

КОНЦЕПЦІЯ ЦИФРОВИХ ДВОЙНИКІВ В ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

Г.С. Макаренко

Харківський національний університет радіоелектроніки
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14
E-mail: hennadii.makarenko@nure.ua

О.С. Пащенко

Харківський національний університет радіоелектроніки
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14
E-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua

М.Г. Стародубцев

Харківський національний університет радіоелектроніки
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14
E-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua

Анотація: Представлено аналіз сучасної концепції цифрових двійників стосовно виробничих систем, наведено огляд характеристик і параметрів цифрового двійника. На основі аналізу визначено та згруповано за значимістю основні характеристики цифрового двійника, що впливають на ефективність застосування концепції у виробничих системах.

Ключові слова: цифровий двійник, кіберфізичні системи.

THE CONCEPT OF DIGITAL TWINS IN MANUFACTURING SYSTEMS

H. Makarenko

Kharkiv National University of Radio Electronics
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14
E-mail: hennadii.makarenko@nure.ua

O. Pashchenko

Kharkiv National University of Radio Electronics
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14
E-mail: oleksandr.pashchenko@nure.ua

M. Starodubcev

Kharkiv National University of Radio Electronics
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14
E-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua

Abstract: The article presents an analysis of the modern concept of digital twins in relation to production systems and provides an overview of the characteristics and parameters of a digital twin. Based on the analysis, the main characteristics of a digital twin that affect the effectiveness of the concept's application in production systems are identified and grouped according to their significance.

Keywords: digital twin, cyber-physical systems.

Сучасними тенденціями у розвитку інформаційних технологій на виробництві стає застосування теорії та практики кіберфізичних виробничих систем [1]. Традиційні методи проектування, такі як імітаційні та кореляційні моделі, поступаються своїм місцем технологічним підходам до опису об'єктів реального світу у віртуальному середовищі. Наприклад, цифровий двійник максимально наближається за складністю його опису, прогнозуванню його властивостей, функцій і поведінки, за його реакцією на збурюючі впливи до поведінки об'єктів реального світу [2].

Особливістю сучасної концепції проектування із застосуванням цифрових двійників є присутність фізичного та віртуального середовищ взаємодії об'єктів реального та віртуального

світу. Фізичне середовище відноситься до простору «реального світу», в якому знаходиться фізичний об'єкт дослідження [3]. Параметри фізичного середовища вимірюються і передаються у віртуальне середовище цифрового двійника, щоб забезпечити точну відповідність між станом об'єкта у фізичному та віртуальному середовищах, а значить, ефективно контролювати стан об'єктів online. Точна відповідність даних середовищ необхідна для застосування функцій симуляції та оптимізації, для досягнення передбачуваних переваг, застосування програмно-орієнтованого підходу [4] до проектування виробничих систем. Фізичне середовище включає всі параметри, які можуть впливати на фізичний об'єкт, при цьому вони не повинні бути обмежені тільки тими параметрами, які вимірюються як частина цифрового двійника.

Віртуальне середовище існує в цифровому середовищі проектування і є дзеркалом фізичного середовища, причому синхронізація між середовищами досягається за допомогою фізичної метрології, тобто датчиків реального часу, що передають ключові вимірювання від фізичного об'єкта до віртуального [3]. На відміну від фізичного середовища, описи віртуального середовища іноді називають базовою технологією, такою як «база даних», «сховище даних», «хмарна платформа», «сервер», «API» (Application Programming Interface) тощо. У постійно мінливому технологічному ландшафті неможливо пов'язувати концепцію цифрових двійників з конкретною технологією.

Параметри відносяться до типів даних, інформації та процесів, які необхідні для взаємодії між фізичними та віртуальними об'єктами через цифрове середовище. Кількість параметрів та їх деталізація впливають на рівень відповідності отриманого цифрового двійника та величину задоволеності результатом застосування даної технології на реальному виробництві.

У табл. 1 наведено основні параметри фізичних об'єктів, що використовуються в середовищі проектування цифрового двійника для ефективного контролю та управління виробничими процесами і системами. Параметри отримані шляхом аналізу публікацій, присвячених застосуванню концепції цифрових двійників на виробництві, і згруповані в десять класів, які найчастіше використовуються в наукових роботах і впливають на ефективність застосування програмно-орієнтованого підходу в проектуванні виробничих систем.

Необхідною умовою функціонування кіберфізичних систем є наявність фізико-віртуальних зв'язків між фізичним об'єктом і його віртуальним аналогом. Фізико-віртуальні зв'язки – це засоби, за допомогою яких стан фізичного об'єкта передається у віртуальне середовище і реалізується в ньому, тобто відбувається оновлення віртуальних параметрів таким чином, щоб вони відображали поточний стан фізичних параметрів. До них відносяться датчики інтернету речей [5], сервіси [6], 5G [7] тощо.

Опис цифрового двійника неможливий без фізичної та віртуальної взаємодії між об'єктами. З'єднання складається з фази метрології, в якій фіксується стан фізичного об'єкта, і фази реалізації, в якій розраховується похибка між фізичною та віртуальною моделями. На рис. 1 показано цей процес.

Наприклад, зміна температури фізичного двигуна здійснюється за допомогою датчика температури інтернету речей (фаза метрології), вимірювання температури передається у віртуальне середовище через веб-сервіс. Віртуальний процес визначає різницю температур між фізичним і віртуальним двигунами, а потім оновлює віртуальний двигун таким чином, щоб обидва вимірювання були однаковими (фаза реалізації).

Цей безперервний зв'язок між фізичним і віртуальним об'єктами є однією з відмінних рис програмно-орієнтованого підходу до проектування із застосуванням цифрових двійників від традиційних методів проектування, де аналіз виконується для кожного середовища в автономному режимі. Фізико-віртуальне з'єднання дозволяє здійснювати моніторинг змін стану, що відбуваються під впливом фізичного і віртуального середовищ. Наприклад, якби

зміна частоти обертання двигуна відбулася внаслідок впливу температури, то фізико-віртуальне з'єднання оцінило і виміряло б ефект цього втручання.

Таблиця 1 – Основні параметри та приклади використання

Параметри	Визначення	Приклади
Форма	Геометрична структура об'єкта	Геометрія об'єкта, знос, допуски, система координат, параметри заготовки (міцність, твердість)
Функціональність	Рух та/або мета об'єкта	Функціональні можливості, контроль, параметри верстата (швидкість шпинделя, швидкість подачі), функціональна модель, біохімічна модель, загальна модель
Здоров'я	Фактичне стан об'єкта по відношенню до його ідеального стану	Аналіз, контроль
Розташування	Географічне положення об'єкта	Розташування об'єкта щодо навколишнього середовища, макетів, виробництва
Процес	Види діяльності, в яких бере участь об'єкт	Параметри планування (послідовність, час простою), моделювання, логістика, загальні відомості
Час	Час, витрачений на виконання дії і дата/час виконання дії	Своєчасність реагування, час простою та час роботи, час виробничого процесу, час впливу
Стан	Поточний вимірний стан всіх параметрів об'єкта та середовища	Стан виробничого процесу, експлуатація, стан виробничого середовища, цілісність технологічних процесів, стан людини, узагальнений стан
Продуктивність	Виміряна продуктивність підприємства в порівнянні з її оптимальним значенням	Продуктивність компонентів системи, загальна продуктивність системи
Навколишнє середовище	Фізичне та віртуальне середовища, в яких існує об'єкт	Параметри фізичного середовища, параметри віртуального середовища
Якісні показники	Інформація, яка є якісною і тому, як правило, не піддається вимірюванню традиційними датчиками	Суб'єктивні уявлення про корисність продукту, вимоги до замовлення продукції, вимоги до кваліфікації працівника

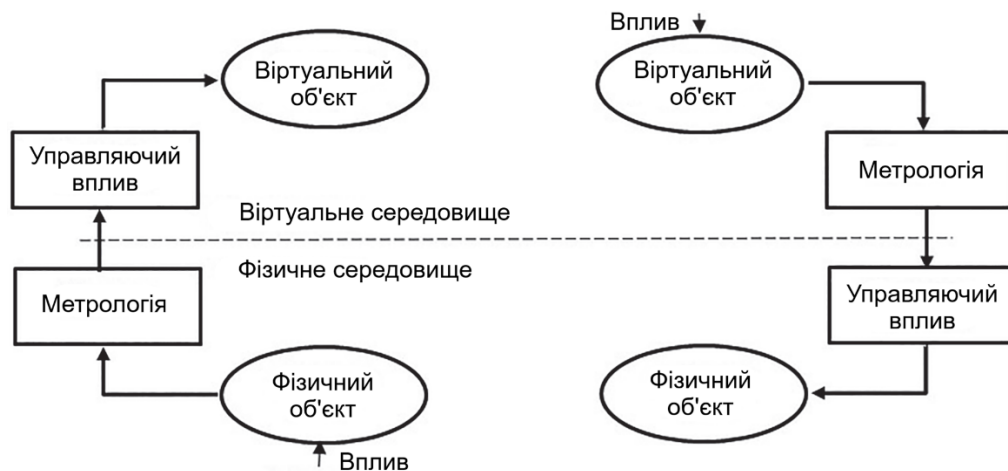


Рисунок 1 – Двонаправлений процес взаємодії фізичного і віртуального об'єктів

Віртуально-фізичний зв'язок представлений потоком інформації та процесів від віртуального до фізичного об'єкта, тобто цифровий двійник містить функціональні можливості для фізичного впливу на стан реального об'єкта. Наприклад, на практиці таку можливість використовують для управління ПЛК (програмований логічний контролер) [8], технологічним процесом [9], параметрами машини [10] і управлінням виробництвом [11] тощо. Віртуально-фізичний зв'язок також проходить через фазу метрології та фазу реалізації.

Двонаправлена взаємодія віртуального та фізичного об'єктів дає перевагу програмно-орієнтованим методам проектування із застосуванням цифрових двійників, оскільки є універсальною та затребуваною на виробництві.

Фактично цифровий двійник, що має як фізичний, так і віртуальний зв'язок, може висунути гіпотезу, а потім виконати, перевірити і скоригувати цю гіпотезу в безперервному циклі адаптації при проектуванні, виробництві та управлінні фізичним об'єктом.

ВИСНОВКИ. В даній роботі проведено аналіз концепції цифрових двійників стосовно виробничих систем. Визначено характеристики та параметри цифрового двійника, що створюють потенційні переваги його застосування при використанні програмно-орієнтованого підходу до проектування, реалізації та експлуатації виробничих систем і процесів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Radhakisan B., Gill H. Cyber-physical systems. The Impact of Control Technology. 2011. P. 161-166.
2. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. V. 48. N 3. P. 567-572.
3. Xiang F., Zhi Z. Jiang G. Digital twins technology and its data fusion in iron and steel product life cycle. Proc. 15th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC). 2018. P. 1-5.
4. Guerineau B., Bricogne M., Durupt A., Rivest L. Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology. Proc. 11th France–Japan and 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM). Compiègne, France. 2016. P. 314-320.
5. Cheng Y., Zhang Y., Ji P., Xu W., Zhou Z., Tao F. Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 97. N 1-4. P. 1209-1221.

6. Zheng Y., Yang S., Cheng H. An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2019. V. 10. N 3. P. 1141-1153.
7. Cheng J., Chen W., Tao F., Lin C.-L. Industrial IoT in 5G environment towards smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*. 2018. V. 10. P. 10-19.
8. Botkina D., Hedlind M., Olsson B., Henser J., Lundholm T. Digital twin of a cutting tool. *Procedia CIRP*. 2018. V. 72. P. 215-218.
9. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihh W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. V. 51. N 11. P. 1016-1022.
10. Lohtander M., Ahonen N., Lanz M., Ratava J., Kaakkunen J. Micro manufacturing unit and the corresponding 3D-model for the digital twin. *Procedia Manufacturing*. 2018. V. 25. P. 55-61.
11. Zhuang C., Liu J., Xiong H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 96. N 1-4. P. 1149-1163.
12. Nevludov, I., Omarov, M., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Jabrayilzade, E. (2026). MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTORIES CONSTRUCTION, MOVEMENT OF THE GRIPPING DEVICE OF A COLLABORATIVE ROBOT. *Advanced Information Systems*, 10(1), 11-20.
13. Model with Neural Network Component for Adaptive Manipulator Control under Variable Load / Amer Abu-Jassar, Mohammad Hamdan, Nowfal Aweisi, Mahmoud Howaidi, V. Yevsieiev, V. Lyashenko // *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. –19(1). – 2026. – P. 855-86
14. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2025(4), 83-94.
15. Nevludov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Artiukh, R. (2025). Mathematical model of adaptive hierarchical high-level control of a three-link collaborative robot-manipulator. *INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SCIENTIFIC SOLUTIONS FOR INDUSTRIES*, (2(32)), 58–68. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.058>
16. Yevsieiev V. Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / V. Yevsieiev, N. Starodubcev // *Science in Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, February 6-8, 2023. - Brussels : De Boeck, 2023. - Scientific Collection «InterConf» . - № 141. - P. 331-334.*
17. Yevsieiv, V. Using the Triangulation Method to Measure the Distance to Objects in the Working Area of a Collaborative Manipulator Robot / V. Yevsieiv, S. Starikova // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2024 : Proceedings of VIII st International Conference, October 25-26, 2024. - Kharkiv, 2024. - P.107-109.*
18. Yevsieiev V. Simulation of the operation of the sensor system of a mobile robot in the Autodesk tinkercad environment / V. Yevsieiev, S. Starikova // *Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації-2023 : матеріали III Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів, Одеса, 28-29 жовтня 2023 р. - Одеса : ОНТУ, 2023 . – С. 21-23.*
19. Model with Neural Network Component for Adaptive Manipulator Control under Variable Load / Amer Abu-Jassar, Mohammad Hamdan, Nowfal Aweisi, Mahmoud Howaidi, V. Yevsieiev, V. Lyashenko // *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. –19(1). – 2026. – P. 855-868.