

С.В. Мисковець¹, Ю.П. Фещук, М.Ю. Фещук², Ю.А.Півоварчук¹

Луцький національний технічний університет¹
Компанія PATON INTERNATIONAL²

ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ МОДУЛЬНИХ ВИРОБНИЧИХ СТАНЦІЙ FESTO

В роботі розглянуті питання створення, впровадження та оптимізації цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO. Шляхом моделювання досліджено роботу програмної та апаратної частини виробничого для центру складання блоку клапана на основі роботи FESTO під управлінням PLC Siemens SIMATIC S7-1500.

Ключові слова: цифрові двійники, автоматизація, роботизація, Індустрія 4.0, програмування

S. Myskovets, Yu. Feshchuk, M. Feshchuk, Yu. Pivovarchuk

OPTIMIZATION OF DIGITAL TWINS OF FESTO MODULAR PRODUCTION STATIONS

The paper considers the issues of creation, implementation and optimization of digital twins of FESTO modular production stations. By means of modeling, the operation of the software and hardware part of the production center for the assembly of a valve block based on FESTO work under the control of the Siemens SIMATIC S7-1500 PLC was investigated.

Key words: digital twins, automation, robotics, Industry 4.0, programming

Постановка проблеми. Активний розвиток технологій Індустрії 4.0 та наскрізна цифровізація виробничих процесів призвели до необхідності запровадження цифрових двійників (Digital Twin, DT) стають незамінними для тестування та моделювання нових параметрів і варіантів проектування. Рішення на базі DT створюють 3D-цифрову копію фізичного об'єкта, що дозволяє розробляти кращі продукти, швидше виявляти фізичні проблеми й точніше прогнозувати результати. Останніми роками цифрові двійники значно знизили вартість розробки нових виробничих підходів, підвищили ефективність, скоротили кількість відходів і мінімізували варіабельність між партіями продукції.

Модульні виробничі станції FESTO Didactic широко використовуються у промислових середовищах для відпрацювання навичок автоматизації, роботизації та інтеграції інтелектуальних систем управління. Вони слугують платформою для навчання принципам програмування ПЛК (PLC), робототехніки, управління виробничими процесами та оптимізації операцій.

Проте, існує низка невирішених проблем. Це недостатня інтеграція цифрових двійників у реальні виробничі середовища, потреба в розробці оптимізованих алгоритмів управління, обмеженість використання цифрових двійників для прогнозного обслуговування, проблеми кібербезпеки та збереження даних.

Таким чином, постає необхідність розробки комплексної методики створення, впровадження та оптимізації цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO, що дозволить підвищити продуктивність та забезпечити адаптивне управління виробництвом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифровий двійник (DT) відрізняється від цифрової тіні (DS) і цифрової моделі (DM). Ці три технології різняться за архітектурою передачі даних і своїм призначенням. Серед них цифровий двійник є найбільш потужною технологією (рис. 1) [1].

Цифрова модель (DM) – це віртуальне 3D-представлення об'єкта чи продукту, яке можна використовувати для симуляції й аналізу. Цифрова модель є статичною копією фізичного об'єкта без автоматизованого обміну даними між фізичним світом і моделлю.

Цифрова тінь (DS) базується на сканованих лазером даних і є віртуальною моделлю, що представляє фізичну модель лише з односпрямованим потоком даних. У DS також відсутній автоматизований обмін даними між фізичним світом і моделлю. Цифрову тінь створюють для конкретних завдань у різний час, і вона може покращувати цифрову модель, синхронізуючи її з реальним світом. В основному DS використовується після завершення дизайну в контексті Індустрії 4.0. Однак це може бути неповним представленням усієї системи. Цифрові тіні можуть існувати паралельно і створюються за допомогою спеціального програмного забезпечення або лазерного сканування фізичних об'єктів [2-4].

У цифровому двійнику (DT) фізичні та віртуальні сутності взаємодіють між собою [1] (рис. 1). DT є повним віртуальним представленням об'єкта або системи, де дані передаються від системи до двійника і від двійника назад до системи. Для ініціювання дій на виробничому майданчику повноцінно функціонуючий DT забезпечує двосторонню передачу даних: він отримує дані з фабрики та може передавати їх назад.

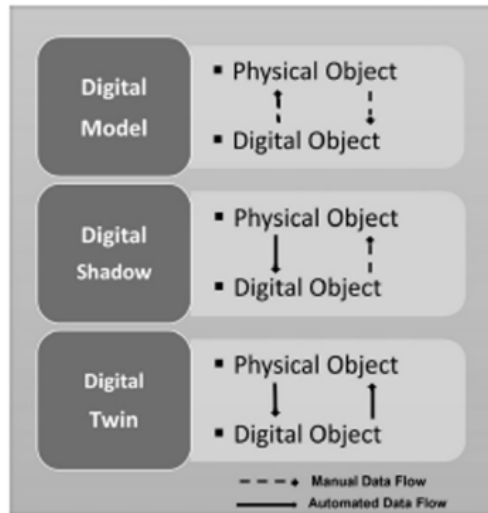


Рис. 1. Порівняння трьох моделей і потоку даних у них [1]

Структура цифрового двійника для виробництва регламентується ISO 23247 (рис. 2).

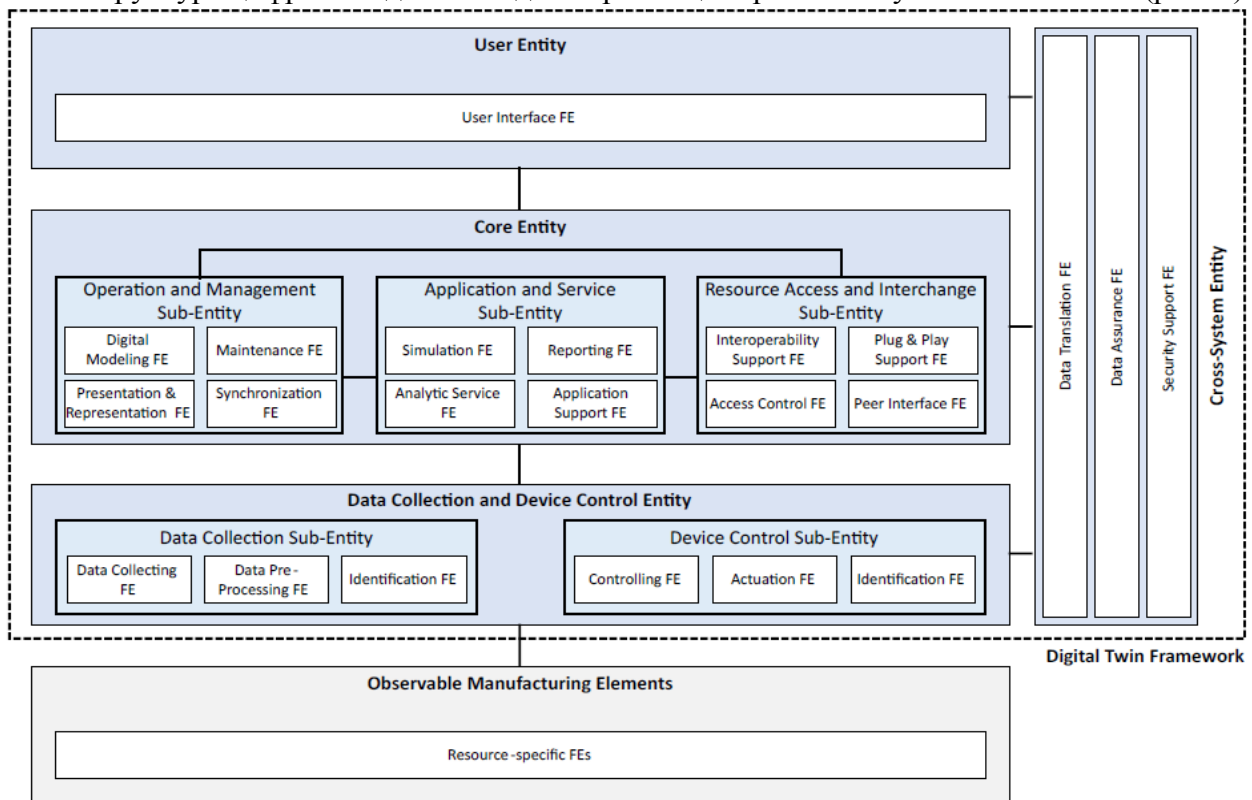


Рис. 2. Структура цифрового двійника для виробництва ISO 23247-1:2021 [5]

Різні галузі виробництва активно використовують усі три технології:

- цифрова модель (DM) корисна для промислового дизайну й розробки концепцій;
- цифрова тінь (DS) є потужною технологією для відстеження виробничих процесів;
- цифровий двійник (DT) є цінним інструментом для оцінки виробничих процесів у реальному часі.

Ці технології є потужними засобами для безперервного аналізу промислових процесів, віддаленого моніторингу на всіх етапах виробництва та прийняття рішень у режимі реального часу. Це призводить до прискорення виробничого циклу, зменшення відходів і збільшення доходів.

Попри схожість із традиційним симуляційним програмним забезпеченням, таким як CAD або програмами для моделювання, цифрові двійники мають низку переваг:

- використання даних у реальному часі завдяки IoT і сенсорам;
- здатність прогнозувати майбутню продуктивність через аналітику та машинне навчання;
- охоплення всього життєвого циклу активу, включаючи проектування, експлуатацію й обслуговування;
- інтегрований підхід, який охоплює всі аспекти процесів чи систем.

Ці унікальні особливості роблять DT важливим інструментом для оптимізації сучасного виробництва.

Цифрові двійники відіграють важливу роль у процесах інженерного проектування та розробки нових продуктів. Вони дають змогу створювати високоточні віртуальні моделі, які дозволяють проводити тестування у віртуальному середовищі, що значно знижує витрати на створення фізичних прототипів і скорочує час виходу нових виробів на ринок.

Впровадження ЦД у виробництві забезпечує постійний моніторинг стану обладнання та виробничих процесів у режимі реального часу. Це дозволяє ідентифікувати критичні точки у виробничому циклі, прогнозувати можливі збої та проводити своєчасні коригування з метою підвищення ефективності.

Однією з ключових переваг цифрових двійників є можливість проведення глибокого аналізу даних, отриманих з датчиків, інтегрованих у виробниче обладнання. Це дає змогу реалізувати стратегії прогнозного технічного обслуговування, що дозволяє мінімізувати час простою обладнання та запобігати аварійним ситуаціям.

Цифрові двійники використовуються для синхронізації виробничих процесів з постачальниками та дистриб'юторами, що забезпечує більш ефективне управління запасами, прискорює постачання матеріалів і зменшує витрати.

Постановка завдання та мета дослідження. Мета роботи – запропонувати метод оптимізації цифрового двійника модульної виробничої станції.

Для вирішення поставленої мети можна виділити ряд завдань:

- проаналізувати застосування цифрових двійників у промисловості;
- дослідити структуру та функціональні можливості модульних виробничих станцій FESTO Didactic;
- розробити програмне забезпечення для керування модульною станцією та цифровим двійником;
- використати методи програмування для створення програм станцій на основі PLC;
- розробити та протестувати інтерактивну модель для взаємодії з цифровим двійником в CIROS Education;
- оцінити ефективність використання цифрових двійників у виробничому процесі.

Об'єктом дослідження є цифрові двійники модульних виробничих станцій в контексті Індустрії 4.0.

Предметом дослідження є цифрові навчальні двійники, створені методами CIROS Education [6].

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці та впровадженні цифрового навчального двійника модульних виробничих станцій з модифікованою структурою.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості проводити навчання та виявляти несправності в безпечних умовах лабораторії, перевіряти вплив нових компонентів виробничих ліній на їх продуктивність та безпечність без фізичної заміни обладнання, здійснювати оптимізацію виробничих процесів та вести моніторинг стану виробничих систем протягом життєвого циклу.

Виклад основного матеріалу. Модульні навчальні станції FESTO Didactic спрямовані на розвиток практичних навичок і теоретичних знань у галузі автоматизації, мехатроніки, пневматики, електроніки, робототехніки та цифрових технологій. Основна мета впровадження модульних навчальних станцій FESTO Didactic – підготовка кваліфікованих фахівців для роботи у сучасних виробничих системах, що відповідають стандартам Industry 4.0.

Модульні навчальні станції надають змогу здобувати досвід роботи з реальними промисловими компонентами FESTO, Siemens SIMATIC S7 та симуляціями.

Використання модульних навчальних станцій сприяє формування навичок проектування, програмування, управління та обслуговування автоматизованих систем. Дозволяє вивчати основи роботи пневматичних, електричних, електропневматичних та гідравлічних систем.

Підготовка до сучасного виробництва на модульних виробничих станціях дозволяє здійснювати навчання відповідно до стандартів сучасної автоматизації (Industry 4.0, IoT, цифрові двійники) з врахуванням підготовки до інтеграції інтелектуальних виробничих технологій у реальних умовах [7].

Інтеграція теорії та практики проводиться шляхом поєднання фундаментальних знань із практичними завданнями за допомогою симуляційних моделей виробничих станцій і програмованих логічних контролерів: ПЛК (PLC).

Методика створення інтерактивних моделей для взаємодії з цифровими двійниками у 3D-просторі в CIROS Education базується на поєднанні віртуальної симуляції, тривимірного моделювання та інтеграції сенсорних даних для забезпечення їх реалістичної взаємодії.

Використовують спеціалізоване ПЗ (наприклад, SolidWorks, Blender чи Autodesk Inventor) для створення тривимірних моделей об'єктів і середовища.

Моделі оптимізують: зменшують складність моделі (наприклад, через зниження кількості полігонів) для швидкої обробки в реальному часі.

Для забезпечення інтерактивності CIROS підтримує інтеграцію з гарнітурами VR (наприклад Oculus Rift, HTC Vive), що дозволяє студентам бачити тривимірне середовище у віртуальній реальності [8].

Для AR використовуються мобільні пристрої чи гарнітури, такі як Microsoft HoloLens, що накладають цифрові моделі на реальне середовище. Студенти можуть взаємодіяти з роботизованим маніпулятором у 3D-просторі, спостерігаючи його рухи з різних кутів.

При програмуванні для створення динамічної взаємодії розробляється сценарій роботи моделі. Наприклад, рухи роботів чи конвеєрів програмуються мовами, які підтримує CIROS [6] (наприклад, Python або спеціалізовані бібліотеки). При встановленні програми CIROS Education 6.4 встановлюється і програма Python 3.7.

Сценарії також враховують реакції на зовнішні дії, такі як рух миші, клавіатури чи сенсорних контролерів.

Датчики, що підключаються до системи (температурні, позиційні, тискові), забезпечують обмін даними між реальним і цифровим середовищем.

Дані передаються в реальному часі через інтерфейси, такі як Modbus, OPC-UA чи спеціальні драйвери. При взаємодії з PLC на основі SIMATIC S7/1500 використовується інтерфейс OPC-UA, оскільки він є природним для даних PLC.

Елемент програми на мові IRL, сумісної з мовою структурованого тексту процесорів SIMATIC S7/1500 для роботи цифрового двійника пристрою для захоплення, розпізнавання та транспортування заготовки представлено в додатку Б.

Візуальні ефекти, такі як освітлення, тіні, текстури, створюються за допомогою сучасних рушіїв (Unity, Unreal Engine).

Написання програмних кодів для моделювання логіки роботи систем та створення віртуального середовища, в тому числі і для реалізації сценаріїв роботи виробничої лінії, де кожен компонент працює відповідно до заздалегідь заданих алгоритмів.

Особливість використання цифрових двійників, створених в CIROS [6], полягає в тестуванні та верифікації поведінки систем перед їхнім реальним впровадженням (рис. 3).

CIROS дозволяє моніторити одночасно і переміщення елементів модулів станції один відносно одного, безпечність роботи (ліва частина вікна програми, наведеного на рис. 3), так і виконання програмного коду для відстеження чіткості виконання логіки, закладеної в PLC (верхня права частина вікна програми).

Переваги використання цифрових двійників у виробничих процесах: підвищення продуктивності (аналіз даних у реальному часі дозволяє оптимізувати виробничі процеси та підвищувати ефективність використання ресурсів), зниження витрат (скорочення потреби у фізичних прототипах та оптимізація процесів значно зменшують фінансові витрати підприємств), гнучкість виробництва (цифрові двійники дозволяють швидко адаптувати виробництво до змін у

попиті та умовах постачання), підвищення якості продукції (постійний моніторинг параметрів виробництва дозволяє вчасно виявляти та усувати дефекти).

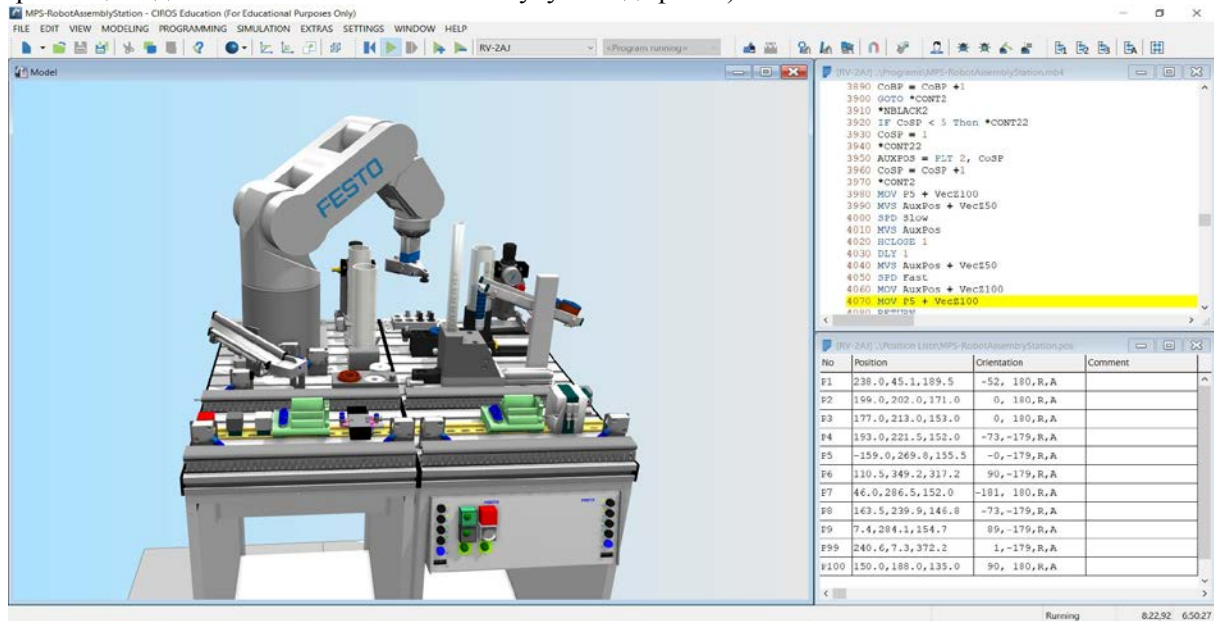


Рис. 3. Хід виконання програми та анімоване відображення роботи виробничого центру на основі робота FESTO під управлінням PLC Siemens SIMATIC S7-1500

Стримуючі фактори впровадження цифрових двійників: висока вартість впровадження (інтеграція цифрових двійників потребує значних капіталовкладень у програмне та апаратне забезпечення), безпека даних (передача великого обсягу інформації між фізичними об'єктами та їхніми цифровими аналогами створює ризики кіберзагроз), необхідність підготовки персоналу (ефективне впровадження цифрових двійників вимагає висококваліфікованих фахівців).

Висновок. Отримана у роботі модель забезпечила оптимізацію цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO, тестування програмного коду керування процесором Siemens SIMATIC S7-1500 на цифровому двійнику перед перевіркою роботи фізичного обладнання, узгодження роботи давачів, контроль механічного переміщення рухомих органів відносно нерухомих частин цифрового двійника виробничого центру без небезпеки пошкодження обладнання в процесі наладки.

Список використаних джерел

1. Attaran M., Attaran S., Celik, B.G. The impact of digital twins on the evolution of intelligent manufacturing and Industry 4.0. *Advances in Computational Intelligence*. Vol. 3(11). 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s43674-023-00058-y>.
2. Seegrün A., Kruschke T, Mügge J, Hardinghaus L, Knauf T., Riedelsheimer T, Lindow K. Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review. *Procedia CIRP*, Volume 119, 2023, Pp. 776-781. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.124>.
3. Jiewu L., Qiang L., Shide Y, Jianbo J, Yan W, Chaoyang Z, Ding Z, Xin C. Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Vol. 63. 2020. Pp. 101895, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101895>.
4. Samad M. E. Sepasgozar. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*. Vol. 11. 2021. P. 151 <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>.
5. ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. <https://www.iso.org/standard/75066.html>.
6. FESTO. CIROS. <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/CIROS/EN/index.html>.
7. L. Hou, S. Wu, G. Zhang, Y. Tan, X. Wang. Literature review of digital twins applications in construction workforce safety. *Appl. Sci.*, 11 (2020), P. 339. <https://doi.org/10.3390/app11010339>.
8. Geng R., Li M., Hu Z., Han Z., Zheng R. Digital Twin in smart manufacturing: remote control and virtual machining using VR and AR technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Vol. 65(11). 2022. P. 321, <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03426-3>.