

Viktor Didenko

Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

DIGITAL TWINS IN AGRICULTURAL INFORMATION SYSTEMS: ARCHITECTURE, DATA, AND DECISION SUPPORT

Abstract. The paper considers a digital twin as an information system that maintains an up-to-date digital representation of a physical agricultural asset or process using sensor data, models, and operational records. A layered architecture is proposed: physical layer, data acquisition and normalization, state model, analytics, and a decision/feedback loop. The distinction between a digital model, a digital shadow, and a fully coupled digital twin is emphasized. Key barriers include incompatible data formats, unstable field data, synchronization complexity, and insufficient representation of agronomic context. Implementation should start with a clearly bounded object such as a greenhouse, irrigation system, machine, or technological operation and then scale gradually.

Keywords: digital twin, agricultural information systems, Internet of Things, precision agriculture, modeling, decision support.

Віктор Діденко

Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна

ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ В АГРАРНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ: АРХІТЕКТУРА, ДАНІ ТА ПІДТРИМКА РІШЕНЬ

Анотація. Розглянуто цифровий двійник як інформаційну систему, що підтримує актуальне цифрове представлення фізичного аграрного об'єкта або процесу на основі даних сенсорів, моделей і операційних записів. Запропоновано багаторівневу архітектуру аграрного цифрового двійника: фізичний рівень, збір і нормалізація даних, модель стану, аналітика та контур прийняття рішень. Показано відмінність між цифровою моделлю, цифровою тінню та повноцінним двійником із зворотним зв'язком. Основними бар'єрами визначено несумісність форматів, нестабільність польових даних, складність синхронізації та недостатню формалізацію агрономічного контексту. Обґрунтовано доцільність початку впровадження з одного чітко визначеного об'єкта — теплиці, системи зрошення, машини або технологічної операції — з подальшим масштабуванням.

Ключові слова: цифровий двійник, аграрні інформаційні системи, Інтернет речей, точне землеробство, моделювання, підтримка рішень.

Цифровізація аграрного виробництва створила велику кількість розрізнених джерел даних: метеостанції, ґрунтові сенсори, телематика машин, супутникові знімки, журнали технологічних операцій, системи обліку ресурсів і виробничі плани. Однак сама наявність даних не гарантує кращих управлінських рішень. Проблема полягає в об'єднанні вимірювань у цілісне представлення стану конкретного поля, культури, теплиці, машини або процесу. Концепція цифрового двійника є одним із підходів до такої інтеграції.

У загальному розумінні digital twin є динамічним цифровим представленням фізичного об'єкта або процесу, яке оновлюється на основі даних із реального середовища та використовується для моніторингу, моделювання, прогнозування або підтримки дій. Огляд технології підкреслює зв'язок цифрових двійників з Інтернетом речей, аналітикою даних і машинним навчанням (Fuller et al., 2020).

Для аграрної сфери ця ідея особливо цікава через просторову та часову мінливість виробничих умов, але водночас складніша через біологічний характер об'єктів і залежність від зовнішнього середовища.

Практично доцільно розрізняти три рівні цифрового представлення. Цифрова модель є статичним або періодично оновлюваним описом без автоматичного зв'язку з фізичним об'єктом. Цифрова тінь отримує дані з фізичного середовища автоматично, але результат аналізу не впливає безпосередньо на процес. Повноцінний цифровий двійник передбачає двонапрямний зв'язок: дані змінюють цифровий стан, а рішення з цифрового рівня можуть бути передані оператору або системі керування для впливу на фізичний об'єкт. У сільському господарстві значна частина проєктів фактично перебуває на рівні цифрової тіні, що є нормальним етапом розвитку.

Базову архітектуру аграрного цифрового двійника можна подати п'ятьма рівнями. На фізичному рівні розташовані рослини, ґрунт, техніка, теплиця або система зрошення. Рівень збору даних включає сенсори, телематику та зовнішні джерела. Далі виконується нормалізація, прив'язка до часу й місця та перевірка якості даних. Четвертий рівень формує модель стану і виконує аналітику: розрахунок індикаторів, прогноз, виявлення аномалій або сценарне моделювання. П'ятий рівень забезпечує підтримку рішення: повідомлення оператору, планування операції або керуючу команду.

Таблиця 1. Рівні зрілості цифрового представлення аграрного об'єкта

Рівень	Потік даних	Функціональність
Цифрова модель	Ручне або періодичне оновлення	Опис, розрахунок, проєктування
Цифрова тінь	Автоматично з фізичного об'єкта до моделі	Моніторинг, аналітика, прогноз
Цифровий двійник	Двонапрямний обмін	Аналітика плюс підтримка/реалізація керуючих дій

Джерело: узагальнено автором на основі Fuller et al. (2020) та Purcell and Neubauer (2023).

Систематичний огляд цифрових двійників у сільському господарстві показав приклади застосування в теплицях, роботизованих системах, аквапоніці та інших контрольованих середовищах, але також відзначив обмеженість повноцінних what-if симуляцій у наявних рішеннях (Purcell & Neubauer, 2023). Це вказує на важливий практичний висновок: не кожна система моніторингу з тривимірною візуалізацією є цифровим двійником. Цінність виникає тоді, коли модель дозволяє перевірити альтернативні рішення або оцінити майбутній стан, а не лише відобразити поточні показники.

Для аграрних інформаційних систем головним технічним бар'єром є інтеперабельність. Дані різних виробників можуть мати несумісні формати, різні одиниці вимірювання, частоту та правила ідентифікації об'єктів. Додатковою проблемою є пропуски й помилки сенсорів. Тому архітектура має містити

окремий шар контролю якості даних, а модель повинна вміти працювати з невизначеністю. Огляд сучасних підходів до цифрових двійників в аграрній сфері також підкреслює значення референтної архітектури та чітких механізмів інтеграції даних (Wang, 2024).

Найбільш реалістична стратегія впровадження — починати з обмеженого контуру. Наприклад, цифровий двійник теплиці може поєднувати температуру, вологість, освітленість, полив і стан культури. На першому етапі система лише синхронізує дані та відображає стан; на другому — прогнозує ризик відхилення; на третьому — пропонує параметри керування; і лише після перевірки може автоматично передавати команди виконавчим системам. Така поетапність зменшує ризик автоматизувати помилкову модель.

Отже, цифровий двійник в аграрній інформаційній системі слід розглядати як інтеграційний механізм між фізичним об'єктом, даними, моделлю і процесом прийняття рішень. Основна складність полягає не у створенні візуального образу, а у підтриманні достовірного стану та узгодженні різномірних даних. Практичний результат досягається тоді, коли цифрове представлення допомагає відповісти на конкретне управлінське запитання: що відбувається, чому це відбувається, що станеться за певного сценарію і яку дію доцільно виконати.

REFERENCES / СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
2. Purcell, W., & Neubauer, T. (2023). Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>
3. Wang, L. (2024). Digital Twins in Agriculture: A Review of Recent Progress and Open Issues. *Electronics*, 13(11), 2209. <https://doi.org/10.3390/electronics13112209>