

Моделирование работы природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов в микросервисной среде

И. В. Бычков¹, А. Г. Феоктистов¹, Р. О. Костромин^{1,*}, О. Ю. Башарина^{1,2},
И. А. Сидоров¹

¹Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, 664033, Иркутск, Россия

²Уральский государственный экономический университет, 620144, Екатеринбург, Россия

*Контактный автор: Костромин Роман Олегович, e-mail: kostromin@icc.ru

Поступила 08 июня 2022 г., принята в печать 30 июня 2022 г.

Предложен подход к имитационному моделированию работы природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов, расположенных на Байкальской природной территории. Разработаны инструментальные средства, базирующиеся на микросервисной архитектуре, с помощью которых осуществляются подготовка и проведение крупномасштабных экспериментов в гетерогенной распределенной вычислительной среде с использованием GPSS-моделей, имитирующих работу оборудования. Реализована поддержка высокопроизводительных вычислений, гибридного моделирования с применением мультиагентных технологий и облачных вычислений, а также механизмов многокритериального принятия решений по результатам моделирования. Создан веб-сервис оценки экономической и экологической эффективности природосберегающей технологии теплоснабжения типовой туристической базы отдыха с помощью тепловых насосов в различных эксплуатационных условиях. Показано преимущество предложенных инструментальных средств по сравнению с известными средствами подобного назначения.

Ключевые слова: инфраструктурные объекты, природосберегающее оборудование, мониторинг, моделирование, микросервисы.

Цитирование: Бычков И.В., Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Башарина О.Ю., Сидоров И.А. Моделирование работы природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов в микросервисной среде. Вычислительные технологии. 2022; 27(5):30–42. DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.004.

Введение

Бережное и эффективное использование природных ресурсов — чрезвычайно актуальная проблема, на решение которой в разных сферах человеческой деятельности направлены пристальное внимание и значительные усилия научного сообщества. Практически значимой проблемой сохранения и развития природных территорий является внедрение природосберегающих технологий хозяйственной деятельности, позволяющих уменьшить объемы вредных выбросов. Таким образом, возникает необходимость в проведении исследований по моделированию, прогнозированию и контролю эффективности использования природных ресурсов и экологичного оборудования при эксплуатации различных инфраструктурных объектов (ИО), расположенных на природных террито-

риях. В рамках проведения подобных исследований очевидным образом возникает необходимость привлечения данных об инфраструктуре и режимах эксплуатации объектов, масштабах антропогенной нагрузки в разные периоды, метеорологических условиях в различных местностях (облачности, солнечной радиации, температуре и иных атмосферных параметрах) и других особенностях жизнедеятельности на исследуемых территориях.

Имитационное моделирование по-прежнему является одним из основных инструментов исследования сложных систем (к которым безусловно относятся и ИО Байкальской природной территории (БПТ)) [1], в том числе на основе цифровых двойников [2]. Использование гибких инструментов для разработки и применения имитационных моделей — один из важнейших аспектов подготовки и проведения экспериментов [3]. Следует отметить повсеместный рост роли микросервисов в управлении сложными системами. Микросервисы реализуют бизнес-операции системы (например, функциональные возможности среды моделирования), существенно упрощают взаимодействие с ней и поддерживают логику ее функционирования. Поддержка принятия решений по результатам моделирования обуславливает необходимость применения механизмов многокритериального выбора [4].

Анализ результатов моделирования работы объекта позволяет существенно улучшить его основные параметры. В то же время применение современных средств моделирования сопровождается такими известными проблемами, как [5]:

- потребность в учете специфики предметной области решаемой задачи;
- необходимость интеграции данных из различных источников, включая геоинформационные системы (ГИС) и каталоги их веб-сервисов обработки данных (Web Processing Services, WPS);
- сложность конструирования научных рабочих процессов (НПП, workflow) и организации параллельного или распределенного моделирования на их основе;
- требование поддержки гибкого доступа пользователей к системе моделирования при подготовке и проведении крупномасштабных экспериментов.

В процессе моделирования обработка больших данных в гетерогенной вычислительной среде по-прежнему остается насущной проблемой [6]. Как правило, это обусловлено наличием квот на невыделенные ресурсы суперкомпьютерных центров общего пользования и привлечением из-за этого дополнительных выделенных облачных ресурсов, что приводит к необходимости интеграции и согласования различных моделей вычислений и средств их поддержки. В статье предложен новый подход к решению задачи организации процессов моделирования применения природосберегающего оборудования ИО, расположенных на уникальной охраняемой БПТ, с учетом вышеупомянутых проблем. В процессе моделирования следует принимать во внимание метеорологические условия БПТ, часто изменяющиеся и существенно различающиеся в ее районах [7]. Отличительной особенностью подхода является автоматизация подготовки и проведения крупномасштабных расчетов на основе использования микросервисной архитектуры среды моделирования с мультиагентным управлением, обеспечивающей сбор, хранение, обработку и анализ данных об особенностях эксплуатации исследуемого объекта в гетерогенной распределенной вычислительной системе (ГРВС). Она может включать как суперкомпьютерные ресурсы для трудоемкой обработки больших объемов данных на основе многовариантных расчетов, так и ресурсы платформ облачных и туманных вычислений, используемых для обработки информации в непосредственной близости к оборудованию.

1. Особенности систем имитационного моделирования

Результаты анализа производительности и эффективности природосберегающего оборудования ИО, получаемые на основе имитационного моделирования, содержат важную для практического применения информацию, позволяющую осуществить выбор рациональных режимов эксплуатации оборудования. Эффективным подходом к имитационному моделированию в ГРВС является дополнительное использование агентов, представляющих компоненты инфраструктуры объекта и передающих в модель знания об их актуальных параметрических и функциональных характеристиках, а также о текущем состоянии объекта [8].

Среди систем имитационного моделирования общего назначения наиболее популярны GPSS World [9] и AnyLogic [10]. Из систем, ориентированных на решение задач экологического мониторинга, следует выделить GeoJModelBuilder [11], предназначенную для работы с WPS-сервисами, а также построения и выполнения НРП на основе композиции таких сервисов.

GPSS World работает под управлением операционной системы Windows в интерактивном или пакетном режиме. В пакетном режиме осуществляется запуск экземпляров GPSS-модели с различными вариантами ее входных данных на разных узлах ГРВС, обеспечивая тем самым распределенные вычисления на основе многовариантных расчетов. Встроенные средства GPSS World позволяют проводить факторный и регрессионный анализ параметров модели относительно выбранной наблюдаемой переменной. Недостатками данной системы являются наличие ряда устаревших конструкций одноименного языка имитационного моделирования, ограниченность ее встроенного языка программирования PLUS, невозможность выполнения вычислений в многопоточном режиме и накладные расходы на поддержку графического интерфейса, который не отключается при запуске модели в пакетном режиме. Тем не менее GPSS World по-прежнему — одна из широко используемых на практике систем и не уступает в производительности и точности другим известным системам имитационного моделирования. Кроме того, разрабатываются различные специализированные средства, существенно расширяющие ее функциональные возможности (см., например, GPSS Studio [12]).

Система AnyLogic поддерживает агентно-ориентированное моделирование, подготовку и проведение экспериментов с целью оптимизации параметров модели относительно заданного критерия. Выполнение параллельных вычислений в системе AnyLogic возможно, но только в собственном облаке. В ней, как и в GPSS World, отсутствуют встроенные средства многокритериального анализа. Обе системы не поддерживают построение НРП и взаимодействие с веб-сервисами, поэтому в них трудно организовать получение данных из ГИС, используя WPS-сервисы или их композиции.

В отличие от систем общего назначения специализированная система GeoJModelBuilder поддерживает взаимодействие с ГИС через WPS-сервисы, построение НРП, обеспечивает интеграцию распределенных датчиков и других информационных источников, моделей и алгоритмов обработки данных, а также вычислительных ресурсов, используемых в процессе моделирования. Обмен данными между моделями в GeoJModelBuilder осуществляется через интерфейс Open Modeling Interface [13]. Агентно-ориентированное моделирование в GeoJModelBuilder не применяется, средства многокритериального анализа отсутствуют.

Таким образом, функциональных возможностей рассмотренных популярных систем моделирования недостаточно для решения поставленной задачи в полной мере. В нашем случае требуется разработка новой специализированной среды имитационного модели-

рования (ССИМ), которая позволит реализовать требуемые дополнительные функциональные возможности. В качестве базовых моделей, выполняемых в ССИМ в пакетном режиме, выбраны GPSS-модели.

2. Специализированная среда имитационного моделирования

Специализированная среда имитационного моделирования основана на микросервисной архитектуре с мультиагентным управлением. Общая схема функционирования среды представлена на рис. 1. Веб-интерфейс обеспечивает доступ к среде трем категориям специалистов: разработчикам научных приложений, конечным пользователям сервисов имитационного моделирования и администраторам ресурсов ГРВС. Системные компоненты среды представлены совокупностью программных сущностей — агентов, взаимодействующих между собой с целью согласованного достижения заданных критериев решения задач. Критерии определяются разработчиками приложений и их конечными пользователями, а также администраторами ресурсов ГРВС. С целью обеспечения эффективности функционирования компонентов ССИМ осуществляется обучение аген-

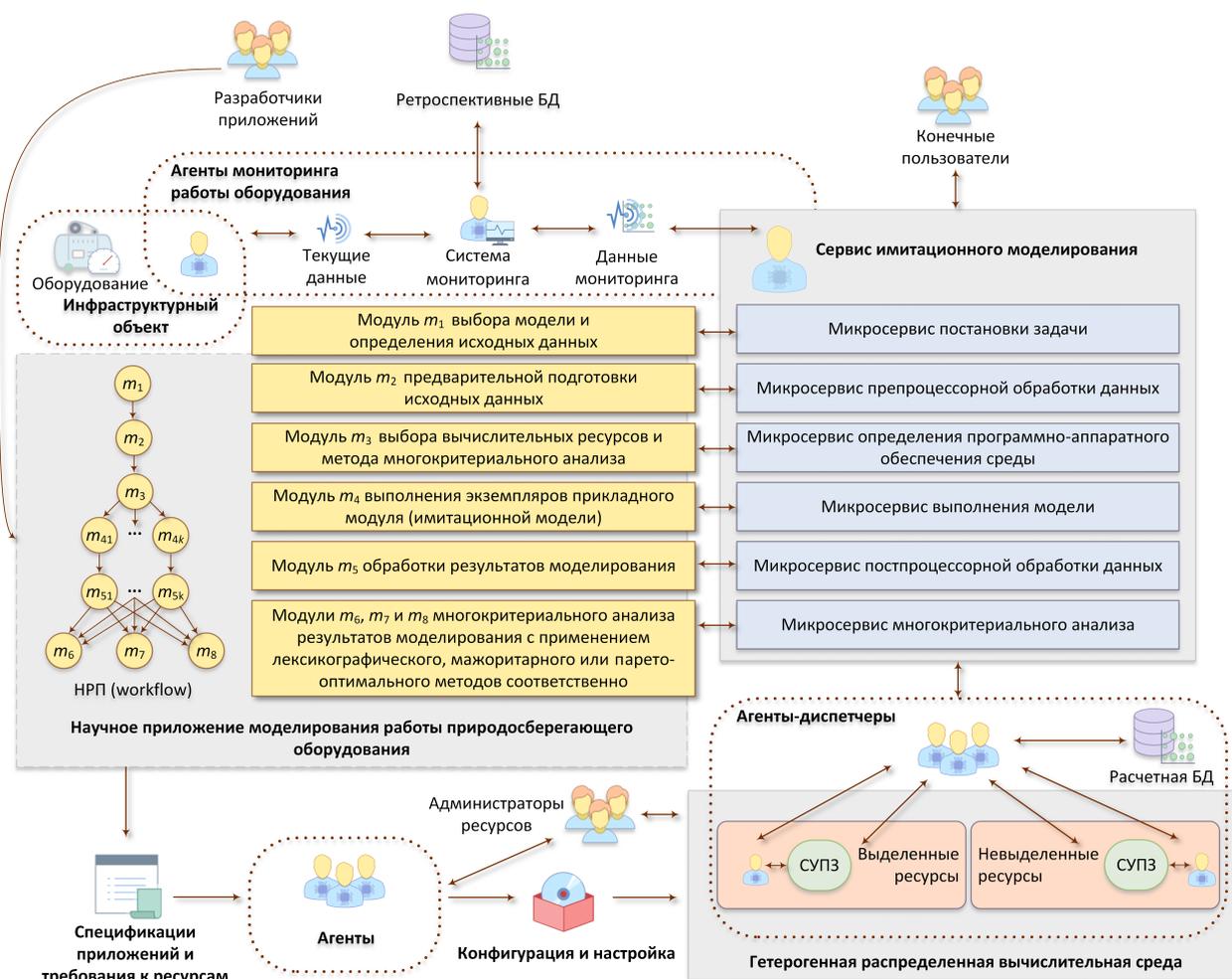


Рис. 1. Схема функционирования среды

Fig. 1. Environment functioning scheme

тов. Оно строится на основе автоматической оценки и корректировки их действий в соответствии с классификацией выполняемых ими заданий и используемых ресурсов [14].

Для создания научных приложений (распределенных пакетов прикладных программ) и их непрерывной интеграции (модификации, сборки, тестирования, отладки, контроля версий, доставки и развертывания) в ГРВС разработчикам предоставляются специализированные инструментальные средства, детально рассмотренные в [15]. В общем случае приложение, реализующее процесс имитационного моделирования, включает системные модули подготовки исходных данных, выбора вычислительных ресурсов и методы многокритериального анализа, пре- и постпроцессорной обработки данных, анализа результатов моделирования, а также прикладные модули (имитационные модели), создаваемые разработчиками приложения в системе GPSS и выполняемые в пакетном режиме. Системные модули выбираются разработчиком приложения из имеющихся библиотек системного программного обеспечения ССИМ или создаются и включаются в эти библиотеки непосредственно им самим в соответствии с predetermined спецификациями этих модулей.

В GPSS-модели ее входными параметрами могут быть такие объекты, как пользовательские переменные и матрицы сохраняемых ячеек. Данные в базе данных (БД) представлены в виде матриц. Выходные параметры (наблюдаемые переменные) модели представлены другими объектами — сохраненными ячейками. Многокритериальный анализ выполняется применительно к этим параметрам. Системные модули реализуют методы лексикографического, мажоритарного и парето-оптимального выбора [16]. Промежуточные результаты расчетов передаются в БД и могут быть представлены как сохраненными ячейками, так и матрицами сохраненных ячеек. Разработана спецификация GPSS-модели на языке JSON [17]. Она позволяет описывать новую модель, поддерживает задание, хранение и передачу вариантов значений ее параметров в процессе подготовки и проведения вычислительных экспериментов. Спецификация описывает следующие объекты: параметры модели, методы генерации их значений, источники исходных данных и требования к ресурсам. Источниками данных являются система мониторинга и ретроспективные БД, а также различные WPS-сервисы, запуск и выполнение которых реализуют системные модули приложения.

Взаимодействие с модулями приложения и компонентами ССИМ (системой мониторинга, агентами-диспетчерами и др.) организуется с помощью микросервисов. Микросервисы разрабатываются на основе predetermined родительских сервисов. Основные родительские сервисы, средства их реализации и выполняемые ими операции представлены в табл. 1. Разработан API на основе REST-подхода для обеспечения взаимодействия с перечисленными выше микросервисами. В отличие от SOAP-сервисов, ответы службы REST на запросы в формате JSON более компактные. Они также могут быть представлены в любом формате, включая XML, используемый службами SOAP. Формат JSON эффективен при обмене данными. Каждая из служб REST обменивается данными с другими службами по локальным и глобальным сетям через GET- и POST-запросы. Запросы могут быть сформированы с применением как специальных системных инструментов (например, утилит GNU wget или curl), так и стандартных средств различных языков программирования. Разработчики и конечные пользователи могут взаимодействовать с микросервисами через веб-интерфейс, командную строку или внешние приложения.

Таким образом, сервис имитационного моделирования реализует композицию микросервисов, представляющую собой НПП. На основе спецификаций приложения и тре-

Т а б л и ц а 1. Компоненты родительских сервисов
Table 1. Parent service components

Задача сервиса	Средство реализации	Операция
Настройка веб-интерфейса	HTML, Bootstrap 4	Обеспечение доступа к API. Создание нового эксперимента. Выбор модели и определение исходных входных данных. Выбор вычислительных ресурсов и выполнение модели. Реализация доступа к результатам моделирования и их анализа
Обработка спецификации модели	Node.js	Обработка спецификации модели. Динамическая настройка и создание веб-форм в соответствии со спецификацией. Извлечение данных из ретроспективной БД и их преобразование в целевые форматы Excel, CSV и др.
Обработка вычислительных заданий	Node.js, GPSS, BAT-scripts	Генерация вариантов исходных данных. Формирование вычислительных заданий. Отправка запроса на запуск заданий в системе управления прохождением заданиями (СУПЗ). Запуск GPSS в пакетном режиме. Сбор отчетов GPSS (результатов моделирования) и размещение их в расчетной БД
Система мониторинга	Nagios, Python	Обработка, сбор и передача данных, полученных с помощью контрольно-измерительных приборов при мониторинге работы оборудования ИО
Анализ результатов моделирования	Node.js	Извлечение полученных значений наблюдаемых переменных из расчетной БД. Преобразование извлеченных данных в целевой формат для многокритериального анализа. Применение выбранных методов многокритериального анализа

бований к ресурсам ГРВС соответствующие агенты осуществляют конфигурацию и настройку этих ресурсов. Затем эти агенты собирают виртуальную машину с необходимыми для проведения эксперимента модулями приложения, системным программным обеспечением, описанием НРП, сгенерированными исходными данными и спецификациями их внешних источников. Задание на выполнение виртуальной машины передается в СУПЗ ресурса ГРВС через агентов-диспетчеров исполнительной системы ССИМ. Вычислительная нагрузка распределяется между ресурсами ГРВС, выбранными пользователем.

3. Вычислительный эксперимент

В качестве иллюстрации применения сервиса имитационного моделирования, разработанного в рамках предложенного подхода, решается задача оценки возможных капитальных вложений и сокращения выбросов CO₂ при замене угольных котлов типовой туристической базы отдыха тепловыми насосами. Рассматриваются шесть моделей насосов от трех производителей: MOTEN-18D 57, BROSK Mark Prom 500 58, Corsa 55, MOTEN-18D 70, BROSK Mark Prom 500 71 и Corsa 70. Использование малогабаритных котлов на угле наиболее распространено для инфраструктурных объектов БПТ [18]. К сожалению, большинство из них сильно изношены. Поэтому, как считают специалисты, оснащать их оборудованием, снижающим вредные выбросы, нецелесообразно.

В связи с этим замена таких котлов на природосберегающее оборудование является актуальной.

Практика показывает, что использование тепловых насосов позволяет достаточно эффективно передавать тепло от низкотемпературного источника к потребителю. При этом электроэнергия используется для обеспечения работы тепловых насосов. В отличие от устройств, предназначенных для прямого преобразования электроэнергии в тепло, тепловое насосное оборудование позволяет значительно снизить потребление электроэнергии. Кроме того, замена котлов, работающих на ископаемом топливе, на тепловое насосное оборудование позволяет снизить расход топлива и объемы вредных выбросов. В результате улучшается экология окружающей среды. Типовая схема работы теплового насоса приведена в [19].

Представленные в примере модели тепловых насосов удовлетворяют потребностям в отоплении турбазы на 50–90 человек. Оценки получены для четырех эксплуатационных режимов: турбаза на 60 человек, установка насоса без бурения; турбаза на 80 человек, установка насоса без бурения; турбаза на 80 человек, установка насоса с бурением. Возможные капитальные вложения определены на основе оценок, представленных производителями. Для оценки сокращения объемов выбросов CO_2 использована методика, описанная в [20]. Прогнозирование изменения температуры окружающей среды базируется на анализе ретроспективных данных из открытого источника [21].

Чтобы упростить иллюстративный пример, значения ряда варьируемых параметров имитационной модели (тип объекта теплоснабжения, его свойства и характеристики системы теплоснабжения) зафиксированы. Предполагается, что исследование проводится для утепленного здания с административными, офисными и жилыми помещениями, система отопления которого оборудована радиаторами с горячей водой в качестве теплоносителя. Установлен малогабаритный угольный котел, который планируется заменить на водяной тепловой насос. Целевой температурой внутри здания считается значение в $20\text{ }^\circ\text{C}$. Термодинамические параметры теплоносителя и отдачи тепловой энергии определяются действующими нормативами и стандартами, установленными в районе расположения объекта. Таким образом, варьируемыми параметрами (факторами) имитационной модели являются модель теплового насоса, необходимость в бурении и вместимость турбазы. Последние два параметра агрегированы в виде эксплуатационного режима. Размер капитальных вложений и сокращение объема выбросов CO_2 выступают

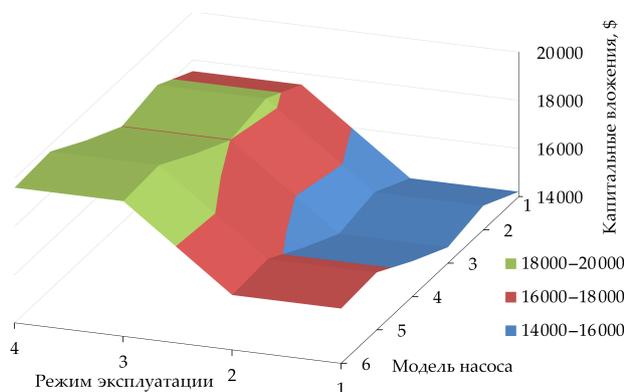


Рис. 2. Капитальные вложения
Fig. 2. Capital investments

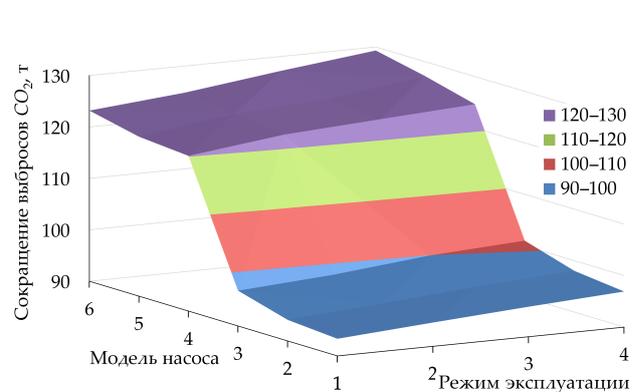


Рис. 3. Сокращение выбросов CO_2
Fig. 3. CO_2 emission reduction

в качестве наблюдаемых переменных имитационной модели. Очевидно, что увеличение числа факторов и их значений приводит к экспоненциальному росту числа прогонов имитационной модели с разными вариантами исходных данных и соответственно повышению вычислительной нагрузки.

Полученные оценки возможных капитальных вложений и сокращения выбросов CO₂ приведены соответственно на рис. 2 и 3. В качестве примера многокритериального анализа рассмотрим лексикографический метод выбора. Пусть наблюдаемые переменные упорядочены по степени их важности следующим образом: размер капитальных вложений и сокращение выбросов CO₂. Тогда первая модель теплового насоса (MOTEN-18D 57) будет рекомендована к выбору как результат принятия решения для каждого из эксплуатационных режимов с учетом минимизации размера капитальных вложений. При обратном упорядочении наблюдаемых переменных будет рекомендована шестая модель теплового насоса (Corsa 70) с точки зрения максимизации сокращения выбросов CO₂.

4. Сравнительный анализ

Проведено сравнение реализации требуемых функциональных возможностей AnyLogic, GeoJModelBuilder и ССИМ. В числе таких возможностей поддержка планирования и выполнения НРП с учетом критериев качества решения задач моделирования (f_1), взаимодействия с ГИС через WPS-сервисы (f_2), проведения многовариантных расчетов (f_3), использования мультиоблачной среды (f_4), осуществления многокритериального анализа (f_5) и гибридного моделирования с использованием агентов (f_6). В табл. 2 приведены степень поддержки (1.00 — полная поддержка, 0.75 — большая степень поддержки, 0.50 — частичная поддержка, 0.25 — низкая степень поддержки, 0 — отсутствие поддержки) и вес w_i каждой из возможностей f_i , а также значения общей оценки (E) функционала AnyLogic (s_1), GeoJModelBuilder (s_2) и ССИМ (s_3). Веса определены на основе оценок пользователей. Оценка E вычисляется по формуле

$$E = \sum_{i=1}^k w_i f_i,$$

где k — число функциональных возможностей. На основе результатов проведенного сравнительного анализа можно заключить, что для решения задачи, поставленной в данной статье, применение ССИМ имеет определенные преимущества.

Т а б л и ц а 2. Степень поддержки функциональных возможностей
Table 2. Degree of functionality support

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	E
s_1	0	0	0.75	0.75	0	1.00	0.20	0.25	0.10	0.10	0.20	0.15	0.30
s_2	1.00	1.00	0.75	1.00	0	0							0.63
s_3	1.00	1.00	0.75	0.75	1.00	1.00							0.95

Заключение

Представлен подход к организации моделирования процессов эксплуатации природосберегающего оборудования инфраструктурных объектов БПТ. Разработанные в рамках предложенного подхода инструментальные средства успешно использованы для оценки потенциальной эффективности применения тепловых насосов с целью снижения выбросов CO₂ при частичной замене ими угольных котлов для типовой туристической базы отдыха. Анализ функциональных возможностей построенной среды моделирования с микросервисной архитектурой и мультиагентным управлением вычислениями в ГРВС по сравнению с возможностями систем подобного назначения показал преимущества предложенного подхода относительно ряда этапов подготовки и проведения экспериментов. Они состоят в организации гибридного моделирования с использованием распределенных вычислений, поддержке взаимодействия с ГИС через WPS-сервисы, поддержке многовариантных расчетов на основе НРП в мультиоблачной среде и предоставлении доступных механизмов многокритериального выбора. Дальнейшие исследования направлены на развитие рассмотренных инструментальных средств с целью построения на их основе программной среды создания и применения цифровых двойников инфраструктурных объектов БПТ и интеграцию этой среды в рамках цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки данной территории [22].

Благодарности. Работа поддержана грантом № 075-15-2020-787 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”).

Список литературы

- [1] **Qi Q., Zhao D., Liao T.W., Tao F.** Modeling of cyber-physical systems and digital twin based on edge computing, fog computing and cloud computing towards smart manufacturing. Proceedings of the 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC), College Station, Texas; 2018: 51–85, DOI:10.1115/MSEC2018-6435.
- [2] **Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.** Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access. 2020; (8):108952–108971. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2998358. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9103025>.
- [3] **Law A.** How to conduct a successful simulation study. Proceedings of the 2003 IEEE Winter Simulation Conference (WSC). New Orleans; 2003: 66–70. DOI:10.1109/WSC.2003.1261409.
- [4] **Fan M., Zhang Z., Wang C.** Mathematical models and algorithms for power system optimization: modeling technology for practical engineering problems. London: Academic Press; 2019: 429.
- [5] **Tako A.A., Robinson S.** The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. Decision Support System. 2012; 52(4):802–815. DOI:10.1016/j.dss.2011.11.015. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167923611002211>.
- [6] **Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F.** Digital twin-driven product design, manufacturing and service with Big Data. The International Journal of Advanced

- Manufacturing Technology. 2018; (94):3563–3576. DOI:10.1007/s00170-017-0233-1. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- [7] **Latysheva I., Vologzhina S., Barkhatova O., Loshchenko C., Sutyrina E.** Circulation factors in climate change in the Baikal region. Proceedings of the 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Novosibirsk; 2019: 112086L. DOI:10.1117/12.2538282.
- [8] **Fortino G., Gravina R., Russo W., Savaglio C.** Modeling and simulating Internet-of-Things systems: a hybrid agent-oriented approach. Computing in Science & Engineering. 2017; 19(5):68–76. DOI:10.1109/MCSE.2017.3421541. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8024135>.
- [9] **Schriber T.J.** Simulation using GPSS. New York: John Wiley & Sons; 1974: 533.
- [10] AnyLogic: имитационное моделирование для бизнеса. The AnyLogic Company; 2022. Адрес доступа: <https://www.anylogic.ru>. (дата обращения 29.05.2022)
- [11] **Paul P.K., Aithal P.S., Bhuimali A., Tiwary K.S., Saavedra R., Aremu B.** Geo information systems and remote sensing: applications in environmental systems and management. International Journal of Management, Technology, and Social Sciences. 2020; 5(2):11–18. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3724127.
- [12] **Девятков В.В., Девятков Т.В., Федотов М.В.** Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO. М.: Вузовский учебник, ИНФРА-М; 2019: 283.
- [13] **Moore R.V., Tindall C.I.** An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). Environmental Science & Policy. 2005; 8(3):279–286. DOI:10.1016/j.envsci.2005.03.009. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901105000456>.
- [14] **Bychkov I., Feoktistov A., Kostromin R., Sidorov I., Edelev A., Gorsky S.** Machine learning in a multi-agent system for distributed computing management. Proceedings of the International Conference “Information Technology and Nanotechnology. Session Data Science”. Samara; 2018; (2212):89–97. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2212/paper12.pdf>.
- [15] **Tchernykh A., Bychkov I., Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Kostromin R., Edelev A., Zorkalzev V., Avetisyan A.** Mitigating uncertainty in developing and applying scientific applications in an integrated computing environment. Programming and Computer Software. 2020; 46(8):483–502. DOI:10.1134/S036176882008023X. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S036176882008023X>.
- [16] **Шоломов Л.А.** Логические методы исследования дискретных моделей выбора. М.: Наука; 1989: 288.
- [17] **Феоктистов А.Г., Костромин Р.О., Сидоров И.А., Горский С.А., Башарина О.Ю.** Цифровые двойники процессов работы природосберегающего оборудования инфраструктурного объекта. Современные наукоемкие технологии. 2021; (1):57–62.
- [18] **Maussyuk E.P., Kozlov A.N., Ivanova I.Yu.** Influence of technical characteristics of solid fuels at estimation of emissions from small boiler plants. Energy Systems Research. 2018; 1(2):43–50. DOI:10.25729/esr.2018.02.0005. Available at: <http://esrj.ru/index.php/esr/article/view/2018.02.0005>.
- [19] **Marinchenko A.Y., Edelev A.V.** A formation of the heat pump mathematical models. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE). Irkutsk; 2020; (2638):191–200. DOI:10.47350/ICCS-DE.2020.18.

- [20] Методика расчета выбросов парниковых газов (СО₂-эквивалента). Саморегулируемая организация Некоммерческое Партнерство “Межрегиональный Альянс Энергоаудиторов”. 2022. Адрес доступа: <https://src150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov>. (дата обращения 29.05.2022)
- [21] Расписание погоды: погода в 243 странах мира. Санкт-Петербург; 2022. Адрес доступа: <https://rp5.ru>. (дата обращения 29.05.2022)
- [22] **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K.** Digital environmental monitoring technology Baikal natural territory. Proceedings of the 3rd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020). Irkutsk; 2020; (2677):1–7. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol1-2677/paper1.pdf>.

Вычислительные технологии, 2022, том 27, № 5, с. 30–42. © ФИЦ ИВТ, 2022
Computational Technologies, 2022, vol. 27, no. 5, pp. 30–42. © FRC ICT, 2022

ISSN 1560-7534
eISSN 2313-691X

INFORMATION TECHNOLOGIES

DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.004

Simulation of operating environmentally friendly equipment of infrastructure objects in microservice environment

BYCHKOV IGOR V.¹, FEOKTISTOV ALEXANDER G.¹, KOSTROMIN ROMAN O.^{1,*},
BASHARINA OLGA YU.^{1,2}, SIDOROV IVAN A.¹

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, 664033, Irkutsk, Russia

²Ural State University of Economics, 620144, Yekaterinburg, Russia

*Corresponding author: Kostromin Roman O., e-mail: kostromin@icc.ru

Received June 08, 2022, accepted June 30, 2022.

Abstract

Nowadays, operation of infrastructure objects has a significant impact on the ecology of natural territories. Modelling object operation that takes into account meteorological conditions allows evaluating the degree of observable negative impact that affects the object functioning and making decision to mitigate possible consequences. In the paper, we propose a new approach for simulation modelling the operation for environmentally friendly equipment of infrastructure objects located in the Baikal natural territory. Within the proposed approach, we have developed tools based on microservice architecture. These tools are intended to prepare and carry out large-scale experiments in a heterogeneous distributed computing environment using GPSS models for simulating the equipment operation. In particular, the tools support high-performance computing, hybrid modelling using multi-agent technologies and multi-cloud computing, and mechanisms for multi-criteria decision-making based on simulation results. All procedures with respect to data preparing, executing models, and analyzing the simulation results are implemented by as microservices. Using these tools, we have created web services for evaluating the economic efficiency of environmentally friendly heat supply technology for a typical tourist recreation center using heat pumps under various operating conditions. The advantages of the proposed tools in comparison with the tools of similar purpose are indicated. The developed tools can be used to study the functioning of other similar objects, such as children’s camps, museums, exhibition centers, etc.

Keywords: infrastructure objects, environmentally friendly equipment, monitoring, modelling, microservices.

Citation: Bychkov I.A., Feoktistov A.G., Kostromin R.O., Basharina O.Yu., Sidorov I.A. Simulation of operating environmentally friendly equipment of infrastructure objects in microservice environment. Computational Technologies. 2022; 27(5):30–42. DOI:10.25743/ICT.2022.27.5.004. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the grant № 075-15-2020-787 for implementation of Major scientific projects on priority areas of scientific and technological development (the project “Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory”).

References

1. **Qi Q., Zhao D., Liao T.W., Tao F.** Modeling of cyber-physical systems and digital twin based on edge computing, fog computing and cloud computing towards smart manufacturing. Proceedings of the 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC), College Station, Texas; 2018: 51–85, DOI:10.1115/MSEC2018-6435.
2. **Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C.** Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*. 2020; (8):108952–108971. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2998358. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9103025>.
3. **Law A.** How to conduct a successful simulation study. Proceedings of the 2003 IEEE Winter Simulation Conference (WSC). New Orleans; 2003: 66–70. DOI:10.1109/WSC.2003.1261409.
4. **Fan M., Zhang Z., Wang C.** Mathematical models and algorithms for power system optimization: modeling technology for practical engineering problems. London: Academic Press; 2019: 429.
5. **Tako A.A., Robinson S.** The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support System*. 2012; 52(4):802–815. DOI:10.1016/j.dss.2011.11.015. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167923611002211>.
6. **Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F.** Digital twin-driven product design, manufacturing and service with Big Data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018; (94):3563–3576. DOI:10.1007/s00170-017-0233-1. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0233-1>.
7. **Latysheva I., Vologzhina S., Barkhatova O., Loshchenko C., Sutyrina E.** Circulation factors in climate change in the Baikal region. Proceedings of the 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Novosibirsk; 2019: 112086L. DOI:10.1117/12.2538282.
8. **Fortino G., Gravina R., Russo W., Savaglio C.** Modeling and simulating Internet-of-Things systems: a hybrid agent-oriented approach. *Computing in Science & Engineering*. 2017; 19(5):68–76. DOI:10.1109/MCSE.2017.3421541. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8024135>.
9. **Schriber T.J.** Simulation using GPSS. New York: John Wiley & Sons; 1974: 533.
10. AnyLogic: simulation modelling for business. The AnyLogic Company; 2022. Available at: <https://www.anylogic.ru>. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
11. **Paul P.K., Aithal P.S., Bhumali A., Tiwary K.S., Saavedra R., Aremu B.** Geo information systems and remote sensing: applications in environmental systems and management. *International Journal of Management, Technology, and Social Sciences*. 2020; 5(2):11–18. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3724127.
12. **Devyatkov V.V., Devyatkov T.V., Fedotov M.V.** Imitatsionnye issledovaniya v srede modelirovaniya GPSS Studio [Simulation studies in the GPSS STUDIO simulation environment]. Moscow: Vuzovskiy Uchebnyk, INFRA-M; 2019: 283. (In Russ.)
13. **Moore R.V., Tindall C.I.** An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). *Environmental Science & Policy*. 2005; 8(3):279–286. DOI:10.1016/j.envsci.2005.03.009. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901105000456>.
14. **Bychkov I., Feoktistov A., Kostromin R., Sidorov I., Edelev A., Gorsky S.** Machine learning in a multi-agent system for distributed computing management. Proceedings of the International Conference “Information Technology and Nanotechnology. Session Data Science”. Samara; 2018; (2212):89–97. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2212/paper12.pdf>.
15. **Tchernykh A., Bychkov I., Feoktistov A., Gorsky S., Sidorov I., Kostromin R., Edelev A., Zorkalzev V., Avetisyan A.** Mitigating uncertainty in developing and applying scientific applications in an integrated computing environment. *Programming and Computer Software*. 2020; 46(8):483–502. DOI:10.1134/S036176882008023X. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S036176882008023X>.
16. **Sholomov L.A.** Logicheskie metody issledovaniya diskretnykh modeley vybora [Logical methods for studying choice discrete models]. Moscow: Nauka; 1989: 288. (In Russ.)

17. **Feoktistov A.G., Kostromin R.O., Sidorov I.A., Gorsky S.A., Basharina O.Yu.** Digital twins of operation processes for environmentally friendly equipment of infrastructure object. *Modern High Technologies*. 2021; (1):57–62. (In Russ.)
18. **Maysyuk E.P., Kozlov A.N., Ivanova I.Yu.** Influence of technical characteristics of solid fuels at estimation of emissions from small boiler plants. *Energy Systems Research*. 2018; 1(2):43–50. DOI:10.25729/esr.2018.02.0005. Available at: <http://esrj.ru/index.php/esr/article/view/2018.02.0005>.
19. **Marinchenko A.Y., Edelev A.V.** A formation of the heat pump mathematical models. Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments (ICCS-DE). Irkutsk; 2020; (2638):191–200. DOI:10.47350/ICCS-DE.2020.18.
20. Methodology for calculating greenhouse gas emissions (CO₂-equivalent). Self-Regulatory Organization Non-Commercial Partnership “Interregional Alliance of Energy Auditors”. 2022. Available at: <https://sro150.ru/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov>. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
21. Weather forecast: weather in 243 countries of the world. St. Petersburg; 2022. Available at: <https://rp5.ru>. (accessed at May 29, 2022) (In Russ.)
22. **Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Khmelnov A.E., Popova A.K.** Digital environmental monitoring technology Baikal natural territory. Proceedings of the 3rd Scientific-Practical Workshop Information Technologies: Algorithms, Models, Systems (ITAMS 2020). Irkutsk; 2020; (2677):1–7. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2677/paper1.pdf>.