

ВИКОРИСТАННЯ ДИСКРЕТНО-ПОДІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

М.Ю. Білоусов

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: matvii.bilousov@nure.ua

М.Г. Стародубцев

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua

С.В. Шибанов

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: serhii.shybanov@nure.ua

Анотація: Цифрові двійники привертають до себе дедалі більшу увагу. Водночас не можна не відзначити той факт, що більшість публікацій розглядають саме застосування цифрових двійників. Те, як ці двійники були побудовані (розроблені) залишається поза розглядом. Тим часом очевидно, що саме питання розробки (створення) двійників є первинними. У роботі розглядається зв'язок дискретних імітаційних моделей та цифрових двійників.

Ключові слова: дискретно-подійне моделювання, цифровий двійник.

USE OF DISCRETE EVENT MODELING IN THE DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS

M. Bilousov

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: matvii.bilousov@nure.ua

M. Starodubcev

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: nikolaj.starodubcev@nure.ua

S. Shybanov

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av., 14

E-mail: serhii.shybanov@nure.ua

Abstract: Digital twins are attracting increasing attention. At the same time, it should be noted that most publications focus on the application of digital twins. How these twins were built (developed) remains outside the scope of consideration. Meanwhile, it is obvious that the very issue of developing (creating) twins is of primary importance. The paper considers the relationship between discrete simulation models and digital twins.

Keywords: discrete event modeling, digital twin.

Дискретне імітаційне моделювання (в роботі – це дискретно-подійне моделювання), в англійській літературі – discrete-event simulation (DES) – один із найстаріших і широко використовуваних підходів до імітаційного моделювання. У дискретно-подійному підході модель системи (опис її функціонування) представляється як послідовність подій у часі.

Кожна подія (або події в багатопотокових системах) відбувається в певний момент часу і фіксує певну зміну стану системи [1].

Стан системи визначаються значеннями змінних, які є складовою моделі. Ініціалізація (зміна значень) змінних відбувається відповідно до логічних правил, які визначають реакцію на подію (або події). Відповідно такі логічні правила також є частиною системи. Іншою частиною будь-якої подібної системи є синхронізатор – механізм (алгоритм), що синхронізує зміни станів (що реалізує “виникнення” подій).

Побудовані моделі бувають однопоточні, тобто мають лише одну подію, або багатопоточні, які можуть мати кілька поточних подій.

Самі події бувають миттєві та інтервальні. За характером виникнення подій дискретноподійні моделі поділяються на детерміновані та стохастичні, залежно від того, яким чином генеруються події [2].

Умовою завершення роботи моделі можуть бути:

- виникнення заданої події;
- досягнення певного стану;
- закінчення заданого часу по годинниках системи моделювання;
- проходження заданої кількості циклів по годинниках системи моделювання.

Результатом моделювання є статистичні характеристики змінних системи, накопичені (виміряні) у процесі роботи моделі.

Це один із найстаріших (довго використовуваних) підходів до моделювання систем, що накопичив за роки використання велику практику і, головне, що призвів до появи популярних інструментальних засобів (бібліотек, фреймворків, проблемно-орієнтованих мов програмування).

Цифровий двійник, згідно з класичним визначенням – це цифрова копія живого чи штучного фізичного об'єкта [3]. Термін цифровий двійник відноситься до цифрової копії потенційних та реальних фізичних активів (фізичний двійник), процесів, людей, місць, систем та пристроїв, які можуть використовуватись для різних цілей. Цифрові двійники покликані полегшувати засоби контролю, розуміння та оптимізації функцій всіх фізичних активів, забезпечуючи безперешкодну передачу даних між фізичним та віртуальним світом [4].

Відповідно, цифровий двійник за визначенням включає імітаційну модель. Звідси випливає природне припущення, що засоби розробки імітаційних моделей можуть бути використані і при створенні цифрових двійників. Оскільки більшість таких систем створювалося в "до двійниково" еру, вони не мають всього, що потрібно для цифрових двійників. Тому коректним є питання, що необхідно (можливо) додати до інструментарію для створення дискретно-подійних моделей, щоб його можна було використовувати для цифрових двійників.

Технологія цифрових двійників грає вирішальну роль Індустрії 4.0, забезпечуючи єдине уявлення реального і віртуального світів.

Розглянемо порівняння дискретно-подійних моделей і цифрових двійників, в яких цифрова репліка може бути представлена у вигляді набору станів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Віртуальні моделі у цифровому двійнику мають бути точними копіями фізичних об'єктів. Це означає точне відтворення фізичної геометрії, властивостей, поведінки та правил функціонування [5]. Наприклад, тривимірні геометричні моделі можуть описувати фізичний об'єкт з погляду його форми, розміру тощо. На підставі фізичних характеристик (властивостей), наприклад, швидкості та сили, фізична модель має відображати такі явища, як деформація, руйнування тощо. Тут необхідно відзначити, що дискретно-подійні моделі зазвичай не дуже підходять для опису саме фізичних моделей у зазначеному вище значенні. Це не є їх недолік у частині використання для проектування цифрових двійників, це просто обмеження щодо застосування. Для фізичних моделей є інші засоби розробки.

Моделі поведінки, відповідно до назви, описують поведінку та механізми реагування на зміни у зовнішньому середовищі. Опис поведінки у формі переходів між станами – це те, що є основою дискретно-подійного моделювання.

Правила тісно пов'язані з моделями поведінки та моделюють прийняття рішень, виконання оцінок та т.п. Правила можуть створюватися з урахуванням історичних даних (якщо є і доступні) чи задаватися експертами. Ця компонента відповідає логічному модулю у дискретно-подійному моделюванні.

Наступний елемент, що є найважливішим для цифрових двійників, – це, звичайно, дані. Усі цифрові двійники, потенційно, мають справу з різнорідними та багатовимірними даними, що надходять із різних джерел. У системах імітаційного моделювання найчастіше приймаються спрощені моделі даних. Наприклад, для багатьох моделей дискретно-подійного моделювання типовим є моделювання настання подій відповідно до деякого статистичного розподілу. Для цифрових двійників спрощення неможливі (інакше це не цифровий двійник). Дані модель може отримувати безпосередньо від фізичних об'єктів, при цьому дані можуть бути як статичними, так і динамічними, дані можуть породжуватися вже самою моделлю, або надходити від різних сервісів, що обробляють дані вимірювань, так і зовнішні (по відношенню до фізичного об'єкта) дані. Зазначимо також, що дані можуть виникати і внаслідок злиття (з'єднання) вимірювань (data fusion).

Звісно, що в такому випадку ці дані не надходять самі по собі, і для цифрового двійника має бути характерна підтримка безлічі з'єднань. Це необхідно для отримання даних від фізичного об'єкта, а також від зовнішніх сервісів. Ці зв'язки представлені на рисунку 1.

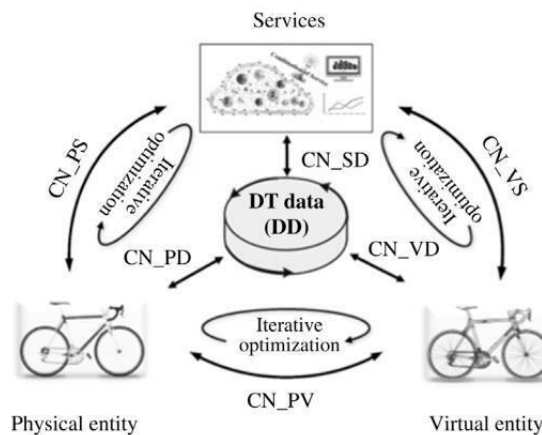


Рисунок 1 – З'єднання у цифровому двійнику [6]

Основна відмінність цифрового двійника від імітаційної моделі може бути сформульована в такий спосіб. Моделювання – це аналіз "що буде якщо ...", тоді як цифровий двійник – це "що відбувається зараз і що буде якщо ...". Ключові відмінності також включають наступні моменти.

Цифровий двійник – це моделювання в реальному часі. Традиційне моделювання виконується у віртуальних середовищах, які можуть представляти фізичні середовища, але не об'єднують дані в реальному часі. Регулярна (постійна) передача інформації між цифровим двійником і відповідним фізичним середовищем робить можливим моделювання в реальному часі. Це підвищує точність прогнозних аналітичних моделей, а також якість управління і моніторингу.

Більша кількість змінних. Збір усіх даних дозволяє розширити кількість можливих змінних, доступних для моделі. Звісно, що такий аналіз потребує підтримки в описах моделей поведінки або в правилах моделі, але він, принаймні, стає принципово можливим. Відповідно, принципово можливим стає і розширене використання результатів моделювання. Іншими словами, цифровий двійник повинен (може) отримувати більше результатів, ніж просто імітаційна модель.

Акумуляція великих наборів даних у цифровому двійнику підвищує його значимість порівняно з імітаційною моделлю. Цифровий двійник стає невід'ємною частиною процесу експлуатації фізичного об'єкта, який використовується для прогнозу аналітики, технічного обслуговування тощо. У підсумку цифровий двійник впливає на фізичний об'єкт, наприклад, надає дані для його поліпшення, оптимізації процесів тощо. Як приклади можна навести, наприклад, цифрові двійники автомобілів Tesla. У кожного автомобіля Tesla, що працює сьогодні, є цифровий двійник, який збирає великі набори даних, що виробляються кожним автомобілем. Зібрані дані використовуються для оптимізації дизайну, прогнозу аналітики, вдосконалення технічного обслуговування тощо [7]. Суто імітаційні моделі, як правило, використовуються тільки на етапі проектування.

Моделювання дискретних подій (DES), як було зазначено вище, – це форма комп'ютерного моделювання системи за допомогою дискретної послідовності подій. Термін «дискретний» описує той факт, що події розвиваються вперед у часі через визначені в моделі інтервали. Власне моделювання призначене для відстеження еволюції системи в часі.

Області застосування дискретно-подієвого підходу досить широкі. Це відбувається завдяки простоті та досить високій ефективності опису систем у вигляді набору станів. Класичні застосування – це все, що може бути представлено як система масового обслуговування: сервісні підприємства, транспортні системи, логістика та складські операції.

Якщо ми переходимо від дискретно-подієвої моделі до цифрового двійника, цифрова репліка якого побудована на базі дискретно-подієвого підходу, то, очевидно, що модельний час, в силу вимоги передачі даних в реальному часі, повинен відповідати реальному часу. Таким чином, наприклад, нульовий відлік – це просто час початку роботи цифрового двійника. Час наступної події – це реальний час настання події, прирост часу – це нова позначка, в якій перевіряються події, що настали після останньої перевірки.

Можна відзначити, що сама схема цифрової репліки буде змінюватися в залежності від того, що реально можливо виміряти в конкретних умовах. Іншими словами, цифрова репліка (її структура) буде залежати від доступності даних фізичного об'єкта. При цьому під доступністю потрібно розуміти як технічну можливість їх отримання, так і економічну доцільність їх збору.

ВИСНОВКИ. У цій статті розглянуто можливості використання засобів дискретно-подійного моделювання при розробці цифрових двійників. Проведено порівняльний аналіз класичних дискретно-подійних моделей та цифрових реплік у двійниках, які використовують дискретно-подійний підхід.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varga András. Discrete Event Simulation System. Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM2001), Prague, 6-9 June 2001, 1-7.
2. Fishman George S. Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis. Springer Science & Business Media, 2013. 537 p.
3. El Saddik Abdulmotaleb. Digital twins: The convergence of multimedia technologies. IEEE MultiMedia. 2018. Volume 25, Issue 2. P. 87-92.

4. Khajavi Siavash H., et al. Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE Access*. 2019. Volume 7. pp. 147406-147419.
5. Qi Qinglin, et al. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021. Vol. 58. pp. 3-21.
6. Tao Fei, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 67. pp. 169-172.
7. Tharma Rajeeth, Roland Winter and Martin Eigner. An approach for the implementation of the digital twin in the automotive wiring harness field. *DS 92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. 2018. pp. 3023-3032.
8. Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(5), 1187-1202.
9. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). Development of mathematical support for adaptive control for the intelligent gripper of the collaborative robot manipulator. *Advanced Information Systems*, 9(3), 57-65.
10. Culbertson, P., Slotine, J. J., & Schwager, M. (2021). Decentralized adaptive control for collaborative manipulation of rigid bodies. *IEEE Transactions on Robotics*, 37(6), 1906-1920.
11. Hameed, A., Ordys, A., Możaryn, J., & Sibilska-Mroziewicz, A. (2023). Control system design and methods for collaborative robots. *Applied Sciences*, 13(1), 675.
12. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
13. Yevsieiev, V. Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0. / V. Yevsieiev, D. Gurin // Sectoral research XXI : characteristics and features : collection of scientific papers "SCIENTIA" with proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. - Chicago : European Scientific Platform, 2023. - P. 92-94.
14. Attar, H., & et al. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.
15. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demska, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In *2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* PP. 61-64. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906
16. Невлюдов, І., Євсєєв, В., Максимова, С., & Артюх, Р. (2025). Математична модель адаптивного ієрархічного високорівневого керування триланкового колаборативного робота-маніпулятора. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, (2 (32)), 58-68.
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 мультимедія 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.