

УДК 004.942

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ ПРИРОДОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ИНФРАСТРУКТУРНОГО ОБЪЕКТА

¹Феоктистов А.Г., ¹Костромин Р.О., ¹Сидоров И.А., ¹Горский С.А., ^{1,2}Башарина О.Ю.

¹ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН»,
Иркутск, e-mail: agf@icc.ru;

²ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»,
Иркутск, e-mail: basharinaolga@mail.ru

Статья посвящена актуальным вопросам разработки и применения цифровых двойников с целью улучшения важных процессов работы природосберегающего оборудования инфраструктурного объекта. Цифровые двойники реализованы в виде набора веб-сервисов. Их организация и взаимодействие основывается на микросервисном подходе. Они обеспечивают возможность проведения массовых расчетов по выявлению и прогнозированию трендов, а также регулярных (сезонных и суточных) колебаний и случайных отклонений в динамике изменений природно-климатических показателей, моделирование процесса управления работой теплонасосного оборудования, а также анализ и оптимизацию эффективности теплоснабжения, реализуемого на базе такого оборудования. Интеллектуализация управления осуществляется путем применения агентов, представляющих компоненты оборудования и эксплуатирующих их субъектов. Агенты обеспечивают согласованное принятие решений по управлению режимами работы оборудования. Процессы работы оборудования исследуются с использованием многовариантных расчетов и многокритериального выбора оптимальных вариантов. Исследование проводится применительно к тепловым насосам туристической базы отдыха, расположенной на охраняемой Байкальской природной территории. Результаты, полученные в процессе моделирования, позволили определить экономически эффективные схемы использования исследуемого оборудования и оптимальные режимы работы его основных компонентов.

Ключевые слова: инфраструктурный объект, теплонасосное оборудование, цифровой двойник, имитационное моделирование, веб-сервисы

DIGITAL TWINS OF OPERATION PROCESSES FOR ENVIRONMENTALLY FRIENDLY EQUIPMENT OF INFRASTRUCTURE OBJECT

¹Feoktistov A.G., ¹Kostromin R.O., ¹Sidorov I.A., ¹Gorsky S.A., ^{1,2}Basharina O.Yu.

¹Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Irkutsk, e-mail: agf@icc.ru;

²Irkutsk State University, Irkutsk, e-mail: basharinaolga@mail.ru

The article is devoted to relevant issues of the development and use of digital twins in order to improve important processes in operating environmentally friendly equipment of an infrastructure object. Digital twins are implemented as a set of web-services. Their organization and interaction are based on a micro-service approach. The developed web-services provide the ability to carry out mass computations to identify and predict trends, regular (seasonal and daily) fluctuations, and random deviations in the dynamics of changes in natural and climatic indicators. They enable us to model the process of controlling the operation of heat pump equipment, as well as analyze and optimize the efficiency of heat supply implemented on the basis of such equipment. Intellectualization of control is carried out through the use of agents representing equipment components and subjects exploiting them. Agents ensure consistent decision-making on the control for equipment operating modes. The equipment operation processes are studied using parameter sweep computations and multi-criteria selection of the optimal scenarios. The study is carried out in relation to the heat pumps of a tourist center located in the protected Baikal natural territory. The results obtained in the process of simulation made it possible to determine cost-effective schemes for using the equipment and the optimal modes of operation of its main components.

Keywords: infrastructure object, heat pump equipment, digital tween, simulation modeling, web-services

Современное развитие информационно-вычислительных и телекоммуникационных технологий обеспечивает возможность оперативного получения, цифровизации и эффективного анализа больших данных, формируемых в процессе работы или моделирования сложных объектов и систем. На этой основе была сформирована концепция цифрового двойника – виртуальной программной сущности, отражающей наиболее важные компоненты жизненного цикла объекта или системы с использованием

физических и виртуальных данных, а также информации о связях между ними. В настоящее время цифровые двойники, представляющие объекты и системы в различных сферах человеческой деятельности, а также процессы их функционирования, все шире внедряются на разных этапах их создания и эксплуатации. К одной из таких сфер деятельности относится поддержка принятия решений при управлении социально-экономическими (в том числе охраняемыми) территориями и расположенными

на них инфраструктурными объектами [1]. При этом особое внимание уделяется использованию экологически чистых технологий и оборудования [2].

Как правило, компоненты оборудования устанавливаются и эксплуатируются в распределенной среде различными субъектами, представляющими инфраструктурный объект. Необходимости согласования критериев эффективности функционирования оборудования и показателей обслуживания инфраструктурного объекта, которые зачастую являются весьма противоречивыми, обоснованно требует интеллектуализации управления. Перспективным подходом к реализации такого управления является применение мультиагентных систем [3].

Целью исследования является разработка цифровых двойников процессов функционирования теплонасосного оборудования инфраструктурного объекта Байкальской природной территории и реализация микро-сервисного взаимодействия между цифровыми двойниками. В качестве такого объекта рассматривается одна из туристических баз отдыха.

Материалы и методы исследования

Практика показывает, что применение тепловых насосов позволяет достаточно эффективно передавать тепло от низкотемпературного источника к источнику потребления тепла. При этом для обеспечения работы самих тепловых насосов используется электрическая энергия. В отличие от приборов, предназначенных для прямой трансформации электроэнергии в тепло, теплонасосное оборудование позволяет существенно снизить ее расход. Кроме того, замена угольных или мазутных котельных, существующих в настоящее время на охраняемых территориях с установленными экологическими ограничениями (к которым относится побережье озера Байкал), на теплонасосное оборудование позволяет снизить объемы потребляемого топлива, сократить вредные выбросы и, как следствие, повысить качество экологической обстановки. Поэтому исследование и оптимизация процессов работы тепловых насосов, используемых туристическими базами отдыха, безусловно, являются актуальными.

Цифровые двойники, представляющие процессы работы оборудования, реализованы тремя веб-сервисами. Первый сервис обеспечивает возможность проведения регулярных массовых расчетов по выявлению и прогнозированию трендов, а также регулярных (сезонных и суточных) колебаний и случайных отклонений в динами-

ке изменений природно-климатических показателей (p_6) [4]. Сервис обеспечивает выполнение следующих операций: постановку задачи – определение диапазона ряда данных (p_1), задание целевого природно-климатического параметра (p_2) и выбор метода анализа данных (p_3); препроцессорную подготовку данных – извлечение указанных данных из базы ретроспективных данных и их трансформацию в целевой формат (Excel, CSV и др.), используемый выбранным методом; моделирование – выявление трендовой, сезонной, циклической и нерегулярной составляющих временного ряда данных; визуализацию результатов моделирования; постпроцессорную обработку данных – преобразование результатов расчетов в форматы данных других сервисов.

Второй сервис разработан для моделирования управления работой теплонасосного оборудования [5]. Его основными операциями являются следующие: постановка задачи – задание структуры теплонасосного оборудования (p_5), указание критериев оптимальности показателей его функционирования (p_7), выбор целевой функции, задание значений входных параметров модели (p_8), определение метода многокритериального анализа результатов моделирования и назначение вычислительного ресурса; препроцессорная обработка данных – формирование вариантов исходных данных путем варьирования заданных значений входных параметров модели; проведение многовариантных вычислений – имитация процесса функционирования теплонасосного оборудования в течение заданного периода модельного времени для каждого варианта исходных данных; многокритериальный анализ результатов моделирования – решение прямой задачи нахождения оптимальных вариантов показателей работы теплонасосного оборудования и последующее решение обратной задачи определения оптимальных вариантов исходных данных, соответствующих найденным показателям; постпроцессорная обработка данных – преобразование результатов моделирования (p_9) в целевой формат данных третьего сервиса и их сохранение в базе расчетных данных.

Элементы оборудования и эксплуатирующие их субъекты представлены в имитационной модели интеллектуальными агентами, обеспечивающими согласованное принятие решений по управлению режимами работы тепловых насосов. Модель управления и аналитические модели работы насосов представлены соответственно в [5] и [6]. Размещение агентов на оборудовании, технология его мониторинга, а также вопросы сбора, обработки и хранения теку-

щих и ретроспективных данных приведены в [7]. В процессе взаимодействия агенты руководствуются установленными ограничениями и критериями оптимальности для процессов работы теплонасосного оборудования и эксплуатации зданий. Решение определяется в виде Парето-оптимального множества альтернатив с помощью дискретных моделей многокритериального выбора [8]. В целом агенты реализуют сценарный подход к реализации согласованных во времени цепочек событий, где каждый сценарий предполагает наличие различных возмущений, определяемых исходными данными, и применение специфических управляющих воздействий агентов, формируемых в процессе их кооперации и соперничества. Агенты функционируют в рамках платформы JADE. Для автоматизации создания, настройки, размещения и конфигурирования агентов разработаны специализированные инструментальные средства [9] в виде надстройки к JADE.

Третий сервис реализует методику анализа и оптимизации эффективности теплоснабжения зданий на побережье озера Байкал на базе тепловых насосов [10]. Сервис поддерживает следующие операции: постановку задачи – выбор имитационной модели, задание значений ее входных параметров и назначение вычислительного ресурса; моделирование – имитацию работы теплонасосного оборудования при регулярных и случайных изменениях условий эксплуатации зданий на основе метода Монте-Карло; постпроцессорную обработку данных – преобразование результатов моделирования (p_{10}) в целевые форматы данных и их сохранение в базе расчетных данных.

Разработан прикладной программный интерфейс (API), выполненный на основе REST-подхода, для обеспечения микро-сервисного взаимодействия. В отличие от протокола SOAP, ответы на запросы в REST являются более компактными. Они могут быть представлены не только в XML, но и в любом другом формате. Для обмена данными используется формат JSON. Каждый из сервисов обменивается данными с другими сервисами по локальным и глобальным вычислительным сетям через GET- и POST-запросы. Создание запросов возможно программными средствами (GNU-утилитами wget или curl, а также штатными средствами различных языков программирования), что позволяет взаимодействовать с сервисами как пользователям через веб-интерфейс или из командной строки, так и программным системам, в том числе агентам. Разработчик модели загружает модель объекта и его спецификацию с помощью веб-интерфейса сервиса имитационного моделирования [5]. Когда на основе данной модели необходимо выполнять расчеты разным группам пользователей, он может опубликовать ее для совместного доступа. В контексте сервиса, модель становится новым проектом и получает уникальный идентификатор и API. С помощью сервиса происходит наследование API для выбранных моделей, что позволяет оперативно создавать новые микросервисы для реализации операций цифровых двойников.

Ниже представлен следующий пример GET-запроса с помощью утилиты командной строки curl для получения спецификации модели цифрового двойника по ее идентификатору:

```
curl -insecure -X GET https://10.20.0.1/DT/projects/123e4567-e89b-12d3-a456-426614174000/spec
```

В ответ будет получен список параметров и спецификация модели в формате JSON [5]. Для обеспечения корректного взаимодействия сервисов между собой необходимо полное соответствие спецификациям моделей. Подробные свойства каждого параметра уточняются соответствующим запросом по имени параметра следующим образом:

```
curl -insecure -X GET https://10.20.0.1/DT/projects/123e4567-e89b-12d3-a456-426614174000/param/AvgHotWaterHourDemand
```

Ниже приведен следующий ответ на данный запрос:

```
{ "success": "true",
  "param": {
    "type": "number",
    "name": "AvgHotWaterHourDemand",
    "title": "Уровень часовой потребности на горячее водоснабжение",
    "gpsName": "par_Q",
    "value": "166.5",
    "variable": " false "}}
```

Информация для обеспечения связей между сервисами доступна пользователям моделей. В спецификациях моделей для указания ссылок на файлы и API предусмотрены соответствующие типы данных. Они позволяют указывать как множества значений переменных, так и пути к базам данных и файлам. В моделях используются текстовые файлы с наборами

значений параметров модели. Допустимо применение файлов табличных данных (CSV или XLS). Для XLS-файлов возможно выполнение вычислений значений в Excel. При задании API другого сервиса в качестве источника данных для параметра модели необходимо заполнить свойство параметра в спецификации следующим образом:

```
"param": {  
  "type": "API_number",  
  "apiPath": "https://10.20.0.1/DT/projects/123e4567-e89b-12d3-a456-426614174000/param/",  
  "token": "a456-426614174000",  
  "apiParamName": "par_Q",  
  "name": "AvgHotWaterHourDemand",  
  "value": "getApi",  
  "apiPostData": "data.json",  
  "title": "Уровень часовой потребности на горячее водоснабжение",  
  "variable": " false "}
```

Для такого параметра указывается следующая информация: тип данных – *API_number*, адрес для доступа к API – *apiPath*, токен авторизации – *token*, имя параметра, значение которого необходимо получить – *apiParamName*, значение поля *value* – *getApi* (это позволит по GET-запросу получить значение выбранного параметра из другого сервиса и присвоить его текущему). Для передачи данных в другой сервис посредством POST-запроса используется поле *apiPostData*. Это поле предназначено для указания исходных данных, на основе которых сервис выполнит вычисления и вернет их результат в качестве ответа на запрос.

Предложенная микросервисная архитектура поддержки взаимодействия цифровых двойников в процессе анализа работы объектов обладает следующими особенностями. Агенты сбора и предварительной обработки данных с датчиков инфраструктурных объектов размещены на маломощных микрокомпьютерах, установленных на инфраструктурных объектах. В силу административных и технических ограничений данные микрокомпьютеры могут передавать небольшие объемы данных по запросу через API и периодически выгружать показатели с датчиков в удаленную базу данных. При этом агенты, представляющие разные компоненты инфраструктурного объекта, могут объединяться в мультиагентную систему для обмена накопленными знаниями и выработки управляющих сигналов, носящих на текущем этапе рекомендательный характер для операторов оборудования. При необходимости в процессе формирования ответа на запросы происходит опрос остальных агентов.

Кроме того, сервисы, которые предназначены для проведения имитационного моделирования и анализа данных, представлены агентами, размещенными на узлах вычислительной среды. Каждый процесс подготовки данных или многовариантного прогона имитационной модели цифрового двойника представлен соответствующим паспортом задания для системы управления очередями заданий, используемой в узлах среды. Благодаря этому агенты осуществляют запуск вычислений в распределенной вычислительной среде по GET- и POST-запросам через API, используя интеллектуальные методы управления потоками заданий. Таким образом, происходит автоматическое масштабирование вычислений агентами, которые запускают дополнительные процессы обработки запросов на вычислительных узлах.

Результаты исследования и их обсуждение

Композиция сервисов для определения экономически эффективных схем использования оборудования и оптимальных режимов его работы приведена в общем виде на рис. 1. Полученные с помощью первого сервиса фрагменты разложения временного ряда природно-климатических данных, собранных метеостанцией в районе локации туристической базы отдыха в течение 8 лет, на сглаженную тренд-циклическую, сезонную и случайную составляющие для аддитивной формы показаны на рисунках 2–4 соответственно.

Расчеты, выполненные с использованием второго сервиса, организованы путем варьирования числа и мощности тепловых насосов, директивно-плановых и оптимально спрогнозированных периодов их

использования, условий подключения дополнительного оборудования (бойлеров), способов учета природно-климатических показателей и др. Для каждого варианта получен стандартный отчет GPSS. Необходимая информация из отчетов автоматически извлекается, агрегируется и обрабатывается с помощью выбранного метода многокритериального анализа. В случае необходимости нахождения единственного решения применяется евклидова метрика относительно идеального варианта.

Экономическая эффективность (обратная величина к ее нормативному коэффициенту, нормирующему объемы разовых

инвестиций и ежегодных текущих затрат) рассчитана для девяти Парето-оптимальных вариантов входных параметров модели управления работой теплонасосного оборудования (рис. 5). Она определена с помощью третьего сервиса на основе расчетного срока окупаемости 8 лет. Для достижения достоверности результатов модель прогонялась 50 000 раз для каждого варианта. Предварительные результаты решения задачи использованы в качестве рекомендаций специалистам по эксплуатации оборудования. Очевидно, что, с экономической точки зрения, варианты 1 и 7–9 являются предпочтительными.

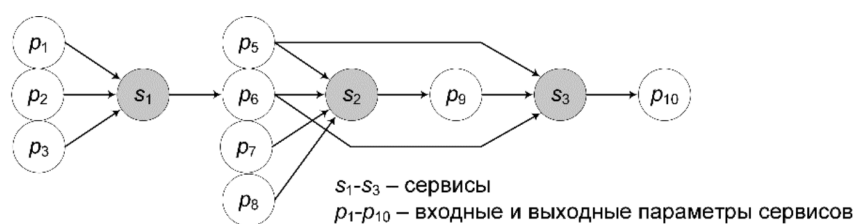


Рис. 1. Схема композиции сервисов

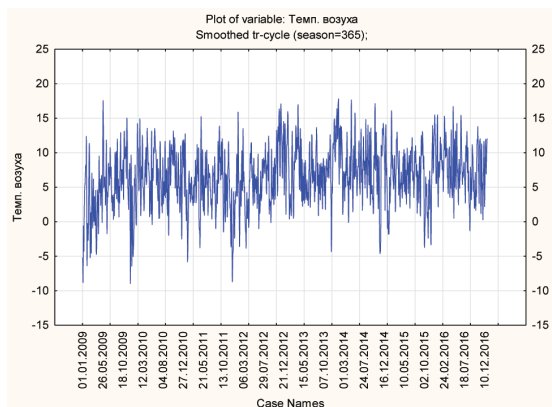


Рис. 2. Трендовая составляющая

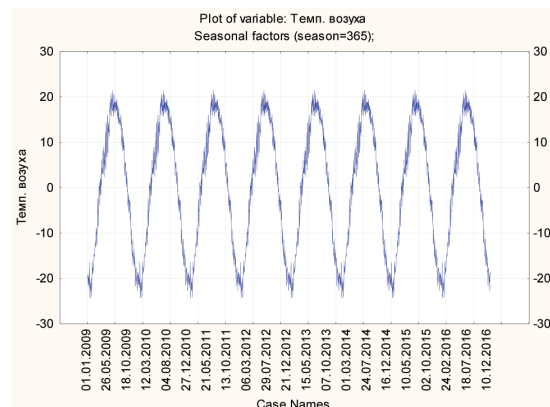


Рис. 3. Сезонная составляющая

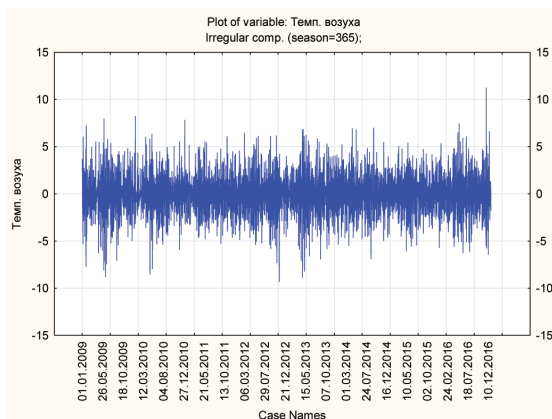


Рис. 4. Случайная составляющая

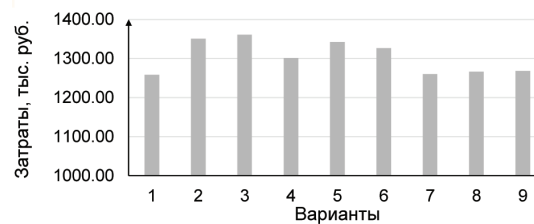


Рис. 5. Экономическая эффективность

Заключение

В настоящее время Байкальская природная территория становится одним из популярных мест активного отдыха россиян и зарубежных туристов, поток которых неуклонно растет каждый год. С учетом повышенных экологических требований, предъявляемых к работе инфраструктурных объектов, использование природосберегающих технологий имеет чрезвычайную важность. В статье представлен подход к разработке и применению цифровых двойников, представляющих процессы работы такого природосберегающего оборудования. Практическое применение разработанных средств показано на примере определения эффективных схем использования теплонасосного оборудования и оптимальных режимов его работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области, проект № 20-47-380002-р_а.

Список литературы

1. Медведев А.В. Цифровые двойники территорий для поддержки принятия решений в сфере регионального социально-экономического развития // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 6–1. С. 61–66.
2. Krawczyk J.B., Lifran R., Tidball M. Use of coupled incentives to improve adoption of environmentally friendly technologies. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2005. Vol. 49. № 2. P. 311–329. DOI: 10.1016/j.jeem.2004.04.007.
3. Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Габдуллина Э.Р. Методологические основы моделирования и интеллектуального управления промышленным комплексом как сложным динамическим многоагентным объектом // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 11-2. С. 288–293.
4. Еделев А.В. Оценка трендов, регулярных сезонных и случайных колебаний природно-климатических характеристик с помощью среды R // Способы, модели и алгоритмы модернизации науки в современных условиях: Тр. Международной научно-практической конф. Уфа: Изд-во АЭТЕРНА, 2020. С. 11–14.
5. 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 // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 2. С. 76–80.
6. 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. CEUR-WS Proceedings*. 2020. Vol. 2638. P. 191–200. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2020.18.
7. Sidorov I., Kostromin R., Feoktistov A. System for monitoring parameters of functioning infrastructure objects and their external environment. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments. CEUR-WS Proceedings*. 2020. Vol. 2638. P. 252–264. DOI: 10.47350/ICCS-DE.2020.23.
8. Шоломов Л.А. Логические методы исследования дискретных моделей выбора. М.: Наука, 1989. 288 с.
9. Феоктистов А.Г., Костромин Р.О. Разработка и применение проблемно-ориентированных мультиагентных систем управления распределенными вычислениями // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 11. С. 65–74. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-11-6575.
10. Еделев А.В., Зоркальцев В.И., Маринченко А.Ю. Моделирование процесса теплоснабжения тепловыми насосами зданий на побережье озера Байкал // *System Analysis & Mathematical Modeling*. 2020. Т. 2. № 2. С. 5–17.