

УДК 004.942

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ИМИТАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Сидоров И.А.

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

В настоящее время методы и средства имитационного моделирования широко применяются в изучении свойств и процессов функционирования инфраструктурных объектов. Такие объекты составляют основу жизнедеятельности разнообразных технических, экономических, культурно-социальных и других систем. Поэтому результаты моделирования инфраструктурных объектов зачастую позволяют существенно улучшить эффективность функционирования таких систем и обеспечить принятие оптимальных решений по их созданию и развитию. Однако анализ современного развития инструментальных средств разработки и применения имитационных моделей инфраструктурных объектов показывает наличие ряда проблем. В их числе сложность разработки самих моделей, организация многовариантных расчетов с использованием распределенных вычислений, обеспечение эффективного использования ресурсов гетерогенной вычислительной среды, поддержка гибкого и удобного доступа конечных пользователей к имитационным моделям с целью организации и проведения крупномасштабных экспериментов. В связи с этим в статье предложен новый подход к имитационному моделированию инфраструктурных объектов, базирующийся на сервис-ориентированной парадигме. Рассмотрена архитектура системы для построения и применения моделей. Описаны принципы и средства их спецификации. Приведен пример сервиса для оценки экономической эффективности работы инфраструктурного объекта Байкальской природной территории.

Ключевые слова: инфраструктурные объекты, имитационное моделирование, распределенные вычисления, гетерогенная среда, сервис-ориентированный подход

SERVICE-ORIENTED APPROACH TO SIMULATING INFRASTRUCTURAL OBJECTS FUNCTIONING

Feoktistov A.G., Kostromin R.O., Sidorov I.A.

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

Nowadays, methods and tools for simulation are widely used in studying the properties and functioning of infrastructure objects. Such objects form the basis of the vital activity of various technical, economic, cultural, social, and other systems. Therefore, the results of modeling infrastructure objects often make it possible to significantly improve the efficiency of the functioning of such systems and ensure the adoption of optimal decisions on their creation and development. However, an analysis of the modern evolution of frameworks for the design and application of simulation models of infrastructure facilities shows a number of problems. Among them are the complexity of developing the models, organizing parameter sweep computations using distributed computing, ensuring the efficient use of resources of a heterogeneous computing environment, supporting flexible and convenient end-user access to simulation models in order to prepare and carry out large-scale experiments. In this regard, the paper proposes a new approach to simulating infrastructure objects based on the service-oriented paradigm. We consider the architecture of the system for designing and applying models. In addition, the principles and tools of their specification are described. Finally, we demonstrate an example of a service for evaluating the economic efficiency in functioning an infrastructural object of the Baikal natural territory.

Keywords: infrastructure objects, simulation modeling, distributed computing, heterogeneous environment, service-oriented approach

В настоящее время имитационное моделирование широко применяется в качестве одного из основных инструментов поддержки принятия решений в управлении разнообразными техническими, экономическими, культурно-социальными и другими системами [1]. В рамках такого управления решается широкий круг практических задач. В их числе стратегическое принятие решений, планирование, контроль и оперативное регулирование и совершенствование бизнес-процессов, а также внедрение новых технологий [2], включая природосберегающие технологии [3]. Имитацион-

ное моделирование обеспечивает получение информации о результатах выполнения бизнес-процессов, их производительности и эффективности для разных конфигураций инфраструктур. Эта информация необходима для выбора оптимальных конфигураций.

Использование гибких и удобных средств разработки и применения имитационных моделей является одним из наиболее важных аспектов в процессе подготовки и проведения экспериментов по изучению свойств и динамики работы вышеупомянутых систем [4]. В связи с этим следует отметить повсеместный рост роли сервисов

в управлении сложными системами, за счет внедрения которых эти системы получают существенные конкурентные преимущества [5]. Известные стандарты имитационного моделирования, такие как Distributed Interactive Simulation (DIS) [6] и High Level Architecture (HLA) [7], по-прежнему широко используются, однако поддерживаемые ими архитектуры и концептуальные основы базируются на технологиях, которые в той или иной степени развиваются в течение нескольких последних десятилетий. Поэтому они часто достигают пределов своих возможностей при их применении в рамках современной цифровизации исследуемых систем. В этой связи разработка новых инструментальных средств имитационного моделирования является чрезвычайно актуальной [8]. Причем особое внимание должно быть уделено разработке и внедрению моделей и методов многокритериального анализа результатов моделирования в рамках таких средств [9].

Целью исследования является разработка новых сервис-ориентированных средств подготовки и проведения крупномасштабных научных экспериментов с имитационными моделями инфраструктурных объектов сложных систем, разработанными с помощью широко используемой системы General Purpose Simulation System (GPSS) [10]. В рамках таких экспериментов процесс моделирования организуется с использованием многовариантных вычислений и многокритериального выбора оптимальных результатов расчетов. Автоматизация разработки и конфигурирования сервисов моделирования базируется, в отличие от известных, на применении специальной спецификации имитационных моделей.

Принципы работы и аспекты реализации сервис-ориентированных средств

Рассматриваемые инструментальные средства предназначены для автоматизации разработки и конфигурирования сервисов имитационного моделирования. Каждый разработанный сервис моделирования обеспечивает подготовку и проведение эксперимента, включая генерацию множества вариантов исходных данных для выбранных GPSS-моделей, их запуск и выполнение в гетерогенной распределенной вычислительной среде на виртуализированных ресурсах, получение результатов моделирования в виде стандартных отчетов GPSS и проведение многокритериального анализа результатов расчетов.

Выполнение GPSS-моделей. GPSS работает под управлением операционных

систем (ОС) семейства Windows. Одним из недостатков GPSS является невозможность выполнения моделирования в многопоточном режиме. Однако GPSS позволяет проводить моделирование в пакетном режиме. Поэтому в ОС всегда есть возможность запуска нескольких экземпляров GPSS с разными вариантами входных данных моделей на разных ядрах процессора. При этом, в отличие от другой популярной системы имитационного моделирования AnyLogic [11], в которой параллельные вычисления привязаны к собственному облаку этой системы, параллельное выполнение экземпляров GPSS может быть осуществлено в любой распределенной вычислительной среде. Автоматический запуск моделей на выполнение осуществляется посредством оболочки PowerShell для Windows, доступ к которой возможен по протоколу SSH. Удаленное выполнение команд реализовано с помощью менеджера WinRM. Сервер OpenSSH устанавливается штатными средствами PowerShell из репозитория модулей для Windows.

Общие принципы создания, конфигурирования и использования сервиса имитационного моделирования. В качестве основы для реализации сервиса выбран REST-подход. В таком случае на стороне сервера размещается приложение (node.js), которое принимает запросы по протоколу HTTP. Для взаимодействия с сервисом разработан веб-интерфейс с личным кабинетом пользователя. В соответствии с запросами средствами node.js происходит выполнение скриптов на языке BASH от имени непривилегированного пользователя. Данные скрипты осуществляют запуск виртуальных машин (ВМ) в очереди вычислительного ресурса, а также запуск процесса имитационного моделирования.

Компоненты сервиса выполнены в рамках микросервисной архитектуры. Каждый этап проведения эксперимента выделен в отдельное приложение (микросервис). Это обеспечивает их интеграцию в другие приложения посредством взаимодействия с другими сервисами через HTTP-запросы. Схема создания, конфигурирования и применения сервиса имитационного моделирования приведена на рисунке 1. На нижнем уровне архитектуры расположены виртуализированные ресурсы. Для выполнения моделирования осуществляется запуск ВМ. Управление ВМ реализуется средствами гипервизора OpenStack. Агент управления ресурсами осуществляет запуск и настройку необходимого числа ВМ на основе сведений об их состоянии, предоставляемых системой метамониторинг-

га [12], и запросов агента диспетчеризации вычислений. Настройка ресурсов выполняется средствами Ansible. Агент диспетчеризации вычислений получает из очереди новые задания и обновляет статусы запущенных через API (запросы GET и PUT). Для новых заданий осуществляется запрос ресурсов у их агента. Далее происходит удаленный запуск заданий на выделенных ресурсах. В БД хранится текущая очередь и список завершенных экспериментов. Каждая ВМ имеет доступ к сетевому хранилищу, где после ее запуска в каталоге входных данных соответствующего эксперимента размещается актуальный файл модели. Аналогично обеспечивается доступ к каталогу результатов расчетов. После завершения работы модели ВМ уничтожается. Информация об эксперименте размещается в БД экспериментов.

Разработчик создает модели GPSS и с помощью файла спецификации в формате JSON описывает входные параметры, их тип, диапазоны значений и вариации данных. Готовые модели и спецификации помещаются в БД спецификаций. С помощью веб-интерфейса пользователя формируются новые вычислительные эксперименты через запросы к API сервиса управления экспериментами. Из личного кабинета доступна история запуска имитационных моделей, а также соответствующие им выходные файлы. Для уже завершенных эксперимен-

тов есть возможность повторного его проведения с новыми значениями параметров. Отдельная подсистема предназначена для работы с БД спецификаций, доступ к которой реализуется средствами специального API. К нему разработчик обращается через веб-интерфейс конфигурирования сервисов имитационного моделирования.

Сервис. В качестве примера применения разработанных инструментальных средств рассмотрим сервис, реализующий методику оценки экономической эффективности функционирования туристической базы отдыха, расположенной на прибрежной территории озера Байкал, с использованием природосберегающей технологии его снабжения электрической энергией с помощью тепловых насосов [13]. Разработчик модели формирует ее спецификацию (рис. 2). Данная спецификация в формате JSON, которая передается сервису через API, содержит следующие основные поля: id (идентификатор эксперимента); name (название эксперимента); model (модель); title (заголовок файла эксперимента); description (описание эксперимента); resources (массив ресурсов, на которых предстоит выполнить эксперимент); parameters (массив параметров модели); command (команда запуска). Разработчик конфигурирует сервисы, указывая программу генерации вариантов исходных данных, каталоги для данных и результатов счета с помощью веб-формы (рис. 3).



Рис. 1. Схема создания, конфигурирования и использования сервиса

```
{ "id": "wf_021248",
  "name": "Model Retro",
  "model": "retro.gps",
  "title": "Имитационная модель Model Retro ",
  "description": "Модель оценки работы инфраструктурного объекта",
  "resources": [
    { "id": "001", "name": "VM_Win", "address": "10.10.0.12" },
    { "id": "023", "name": "VM_Win10", "address": "10.10.0.221" } ],
  "parameters": {
    "dataPath": "~/models/Model Retro/",
    "input": [ {
      "type": "number",
      "name": "temp_in",
      "title": "Температура внутри здания",
      "value": "20.0",
      "variable": "true",
      "step": "1",
      "minValue": "20",
      "maxValue": "24" }, {
      "type": "number",
      "name": "prop_coef",
      "title": "Коэффициент пропорциональности",
      "value": "1.978263",
      "variable": "false" }, {
      "type": "number",
      "name": "hour_need",
      "title": "Часовая потребность в энергии",
      "value": "1.0",
      "variable": "true",
      "step": "0.1",
      "minValue": "0.1",
      "maxValue": "2.0" } ],
    "output": [ {
      "type": "string",
      "name": "result",
      "title": "Отчет GPSS",
      "resultPath": "~/models/Model Retro/out" } ] },
  "commands": {
    "start": "./start.sh ${input_num} ${input_text}" }
```

Рис. 2. Фрагмент спецификации модели

Конфигурирование	
Генератор вариантов исходных данных	<input type="text" value="Generator01.exe"/> Выбор файла
Каталог файлов исходных данных	<input type="text" value="~/models/Model Retro/"/>
Каталог файлов результатов расчетов	<input type="text" value="~/models/Model Retro/out"/>

Рис. 3. Веб-форма «Конфигурирование»

Наблюдаемые переменные реализуются в модели в виде сохраняемых ячеек и описываются в спецификации модели. Раздел стандартного отчета GPSS, представляющий информацию о сохраняемых ячейках, является областью многокритериального анализа. Специальный микросервис реализует три метода данного анализа: лексикографический, мажоритарный и Парето-оптимальный [9]. На рис. 4 приведен скриншот веб-формы для подготовки и запуска эксперимента. Она обеспечивает возможность выбора модели, задания ее входных параметров и определения используемого метода многокритериального анализа. После задания всей необходимой

информации осуществляется запуск задания в вычислительной среде. Сведения о процессе выполнения задания доступны на веб-форме, представленной на рис. 5. Кнопка «Скачать архив отчетов» позволяет скачать отчеты GPSS, созданные в процессе моделирования для каждого экземпляра модели. Результаты многокритериального анализа отображаются на специальной веб-форме (рис. 6). Моделирование выполнено для различных климатических условий помещений объекта. В результате получены требуемые оценки стоимости использования природосберегающей технологии снабжения этого объекта электрической энергией.

Подготовка и запуск эксперимента

Номер версии эксперимента	<input type="text" value="retro_0002"/>
Имя модели	<input type="text" value="Model Retro"/>

Температура внутри здания [диапазон]:шаг	<input type="text" value="[20..24]:1"/>
Коэффициент пропорциональности	<input type="text" value="1,978263"/>
Средний уровень часовой потребности на горячее водоснабжение	<input type="text" value="166,5"/>
Мощность теплового насоса	<input type="text" value="200"/>
Коэффициент перевода тепловой мощности в электрическую	<input type="text" value="1"/>
Коэффициент производительности теплового насоса	<input type="text" value="5"/>
Цена единицы электроэнергии	<input type="text" value="3"/>
Температура наружного воздуха	<input type="text" value="~/wf_in/temp.txt"/>
Количество имитаций годового функционирования системы теплоснабжения	<input type="text" value="50000"/>
Постоянные, не зависящие от случайных реализаций потребностей, текущие издержки	<input type="text" value="30000"/>
Капитальные вложения, инвестиции, которые необходимо сделать для функционирования рассматриваемого варианта теплоснабжения	<input type="text" value="1000000"/>
Нормативный коэффициент эффективности капиталовложений	<input type="text" value="0,12"/>

Метод многокритериального анализа:

Вычислительный ресурс:

Рис. 4. Веб-форма «Подготовка и запуск эксперимента»

Результаты моделирования							
ID	Имя модели	Номер версии эксперимента	Статус	Время начала выполнения	Время завершения выполнения	Общее время выполнения, сек.	Отчеты
wf_021220	Model Retro	retro_14	В очереди	2020-07-30 12:31:50			Скачать архив отчетов
wf_021227	Model Retro	retro_13	Выполняется	2020-07-30 12:31:50			Скачать архив отчетов
wf_021231	Model Retro	retro_12	Завершен	2020-07-30 12:32:42	2020-07-30 12:32:44	2	Скачать архив отчетов
wf_021229	Model Retro	retro_11	Завершен с ошибкой	2020-07-30 12:32:45	2020-07-30 12:32:48	3	Скачать архив отчетов

Рис. 5. Веб-форма «Результаты моделирования»

Результаты многокритериального анализа

Номер варианта исходных данных	1
Наблюдаемые переменные	Оптимальный вариант значений
Затраты	156649.350

Рис. 6. Веб-форма «Результаты многокритериального анализа»

Заключение

Предложен новый подход к имитационному моделированию инфраструктурных объектов. Инструментальные средства, разработанные в рамках подхода для подготовки и проведения крупномасштабных экспериментов в разнородной вычислительной среде, базируются на микросервисной архитектуре. Эти средства применены для создания сервиса оценки экономической эффективности работы инфраструктурного объекта Байкальской природной территории (туристической базы отдыха). С помощью сервиса проведено моделирование стоимости использования природосберегающей технологии снабжения объекта электрической энергией с помощью тепловых насосов в различных климатических условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области, проект № 20-47-380002-р а (регистрационный № АААА-А20-120021090008-7).

Список литературы

1. Orta E., Ruiz M., Hurtado N., Gawn D. Decision-making in IT service management: a simulation based approach. *Decision Support Systems*. 2014. Vol. 66. P. 36–51. DOI: 10.1016/j.dss.2014.06.002.
2. Tako A.A., Robinson S. The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems*. 2012. Vol. 52. № 4. P. 802–815. DOI: 10.1016/j.dss.2011.11.015.
3. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Горский С.А. Разработка интеллектуальной технологии поддержки принятия решений в системах массового обслуживания на основе их имитационного моделирования на суперкомпьютерах // Со-

временные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 76–80. DOI: 10.17513/snt.37918.

4. Law A. How to conduct a successful simulation study. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2003. P. 66–70. DOI: 10.1109/WSC.2003.1261409.

5. Marrone M., Kolbe L.M. Impact of IT service management frameworks on the IT organization. An empirical study on benefits, challenges and processes. *Business and Information System Engineering*. 2011. Vol. 3. № 1. P. 5–18. DOI: 10.1007/s11576-010-0257-8.

6. Stasto A.M. Overview of physics possibilities at future DIS facilities. *Proceedings of Science*. 2019. Vol. 352. P. 237. DOI: 10.22323/1.352.0237.

7. Falcone A., Garro A., Anagnostou A., Taylor S.J. An introduction to developing federations with the High Level Architecture (HLA). *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2017. P. 617–631. DOI: 10.1109/WSC.2017.8247820.

8. Ivaschenko A., Korchivoy S., Spodobayev M. Infrastructural models of intermediary service providers in digital economy. *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*. Springer, Cham, 2019. P. 594–605. DOI: 10.1007/978-3-030-29513-4_44.

9. Феоктистов А.Г. Управление сложной системой на основе методологии многокритериального выбора управляющих воздействий // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 9–1. С. 82–86.

10. Кудрявцев Е. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. М.: ДМК Пресс, 2007. 320 с.

11. AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения: 05.09.2020).

12. Бычков И.В., Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Сидоров И.А., Богданова В.Г., Горский С.А. Мультиагентное управление вычислительной системой на основе метамониторинга и имитационного моделирования // *Автометрия*. 2016. Т. 52. № 2. С. 3–9. DOI: 10.15372/AUT20160201.

13. Еделев А.В., Маринченко А.Ю., Зоркальцев В.И. Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера Байкал // *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2020. Т. 2. № 2. С. 5–17.