

УДК 004.05 + 006

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ АСУ ТП АЭС

ПОЛЕТЫКИН А.Г., ПРОМЫСЛОВ В.Г., СЕМЕНКОВ К.В.,
МЕНГАЗЕТДИНОВ Н.Э., ЖАРКО Е.Ф.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова Российской академии наук
(Москва, Российская Федерация)*

Аннотация. Точная оценка архитектуры и характеристик АСУ ТП АЭС является сложной задачей для экспертов и инженеров. В работе рассматривается проблема разработки и применения цифрового двойника для оценки характеристик цифровой системы управления АЭС в течение ее жизненного цикла. Анализируются сценарии применения цифровых двойников на этапах жизненного цикла АСУ ТП АЭС, от проектирования до вывода её из эксплуатации. В работе рассматриваются и обобщаются моделируемые свойства, относящиеся к цифровым и физическим компонентам системы. Особое внимание уделяется сценариям использования цифрового двойника для повышения кибербезопасности АСУ ТП АЭС и управлению изменениями. В работе описывается реализация цифрового двойника для реальной системы верхнего блочного уровня АЭС.

Ключевые слова: цифровой двойник, АСУ ТП, АЭС виртуализация, жизненный цикл, кибербезопасность.

APPLICATION OF THE DIGITAL TWIN AT NPP I&C SYSTEM LIFE CYCLE
POLETIKIN A.G, PROMYSLOV V.G., SEMENKOV K.V., MENGAZETDNINOV N.E.,
ZHARKO E.F.

*V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)*

Abstract. The precise evaluation of the instrumentation and control (I&C) system design and characteristics is a challenge for experts and engineers. This paper considers the problem of the development and application of a digital twin to assess digital I&C system during its life cycle. We analyze the details of digital twin applications at different lifecycle stages from design to decommissioning. The work reviews and summarizes properties of models concerning the digital and physical components of a I&C system. The other issue of a I&C is increasing cybersecurity threat for NPP, so special attention is paid to the heterogeneous digital twin usage scenarios to improve I&C cybersecurity. The paper also details the digital twin's implementation for a real upper-level control system of a nuclear power plant.

Keywords: cloud computing, cyber physical system, life cycle, digital twin, I&C, NPP, cybersecurity

Введение

Технология цифровых двойников является частью технологии киберфизических промышленных систем Индустрии 4.0. Идея Индустрии 4.0 и сам термин были впервые сформулированы в Германии в 2011 году рабочей группой по видению перспектив развития отрасли [1]. За небольшой период идея и термин получили широкое распространение. В тот период другие страны также проводили исследования подобного рода, и обсуждаемая идея также известна как промышленный Интернет, интеллектуальная промышленность, интеллектуальное производство и т. д. [2,3]. Список цифровых технологий, которые должна использовать компания-производитель в рамках Индустрии 4.0, включает (см., например, [2,4,5]) облачные и туманные вычисления, искусственный интеллект и мобильных автономных роботов, виртуализацию, новые протоколы передачи данных для Интернета вещей, и многие другие. Эти технологии предназначены для создания киберфизических систем (КБФС), которая объединяет цифровые ресурсы и физические, реальные объекты в согласованную среду.

До сих пор не существует однозначного определения термина «цифровой двойник». Например, IBM [6] определяет цифрового двойника как «динамическое виртуальное представление физического объекта или системы, обычно на нескольких этапах ее жизненного цикла. Он использует реальные данные, моделирование или машинное обучение в сочетании с анализом данных, чтобы обеспечить понимание, обучение и рассуждения. Консорциум Industrial Internet [7] полагает, что «цифровой двойник - это формальное цифровое

представление некоторого актива, процесса или системы, которое фиксирует атрибуты и поведение этого объекта, подходящее для связи, хранения, интерпретации или обработки в определенном контексте». Определение W3C [8], на наш взгляд, лучше отражает практические аспекты реализации цифровых двойников контрольно-измерительных систем (систем I&C): «Цифровой двойник - это виртуальное представление устройства или группы устройств, которые находятся в облаке или на граничных узлах. Его можно использовать для представления реальных устройств, которые не могут быть постоянно подключены к сети, или для моделирования новых приложений и служб, прежде чем они будут развернуты на реальных устройствах».

Мы разделяем общее мнение, что цифровой двойник должен обладать некоторыми общими свойствами. Следуя официальным документом Industrial Internet Consortium [7] и Tao et al. [9], приведем некоторые из них:

1. Цифровой двойник может следовать за своим реальным двойником на различных этапах жизненного цикла или в течение какого-то отдельного этапа жизненного цикла.

2. Цифровой двойник должен иметь связь со своим реальным двойником и собирать данные с реального объекта.

3. Цифровой двойник «должен позволять вычислительным и аналитическим моделям анализировать эти данные для описания, диагностики, прогнозирования и моделирования состояний и поведения объектов и систем реального мира» [7].

Предприятия с высоким уровнем риска обычно более консервативны в выборе технологий. Однако концепция Индустрии 4.0 сейчас рассматривается применительно к системам управления атомными электростанциями (АЭС), поскольку она потенциально позволяет повысить эффективность и безопасность эксплуатации таких объектов [10]. Помимо общих свойств, представленных выше, мы со своей стороны в ходе практической реализации цифрового двойника постарались добиться:

- соблюдения баланса между абстрактной моделью и реальными компонентами цифрового двойника.

- управления конфигурацией для установления строгого соответствия цифрового двойника и реальной системы в течение жизненного цикла.

- поддержания высокой актуальности временных характеристик цифрового двойника.

Цифровой двойник представляет собой вычислительную модель и интерфейс обмена данными с реальным объектом.

АСУ ТП АЭС и ее цифровой двойник являются киберфизическими системами, поскольку они объединяют вычисления и управление с восприятием и приведением в действие физической среды. Это потенциально позволяет взаимозаменяемо использовать некоторые программные и аппаратные компоненты в обеих системах: реальных и цифровых.

В этой статье мы обсуждаем общие проблемы моделирования АСУ ТП АЭС, соответствующих Индустрии 4.0, и представляем наш практический результат: реализацию цифрового двойника для подсистемы АСУ ТП АЭС [10,11]. Представленный цифровой двойник представляет новый тип цифровых двойников, «неоднородный» цифровой двойник, который включает имитационные модели и реальные программные и аппаратные компоненты реальной системы для достижения точности моделирования при адекватном отражении системы.

Результаты и их обсуждение

На основе предложенного подхода гетерогенного цифрового двойника спроектирована и реализована гетерогенная цифровая модель системы управления верхнего уровня (СВБУ) АСУ ТП атомной электростанции [11]. СВБУ предлагает функциональные возможности интеграции для различных частей системы АСУ ТП АЭС и обеспечивает взаимодействие всех других систем АСУ ТП АЭС. СВБУ представляет собой современную цифровую сетевую распределенную систему управления. Основные функции СВБУ - мониторинг и контроль состояния АЭС. К ее функциям относятся функции, связанные с безопасностью, и вспомогательные функции; последние - это самодиагностика, архивирование данных о состоянии АЭС в базе данных и обеспечение синхронизации времени для других компонентов АСУ ТП. СВБУ обеспечивает человеко-машинный интерфейс с основным оборудованием АЭС

и содержит около тридцати рабочих станций в типичной конфигурации. Существенной характеристикой системы является ее функционирование в реальном времени. Для повышения надежности СВБУ были приняты проектные меры по обеспечению избыточности системы (резервирование линий связи и вычислительных узлов).

Система имеет модульную архитектуру, что позволяет увеличить количество рабочих мест операторов и обрабатываемой информации. В базовой конфигурации для АЭС общий объем управляемой базы данных составляет около 10^6 сигналов с производительностью около нескольких тысяч сигналов в секунду.

СВБУ состоит (см. Рисунок 1) из серверов, активного и пассивного сетевого оборудования, рабочих станций, вспомогательного оборудования шкафов (источники бесперебойного питания, принтеры и т. д.). Информация передается по сетям Ethernet; все ключевые узлы и пути данных являются избыточными и работают параллельно, обеспечивая резервирование с горячим резервом. СВБУ работает под управлением промышленной операционной системы LICS на базе Linux [13].

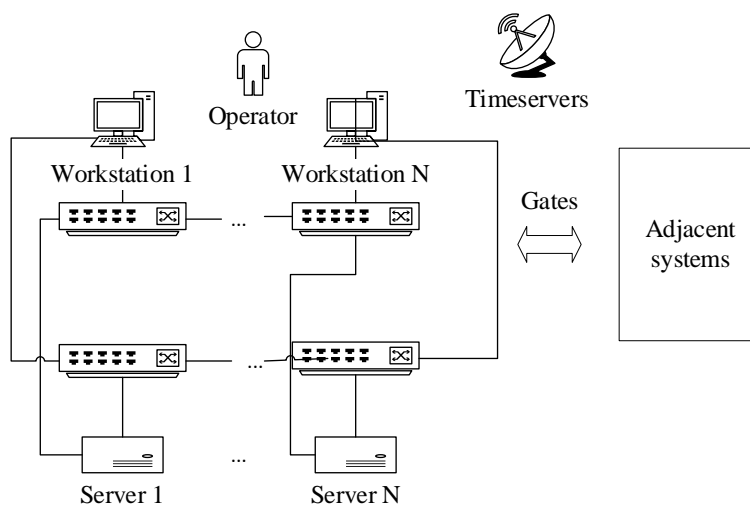


Рис. 1. Структура СВБУ

Цифровой двойник СВБУ объединяет вычислительные, аналитические модели и компоненты оборудования и позволяет описывать, диагностировать, прогнозировать и моделировать состояния и поведение системы. Цифровой двойник СВБУ получает данные от дополнительных программных цифровых двойников смежных систем АЭС. Дополнительные цифровые двойники включают в себя как источники данных на основе моделей, так и некоторые ранее записанные данные из реальной динамики оборудования.

Дополнительные цифровые двойники используются для моделирования динамики функционирования оборудования АЭС для нормальных и некоторых аномальных режимов работы, а так же для прогнозирования и моделирования состояний и поведения реального СВБУ в зависимости от состояния объекта.

Цифровой двойник СВБУ включает в себя некоторые элементы реального оборудования системы СВБУ и около сотни виртуальных компонентов, представляющих компьютеры и сетевые устройства (см. Рисунок 2).

Реальное оборудование включает в себя сервер времени, распределительный шкаф, шкаф рабочего места с операторской панелью, серверный шкаф.

Сервер реального времени действует как источник синхронизации времени через протокол времени (NTP). Аппаратные элементы используются для моделирования поведения вспомогательных устройств в составе рабочих станций и серверных шкафов (например, ИБП и устройства контроля доступа). Виртуальные машины для каждого сервера и рабочей станции физически работают на хост-сервере под управлением ОС LICS и гипервизора QEMU/KVM [14,15]. Физический компьютер рабочей станции также работает под управлением ОС LICS.

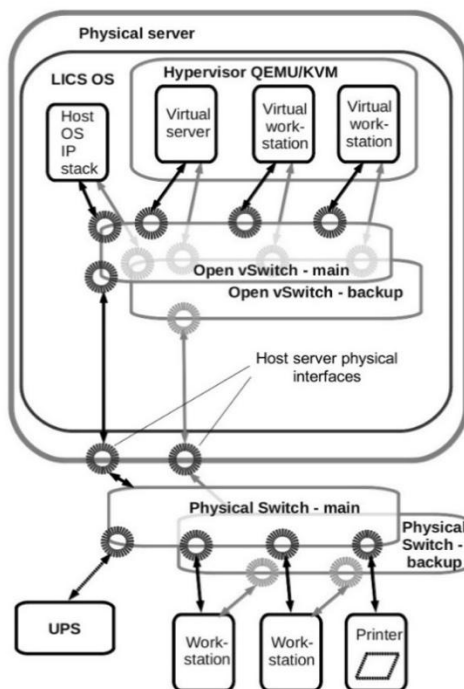


Рис. 2. Архитектура цифрового двойника СВБУ

Заключение

Реализация и применение цифрового двойника для киберфизической системы позволяет снизить затраты на тестирование программного обеспечения, поскольку цифровой двойник более доступен для испытаний в различных режимах. В частности, это проявляется в том, что некоторые ошибки, которые, скорее всего, останутся незамеченными при нормальном тестировании на реальном объекте, обнаруживаются на цифровом двойнике. Более того, можно более одного раза клонировать объект цифрового двойника и таким образом увеличить тестовое покрытие.

Мы продемонстрировали эффективность цифрового двойника в ходе разработки системы управления верхнего блочного уровня (СВБУ) для атомной электростанции. Созданный гибридный цифровой двойник СВБУ включает около сотни виртуальных и реальных объектов (серверы, рабочие станции, сетевое оборудование) и полностью воспроизводит реальные свойства системы, включая избыточность компонентов и сетей. Цифровой двойник СВБУ используется для развертывания системы во время ввода в эксплуатацию и испытаний, измерения и анализа рабочих характеристик СВБУ, тестирования некоторых специальных режимов, которые могут быть затруднены в реальной системе из-за ограничений по стоимости или безопасности, и исправления связанных с ними ошибок. Наш опыт показывает, что процент ошибок, связанных со специальными режимами, составляет около 15–20% от всех ошибок программного обеспечения.

Мы планируем продолжить работу с цифровым двойником на других этапах жизненного цикла СВБУ. Основное внимание будет уделено совершенствованию механизмов синхронизации цифрового двойника и реальной системы, повышению точности моделей, прежде всего, по динамическим и временным характеристикам, а также разработке методик, позволяющих проводить диагностику и прогнозирование состояния системы, оценке ее кибербезопасности и тестированию системы в случае ее модификации

Список литературы

1. Kagermann, H.; Lukas, W.-D.; Wahlster, W. Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. VDI Nachr. 2011, 13, 2–3.
2. Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. In Proceedings of the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences

- (HICSS), Koloa, HI, USA, 5–8 January 2016, doi: 10.1109/HICSS.2016.488. Available online: https://www.researchgate.net/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review (accessed on 27 January 2021).
3. Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry; final report of the Industrie 4.0 working group; Forschungsunion: Berlin, Germany, 2013; pp. 1–79.
 4. Schumacher, A.; Erol, S.; Sihn, W. A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP* 2016, 52, 161–166, doi:10.1016/j.procir.2016.07.040.
 5. Zhong, R.Y.; Xu, X.; Klotz, E.; Newman, S.T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering* 2017, 3, 616–630, doi:10.1016/J.ENG.2017.05.015.
 6. Stanford-Clark, H.; Frank-Schultz, E.; Harris, M. What are digital twins? 2019. Available online: <https://developer.ibm.com/technologies/iot/articles/what-are-digital-twins/> (accessed on 25 February 2021).
 7. Industrial Internet Consortium. Digital Twins for Industrial Applications. Definitions, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases; An Industrial Internet Consortium White Paper, v. 1.0, 2020. Available online: https://www.iiconsortium.org/pdf/IIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf (accessed on 25 February 2021).
 8. W3C. Web of Things (WoT) Architecture. W3C Recommendation 9 April 2020. Available online: <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-architecture-20200409/> (accessed on 25 February 2021).
 9. Tao, F.; Zhang, M.; Liu, Y.; Nee, A.Y.C. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2018, 67, 169–172, doi:10.1016/j.cirp.2018.04.055.
 10. Промыслов В.Г., Семенов К.В., Шумов А.С. Синтез архитектуры кибербезопасности для систем управления атомных станций // Проблемы управления. 2019. № 3. с. 61-71..
 11. Бывайков М.Е., Жарко Е.Ф., Менгазетдинов Н.Э., Полетыкин А.Г., Прангишвили И.В., Промыслов В.Г. Опыт проектирования и внедрения системы верхнего блочного уровня АСУ ТП АЭС // Автоматика и телемеханика. – 2006. – Т. 5. – с. 65-79.
 12. Семенов К.В., Промыслов В.Г., Полетыкин А.Г., Менгазетдинов Н.Э. Validation of Complex Control Systems with Heterogeneous Digital Models in Industry 4.0 Framework // *Machines*. 2021. vol. 9, iss. 3. С. 1-17, <https://www.mdpi.com/2075-1702/9/3/62>.
 13. LICS Registration Certificate, 2019. Available online: <https://www1.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=07B0B75D-B08F-4A7B-BF76-011ED855B976> (accessed on 27 January 2021).
 14. KVM Documentation. Available online: <https://www.linux-kvm.org/page/Documents> (accessed on 27 January 2021).
 15. QEMU Documentation. Available online: https://wiki.qemu.org/Main_Page (accessed on 27 January 2021).