

Инструментальные средства построения цифровых двойников информационно-вычислительных систем

Александр Феокистов¹, Михаил Воскобойников¹, Евгений Юмашев^{1,2}, Максим Боднюк^{1,2}, Дмитрий Яковлев¹

¹ Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, ул. Лермонтова, д. 134, 664033, Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, д. 15, 664074, Иркутск, Россия

Аннотация

Рассматриваются инструментальные средства построения цифровых двойников компонентов информационно-вычислительных систем и их программно-аппаратных инфраструктур. В качестве основного инструмента предложено применение инструментального комплекса Framework for Development and Execution of Scientific WorkFlows (FDE-SWFs). Его применение рассматривается на практических примерах построения цифрового двойника микросети и цифрового двойника в виде испытательного стенда для оценки эффективности работы алгоритмов решения задач исследования живучести энергетической системы на узлах с различными архитектурами процессора.

Ключевые слова

Информационно-вычислительные системы, программно-аппаратные инфраструктуры, цифровые двойники, инструментальные средства

1. Введение

Одним из перспективных направлений разработки, настройки и оптимизации информационно-вычислительных систем для моделирования критически важных инфраструктур (например, энергетических комплексов на разных уровнях их территориально-отраслевой иерархии) является использование технологий ЦД. В общем случае ЦД представляет собой набор моделей (физических, аналитических, имитационных, комбинированных и др.), которые отображают физический объект (ФО) в виртуальном пространстве [1]. Элементы ФО и виртуального объекта (ВО) обмениваются между собой данными в процессе мониторинга, моделирования, прогнозирования и диагностики, а также управления состоянием и поведением ФО в виртуальном пространстве. Как правило, основными областями применения ЦД являются индустрия, интернет вещей, добыча и переработка полезных ископаемых, энергетика, строительство и др. Однако в настоящее время актуализируются работы, связанные с различными аспектами применения ЦД для исследования, настройки и оптимизации компонентов научных информационно-вычислительных инфраструктур. В [5] выполнен обзор работ по ЦД крупномасштабной научной инфраструктуры. Программный комплекс для создания ЦД распределенных центров хранения данных обсуждается в [6]. Вопросы разработки и специализации ЦД вычислительной и инженерной инфраструктур центра коллективного пользования представлены в [7]. Применение ЦД для моделирования и конфигурирования туманных вычислений предлагается в [8].

Information, Computation, and Control Systems for Distributed Environments: Practice and Experience

EMAIL: agf@icc.ru (A. 1); mikev1988@mail.ru (A. 2); yumashevgeny@mail.ru (A. 3); maks.bodnyuk@mail.ru (A. 4); dimasgamer353@gmail.com (A. 5)

ORCID: 0000-0002-9127-6162 (A. 1); 0000-0003-3034-4907 (A. 2); 0009-0003-8736-0155 (A. 3); 0009-0008-4337-9352 (A. 4);

0009-0009-7973-1685 (A. 5)



© 2024 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

DOI:10.47350/ICCS-DE-PE.2024.05

Другим активно развивающимся направлением исследования, настройки и оптимизации компонентов научных информационно-вычислительных инфраструктур является разработка и применение испытательных стендов. Термин «испытательный стенд» (англ., testbed) [9] широко используется в научных исследованиях. Испытательные стенды применяются в рамках создания, развития и использования информационно-вычислительных и телекоммуникационных систем и технологий. Они представляют собой программно-аппаратные среды, специализированные для проведения экспериментов, которые связаны с тестированием и испытанием новых алгоритмических и программных разработок, различных технологических решений и источников данных, а также систем их извлечения, обработки, передачи, хранения и анализа. Как правило, такие эксперименты проводят перед внедрением создаваемых или модифицируемых систем и технологий. Испытательные стенды создаются в физической или виртуальной формах с целью обеспечения разработчиков контролируемой средой для проверки работоспособности, удовлетворения функциональным и системным требованиям, производительности, эффективности использования ресурсов и других свойств исследуемых систем и технологий.

В данной работе представлены инструментальные средства построения ЦД компонентов информационно-вычислительных систем и их программно-аппаратных инфраструктур, которые базируются на интеграции двух вышеупомянутых направлений. Такая интеграция позволяет получить синергетический эффект, заключающийся в построении ЦД, компоненты которого специализированы и оптимизированы под требуемую информационно-вычислительную инфраструктуру. В процессе решения поставленной задачи применяются методы и средства разработки ЦД в виде рабочего процесса, отражающего наиболее важные аспекты функционирования ФО, организации распределенных и сервис-ориентированных вычислений, накопления, обработки и анализа больших данных, программной инженерии и инженерии знаний.

2. Архитектура цифрового двойника

Достаточно распространенная традиционная архитектура цифрового двойника включает 5 основных компонентов (рис. 1): ФО, данные, ВО, сервисы и средства телекоммуникации [10].

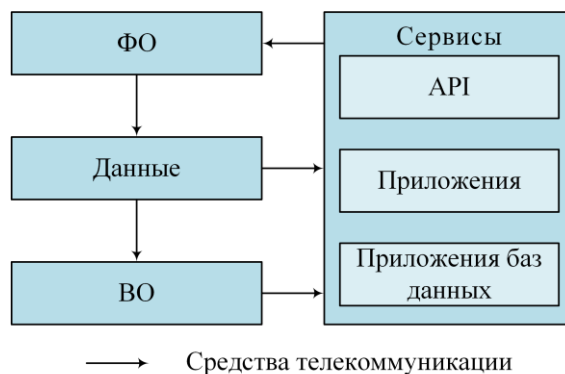


Рисунок 1: Традиционная архитектура цифрового двойника

На основе этой архитектуры разработана специализированная архитектура ЦД компонентов информационно-вычислительных систем и их программно-аппаратных инфраструктур (рис. 2). В рамках этой архитектуры ФО функционирует во взаимодействии с окружающей средой. Контрольно-измерительные систем получают данные о состоянии и процессах работы как ФО, так и окружающей среды.

ВО с помощью сервисов получает, обрабатывает, хранит и анализирует эти данные. Он использует их для моделирования, визуализации, анализа, прогнозирования и оценки состояния и развития ФО. Перечисленные процессы реализуются сервис-ориентированными приложениями и приложениями баз данных.

Приложения выполняются в гетерогенной распределенной вычислительной среде (ГРВС), которая может интегрировать суперкомпьютерные ресурсы центров коллективного пользования, ресурсы Grid-систем, ресурсы облачных и туманных платформ в процессе решения больших научных и прикладных задач.

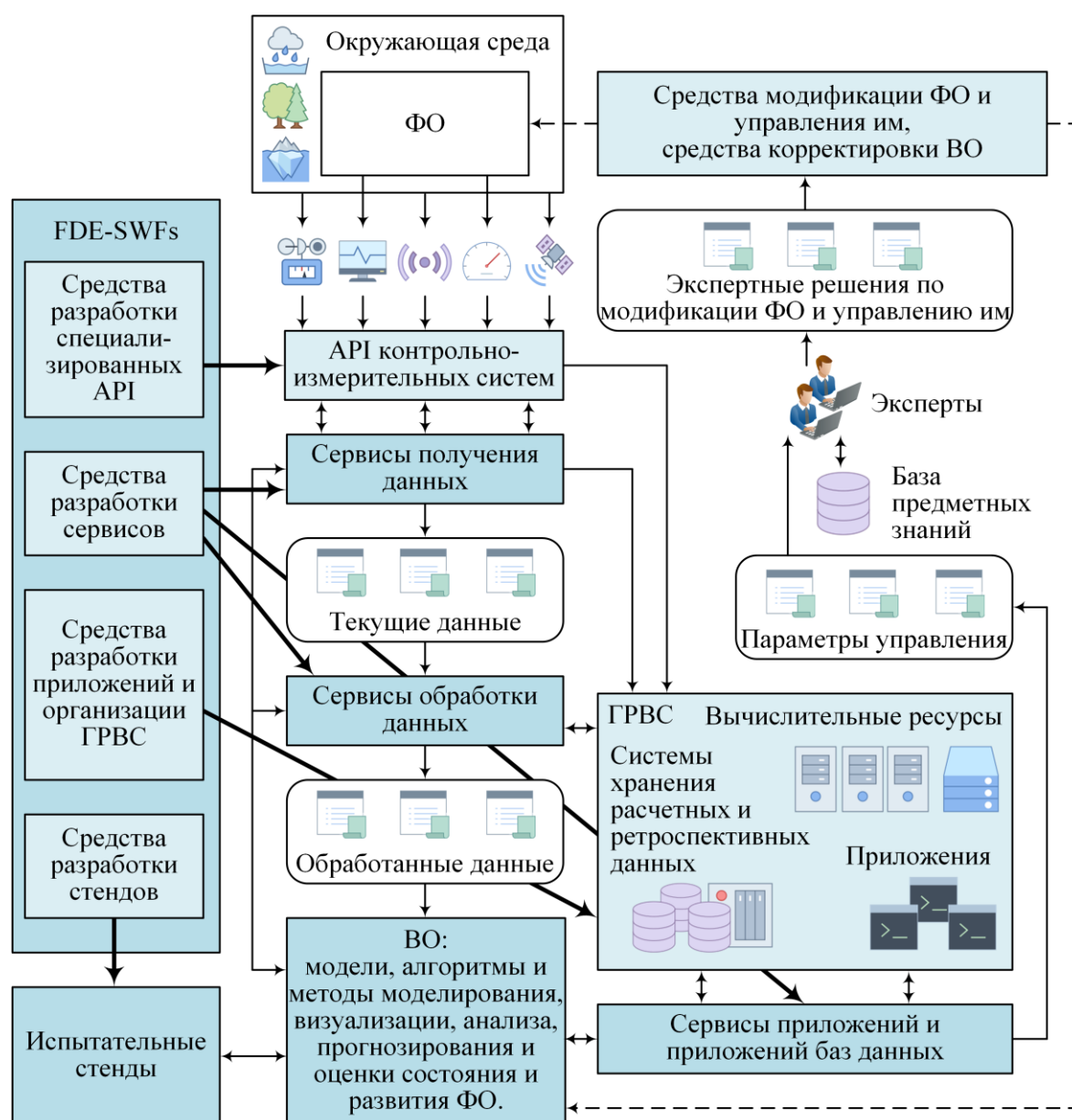


Рисунок 2: Специализированная архитектура цифрового двойника

Разработка специализированных API, сервисов и приложений, а также организация ГРВС осуществляется с помощью инструментального комплекса FDE-SWFs [11]. Валидация данных и верификация программ, используемых ВО, осуществляется на испытательных стендах, которые также разрабатываются средствами FDE-SWFs в виде системных рабочих процессов.

В отличие от известных инструментов подобного назначения (систем управления рабочими процессами) [12, 13], данный комплекс обеспечивает поддержку ряда стандартов разработки и применения рабочих процессов. Он позволяет представлять рабочие процессы на языке Business Process Execution Language (BPEL) [14] и поддерживает стандарт Web Processing Service (WPS) от консорциума Open Geospatial Consortium (OGC) [15]. Поддержка WPS-сервисов особо важна для решения задач экологического мониторинга природных территорий, чрезвычайно актуальных в настоящее время.

Кроме того, в сравнении с другими системами управления рабочими процессами, FDE-SWFs обеспечивает уникальную возможность разработки испытательных стендов для тестирования и анализа работы компонентов сервис-ориентированных приложений и приложений баз данных, реализующих модели, алгоритмы и методы ВО.

Целью работы ВО является выработка рекомендаций по настройке параметров управления ФО и передача их на рассмотрение экспертам, которые формируют окончательные решения по возможной модификации ФО и управлению им. Управляющие воздействия осуществляются специальными средствами. После реализации управляющих воздействий соответствующие корректировки должны быть внесены в модели, алгоритмы и методы ВО.

3. Практическое применение

FDE-SWFs использован для построения ЦД микросети в виде предметно-ориентированной вычислительной среды моделирования ее функционирования [16]. ЦД реализован в виде совокупности веб-сервисов, представляющих приложения моделирования процессов функционирования микросети в ГРВС. Сервисы обеспечивают агрегирование, структурирование и анализ больших временных рядов ретроспективных и текущих предметных данных, моделирование процессов управления оборудованием, анализ эффективности энергоснабжения и его оптимизацию.

Кроме того, проведена оценка эффективности использования вычислительных ресурсов и надежности выполнения вычислительных процессов при решении задач исследования живучести энергетических систем [17]. Был протестирован ряд алгоритмов для решения задач исследования живучести энергетической системы на узлах с различными архитектурами процессора. Тестирование реализовано с использованием испытательного стенда, представленного системным сервис-ориентированным научным рабочим процессом на языке BPEL. ЦД в виде тестового стенда разработан с использованием FDE-SWFs. Тестовый стенд включает в себя широкий спектр системных библиотек для тестирования алгоритмов, анализа их производительности на основе профилирования модулей рабочих процессов, проверки взаимодействия с различными источниками данных и визуализации результатов анализа.

4. Заключение

Предложен новый подход и инструментальные средства построения ЦД компонентов информационно-вычислительных систем и их программно-аппаратных инфраструктур. В качестве основного инструмента используется FDE-SWFs, обеспечивающий построение ЦД на основе традиционной пятиуровневой архитектуры.

Предложенные разработки применены для построения ЦД микросети в виде предметно-ориентированной вычислительной среды моделирования ее функционирования, а также создания испытательного стенда для оценки эффективности использования вычислительных ресурсов и надежности выполнения вычислительных процессов при решении задач исследования живучести энергетических систем.

Применение таких двойников позволяет осуществить на практике детальный учет характеристик распределяемых ресурсов объектов среды и выполняемых в них работ, оценку текущего состояния объектов и прогноз его развития, в том числе предсказание и выявление и нештатных ситуаций в функционировании объектов. Тем самым обеспечивается снижение степени неопределенности в недетерминированной распределенной среде. Это позволяет повысить эффективность и надежность управления такой средой в сравнении с традиционными системами управления.

5. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа

предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» (рег. № 121032400051-9).

6. Список литературы

- [1] M. Segovia, J. Garcia-Alfaro, Design, modeling and implementation of digital twins, *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 14, pp. 5396. doi:10.3390/s22145396.
- [2] A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow, Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 108952–108971. doi:10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [3] S. Mihai et al., Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 2255–2291. doi:10.1109/COMST.2022.3208773.
- [4] M. Javaid, A. Haleem, R. Suman, Digital twin applications toward industry 4.0: A review, *Cognitive Robotics*, 2023, vol. 3, pp. 71–92. doi:10.1016/j.cogr.2023.04.003.
- [5] D. V. Kosyakov, M. A. Marchenko, Digital Twins in Large-Scale Scientific Infrastructure Projects, *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 88–106. doi:10.14529/jsfi230308.
- [6] Д. И. Пряхина и др., Верификация программы моделирования для создания цифровых двойников распределенных центров сбора, хранения и обработки данных, *International Journal of Open Information Technologies*, 2024, т. 12, № 1, pp. 118–128.
- [7] Р. О. Костромин, Сравнительный обзор средств управления конфигурациями ресурсов вычислительной среды функционирования цифровых двойников, *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2021, № 1 (21), с. 132–145. doi:10.38028/ESI.2021.21.1.011.
- [8] А. Б. А. Алаасам и др., Цифровые двойники в туманных вычислениях: организация обработки данных с сохранением состояния на базе микропотоков работ, *Труды Института системного программирования РАН*, 2021, т. 33, № 1, с. 65–80. doi:10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-5.
- [9] Г. И. Радченко, Распределенные виртуальные испытательные стенды: использование систем инженерного проектирования и анализа в распределенных вычислительных средах, *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование*, 2011, № 37 (254), с. 108–121.
- [10] F. Tao, M. Zhang, A. Y. C. Nee, Digital twin driven smart manufacturing, *Academic press*, 2019.
- [11] А. Феоктистов, М. Воскобойников, А. Еделев, Методы и средства разработки и применения испытательного стенда сервис-ориентированных приложений, *Сборник научных трудов VI Международного семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенных сред (ICCS-DE 2024, 1-5 июля 2024 г., г. Иркутск, Россия)*, Иркутск, Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2024, с. 169–173. doi:10.47350/ICCS-DE.2024.23.
- [12] E. Deelman et al., The future of scientific workflows, *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 2018, vol. 32, no. 1, pp. 159–175. doi:10.1177/1094342017704893.
- [13] М.Л. Воскобойников, А.Г. Феоктистов, Сравнительный анализ систем управления научными рабочими процессами, *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2024, № 4. В печати (принята к публикации).
- [14] B. Margolis, SOA for the business developer: Concepts, BPEL, and SCA, *MC Press, LLC*, 2007.
- [15] Open Geospatial Consortium. OGC WPS 2.0 Interface Standard. 2015. URL: <https://repository.oceanbestpractices.org/handle/11329/1140>.
- [16] А. В. Еделев, Д. Н. Карамов, О. Ю. Башарина, Анализ уязвимости автономных микросетей, *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2024, № 1(33), с. 112–121. doi:10.25729/ESI.2024.33.1.010.
- [17] G. Danilov and M. Voskoboinikov, Testbed-based approach to testing a library for evaluating network reliability algorithms, *Proceedings of the International Workshop on Critical Infrastructures in the Digital World (IWCI-2024)*, March 14-20, 2024, Bolshoe Goloustno, Russia, Irkutsk, ESI SB RAS, 2024, pp. 3–4.