

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ЗЕРНОВОГО ЕЛЕВАТОРА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ОБЛАДНАННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто концепцію цифрового двійника зернового елеватора на основі раніше розробленої ієрархічної моделі обладнання. Запропонована архітектура передбачає трирівневу структуру, що охоплює фізичний, комунікаційний та цифровий шари. Особливу увагу приділено механізму збору та передачі телеметричних даних у реальному часі від IoT-пристроїв та SCADA-систем до цифрової моделі, а також методу виявлення відхилень у роботі обладнання на основі порогових значень із агрегацією по ієрархії.

Ключові слова: цифровий двійник, зерновий елеватор, моніторинг обладнання, IoT, SCADA, телеметрія, виявлення відхилень, ієрархічна модель, реальний час.

Abstract

The concept of a digital twin for a grain elevator based on a previously developed hierarchical equipment model is considered. The proposed architecture features a three-layer structure encompassing physical, communication, and digital layers. Special attention is given to the mechanism for real-time collection and transmission of telemetry data from IoT devices and SCADA systems to the digital model, as well as the method for detecting equipment anomalies using threshold values with hierarchical aggregation.

Keywords: digital twin, grain elevator, equipment monitoring, IoT, SCADA, telemetry, anomaly detection, hierarchical model, real time.

Вступ

Розвиток концепції Industry 4.0 та широке впровадження IoT-технологій у промисловості зумовили появу нового підходу до управління складними технологічними об'єктами — цифрового двійника (Digital Twin). Цифровий двійник є динамічною віртуальною копією фізичного об'єкта, що синхронізується з реальним станом обладнання в режимі реального часу та забезпечує можливості комплексного моніторингу, аналізу та прогнозування.

У попередній роботі авторами було розроблено ієрархічну модель обладнання зернових елеваторів, що базується на теорії направлених графів та описує статичну структуру технологічного комплексу [1]. Проте для повноцінного управління елеватором статичної структури недостатньо — необхідно забезпечити динамічне відображення поточного стану кожної одиниці обладнання.

Метою роботи є розробка архітектури цифрового двійника зернового елеватора, що базується на ієрархічній моделі обладнання та забезпечує моніторинг ключових параметрів роботи в реальному часі з автоматичним виявленням відхилень.

Результати дослідження

Запропонована архітектура цифрового двійника зернового елеватора складається з трьох взаємопов'язаних шарів (рисунок 1).

Фізичний шар включає реальне обладнання елеватора (норії, конвеєри, сепаратори, силоси тощо) та мережу IoT-пристроїв, що знімають телеметричні дані безпосередньо з обладнання. До ключових параметрів вимірювання належать: споживана потужність (кВт), струм навантаження (А), температура підшипників (°C) та рівень вібрації (мм/с).

Комунікаційний шар забезпечує передачу даних від фізичного шару до цифрового. Для зв'язку IoT-пристроїв використовується протокол MQTT завдяки його низькому енергоспоживанню та надійності в умовах нестабільного з'єднання. Інтеграція з існуючими SCADA-системами здійснюється через протокол OPC-UA, який є промисловим стандартом для обміну даними між системами автоматизації [2].

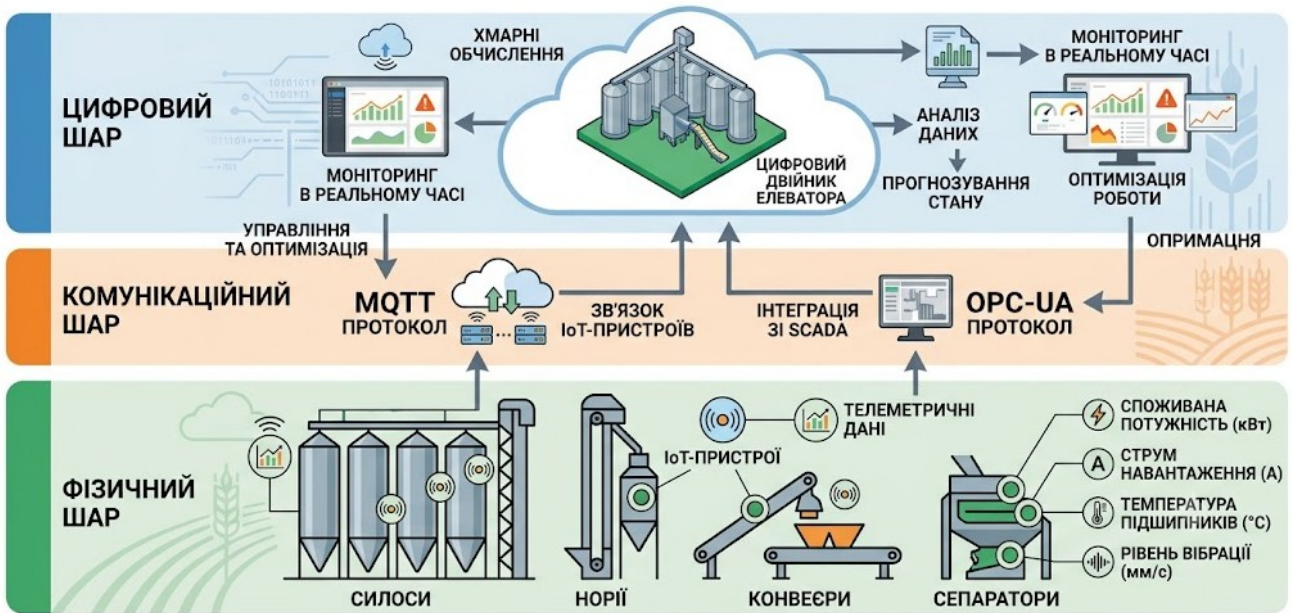


Рисунок 1. Архітектура цифрового двійника зернового елеватора

Цифровий шар є програмним ядром двійника. Він побудований на основі ієрархічної моделі $G = (V, E)$, де кожна вершина V розширена вектором стану:

$$S_i(t) = \{ p_i(t), I_i(t), T_i(t), v_i(t) \}$$

де $p_i(t)$ — споживана потужність, $I_i(t)$ — струм, $T_i(t)$ — температура, $v_i(t)$ — вібрація одиниці обладнання i у момент часу t .

Для кожної одиниці обладнання визначається вектор допустимих діапазонів:

$$\Theta_i = \{ [p_i^{min}, p_i^{max}], [T_i^{min}, T_i^{max}], [v_i^{min}, v_i^{max}] \}$$

Стан вузла i у момент часу t визначається функцією:

$$\delta_i(t) = \begin{cases} 1, & S_i(t) \ni \Theta_i \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Ключовою особливістю моделі є агрегація сигналів відхилень по ієрархії "батько-нащадок". Якщо будь-який нащадок вузла vk має відхилення, батьківський вузол отримує агрегований сигнал:

$$\Delta_k(t) = \delta_k(t) \vee \Delta_i(t)$$

Це дозволяє оперативно виявляти проблемні ділянки технологічного ланцюга на будь-якому рівні ієрархії — від окремого датчика до рівня підприємства в цілому.

Цифровий двійник використовує раніше визначені сутності ієрархічної моделі та розширює їх динамічними атрибутами. Сутність Equipment доповнюється полями поточних показників та міткою часу останнього оновлення. Зв'язок із SCADA здійснюється через унікальні ідентифікатори кожної одиниці обладнання, що були передбачені в попередній моделі [1]. Таким чином, цифровий двійник є природним розвитком існуючої архітектури, а не окремою незалежною системою.

Практична реалізація передбачає виклики до брокера MQTT кожні 5–30 секунд залежно від типу обладнання, збереження часових рядів у базі даних типу time-series (наприклад, InfluxDB) та відображення стану на веб-панелі моніторингу.

Серед обмежень підходу варто відзначити залежність якості двійника від надійності мережі IoT-пристроїв та необхідність первинного калібрування порогових значень для кожного типу обладнання.

Висновки

Запропонована архітектура цифрового двійника зернового елеватора формує логічне продовження ієрархічної моделі обладнання, перетворюючи статичну структуру даних на динамічну систему моніторингу реального часу. Трирівнева організація (фізичний — комунікаційний — цифровий шар) забезпечує чітке розмежування відповідальності компонентів системи та спрощує її масштабування.

Механізм агрегації відхилень по ієрархії "батько-нащадок" дозволяє оперативно локалізувати проблемні вузли в технологічному ланцюзі та забезпечити своєчасне реагування операторів. Подальші дослідження передбачають апробацію моделі на реальних даних елеватора та розробку алгоритмів прогнозування відмов на основі накопичених часових рядів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О.В. Мазурук, «Ієрархічне моделювання обладнання зернових елеваторів», Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 березня 2025 р.
2. С. М. Лісовець, В. Г. Здоренко. SCADA-Системи. Практикум. Частина 1 – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 17 с.
3. V. B. Mokin, M. V. Dratovany, A.V. Lukhverchuk, «DEVELOPMENT OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES FOR ENERGY-SAVING OPTIMIZATION OF GRAIN ELEVATOR OPERATION USING NEURAL NETWORK MODELS AND REINFORCEMENT LEARNING METHODS» in *the 5th International scientific and practical conference “Scientific progress: innovations, achievements and prospects” (February 6-8, 2023) MDPC Publishing, Munich, Germany, 2023. 447 p.*
4. M. Grieves, J. Vickers, «Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems», *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, 2017. pp. 85–113.

Мазурук Олег Володимирович — аспірант кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, e-mail: omazuruk3@gmail.com.

Науковий керівник: **Мокін Борис Іванович** — академік НАПН України, д-р техн. наук, професор кафедри системного аналізу та інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Mazuruk Oleh V. — Post-Graduate Student of the Chair of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: omazuruk3@gmail.com

Supervisor: **Mokin Borys I.** — Academician of NAPS of Ukraine, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of System Analysis and Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia