

УДК 004.942

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ

Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Горский С.А.

*ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова» СО РАН,
Иркутск, e-mail: agf65@yandex.ru*

В настоящее время повышение эффективности управления сложными объектами в большинстве случаев достигается путем интеллектуализации их управляющих систем. В связи с этим в статье предложен новый подход к предметно-ориентированному исследованию систем массового обслуживания. В рамках данного подхода разрабатываются новые интеллектуальные модели, алгоритмы, методы и инструментарии, предназначенные для поддержки принятия решений в процессе управления системами массового обслуживания на базе структурного и параметрического анализа их характеристик, свойств и процессов работы. Перечисленные разработки объединяются в новую специализированную технологию принятия решений. Разрабатываемые методы и средства моделирования систем массового обслуживания будут использованы в процессе исследования важных инфраструктурных объектов Байкальской природной территории, использующих природосберегающие технологии. С этой целью разрабатываются цифровые двойники инфраструктурных объектов. Они позволяют расширить диапазон исследуемых условий функционирования инфраструктурных объектов. Их применение дает возможность более точно оценить достигаемую эффективность их создания и работы, сэкономить ресурсы, минимизировать риски ошибок и сбоев оборудования, продлить срок стабильной работы данных объектов. Дополнительно можно будет получить максимальную отдачу от инвестиций в природосберегающие технологии, повысить конкурентоспособность объектов и нарастить лояльность их клиентов.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, моделирование, цифровые близнецы, инфраструктурные объекты, высокопроизводительные вычисления

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT TECHNOLOGY FOR DECISION MAKING SUPPORT IN QUEUING SYSTEMS BASED ON THEIR SIMULATION MODELING ON SUPERCOMPUTERS

Feoktistov A.G., Kostromin R.O., Gorskiy S.A.

*Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk,
e-mail: agf65@yandex.ru*

Nowadays, improving the management efficiency of complex objects, as a rule, can only be achieved through the intellectualization of their control systems. In this regards, we propose a new approach to the subject-oriented study of queuing systems. In this approach, new intelligent models, algorithms, methods, and tools are developed. They will be integrated within the framework of a unified decision support technology for managing queuing systems based on an analysis of their structural and parametric characteristics. The developed methods and tools of modeling queuing systems will be used in the process of studying the important infrastructural objects of the Baikal Natural Territory that use environmentally friendly technologies. To this end, digital twins of infrastructural objects are developed. They enable to expand the range of studied conditions for the operation of infrastructural objects. We will more accurately evaluate the achieved efficiency of their creation and operation, save resources, minimize the risks of equipment errors and failures, and extend the period of stable operation of these objects. In addition, it will be possible to obtain the maximum possible return on investment in environmentally friendly technologies, increase the competitiveness of objects, and enhance customer loyalty.

Keywords: queuing systems, modeling, digital twins, infrastructural objects, high-performance computing

В настоящее время исследование поведения сложноорганизованных социально-экономических и технических систем массового обслуживания (СМО) во времени на разных этапах их проектирования и функционирования является одной из важных проблем имитационного моделирования. Сложность динамической структуры СМО обусловлена: большим числом важных характеристик функционирования СМО и связей между ними, представленными функциональными, статистическими, не-

однозначными или иными отображениями; существованием широкого спектра случайных событий и законов их распределения; наличием ограничений различных видов.

СМО используются для моделирования процессов обслуживания клиентов, производства, транспортировки, связи, обработки информации, функционирования инфраструктурных объектов и других процессов. Применение имитационного моделирования позволяет существенно упростить разработку оптимальных режимов

их работы, а также нахождение и выбор управляющих параметров. В рамках такого моделирования разрабатывается имитационная программа, воспроизводящая процессы работы исследуемой системы, определяются ее входные и выходные (наблюдаемые) параметры, задаются внешние воздействия. Подготовка многовариантных расчетов осуществляется путем перебора значений входных переменных в заданных диапазонах. Для каждого варианта входных переменных рассчитываются соответствующие выходные переменные. Полученные результаты расчетов оптимизируются. Таким образом, оптимальные параметры процессов работы системы ищутся на основе метода грубой силы. Качество полученных результатов моделирования во многом обусловлено степенью полноты знаний о предметной области исследуемой системы, а также алгоритмах, используемых при решении задач.

Имитационное моделирование на основе многовариантных расчетов характеризуется высокой комбинаторной сложностью. Это в свою очередь приводит к большим затратам оперативной памяти и дискового пространства, а также значительной нагрузке на интерконнект. Поэтому для получения качественных результатов моделирования СМО зачастую требуется применение средств высокопроизводительных вычислений. Как правило, такие средства предоставляются центрами коллективного пользования (ЦКП). В противном случае, необходимо огрубление модели СМО, обуславливающее снижение качества результатов решения задачи. Использование параллельных или распределенных вычислений обеспечивает поддержку проведения крупномасштабных имитационных экспериментов, обработку исходных данных большего объема и расширение класса решаемых задач.

Необходимость учета специфики работы СМО и анализа информационных потоков данных актуализирует переход от традиционной математической модели системы к ее качественно новому виду – цифровому двойнику, содержащему актуальные данные о всем ее жизненном цикле [1, 2]. В настоящее время такой переход возможен благодаря стремительному развитию информационных технологий, увеличению размеров систем хранения данных и существенному росту производительности вычислительных систем, необходимому для обработки больших данных и эффективного извлечения знаний [3, 4].

Анализ научных работ по имитационному моделированию [5, 6], связанных

с темой исследования, позволяет сделать вывод, что пользователи могут выбирать из ряда доступных инструментов моделирования, которые отличаются точностью представления реального мира и эффективностью. Однако многие инструменты не используют доступные мощности вычислительной среды и не учитывают специфику предметных областей исследуемых систем [7], а также не обеспечивают сервис-ориентированный интерфейс, являющийся важным компонентом современных средств моделирования [8].

Зачастую известные в настоящее время средства имитационного моделирования СМО в высокопроизводительной вычислительной среде либо являются узкоспециализированными, не обладающими всеми необходимыми функциональными возможностями для решения обозначенных выше проблем, либо входят в состав дорогостоящего программного обеспечения (как правило, зарубежного) [9] и в силу этого недоступны широкому кругу конечных пользователей (сотрудников профильных организаций).

Целью исследования является создание моделей, алгоритмов, методов и инструментариев, предназначенных для интеллектуальной поддержки принятия решений в процессе управления СМО на базе структурного и параметрического анализа их характеристик, свойств и процессов работы. Принятие решений базируется на многокритериальном анализе результатов имитации работы исследуемых систем в вычислительной среде, которая состоит из разнородных высокопроизводительных ресурсов. Такая среда может включать ресурсы центров коллективного пользования, включая суперкомпьютеры.

В статье представлен новый подход к исследованию СМО, базирующийся на комплексном применении методов концептуального программирования, инженерии знаний, искусственного интеллекта, многокритериальной оптимизации, параллельных и распределенных вычислений, виртуализации ресурсов, а также мультиагентных и сервис-ориентированных технологий. Рассмотрены архитектура и принципы функционирования системы спецификации и моделирования процессов функционирования СМО.

Принципы работы и аспекты реализации

Разработчики программного обеспечения для исследования сложных систем путем их имитации отмечают такие его необходимые свойства, как поддержка частичной автоматизации сборки моделей, их

верификация и валидация, настройка модели на конкретную предметную область, реализация комбинированного моделирования или гибридного моделирования, сбор и обработка слабоструктурированных данных, их реформирование в структуры, используемые моделью, оптимизационный анализ результатов расчетов [10–12].

Кроме того, поскольку имитационное моделирование ведет к большим временным и ресурсным расходам, требуется использование высокопроизводительной вычислительной техники, доступ к которой со стороны пользователей должен быть удобным и гибким. Сервис-ориентированная парадигма программирования позволяет успешно реализовать такой доступ.

Следует отметить, что для эффективного проведения экспериментов с имитационными моделями в высокопроизводительной вычислительной среде должна быть составлена соответствующая методика выполнения исследований.

Представленные в статье технология и реализующая ее система спецификации и моделирования процессов функционирования СМО в полной мере учитывают вышеупомянутые требования. Новая методика выполнения исследований базируется на совместном и согласованном использовании методов автоматизации конструирования и применения имитационных моделей на языке GPSS на основе парадигм концептуального, модульного, каркасного и сервис-ориентированного программирования, инженерии знаний, высокопроизводительных вычислений и мультиагентных систем, а также методов анализа экспериментальных данных на основе дискретной многокритериальной оптимизации.

Цифровой двойник исследуемой СМО (прототип системы) базируется на имитационном моделировании процессов ее работы по совокупности ретроспективных и текущих данных. Цифровые двойники будут использоваться для разработки и отладки новых стратегий управления СМО на основе оптимизационного анализа результатов многовариантных расчетов. Реализация агентного моделирования в процессе исследования реальной системы (например, турбазы или пункта проката) позволит осуществлять верификацию и валидацию имитационной модели путем полунатурного моделирования.

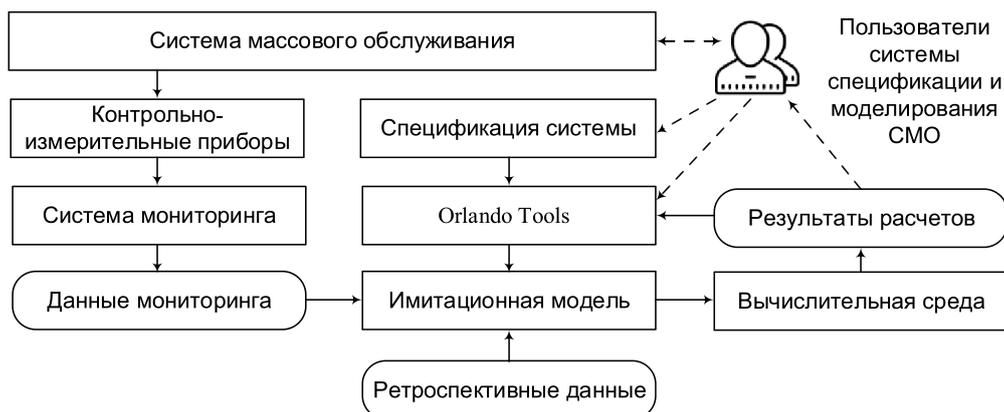
В рамках агентного моделирования субъекты, связанные с обеспечением эксплуатации объекта и потреблением предоставляемых им ресурсов и услуг, делегируют агентам свои права и обязанности.

Субъекты могут задавать критерии эффективности функционирования объекта, которые в общем случае могут быть противоречивыми (например, экологические и экономические показатели используемой природосберегающей технологии). Агентный подход позволит учитывать и на основе многокритериальной оптимизации согласовывать предпочтения субъектов, связанных с объектом, в процессе его моделирования.

Многовариантные расчеты будут выполняться в вычислительной среде, объединяющей выделенные и невыделенные ресурсы. Для управления выделенными (виртуализированными) ресурсами выбран программный комплекс OpenStack, обеспечивающий взаимодействие с различными гипервизорами (KVM, XEN, ESXi, QEMU и др.), а также с системами управления контейнерами (LXC, Docker и др.). В дополнение к этому комплексу создан новый менеджер виртуальных машин. Данный менеджер поддерживает возможность запуска заданий по выполнению виртуальных машин из общих очередей СУПЗ (например, PBS, SLURM или SGE) на невыделенных ресурсах суперкомпьютеров ЦКП. Виртуальные машины, запущенные на выделенных и невыделенных ресурсах для прогона экземпляров модели в параллельном режиме, будут подключаться к единой виртуализированной среде, организованной на основе технологии Virtual Private Network (VPN).

Конструирование модели, подготовка и проведение крупномасштабных экспериментов осуществляются с помощью специализированного инструментального комплекса Orlando Tools [13], предназначенного для разработки специального класса масштабируемых научных приложений (распределенных пакетов прикладных программ), к которому в целом относится система спецификации и моделирования процессов функционирования СМО (рисунок).

Исследователи конструируют имитационную модель с помощью Orlando Tools на основе спецификации системы. В процессе выполнения модели используются текущие данные мониторинга и ретроспективные данные о процессах работы системы и окружающей среде. Текущие данные предоставляются системой мониторинга, которая снимает их с контрольно-измерительного оборудования. Экземпляры модели параллельно выполняются в вычислительной среде. Оптимизационный анализ результатов расчетов выполняется средствами Orlando Tools.



Архитектура системы спецификации и моделирования СМО

Элементарные функциональные возможности цифровых двойников и агентов будут представлены в виде микросервисов. Такой подход позволит организовать взаимодействие между вышеупомянутыми виртуальными сущностями на базе эффективных сетевых протоколов и упростит процессы добавления новых и модификацию существующих двойников и агентов. Конечные пользователи Orlando Tools разных категорий (разработчики программного обеспечения, администраторы информационно-вычислительных ресурсов, эксперты по принятию решений по оптимизации функционирования инфраструктурных объектов на основе результатов их моделирования и другие лица) будут обеспечены веб-ориентированным интерфейсом для доступа к разработанным средствам, а также необходимой экспертной поддержкой в процессе подготовки и проведения экспериментов.

Система спецификации и моделирования СМО будет применена для исследования инфраструктурных объектов Байкальской природной территории, использующих природосберегающие технологии. Оптимизационная постановка задачи в рамках такого исследования приведена ниже.

Пусть $x = (x_1, x_2, \dots, x_j)$ – это вектор экономических показателей потребления ресурсов (электропотребления, теплоснабжения, потребления воды и т.п.) в процессе эксплуатации инфраструктурного объекта за период времени t . Состояние технических устройств (водяных и тепловых насосов, бойлеров, кондиционеров и др.), используемых объектом, представлено вектором $b = (b_1, b_2, \dots, b_l)$ булевых переменных. Элемент $b_i = 0$ ($b_i = 1$) означает, что i -е устройство выключено (включено), $i \in \overline{1, l}$.

Характеристики устройств представлены множеством параметров $C = \{c_1, c_2, \dots, c_h\}$. На множестве C определено множество операций $F = \{f_1, f_2, \dots, f_w\}$. Операция $f_i \in F$ обеспечивает расчет необходимых целевых параметров из C по начальным данным, так же представленных параметрами из C .

Выделим в множестве C подмножества параметров, отражающих эксплуатационные показатели и управляющие параметры объекта. Эти подмножества параметров представим векторами $q = (q_1, q_2, \dots, q_p)$ и $u = (u_1, u_2, \dots, u_r)$.

Текущие природно-климатические показатели окружающей среды объекта отражены вещественной матрицей A размерности $m \times n$. Элемент матрицы a_{ij} содержит значение i -го природно-климатического показателя в j -й час периода t . Ретроспективные природно-климатические показатели окружающей среды аналогично представлены вещественной матрицей R такой же размерности.

Запишем целевую функцию в следующем виде:

$$y(x, \tau, A, R, b, v) = \sum_{i=1}^n x_i \rightarrow \min,$$

$$h_j(b) = 0, \quad q_s \rightarrow \min(\max),$$

$$q_s^{\min} \leq q_s \leq q_s^{\max}, \quad s = \overline{1, p},$$

где $h_1(b), h_2(b), \dots, h_o(b)$ – это булевы функции, накладывающие ограничения на совместное использование технических устройств, $q_s \rightarrow \min(\max)$ – условие оптимальности s -го эксплуатационного показателя, q_s^{\min} и q_s^{\max} – его предельные значения, $v = (v_1, v_2, \dots, v_z)$ – вектор входных параметров модели, $v_t \in C, t = 1, z$.

Сбор, унификацию, агрегирование, хранение и передачу данных о работе инфраструктурного объекта и природно-климатических условиях окружающей среды будет осуществлять специальная система мониторинга информационно-вычислительных систем [13], адаптированная к обслуживанию объектов, данного вида.

Определение оптимальных значений эксплуатационных показателей (решение прямой задачи) осуществляется путем прогона экземпляров модели с разными вариантами ее входных параметров с последующим применением правил дискретного многокритериального выбора. Если оптимальному варианту эксплуатационных показателей соответствует несколько вариантов входных переменных модели, то выбор оптимального варианта (решение обратной задачи) производится с помощью тех же самых правил.

Управление инфраструктурным объектом заключается в регулировании его управляющих параметров, представленных вектором u , с помощью выбранного оптимального варианта значений входных параметров модели.

Заключение

В статье предложена технология, а также рассмотрены архитектура и принципы работы системы спецификации и моделирования процессов функционирования СМО. Среда для проведения расчетов построена на базе ресурсов ЦКП «Иркутский вычислительный центр СО РАН» [14]. Представленные методы и средства моделирования СМО будут применены в процессе исследования инфраструктурных объектов Байкальской природной территории, использующих природосберегающие технологии, с целью анализа эффективности сбора и утилизации отходов, работы систем канализации, энергоснабжения, теплоснабжения, природовосстановления и других эксплуатационных процессов. Это в свою очередь позволит существенно улучшить экономические и экологические показатели функционирования исследуемых объектов.

Результаты исследований по проекту могут быть также использованы при разработке и исполнении законодательства по сохранению оз. Байкал и его экологическому оздоровлению в рамках социально-экономического развития Байкальской природной территории, включая повышение экономической эффективности инфраструктурных объектов и снижение негативного воздействия туристической деятельности на окружающую среду.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-47-380002-р_а.

Список литературы

1. Uhlemann T.H.-J., Lehmann C., Steinhilper R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 61. P. 335–340. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.152.
2. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. № 11. P. 1016–1022. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
3. Iafra F. A Journey from Big Data to Smart Data. *Proceedings of the Second International Conference on Digital Enterprise Design and Management*. Springer, Cham, 2014. P. 25–33. DOI: 10.1007/978-3-319-04313-5_3.
4. Didenko N.I., Skripnuk D.F., Mirolyubova O.V. Big data and the global economy. *Proceedings of the 2017 Tenth International Conference Management of Large-Scale System Development (ML SD)*. Moscow, Russia, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109611.
5. Девятков В.В. Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития. М.: ИНФРА-М, 2013. 448 с.
6. Vlasov S.A., Deviatkov V.V., Isaev F.V., Fedotov M.V. *Imitational Studies with GPSS WORLD: New Capabilities. Automation and Remote Control*. 2014. Vol. 75. № 2. P. 389–398. DOI: 10.1134/S0005117914020179.
7. Sulistio A. A Taxonomy of Computer-Based Simulations and Its Mapping to Parallel and Distributed Systems Simulation Tools. *Software: Practice and Experience*. 2004. Vol. 34. № 7. P. 653–673. DOI: 10.1002/spe.585.
8. Beloglazov A., Banerjee D., Hartman A., Buyya R. Improving Productivity in Design and Development of Information Technology (IT) Service Delivery Simulation Models. *Journal of Service Research*. 2015. Vol. 18. № 1. P. 75–89. DOI: 10.1177/1094670514541002.
9. Dias L.M.S., Vieira A.A.C., Pereira G.A.B., Oliveira J.A. Discrete simulation software ranking – A top list of the worldwide most popular and used tools. *Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2016. P. 1060–1071. DOI: 10.1109/WSC.2016.7822165.
10. Плотников А.М., Рыжиков Ю.И., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Анализ современного состояния и тенденции развития имитационного моделирования в российской федерации (по материалам конференций «имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД)) // *Труды СПИИРАН*. 2013. Т. 2. № 25. С. 42–112. DOI: 10.15622/sp.25.3.
11. Eldabi T., Balaban M., Brailsford S., Mustafee M., Nance R.E., Onggo B.S., Sargent R.G. Hybrid simulation: historical lessons, present challenges and futures. *Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2016. P. 1388–1403. DOI: 10.1109/WSC.2016.7822192.
12. Петров А.В. Имитация как основа технологии цифровых двойников // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 10 (141). С. 56–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-10-56-66.
13. Феоктистов А.Г., Горский С.А., Сидоров И.А., Костромин Р.О., Фереферов Е.С., Бычков И.В. Непрерывная интеграция функционального наполнения распределенных пакетов прикладных программ в Orlando Tools // *Труды Института системного программирования РАН*. 2019. Т. 31. № 2. С. 83–96. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(2)-7.
14. ЦКП Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://hpc.icc.ru/> (дата обращения: 11.01.2020).