических решений. Принципы работы, методика применения, спосо-

бы и средства реализации рассмотренных инструментов [12–14] обеспечивают широкий спектр использования их функциональных возможностей для имитационного моделирования сложных систем в самых различных сферах деятельности, например, в управлении экономическими и производственными объектами, в процессе эксплуатации высокопроизводительных вычислительных систем, а также допускают комплексирование пакетов моделирования.

#### Литература

1. Naylor T.H. Computer simulation experiments with models of economic systems. NY, J. Wiley, 1971, 502 p.
2. Xia S., Smith N. Automated modelling: a discussion and review. The Knowledge Engineering Review, 1996, vol. 11, no. 2, pp. 137–160.
3. Schriber T.J. Simulation using GPSS. New York, John Wiley, 1974, 534 p.
4. Litzkow M., Livny M., Mutka M. Condor – A Hunter of Idle Workstations. Proc. 8th Intern. Conf. of Distributed Computing Systems (ICDCS), Los Alamitos, IEEE CS Press, 1988, pp. 104–111.
5. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965. 340 с.
6. GPSS World Tutorial Manual. URL: [http://www.minute-mansoftware.com/tutorial/tutorial\\_manual.htm](http://www.minute-mansoftware.com/tutorial/tutorial_manual.htm) (дата обращения: 3.03.2015).
7. 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. Journ. of Computer and Systems Sciences Intern., 2014, vol. 53, no. 5, pp. 713–722.
8. Шоломов Л.А. Логические методы исследования дискретных моделей выбора. М.: Наука, 1989. 288 с.
9. Дыбская В.В. Логистика для практиков. Эффективные решения в складировании и грузопереработке. М.: Изд-во ВИНТИ РАН, 2002. 264 с.
10. Кононенко О., Маханько О. Анализ финансовой отчетности. Харьков: Фактор, 2006. 200 с.
11. Опарин Г.А., Богданова В.Г. Инструментальные средства автоматизации параллельного решения булевых уравнений на многоядерных процессорах // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 10–14.
12. Башарина О.Ю., Горский С.А. Моделирование складской логистики: разработка и комплексирование в ORLANDO TOOLS // Программные продукты и системы. 2012. № 1. С. 89–91.
13. Архипкин О.В., Лескова Т.М., Кородюк И.С. Организация процессов производственного менеджмента и принципы виртуальных производств // Экономічний часопис-XXI. 2015. Т. 1. № 1–2. С. 44–47.
14. Корсуков А.С. Оценка надежности функционирования интегрированной кластерной системы с метапланировщиком Gridway // Программные продукты и системы. 2013. № 1. С. 67–69.

DOI: 10.15827/0236-235X.111.075-079

Received 26.05.15

#### AUTOMATION OF COMPLEX SYSTEMS SIMULATION MODELING IN A DISTRIBUTED COMPUTING ENVIRONMENT

(The study was partially supported by RFBR, project no. 15-29-07955-офу\_м)

**Feoktistov A.G.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, [agf65@yandex.ru](mailto:agf65@yandex.ru)

(Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Lermontov St. 134, Irkutsk, 664033, Russian Federation);

**Basharina O.Yu.**, Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, [basharinao@mail.ru](mailto:basharinao@mail.ru)  
(Irkutsk state university, Karl Marks St. 1, Irkutsk, 664003, Russian Federation)

**Abstract.** One of the most effective approaches to the analysis of complex systems is simulation modeling. The process of building simulation program, which adequately reflects the object of study, is a non-trivial task and requires high

mathematical and programming skills from its developer, especially when it comes to a parallel or distributed program. Thus, there is a need for high-level tools for automation of this process, that will maximize the potential of high-performance IT-equipment and provide building a complex technological chain: from task formulation to model creation, then to software development and to carrying out a computational experiment. The article considers new software tools of complex system modeling based on the use of distributed computing environment. The authors represent the technology of software tools implementing to solve the research tasks of complex systems. Modeling is carried out using multiversion distributive calculations that allow reducing the time for task solution. As an example of distributive computing environment the authors take computer clusters based on the personal computers from educational and scientific establishments. The article represents the examples of software tools implementation in the process of important practical tasks solution. The principles of work, the technology of application, means and ways of implementing the above mentioned instruments provide the wide range of using their functional possibilities for complex systems simulation modeling in different fields of human activity.

**Keywords:** complex system, simulation modeling automation, GPSS, toolkit, distributed computing environment.

#### References

1. Naylor T.H. *Computer simulation experiments with models of economic systems*. NY, J. Wiley Publ., 1971, 502 p.
2. Xia S., Smith N. Automated modelling: a discussion and review. *The Knowledge Engineering Review*. 1996, vol. 11, no. 2, pp. 137–160.
3. Schriber T.J. *Simulation using GPSS*. NY, J. Wiley Publ., 1974, 534 p.
4. Litzkow M., Livny M., Mutka M. Condor – A Hunter of Idle Workstations. *Proc. of the 8th Int. Conf. of Distributed Computing Systems (ICDCS)*. Los Alamitos, IEEE CS Press, 1988, pp. 104–111.
5. Nalimov V.V., Chernova N.A. *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremalnykh eksperimentov* [Statistical methods for planning extreme experiments]. Moscow, Nauka Publ., 1965, 340 p.
6. *GPSS World Tutorial Manual*. 2001. Available at: [http://www.minutemansoftware.com/tutorial/tutorial\\_manual.htm](http://www.minutemansoftware.com/tutorial/tutorial_manual.htm) (accessed March 3, 2015).
7. 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. *Journ. of Computer and Systems Sciences Int.* 2014, vol. 53, no. 5, pp. 713–722.
8. Sholomov L.A. *Logicheskie metody issledovaniya diskretnykh modeley vybora* [Logical Research Methods of Discrete Choice Models]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 288 p. (in Russ.).
9. Dybskaya V.V. *Logistika dlya praktikov. Effektivnye resheniya v skladirovanii i gruzopererabotke* [Logistics for Practitioners. Effective Solutions in Warehousing and Cargo Handling]. Moscow, VINITI RAN Publ., 2002, 264 p. (in Russ.).
10. Kononenko O., Makhanko O. *Analiz finansovoy otchetnosti* [Analysis of Financial Statements]. Kharkov, Faktor Publ., 2006, 200 p. (in Russ.).
11. Oparin G.A., Bogdanova V.G. Parallel computing toolkit for solving boolean equations on multi-core processors. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2012, no. 1, pp. 10–14 (in Russ.).
12. Basharina O.Y., Gorsky S.A. Modeling of warehousing: development and integration in Orlando tools. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2012, no. 1, pp. 89–91 (in Russ.).
13. Arkhipkin O.V., Leskova T.M., Korodyuk I.S. Organization of management processes and principles of virtual production. *The Economic Annals-XXI Journ.* 2015, no. 1-2 (1), pp. 44–47 (in Russ.).
14. Korsukov A.S. The evaluation of reliability of the integrated cluster system with the Gridway meta-scheduler. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2013, no. 1, pp. 67–69 (in Russ.).

Реклама

### Всероссийский конкурс технических проектов социальной направленности «Композит»

Конкурс проводится при поддержке Министерства образования и науки РФ и Тверского государственного университета с целью развития профессиональных компетенций и интеллектуального потенциала студентов, популяризации инженерных специальностей среди молодежи.

С 21 по 24 сентября на базе Тверского государственного университета пройдут его очный этап, включающий презентацию и сборку устройств для людей с ограниченными возможностями, а также образовательную программу, выставки и экскурсии, и финал, где будут определены самые перспективные проекты по разработке социально-полезных устройств, предназначенных для людей с инвалидностью, с помощью современных и широкодоступных технологий, таких как 3D-печать, Arduino и Leap Motion. Задания конкурса составлены с учетом деятельности приоритетных государственных программ «Доступная среда» и «Год литературы».

Финалисты конкурса получают не только ценные призы, но и возможность опубликовать результаты своей исследовательской деятельности в журнале «Программные продукты и системы».

На сайте конкурса <http://physica.tversu.ru>, а также в официальной группе в соцсетях [https://vk.com/camp\\_kompozit](https://vk.com/camp_kompozit) можно ознакомиться с положением о конкурсе, а также с дополнительной информацией.

Оргкомитет