

# Использование цифровых двойников при построении социо-кибер-физических систем

В. Я. Ананьева<sup>1</sup>, А. И. Водяхо<sup>2</sup>, А. А. Головин<sup>3</sup>

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>varvara.spb99@mail.ru, <sup>2</sup>aivodyaho@mail.ru, <sup>3</sup>golovin99@icloud.com

**Аннотация.** В статье описан подход к построению сложных распределенных социо-кибер-физических систем, основанных на использовании цифровых двойников. Основная идея разработанного подхода заключается в том, что цифровой двойник рассматривается в качестве элемента системы цифровых двойников. Предложена эталонная сервисно-ориентированная архитектура социо-кибер-физических систем и эталонная архитектура цифрового двойника. Рассмотрена задача поддержания в актуальном состоянии системы моделей, входящих в состав системы цифровых двойников. Приведены результаты эксперимента по синхронизации моделей. Описанный подход может представлять интерес для специалистов, занимающихся исследованиями и разработкой различного рода информационных систем, в частности, интеллектуальных систем.

**Ключевые слова:** цифровой двойник; системы цифровых двойников; социо-кибер-физические системы

## I. ВВЕДЕНИЕ

История развития цифровых двойников (ЦД) насчитывает уже несколько десятилетий, хотя сам термин появился позже. В основе современных ЦД-технологий лежат три идеи, высказанные разными авторами: ЦД – это элемент некоторого виртуального мира [1]; ЦД – это модель, которая сопровождает антропогенную систему (продукт) на протяжении всех этапов жизненного цикла [2]; ЦД – это разновидность агента [3]. В 2010-х годах наибольшее распространение получил второй подход, в соответствии с которым ЦД – это виртуальная копия продукта (ЦД продукта). ЦД продукта традиционно ассоциируется с этапом производства и является одной из ключевых идей, положенных в основу парадигмы Industry 4.0. Сам термин ЦД продукта часто используется до настоящего времени как синоним термина ЦД. В литературе можно найти большое число разнообразных определений понятия ЦД [4]. Наиболее общим и широко используемым определением ЦД является определение, предложенное в 2020 году Digital Twin Consortium, в соответствии с которым данный термин определяется как «*виртуальное представление объектов и процессов реального мира, синхронизированное с заданной частотой и точностью*». [5].

Однако в последние годы термин ЦД все чаще стал применяться не только к антропогенным системам, но и к природным системам, а также к людям (ЦД человека, ЦДЧ) и коллективам людей, в частности, когда они выступают в качестве элементов социо-кибер-физических систем (СКФС) [6]. Следует заметить, что

применительно к СКФС ряд авторов предлагает отказаться от попыток создать подобное определение и предлагается использовать концепцию глобального ЦД [6], в соответствии с которой ЦДЧ определяется как совокупность всей хранящейся в цифровом виде информации и прогнозных знаний, касающихся конкретного человека, т.е. фактически предлагается использовать систему доменно-ориентированных моделей.

## II. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦД-ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время доступны многие тысячи статей, касающиеся различных аспектов построения как СКФС, так и собственно ЦД. Кроме того, доступен ряд монографий по данной тематике. С точки зрения предмета исследования настоящей статьи, который может быть определен как исследование принципов построения систем ЦД в среде СКФС, наибольший интерес представляют публикации, посвященные кибер-физическим системам (КФС) и СКФС [6], ЦД-ориентированным архитектурам [7], эталонным архитектурам ЦД, ЦДЧ, моделям, используемым в составе ЦД [8], а также системам ЦД [9].

Современное состояние ЦД-технологий может быть охарактеризовано следующим образом:

1. ЦД технологии входят в фазу зрелости (Plateau of productivity), что приводит к необходимости разработки эталонных архитектур, созданию фреймворков и наборов паттернов для их построения.
2. ЦД нельзя более рассматривать только как ЦД продукта, хотя данный класс ЦД является одним из важнейших подклассов класса ЦД.
3. ЦД, ЦДЧ и ЦД групп (коллективов) людей являются основным средством интеграции гетерогенных элементов, входящих в состав больших и сложных СКФС, которые могут быть отнесены к классу систем систем (System of Systems, SoS) [10].
4. ЦД становится полноправным элементом SoS и поэтому речь идет не только о создании ЦД, а о создании систем ЦД, которые должны работать на разных стадиях жизненного цикла.

Дальнейшие перспективы развития ЦД-технологий можно связать, прежде всего, с повышением уровня интеллекта создаваемых СКФС, что может быть

достигнуто за счет использования идей гибридного интеллекта (ГИ) [11] при построении перспективных СКФС.

Предметом рассмотрения в настоящей статье являются ЦД времени выполнения. В данной статье рассматривается два вопроса, которые, по мнению авторов, являются ключевыми для построения СКФС, основанных на использовании систем ГИ:

1. Каким должен быть ЦД, который может выступать в качестве полноправного элемента СКФС.
2. Что представляют из себя системы ЦД, и каким образом их можно поддерживать в актуальном состоянии.

### III. ЭТАЛОННАЯ АРХИТЕКТУРА СКФС

В настоящее время известно несколько эталонных моделей СКФС. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является ориентация на использование сервисно-ориентированных решений. Сервисно-ориентированная (СО) эталонная структура СКФС может быть представлена на четырех уровнях:

- уровень сущностей;
- инфраструктурный уровень;
- уровень моделей;
- уровень сервисов.

На уровне 0 располагаются сущности разной физической природы (физические сущности, люди, группы людей и др.). На уровне 1 располагается компьютерно-телекоммуникационная инфраструктура. На уровне 2 располагаются ЦД и встроенные в них модели. На уровне 3 располагаются сервисы четырех типов: сервисы доступа к сущностям (А-сервисы), сервисы доступа к моделям (М-сервисы), сервисы запросов (Q-сервисы), сервисы синхронизации (S-сервисы) и бизнес-сервисы (В-сервисы), принадлежащие ЦД. Необходимо заметить, что структура по рис. 1 – это не физическая, а логическая структура.

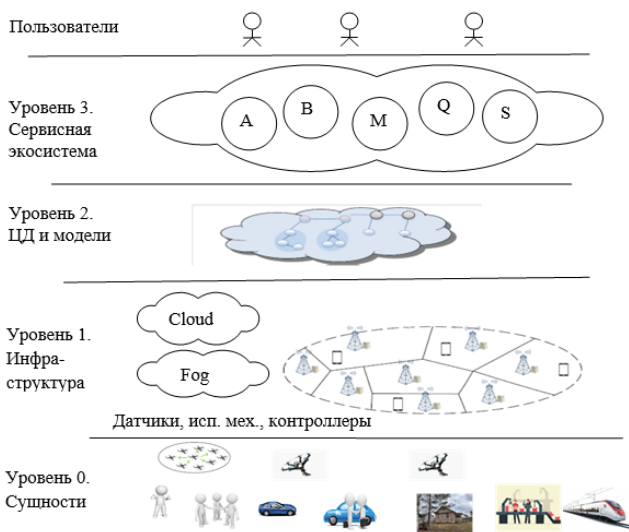


Рис. 1. Эталонная структура сервисно-ориентированной СКФС

### IV. ЭТАЛОННАЯ АРХИТЕКТУРА ЦД

Эталонная архитектура ЦД, выступающего в качестве элемента, показана на рис. 2. ЦД включает в себя 4 элемента: репозиторий моделей, процессор моделей, процессор запросов и DSL процессор.

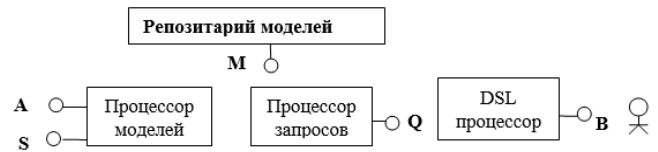


Рис. 2. Эталонная сервисная архитектура ЦД

Репозиторий моделей, предназначен для хранения как текущих, так и исторических моделей сущностей. Репозиторий может располагаться как в туманном, так и в облачном слое. Наиболее рациональным представляется хранение оперативных моделей в туманном слое, а исторических моделей в облачном слое. Репозиторий реализует М-сервисы.

Процессор моделей реализует две основные функции: поддерживает модель в актуальном состоянии и обеспечивает синхронизацию моделей. Процессор моделей поддерживает А-сервис, обеспечивающий обработку информации о событиях, поступающую, в частности, в виде log-файлов, а также S-интерфейс, который используется для синхронизации моделей.

Процессор запросов поддерживает сервис запросов к моделям (Q-сервис).

DSL процессор является интерпретатором DSL конкретных пользователей. Различные категории пользователей могут использовать разные DSL. Этот процессор поддерживает бизнес-интерфейсы (В-сервисы), которыми могут пользоваться как люди, так и приложения.

Ключевым элементом ЦД являются модели. Типы используемых моделей определяются как интересами пользователей, так и спецификой сущности (А). В качестве моделей ЦД (МЦД) аналоговых систем обычно используются дифференциальные уравнения. В качестве МЦД дискретных систем чаще всего используются автоматные [12, 13] и графовые модели (графы свойств, графы знаний [14, 15]), в качестве МЦД человека обычно используются графовые модели. Очевидно, что алгоритмы построения и поддержания этих моделей в актуальном состоянии существенно различаются.

Термин ЦДЧ используется в различных науках и понимается несколько по-разному в зависимости от контекста применения [6]. ЦДЧ могут быть построены в терминах разных групп атрибутов, таких как физические характеристики, антропометрические характеристики, физиологические характеристики, психосоциальные характеристики, перцептивные характеристики, эмоциональные характеристики, ментальные характеристики. Следует заметить, что это далеко не полный список. Чаще всего ЦДЧ используются в таких областях как производство, медицина, спорт [6].

В зависимости от типа элемента, которому соответствует данный ЦД, могут использоваться самые разные модели. Это могут быть, в частности, графы

свойств, графы знаний, онтологии, автоматные модели, для аналоговых систем это могут быть дифференциальные уравнения.

#### V. ЗАДАЧА ПОДДЕРЖАНИЯ СИСТЕМЫ ЦД В АКТУАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

Одной из ключевых задач, возникающих при работе с распределенной системой ЦД является задача поддержания в актуальном состоянии множества связанных между собой моделей, которые в простейшем случае образуют дерево. Обычно в крупных СКФС имеется достаточно много групп пользователей, каждый из которых имеет собственные интересы, и в системе приходится поддерживать в актуальном состоянии множество моделей.

Можно рассмотреть три основных подхода к поддержанию системы моделей в актуальном состоянии: 1) все события, которые приводят к необходимости коррекции модели, обрабатываются немедленно по поступлению; 2) информация о событиях, которые приводят к необходимости коррекции модели, просто запоминаются, а модель объявляется устаревшей, когда появляется запрос, для обработки которого требуется данная модель, то модель строится заново; 3) постоянно в актуальном состоянии поддерживаются наиболее востребованные модели, а прочие модели строятся при появлении запроса.

#### VI. ЭКСПЕРИМЕНТ

Целью проведения эксперимента являлась оценка сложности построения многоуровневых моделей. При проведении эксперимента использовался генератор случайных чисел. Эксперимент проводился на персональном компьютере (ПК), возможности которого приблизительно соответствуют возможностям одноплатного компьютера, используемого в туманном слое КФС. Количество уровней варьировалось в пределах от 1 до 9, а количество дочерних элементов у каждого узла варьировалось в пределах от 0 до 100, что отражает структуру реальных КФС.

Результаты эксперимента показали, при генерации модели при фиксированном максимальном количестве дочерних узлов у каждого узла (`max_children`), равном 10, ПК перестал справляться с высотой дерева (`depth`) 10 уровней и выше. Это связано с рекурсивным вызовом алгоритма при генерации модели. При фиксированной высоте, равной 5 уровням, ПК не справлялся, начиная с `max_children`, равном 60 узлам (рис. 3).

Также был проведен эксперимент по поддержанию модели в актуальном состоянии, при условии, что все события, которые приводят к необходимости коррекции модели, обрабатываются немедленно по поступлению. Немедленная обработка событий позволяет уменьшить время обработки запроса, но если запросов мало, а событий много, то все время перестраивать модели становится не выгодно.

На рис. 4 приведены графики зависимости суммарного времени обработки запросов в зависимости от времени между запросами (при фиксированном среднем времени между событиями, равном 60 тактов) и

от времени между событиями (при фиксированном среднем времени между запросами, равном 20 тактов).

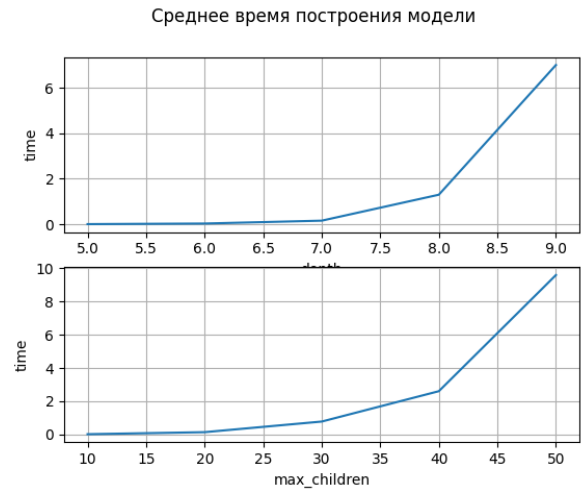


Рис. 3. График зависимости времени построения модели от количества уровней и количества дочерних узлов у каждого узла

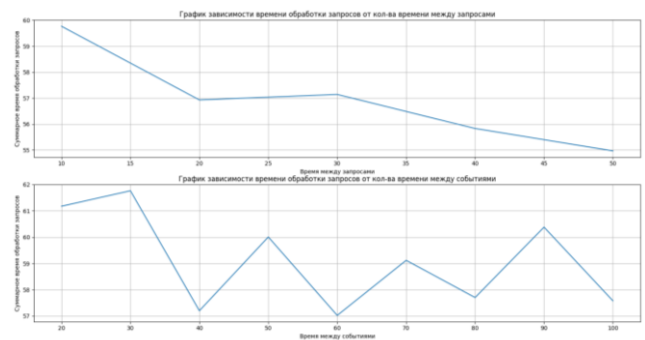


Рис. 4. График зависимости суммарного времени обработки запросов от времени между запросами и времени между событиями

Таким образом, эксперимент показал, что время построения модели растёт экспоненциально с увеличением числа уровней и числа дочерних узлов у каждого узла. А также с увеличением времени между появлением запросов, суммарное время обработки запросов уменьшается.

#### VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ доступных литературных источников показал, что ЦД-технологии входят в фазу зрелости и находят все более широкое практическое применение, причем не только в сфере производства, но и при построении больших и сложных КФС и СКФС, что приводит к необходимости разработки эталонных архитектур, созданию фреймворков и наборов паттернов для их построения.

В результате проведенного исследования была предложена эталонная четырехуровневая сервисно-ориентированная архитектура СКФС. Также предложена эталонная архитектура ЦД, ориентированная на использовании в качестве элемента системы ЦД включающая в себя 4 элемента: репозиторий моделей, процессор моделей, процессор запросов и DSL процессор.

В качестве одной из ключевых проблем построения является проблема поддержания в актуальном состоянии системы моделей. Рассмотрены три возможных подхода к решению этой задачи. Проведен эксперимент по оценке условий целесообразности применения альтернативных подходов к синхронизации системы моделей.

Предложенные архитектуры могут представлять интерес для специалистов, занимающихся исследованиями и разработкой различного рода КФС и СКФС. Дальнейшие исследования и разработки предлагается провести, в первую очередь, в области расширения списка объектов, выступающих в роли объекта наблюдения и создания фреймворков, ориентированных на разработчиков реальных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Gelernter D. *Mirror Worlds*. Oxford University Press, Inc. 1992.
- [2] Grieves M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *Int. J. Prod. Dev.* 2 (12), 2005.
- [3] Mariani S., Picone M., Ricci A. About Digital Twins, agents, and multiagent systems: a cross-fertilisation journey. DOI: 10.48550/arXiv.2206.03253
- [4] Barricelli B.R., Casiraghi E., Fogli D. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, 2019.
- [5] Harper E., Ganz Ch., Malakuti S. Digital Twin Architecture and Standards. *IC Journal of Innovation*, 2019.
- [6] Gräßler I., Maier G., Steffen E., Roesmann D. *The Digital Twin of Humans: An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0*. Springer Nature, Switzerland AG, 2023.
- [7] Nakamura T. *The Digital Twin Computing Reference Model Version 2.0*. 2021.
- [8] Taha W., Taha Abd-Elhamid M., Thunberg J. *Cyber-Physical Systems: A Model-Based Approach*. 2021.
- [9] Wu Y., Zhang K., Zhang Y. Digital Twin Networks: A Survey. *IEEE Internet of things journal*, vol. 8, NO. 18, 2021.
- [10] Olsson Th., Axelsson J. *Systems-of-Systems and Digital Twins: A Survey and Analysis of the Current Knowledge*. 2023.
- [11] Lyu Z., Xie S. Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics. *Digital Twin*, 2022.
- [12] Torgashev V.A., Plyusnin V.U. *Dynamic Architecture Computers*. In *Proc. of The Int. Conf. Parallel Computing Technologies*. ReSCo, Moscow, 1993.
- [13] Torgashev V.A., Tsarev I.V. A family of supercomputers with dynamic architecture – conceptual foundations // *Artificial intelligence*, №3, 2009.
- [14] Chartrand G., Egan C., Zhan P. *How to Label a Graph*. Springer Nature, Switzerland AG, 2019.
- [15] Kejriwal M., Knoblock C., Szekely P. *Knowledge Graphs Fundamentals, Techniques, and Applications*. Massachusetts Institute of Technology, 2021.