

РОЗРОБКА ТИПОВОЇ АРХІТЕКТУРИ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПРИ КЕРУВАННІ ОЧИСНИМИ СПОРУДАМИ

***Анотація.** У статті запропоновано типову архітектуру побудови цифрового двійника в автоматизованому виробництві. Вона ґрунтується на використанні рівнів для мінімізації часу розроблення цифрового двійника та забезпечує гнучкість та здатність поступово розширюватися без радикальних змін. Розглянуто рівні системи та надано рекомендації, щодо складових рівнів та їхнього розроблення.*

***Ключові слова:** архітектура цифрового двійника, цифрові двійники, автоматизоване виробництво, очисні споруди, багаторівнева архітектура, IoT, хмарні обчислення, граничні обчислення.*

Постановка проблеми.

Сучасні очисні споруди є складними технологічними об'єктами, ефективне управління якими потребує впровадження цифрових двійників для моделювання, прогнозування та оптимізації процесів очищення в реальному часі. В концепції Індустрії 4.0 кожен актив повинен мати цифрову копію, тому в автоматизованому виробництві набуває поширення поетапне впровадження цифрових двійників, починаючи з пілотних проектів і поступовим масштабуванням на всі підрозділи або процеси. Основними цілями впровадження цифрових двійників є зниження витрат на енергоспоживання, покращення якості продукції, підвищення ефективності технічного обслуговування та скорочення часу простою. І тут постає науково-практична проблема формулювання принципів побудови цифрових двійників та розробки типової архітектури, яка б сприяла швидкому впровадженню пілотних проектів з поступовим масштабуванням цифрових двійників на всі активи та процеси автоматизованого виробництва.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз досліджень з інтеграції цифрових двійників у виробництво показав, що існують різноманітні підходи, які дозволяють підвищити точність і ефективність, а також знизити витрати і час на розробку [1]. Але для поступового впровадження цифрових двійників у промисловому середовищі необхідно провести додаткові дослідження та стандартизацію. Треба визначити узгоджену концепцію для цілісного використання цифрових двійників, що охоплює питання стандартизації інтерфейсів, їх взаємодії та ефективного обміну інформацією, щоб забезпечити широке впровадження цих підходів у промисловість [2]. У зв'язку з цим постає науково-практична задача зі створення типової архітектури системи з використанням цифрових двійників.

Мета досліджень. Метою дослідження, наведеного в даній статті, є визначення типової архітектури системи з використанням цифрових двійників в автоматизованому виробництві. Також будуть розглянуті різноманітні інструменти для симуляції фізичних процесів, збору, обробки та зберігання інформації, візуалізації метрик та станів цифрового двійника, питання безпеки та типові шляхи впровадження цифрових двійників.

Викладення основного матеріалу досліджень. Слід зазначити, що підходи до розробки цифрових двійників у виробництві дуже різноманітні, що відображає різноманітність виробничих процесів, цілей і технологічних екосистем. Ця мінливість виникає внаслідок таких факторів, як тип виробленого продукту, складність виробничої системи, розвиненість цифрової інфраструктури організації та конкретні цілі (наприклад, оптимізація, прогнозне обслуговування або контроль якості). Виходячи з цього перед створенням цифрового двійника варто враховувати наступні фактори:

1. *Обсяг і деталізація.*
 - а. Один актив: цифровий двійник одного верстата для моніторингу зносу чи оптимізації, з простими моделями та датчиками.
 - б. Система: моделювання цілих ліній чи заводів із складними IoT-платформами для врахування взаємозв'язків.
2. *Джерела даних та інтеграція.*
 - а. IoT пристрої: Реальні дані з IoT пристроїв.

- b. Традиційні системи: Дані з PLC чи SCADA через проміжне програмне забезпечення.
 - c. Гібрид: Поєднання реальних даних з IoT пристроїв та PLC, SCADA із даними ERP/MES систем для контексту.
3. *Техніки моделювання.*
- a. Фізичні: Точні моделі (MATLAB) для симуляції фізичних процесів.
 - b. Машинне навчання (Machine Learning): для прогнозів на основі трендів.
 - c. Гібрид: Комбінація моделювання фізичних явищ за допомогою точних моделей та машинного навчання.
4. *Технологічний стек.*
- a. На основі готових рішень, таких як AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Siemens MindSphere, GE Predix Platform та інші.
 - b. Власні рішення на хмарних технологіях AWS, Azure, GCP чи відкритих інструментах.
 - c. Комбінація готових інструментів і скриптів.
5. *Мета й використання.*
- a. Прогнозування: Виявлення збоїв із ML та датчиками.
 - b. Оптимізація: Налаштування процесів із симуляціями.

Контроль якості: Відстеження дефектів із статистичними інструментами.

Також необхідно враховувати бюджет для створення цифрових двійників, який помітно варіюється залежно від масштабу проекту, галузі, складності технологій та рівня зрілості інфраструктури. Компанії часто починають з малого і масштабуються, тому архітектура системи з використанням цифрових двійників повинна бути модульною, гнучкою, економічно вигідною та здатною поступово розширюватися без радикальних змін.

Тепер можна визначити основні принципи типової архітектури системи з використанням цифрових двійників:

1. Модульність: Кожен рівень додає нові компоненти без перебудови основи (наприклад, від локального SQLite до хмарного DynamoDB).
2. Відкритість: Початок із безкоштовних інструментів (Python, Raspberry Pi) дозволяє легко перейти до комерційних (AWS, Siemens).

3. Масштабованість: Хмара та IoT-шлюзи забезпечують поступове розширення від одного активу до заводу.
4. Простота старту: Локальні рішення знижують початкові витрати й залежність від зовнішніх сервісів.
5. Безпека: Додається поступово від базового шифрування (HTTPS) до повних рішень (TLS, OAuth).

Враховуючи вищезазначені принципи можна сформулювати рівні (Layers) типової архітектури системи з використанням цифрових двійників в автоматизованому виробництві які представлено на рис. 1: фізичний (Physical Layer), рівень прийому даних (Data Ingestion Layer), рівень збереження та обробки даних (Data Management Layer), рівень моделювання та імітації (Modeling and Simulation Layer), аналітичний та прикладний рівень (Analytics and Application Layer).

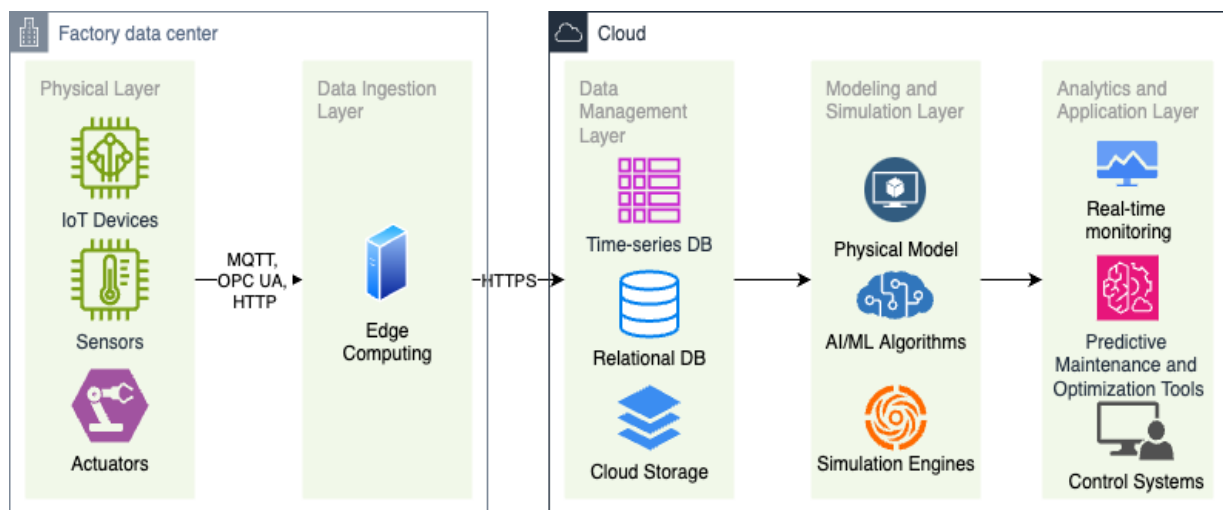


Рисунок - 1. Архітектура модулю графічного інтерфейсу

Фізичний рівень і рівень прийому даних знаходяться безпосередньо на виробництві, що дозволяє мінімізувати трафік шляхом фільтрації та трансформації даних з подальшим надсиланням в хмару. Інші три рівні знаходяться в хмарі, пропонуючи гнучкість та масштабованість, швидке розгортання, доступність, економію витрат (“pay-as-you-go”), тощо.

Розглянемо зазначені рівні детально.

Фізичний (Physical Layer) рівень - це сукупність реальних об'єктів або процесів, таких як машини, апарати, будівлі, виробничі лінії чи технологічні

вузли очисних споруд (аеротенки, відстійники, насосні станції), які моделюються цифровим способом. Він включає датчики для збору первинних даних (наприклад, температури, тиску, швидкості потоку, рівня розчиненого кисню, каламутності чи концентрації забруднюючих речовин), виконавчі механізми для коригування параметрів процесу на основі цифрових сигналів (регулятори частоти обертання насосів, засувки, дозатори реагентів), а також IoT-пристрої, що забезпечують стабільний двосторонній зв'язок фізичної системи з її цифровим двійником. Цей рівень є джерелом необробленого потоку телеметричних даних та одночасно виконавчою ланкою, яка реалізує керуючі команди, отримані від цифрового двійника у відповідь на результати аналітики.

Рівень прийому даних (Data Ingestion Layer) відповідає за збирання, безпечну передачу, буферизацію та первинну обробку даних із фізичного об'єкта. Він використовує інформацію з датчиків та IoT-пристроїв, а також промислові та IT-протоколи зв'язку, такі як MQTT, OPC UA, Modbus TCP чи HTTP, адаптуючи їх під специфіку кожного типу обладнання. Основним архітектурним елементом цього рівня є граничні обчислення (Edge computing), що попередньо обробляють дані локально - виконують фільтрацію шумів, нормалізацію, агрегацію та виявлення аномальних значень для зменшення мережевої затримки, ефективного використання пропускну здатності каналу зв'язку та підвищення стійкості системи при тимчасовій втраті з'єднання з хмарою. Цей рівень забезпечує безперебійний, безпечний та відмовостійкий обмін даними між фізичною системою та її цифровим двійником.

Рівень збереження та обробки даних (Data Management Layer) збирає, упорядковує, зберігає та вдосконалює вхідні дані, щоб вони були придатними для моделювання та подальшої аналітики в межах цифрового двійника. Він використовує різноманітні інструменти, такі як бази даних часових рядів (наприклад, InfluxDB чи TimescaleDB), реляційні бази даних (наприклад, PostgreSQL) для зберігання структурованої контекстної інформації або хмарні об'єктні сховища (наприклад, AWS S3) для архівації великих обсягів історичних даних. Даний рівень об'єднує дані реального часу з історичною інформацією, довідниками та зовнішніми джерелами (метеорологічними, лабораторними аналізами), а також покращує необроблені дані за допомогою очищення,

валідації, дедуплікації та агрегації [3]. Основна функція цього рівня має на меті забезпечити цілісну, узгоджену та добре організовану базу даних для моделювання й аналітики.

Рівень моделювання та імітації (Modeling and Simulation Layer) є центральним осередком системи цифрового двійника, де створюється, калібрується та постійно оновлюється складна віртуальна копія реального об'єкта. Він включає такі компоненти, як 3D-моделі або фізичні симуляції (наприклад, CAD-проекти та гідродинамічні моделі) для відображення геометричної структури та динаміки поведінки фізичного об'єкта, алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозу аналітики, виявлення аномалій [4] та оптимізації продуктивності технологічних процесів, а також потужні симуляційні платформи, які дозволяють цифровому двійнику відтворювати та досліджувати поведінку фізичного об'єкта у віртуальному середовищі. MATLAB і Simulink вирізняються в математичному моделюванні та симуляції динамічних систем, забезпечуючи детальний аналіз технічних сценаріїв і реакцій, залежних від часу, та дозволяють будувати моделі у формі диференціальних рівнянь або блок-схем, тоді як Unity пропонує візуалізацію в реальному часі у 3D та інтерактивні середовища для просторових або візуальних експериментів і підготовки персоналу [5].

Завдяки запуску гіпотетичних сценаріїв, наприклад, змін умов роботи, коливань навантаження, зміни якості вхідної сировини чи відмови окремих компонентів, ці інструменти допомагають прогнозувати майбутню продуктивність, знаходити шляхи до вдосконалення конструкції, оптимізувати режими експлуатації та зменшувати операційні й технологічні ризики без будь-якого впливу на реальний об'єкт. Ключова роль цього рівня полягає у точному відтворенні поточного стану фізичного об'єкта, симуляції його поведінки в реальному світі та достовірному передбаченні майбутніх результатів, аварійних ситуацій чи потенційних проблем.

Аналітичний та прикладний рівень (Analytics and Application Layer) є ключовим мостом між цифровим двійником та його впливом на реальний світ, об'єднуючи аналітичні можливості, моніторинг системи та засоби взаємодії з оператором. З боку аналітики він обробляє потоки даних від цифрового двійника, зокрема показники датчиків, результати симуляцій та обчислені

ключові показники ефективності, використовуючи моніторинг у реальному часі для виявлення поточних проблем та відхилень, алгоритми прогнозного обслуговування для передбачення майбутніх збоїв (наприклад, перегрівання двигуна за три тижні) [6] та інструменти оптимізації для формування обґрунтованих пропозицій щодо покращень (наприклад, зменшення енергоспоживання на 10% або скорочення витрати реагентів). Цей рівень також включає інформаційні панелі та системи керування, що надсилають точні вказівки фізичному об'єкту, наприклад, регулюють швидкість конвеєрної стрічки, продуктивність повітродувки чи дозування коагулянтів на основі аналітичних прогнозів. У свою чергу цей рівень гарантує, що цифровий двійник - це не просто пасивна модель, а динамічний інструмент для прийняття рішень, оптимізації та операційного контролю.

Висновки. У статті запропоновано типову багаторівневу архітектуру системи з використанням цифрових двійників в автоматизованому виробництві при керуванні очисними спорудами, що дозволяє розпочинати впровадження з базового функціоналу окремого активу та поступово масштабувати систему до рівня всієї очисної споруди і, за потреби, цілого підприємства. Це досягається за допомогою розмежування на рівні, кожен з яких є гнучким та здатним поступово розширюватися без радикальних змін.

На основі запропонованої архітектури визначено стратегію поетапного створення цифрового двійника очисних споруд. З урахуванням того, що очисні споруди, як правило, вже оснащені діючою системою автоматизації на базі програмованих логічних контролерів та систем SCADA, на першому етапі для мінімізації початкових капітальних витрат як основне джерело даних обрано існуючу інфраструктуру, а для рівня моделювання обрано підхід на основі детермінованих фізичних моделей, що забезпечує точне математичне відтворення біохімічних та гідравлічних процесів очищення без потреби у значних обсягах історичних даних. Основними цілями першого етапу визначено моніторинг та контроль якості технологічних процесів очищення, а також систематичне накопичення історичних даних, які на наступних етапах стануть основою для переходу до гібридних технік моделювання із застосуванням алгоритмів машинного навчання та впровадження функцій прогнозного обслуговування й оптимізації енергоспоживання.

ЖИТЕПАТҮПА/ REFERENCES

1. Benjamin Schleich, Nabil Anwer, Luc Mathieu, Sandro Wartzack, Shaping the digital twin for design and production engineering, CIRP Annals, Volume 66, Issue 1, 2017, Pages 141-144.
2. Raphael Wagner, Benjamin Schleich, Benjamin Haefner, Andreas Kuhnle, Sandro Wartzack, Gisela Lanza, 2019, Challenges and Potentials of Digital Twins and Industry 4.0 in Product Design and Production for High Performance Products, Procedia CIRP Volume 84, 2019, Pages 88-93.
3. Hu, L., Nguyen, N.T., Tao, W., Leu, M.C., Liu, X.F., Shahriar, M.R., Al Sunny, S.N., 2018. Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with mt connect. Procedia manufacturing 26, 1193–1203.
4. Celebi M.E., Aydin K., Unsupervised Learning Algorithms, Springer International Publishing (2016), pp. 1-558.
5. Liu Q., Zhang H., Leng J., Chen X. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. Int. J. Prod. Res., 57 (12) (2019), pp. 3903-3919.
6. K.A.B. Asare, R. Liu, C.J. Anumba, R.R.A. Issa, Real-world prototyping and evaluation of digital twins for predictive facility maintenance, J. Build. Eng., 97 (Nov) (2024)

Received 15.03.2026.

Accepted 20.04.2026.

Published 30.04.2026

UDC 004.94:628.32

Oleksandr Yanov, Oleh Klymenko

DEVELOPMENT OF A REFERENCE ARCHITECTURE FOR BUILDING DIGITAL TWINS IN AUTOMATED PRODUCTION FOR WASTEWATER TREATMENT PLANT CONTROL

***Abstract.** Analysis of recent research and publications. Analysis of contemporary research on the integration of digital twins into production processes reveals the existence of numerous approaches aimed at improving modeling accuracy, enhancing equipment operational efficiency, and reducing development time and resource consumption. However, existing developments are predominantly oriented toward specific application tasks and do not provide a unified conceptual foundation for the phased implementation of digital twins in industrial environments. Issues related to interface standardization, interoperability between heterogeneous components, efficient data exchange, and a coherent architectural model that enables gradual scaling from pilot projects to the enterprise level require additional investigation. This justifies the relevance of developing a reference architecture for systems utilizing digital twins, particularly for such complex technological facilities as wastewater treatment plants.*

Research objective. The objective of the article is to develop a reference multi-layer architecture for building digital twins in automated production for wastewater treatment plant control, which ensures modularity, flexibility, and the capacity for gradual expansion without radical changes to the system structure.

Presentation of the main research material. The article analyzes the key factors that must be considered prior to creating a digital twin: the scope and granularity of modeling (from a single asset to an entire production line), data sources (IoT devices, PLCs, SCADA, ERP/MES systems), modeling techniques (physics-based models, machine learning, or hybrid approaches), technology stack (off-the-shelf solutions, custom cloud-based developments, or combined variants), and intended purpose (prediction, optimization, quality control). The fundamental principles of architecture design are formulated: modularity, openness, scalability, simplicity of initial deployment, and incremental security implementation. Based on these principles, an architecture consisting of five layers is proposed: the Physical Layer, Data Ingestion Layer, Data Management Layer, Modeling and Simulation Layer, and Analytics and Application Layer. The first two layers are located directly at the production site, which minimizes network traffic through local data filtering and transformation, while the remaining layers are deployed in the cloud environment, providing flexibility, scalability, and cost efficiency through the pay-as-you-go model. For each layer, recommendations are provided regarding the selection of protocols (MQTT, OPC UA, HTTP), storage technologies (InfluxDB, PostgreSQL, AWS S3), and modeling tools (MATLAB, Simulink, Unity).

Conclusions. The proposed reference multi-layer architecture allows the implementation of a digital twin to commence with the basic functionality of an individual asset and to be gradually scaled to cover the entire wastewater treatment facility or enterprise. A strategy for the phased development of a digital twin for wastewater treatment plants is defined: at the initial stage, the existing PLC- and SCADA-based infrastructure is used as the data source, and modeling is built upon deterministic physics-based models of biochemical and hydraulic processes. Subsequent stages involve transitioning to hybrid modeling techniques incorporating machine learning algorithms and introducing predictive maintenance and energy consumption optimization functions. This approach minimizes initial capital expenditures and ensures the systematic accumulation of historical data for the further development of the system.

Keywords: *digital twin architecture, digital twins, automated production, wastewater treatment plants, multi-layer architecture, IoT, cloud computing, edge computing.*

Янов Олександр Олександрович - аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Національного університету харчових технологій, Київ.

Клименко Олег Миколайович - доцент, кандидат технічних наук. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Національного університету харчових технологій, Київ, <https://orcid.org/0000-0002-3525-7805>.

Yanov Oleksandr Oleksandrovych - Post-Graduate Student of Automation, Computer-integrated Technologies and Robotics Department, National University of Food Technologies, Kyiv.

Klymenko Oleh Mykolaiovych - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Computer-integrated Technologies and Robotics Department, National University of Food Technologies, Kyiv, <https://orcid.org/0000-0002-3525-7805>.