

# ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ РАСШИРЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

И. А. Перл

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

*E-mail: ivan.perl@itmo.ru*

Рассмотрена история возникновения такого понятия как «Цифровой Двойник» в контексте современного кибер-физического подхода к описанию и взаимодействию между виртуальным и реальным миром. Показан основной подход, который применяется к построению таких двойников. В качестве развития этой тематики предложена интеграция современных методов и средств компьютерного моделирования в процесс построения и дальнейшего использования цифровых двойников.

Ключевые слова: *компьютерное моделирование, цифровой двойник, Интернет вещей.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, вычислительные виртуальные окружения становятся всё более тесно интегрированы с различными реальными процессами и системами. Ещё на заре развития вычислительной техники специалисты в различных областях пришли к выводу, что компьютерное управления процессами и системами и различные подходы к оптимизации сулят значительные преимущества и, как следствие, различные аспекты интеграции реального и виртуального миров стали одним из направлений исторического развития вычислительной техники.

Сегодня, одним из популярных направлений кибер-физических систем, является разработка цифровых двойников (Digital Twin, DT), которые, по оценке Gartner были обозначены одним из ведущих стратегических трендов развития информационных систем в течение трёх лет (2017–2019) [1]. Однако несмотря на то, что это направление так популярно в настоящее время, его истоки можно найти в работах, вышедших более тридцати лет назад. Так в 1993 году Onosato и Iwata описали концепцию виртуального производства (Virtual Manufacturing, VM) [2]. С тех пор, в литературе можно найти можно обращений к этой тематике [3–8]. Повышение активности работ в этой области зачастую связано с появлением новых технологических решений и подходов.

Текущая итерация бума цифровых двойников связана с несколькими недавними крупными успехами индустрии информационных технологий. В числе первых можно назвать массовый переход решений на облачную модель предоставления сервисов. Первое было бы не реализуемо без значительных успехов в области коммуникации, которые позволили

быстро передавать большие объёмы данных с одной стороны и с другой обеспечили возможность подключения значительного количества участников обмена данными с другой. Третьим важным элементом можно назвать существенное уменьшение и удешевление электронных компонентов, которое даёт возможность размещать все возможные сенсоры, контроллеры и элементы обратной связи практически в любых условиях. Такое положение дел привело к тому, что к сети Интернет слало подключено устройств, участвующих в автоматизированном обмене данными, намного больше, чем реальных пользователей, людей. И это ознаменовало текущую эпоху Интернета Вещей (Internet of Things, IoT).

Появившаяся технологическая возможность собрать все возможные данные практически с любых узлов информационных или физически существующих систем привела к бурному развитию систем обработки, передачи, сортировки и поиска данных, а также извлечению из неё полезной информации. Однако, стало очень быстро понятно просто собирать данные в больших количествах не эффективно и не целесообразно. Реальной индустрии нужны не сухие цифры, а удобное представление сложных систем с их состояниями и переходами между ними. Так начался новый виток в развитии цифровых двойников, когда данные, собираемые с использованием решений в области Интернета Вещей, встраиваются в богатое семантикой конкретной предметной области виртуальное представление рассматриваемого процесса.

В большинстве случаев современные промышленные решения для создания цифровых двойников сводятся к возможности иерархической организации элементов сложных систем, их группировке, управлению правами доступа и представлению данных с соответствующих реальных устройств с одной стороны и применению богатого инструментария для анализа получаемых данных средствами численных методов и методов машинного обучения с другой. Такая комбинация позволяет решать широкий спектр сложных задач, таких как наглядное представление состояния отдельных узлов или всей сложной системы в целом, отслеживание аномалий в получаемых данных (и, как следствие, в поведении моделируемой системы), построение прогнозов ещё будущих состояний и много другое.

В подавляющем большинстве решений такого типа можно выделить четыре основные составные части: сбор данных, моделирование структуры системы или процесса, наложение собранных данных на виртуальную структуру и различный анализ собранных данных. Т.е. иными словами, при таком рассмотрении, цифровые двойники сводятся к виртуальному моделированию структуры целевой системы или процесса и работе с данными мониторинга этого процесса. Во многих случаях ещё

присутствует элемент обратной связи, когда пользователь может, взаимодействуя с цифровым двойником, отправлять управляющие сигналы обратно для коррекции поведения реальной системы.

При таком рассмотрении, в рамках цифрового двойника упускается важная часть отражения целевой системы – функциональная. Поэтому в качестве приоритетного направления исследований в области построения цифровых двойников можно выделить поиск механизмов и методологии их построения с учётом не только структурных аспектов, но, также, с учётом функционального взаимодействия компонентов.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ**

Параллельно с успехами в области развития систем сбора и обработки информации, которые привели к бурному развитию индустрии производства решений для создания цифровых двойников для систем широкого спектра размеров и сложности, большие успехи произошли и в другой области, области компьютерного моделирования, стоящей на границе между математикой и компьютерными науками. С момента появления первых вычислительных машин компьютерное моделирование стало важным инструментом в развитии практически всех научных направлений и технических свершений. Сложно представить сейчас разработку чего-либо, где бы оно не было задействовано. Более того, существует широкий спектр областей, таких как космические исследования и производство, которые, в силу сложности и дороговизны реальных экспериментов в очень большой степени полагаются на сложнейшие модели процессов и систем.

В отличие от цифровых двойников, компьютерные модели процессов и систем фокусируются не только на структуре того, что они моделируют, но и, в большей части, на функциональных связях между узлами и компонентами целевой системы. Существует большое количество подходов к моделированию, таких как дискретное событийное моделирование, агентное моделирование, системная динамика и многие другие.

Основной целью компьютерного моделирования, при рассмотрении сложных процессов и систем является рассмотрение внутренних процессов, которые протекают в них. Таким образом, компьютерное моделирование – это тот подход, который мог бы помочь закрыть пробел в области проектирования цифровых двойников который сейчас находится на месте отражения процессов в целевых системах или процессах, для которых строятся двойники.

## ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ОСНОВАННЫХ НА МОДЕЛЯХ СИСТЕМ

Итак, разобравшись в том, что такое современные цифровые двойники и найдя в них область, требующую дополнительной проработки, рассмотрим вариант интеграции между ними и современными подходами к компьютерному моделированию, с целью построения более полных цифровых двойников, которые смогут отображать не только структурные особенности целевого процесса или системы, но, также и функциональные связи между его элементами.

Для того, чтобы реализовать этот подход, необходимо в рамках цифрового двойника добавить ещё один компонент. Рассмотрим следующую структурную схему решения (рис. 1), включающего модель системы в структуру цифрового двойника:



Рис. 1. Схема цифрового двойника

Итак, в классическом цифровом двойнике мы опираемся на три ключевых элемента. Первый – это данные, которые мы получаем непосредственно от системы, для которой разрабатывается двойник. Второй – это структурная схема рассматриваемой системы или процесса. Третье это результаты применения различных аналитических инструментов, которые принимают на вход поток данных от реальной системы и учитывают созданную структуру двойника. В таком виде двойник может использоваться для решения широкого спектра задач управления и мониторинга различными системами. Однако, такой двойник не будет учитывать функциональные связи между компонентами системы, что, могло бы расширить возможности его применения как в задачах мониторинга, так и в задачах прогнозирования будущих состояний.

Расширим структуру нашего двойника новым элементом – моделью рассматриваемой системы. При этом, в этом контексте мы будем говорить не только о структурной модели, так как она у нас уже есть, а именно о функциональной. Следует отметить, что, в отличие от структурной модели, которую во многих случаях разработать достаточно просто, разработка функциональной модели может оказаться достаточно сложной задачей, так как она требует знания функциональных зависимостей между компонентами системы, а также обладания навыками в области компьютерного моделирования.

Предположим, что для конкретной рассматриваемой системы нам удалось разработать её компьютерную модель. Т. е. мы можем задать определённые начальные значения и далее следить за тем, как будет меняться состояние системы с течением времени. Наличие такой модели может оказаться полезным в нескольких аспектах. Для того, чтобы получить максимальную выгоду от этого компонента, также необходимо обеспечить несколько вариантов расчёта созданной модели. Среди них можно назвать возможность рассчитывать состояния модели (системы) в будущем, учитывая определённую глубину известных реальных состояний системы и расчёт модели во времени, близком к реальному. Для очень сложных систем второй вариант может оказаться непростым в реализации, так как сложность модели или используемые в ней математические преобразования могут требовать больших вычислительных затрат, однако, современные доступные вычислительные мощности могут обеспечить выполнимость этого режима для большого круга задач.

Рассмотрим несколько сценариев, которые становятся возможными при наличии в составе цифрового двойника модели, описывающей функциональное поведение системы. Начнём с самого распространённого случая – мониторинг работы системы. Предположим, что у нас есть некоторая система, которая функционирует на протяжении определённого времени. За это время была накоплена информация о состоянии её узлов. Это позволяет просмотреть историю её состояний в цифровом двойнике, а также, средствами аналитических решений, экстраполировать различными способами накопленные данные, чтобы предсказать будущие состояния системы. Также, накопленные данные позволят аналитической системе выявлять определённые типы аномалий в её поведении. Например, если известно, что показатели одного из узлов были достаточно стабильными и описывались гладкой функцией, то резкие пики и отклонения могут трактоваться как аномалии и наоборот, если значения показывали высокую вариативность, а потом стали мало отличаться – это тоже может свидетельствовать об аномалии. Однако, такие способы определения аномального поведения системы не всегда подходят, так как

очень часто системы меняют своё поведение не резко, а постепенно, что бывает вызвано постепенной деградацией и износом её элементов. Для определения такого отклонения в поведении может служить используемая модель системы. Очевидно, что реальная система никогда не будет выдавать ровно те же значения, которые приходят в результате мониторинга моделируемой системы. Однако, можно ожидать, что реальные значения будут находиться в определённой окрестности относительно значений, получаемых на выходе модели. Тогда, если мы будем знать, что результаты мониторинга системы определённо время отличались от результатов моделирования в пределах постоянной величины, а после определённого момента этот коридор расширился или сместился – значит в самой системе что-то изменилось и требуется внимание операторов или службы поддержки.

Другой сценарий, при котором наличие функциональной модели в рамках цифрового двойника может показать хорошие результаты – это прогнозирование будущих состояний. При традиционном построении цифровых двойников, прогнозирование будущих состояний осуществляется, основываясь на предсказании будущих значений временных рядов, описывающих состояния отдельных узлов системы. У такого подхода есть ряд существенных недостатков, например, они не учитывают или слабо учитывают взаимозависимость параметров системы. Более того, такое прогнозирование сложно использовать для задач класса “Что если?”. Например, предположим, что рассматриваемой системой является логистическая сеть, осуществляющая доставку различных грузов. При наличии модели этой сети, путём постановки вычислительных экспериментов, владелец сети может оценить последствия оптимизации или отключения тех или иных терминалов или каналов перевозки. Имеющаяся у него модель покажет, как будет меняться загруженность оставшихся узлов и элементов сети. Решить такую задачу путём экстраполяции исторических значений, полученных в ходе мониторинга поведения системы практически невозможно.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной статье рассматриваются современные системы цифровых двойников для сложных процессов и систем. Затрагивается исторический аспект их развития, показаны основные концепции, а также выявлены области, развитие которых может значительно повысить их полезность при анализе работы систем их эксплуатации. В качестве элемента, который предложено ввести в состав цифрового двойника предложена функциональная модель рассматриваемой системы. Показаны её место в общей архитектуре решения, а также сценарии, в рамках которых её нали-

чие приведёт к существенным улучшения и расширению применимости двойника.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ**

1. Liu M. N., Fang S. L., Dong H. Y., Xu C. Z. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. N 58. P. 346-361.
2. Onosato M., Iwata K. Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models // *CIRP Annals*. 1993. V.1 N.42. P. 475-478.
3. Opoku D. J., Perera S., Kyei R., Rashidi M. Digital twin application in the construction industry: A literature review // *Journal of Building Engineering*. 2021. V. 40. P. 102726.
4. Leng J., Wang D., Shen W., et al. Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review // *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. V. 60. P. 119-137.
5. Todorovic M. H., Datta R., Stevanovic L., et al. Design and testing of a modular sic based power block // *In Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. 2016. Germany, P. 1- 4.
6. Tao F., Cheng J. F., Qi Q. L., et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 94. P. 3563-3576.
7. Tao .F, Zhang H., Liu A., Nee A. Digital twin in industry: State-of-the-art. // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. V. 15. N. 4. P. 2405-2415.
8. Wu Y., Wang X. J., He Y., et al. Review on the technology and application of digital twin in manufacturing industry. // *Modern Manufacturing Engineering* 2021. V. 9. P. 137-145.