



# Цифрові двійники для промислового застосування

Визначення, комерційна цінність, аспекти розробки, стандарти та  
прикладні використання

An Industrial Internet Consortium White Paper

Version 1.0

2020-02-18

Ця біла книга – практичний посібник по Цифровим двійникам (Digital Twins), який включає визначення, переваги, архітектури та необхідні для створення компоненти. На прикладах ми покажемо взаємозв'язок між системами Промислового інтернету речей (Industrial Internet of Things, IIoT) та їх двійником.

Ми наведемо:

- визначальні характеристики цифрового двійника;
- зв'язки між цифровими двійниками при формуванні композитних систем;
- роль цифрових двійників у життєвому циклі об'єктів, враховуючи сценарії з цифровими двійниками та без них, комерційну цінність двійників;
- внутрішню структуру цифрових двійників;
- детальний опис різних проектних рішень;
- огляд стандартів по цифровим двійникам, якими можна керуватися під час розробки;
- приклади використання цифрових двійників в різних галузях промисловості.

Ця біла книга буде корисною керівникам підприємств, що шукають ефективні засоби підвищення ефективності системи, системним архітекторам IIoT, та іншим зацікавленим особам завдяки:

- висвітленню та оцінці стандартів, практик та характеристик, що найкраще підходять для комплексного рішення проблеми цифрових двійників, та виділенню прогалів в знаннях там, де це потрібно;
- висвітленню порядку розгортання рішень та наскрізних функцій, які включають способи та характеристики створення цифрових двійників.

## Визначення цифрового двійника по версії ІІС

Цифровий двійник – це формальне цифрове представлення деякого активу, процесу чи систем, що фіксує ознаки та поведінку цього об'єкта, які підходять для зв'язку, зберігання, інтерпретації чи обробки у певному контексті.

Інформація цифрового двійника включає, але не обмежується, комбінацію таких категорій:

- фізичну модель та дані,
- аналітичну модель та дані,
- часові архіви параметрів,
- транзакційні дані,
- основні дані,
- візуальні моделі та
- розрахунки.

Зображення на рис. 1 показує багатогранність цифрового двійника. Далі по тексту воно використовується для відображення цифрового двійника.



Рис. 1 – Зображення цифрового двійника

## Зв'язки між цифровими двійниками в системах

Рівень абстракції цифрового двійника залежить від умов використання, для яких він розробляється.

*Окремий цифровий двійник* – це єдине ціле, що створює цінність без потреби подальшого розбиття. Наприклад, коробка передач чи двигун шарового млина в шахті на рівні моніторингу може розглядатися як єдиний об'єкт. Збірка дискретних цифрових двійників для утворення композитного цифрового двійника (рис. 2) показана у вигляді вертикального розширення, що описує збільшення складу від одиниці до множини сутностей.

*Складений (компонентний) цифровий двійник* – це комбінація окремих цифрових двійників, що представляє собою об'єкт, який складається з кількох окремих компонентів чи частин. Композиція може проходити на різних рівнях. Для прикладу, виробнича комірка – це складне утворення, чий цифровий двійник складається з цифрових двійників пристроїв у цій комірці.

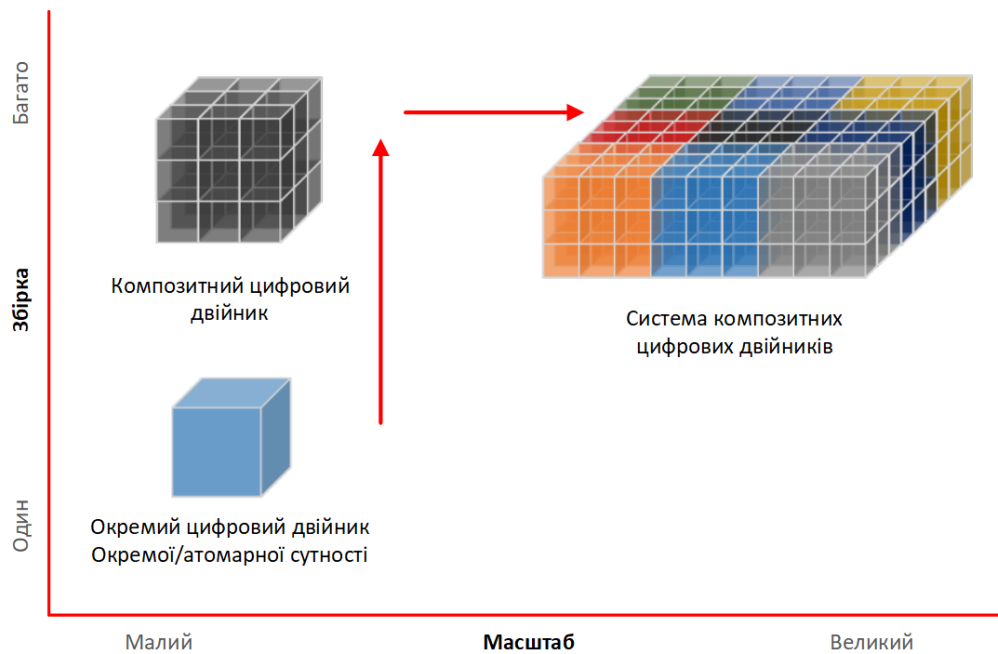


Рис. 2 – Утворення композитного цифрового двійника

У композитному цифровому двійнику зв'язки між елементами (рис. 3) можуть бути:

*ієрархічними*: так само, як і їх реальні аналоги, набір цифрових двійників-компонентів об'єднується в цифрового двійника устаткування, кілька цифрових двійників устаткування становлять цифрового двійника виробничої лінії, а набір цифрових двійників виробничих ліній може бути зібраний в цифрового двійника заводу і так далі.

*асоціативними*: між цифровими двійниками, як і між їх реальними прототипами, є асоціації. Цифровий двійник газопроводу пов'язаний цифровими двійниками процесів видобування та споживання газу.

*одноранговими (peer-to-peer)*: зв'язки між рівноправними вузлами можна спостерігати в групі обладнання однакового чи схожого типів, що виконує такі ж чи подібні функції. Загальний ефект всього обладнання – це просто сума ефектів, що продукуються кожним елементом групи. Наприклад, вітрова електростанція, де вітрогенератори формують композитний цифровий двійник вітрової турбіни.

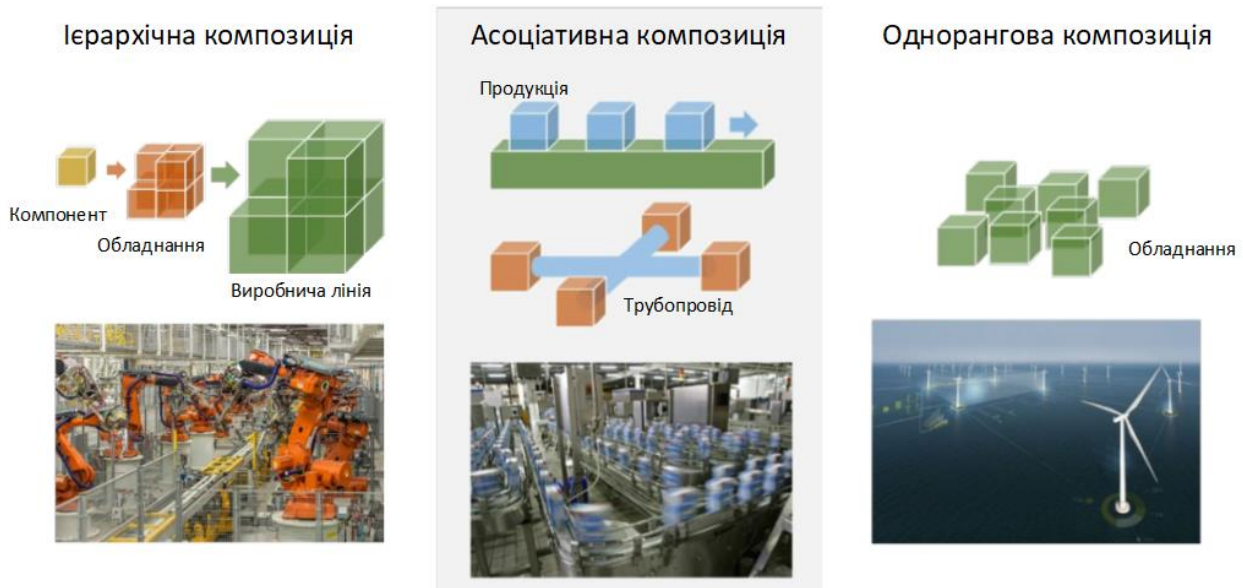


Рис. 3 – Відношення між цифровими двійниками у збірці

## Цифровий двійник в життєвому циклі об'єкту

Зазвичай інформація про об'єкт розкидана по багатьом інформаційним ресурсам (рис. 4), які створені та підтримуються різними організаціями. Це призводить до руйнування інформаційного потоку впродовж життєвого циклу об'єкту через те, що інформаційні ресурси можуть некоректно обмінюватися даними. Деяка інформація може дублюватися або містити протиріччя, а деяка – взагалі бути відсутньою. У результаті на пошук потрібної інформації, приведення її у потрібний вигляд та створення в ній семантичних зв'язків витрачається багато часу. Більш того, це може

призвести до конфліктів в оперативній інформації та посприяти прийняттю неефективних рішень. Крім того, окремі інформаційні банки перешкоджають впровадженню передових методів, таких як розширена аналітика та штучний інтелект, які потребують доступу до великих об'ємів інформації.



Рис. 4 – Експлуатація без цифрових двійників

Цифрові двійники допомагають впоратися з проблемою окремих інформаційних сховищ (рис. 5). Цифровий двійник виступає як проксі, що централізовано збирає дані про кожний об'єкт, а потім через інтеграційні інтерфейси (напр., Application Programming Interfaces, API) робить доступною цю інформацію різним сферам бізнесу в залежності від їх специфічних застосувань. Це покращує процес прийняття рішень завдяки загальному розумінню робочого стану та знижує загальну вартість життєвого циклу експлуатації та обслуговування заводу.

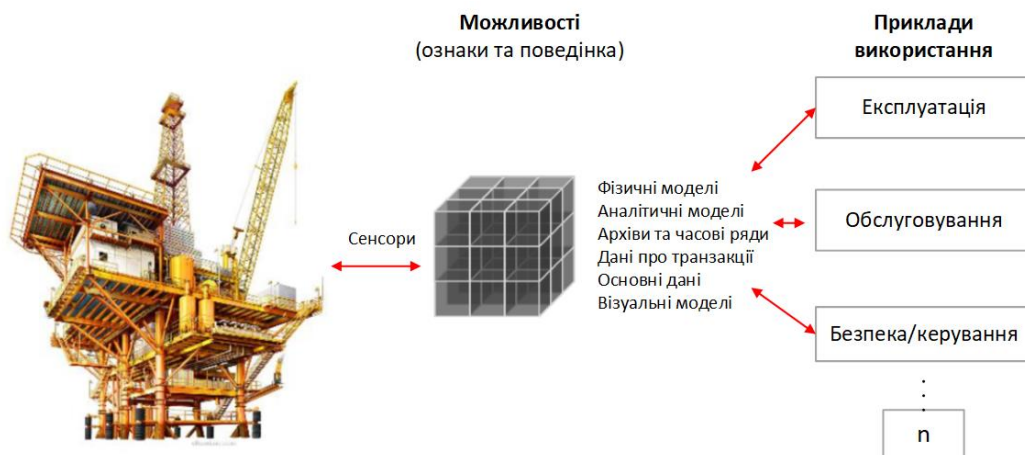


Рис. 5 – Експлуатація із цифровими двійниками

Ось приклад (рис. 6), як цифровий двійник розвивається впродовж життєвого циклу об'єкту, навіть за межами організації. У виробничих системах виробник може додати новий тип продуктів до каталогу типів. Споживач обирає типи продуктів, які він хотів би замовити, з каталогу, та розміщує замовлення. Продукт виготовляється та доставляється до споживача. Тим часом споживач може застосувати різні інструменти для інженерного та віртуального введення в експлуатацію, щоб налаштувати продукт, визначити його параметри та подивитись на взаємодію з іншими продуктами на своєму заводі. Коли реальний продукт доставляється до споживача, він монтується, налаштовується і запускається в експлуатацію. Під час експлуатації продукт може потребувати різного обслуговування. Інформація, отримана під час обслуговування, може надалі використовуватися споживачем для уточнення його наступних замовлень. Виробник може бути поінформований про виявлені у продукті проблеми та використати це для подальшого покращення якості своєї продукції.

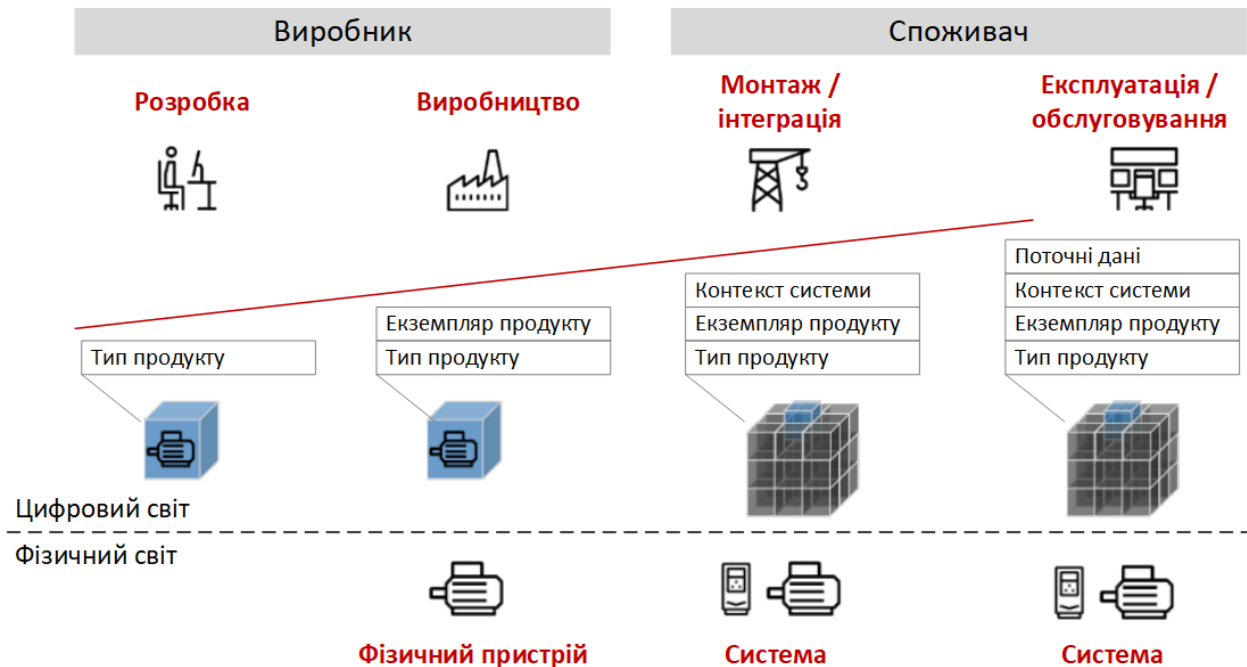


Рис. 6 – Цифровий двійник зменшує розмір інформаційних сховищ

Цей простий приклад показує інформаційний потік через границю між виробником та споживачем. На сьогодні цей потік у значній мірі порушений. Наприклад, у компанії можуть бути різні інструменти для вибору, налаштування та віртуального введення в експлуатацію, що не дуже добре взаємодіють між собою та не можуть обмінюватися інформацією. Оперативна інформація щодо продукту може оброблятися в його програмному забезпеченні; дані про обслуговування зберігаються у відповідних базах даних та відділені від процесу вибору продукту. Навіть якщо існує домовленість про надання часткової оперативної інформації та даних про обслуговування

виробнику, вона все одно розкидана по базах даних та спеціалізованому програмному забезпеченні. Її складно вчасно, дешево та без втрат зібрати до купи.

Цифровий двійник об'єкта – це засіб доступу до інформації про життєвий цикл та єдиний інтерфейс до неї. Цифрові двійники можуть бути створені для будь-якої сутності, яка цікавить підприємство. У наведеному прикладі виробник може визначити собі цифрові двійники для типів продукції, включивши до них всю відповідну інформацію, таку як аналіз ринків, креслення автоматизованого проектування, документацію та відомості про продуктивність, отримані від користувачів. Виробник може також створити цифрового двійника для своєї продукції та зберігати виробничу та сервісну інформацію, отриману від користувачів, прямо в ньому. Це дає виробникові єдиний інтерфейс для доступу до всієї інформації про тип продукту та сам продукт, що може мати цінність для кількох компаній водночас. Одна сутність може мати кілька цифрових двійників, так як контекст може відрізнятися й інформація використовується по-різному.

Між цифровими двійниками різних сутностей, як і в реальному світі, існують семантичні зв'язки. Нехтування ними перетворить позбавлений зв'язків двійник на банк даних самого себе. Так як інформація надходить з різних джерел, в різний час та в різних форматах, встановлення таких зв'язків автоматично стає одним з найбільших викликів при розробці цифрових двійників.

Завдяки забезпеченню єдиної точки входу інформації життєвого циклу сутностей, та забезпеченню зв'язків інформації в середині одного цифрового двійника та між різними, можна досягти багатьох переваг. Наприклад:

Цифрові двійники можуть слугувати *основою* для застосувань розширеної аналітики та штучного інтелекту, які використовуватимуть та збагачуватимуть контент цифрового двійника. У якості альтернативи, розширена аналітика та застосування штучного інтелекту можуть бути частиною цифрового двійника, перетворюючи його на інтелектуальний самодостатній об'єкт.

Не завжди можна виміряти кожний важливий фізичний параметр. Цифрові двійники за допомогою вбудованих фізичних моделей можна використати для створення високоточних *програмних датчиків або віртуальних сенсорів*, та використовувати їх як заміну фізичним вимірюванням. Використовуючи цифрові двійники, до підконтрольного процесу можна застосувати розширену аналітику та провести симуляцію, щоб передбачити його поведінку у майбутньому.

Поточні вимірювання технологічних параметрів активу, отримані від датчиків, *не завжди точні* через можливі поломки або дрейф характеристик. Коли аномалія в показниках виникає через відмову датчика, а не через операційну несправність фізичного активу, реакція на аварійну ситуацію не має призвести до непотрібного вимкнення. Фізичні моделі та цифровий двійник можна використати для узгодження даних, щоб підвищити якість вимірювань та впевнитися в їх істинності. Наприклад, в цифровому двійникові електростанції простий тепло-масовий баланс в контурі допоможе узгодити дані та розпізнати можливу відмову датчика.

Цифрові двійники *полегшують спільну розробку* на всіх етапах життєвого циклу. Це скорочує час, витрачений на пошук та експорт-імпорт інформації в інструменти, задіяні в різних задачах.

Цифрові двійники можуть вирішувати експлуатаційні проблеми та проблеми обслуговування, щоб інакше могли б призвести до вартісних простоїв.

Цифрові двійники *покращують якість*, так як багато помилок у виробництві виникають через недостовірну чи запізнілу інформацію.

Цифрових двійників можна зробити доступними для будь-кого, будь-де і в будь-який час. Обмін досвідом по всьому світі забезпечує цілодобове обслуговування та швидке реагування при максимальному залученні експертів. У випадку, коли для впровадження потрібні операції за місцем, можна залучати місцевих інженерів із віддаленою підтримкою експертів.

Отже, цифрові двійники надають систематичну методологію, технологію та інструменти для представлення складних фізичних та логічних середовищ та забезпечують ефективні моніторинг, діагностику, прогнозування та прописування дій фізичних та логічних об'єктів.

## Розробка цифрового двійника

Для того, щоб представляти об'єкти реального світу в динаміці, екземпляри цифрового двійника повинні бути з'єднані з їхніми фізичними оригіналами, інколи в режимі реального часу, для збирання та упорядкування даних відповідних об'єктів реального світу. Для аналізу цих даних у цифровому двійнику мають бути розрахункові та аналітичні моделі, щоб описувати, діагностувати, прогнозувати та симулювати стани та поведінку реальних об'єктів і систем. Висновки, отримані в результаті такого аналізу, можуть бути поєднані із бізнес-логікою та цілями для оптимізації виробничих процесів. Щоб цього досягти, розробка цифрового двійника повинна включати сервісні інтерфейси для інтелектуальних промислових застосувань для доступу до даних та аналітичних висновків.

Цифровий двійник складається (рис. 7) із даних і розрахункових моделей (тут і далі – просто «моделей») та сервісних інтерфейсів. Так само, як об'єктно-орієнтована мова програмування має дані, методи та інтерфейси.

*Дані:* цифровий двійник повинен містити дані про свою фізичну копію, так як вони потрібні моделям, щоб відобразити та оцінити стани і поведінку об'єкта. У багатьох випадках дані можуть складатися з інформації про весь життєвий цикл реального об'єкта. У випадку устаткування – це дані етапу проектування (специфікації, моделі проектування, виробничі процеси та технічні характеристики), етапу виробництва (дані про працівників, виробниче обладнання, матеріали та деталі, методи виробництва та дані про контроль якості), етапу експлуатації (дані про встановлення та конфігурацію, поточні та архівні стани і параметри, відмітки про обслуговування) та навіть дані про процедуру утилізації. Також можуть міститися дані комерційного характеру, такі як записи транзакцій тощо.

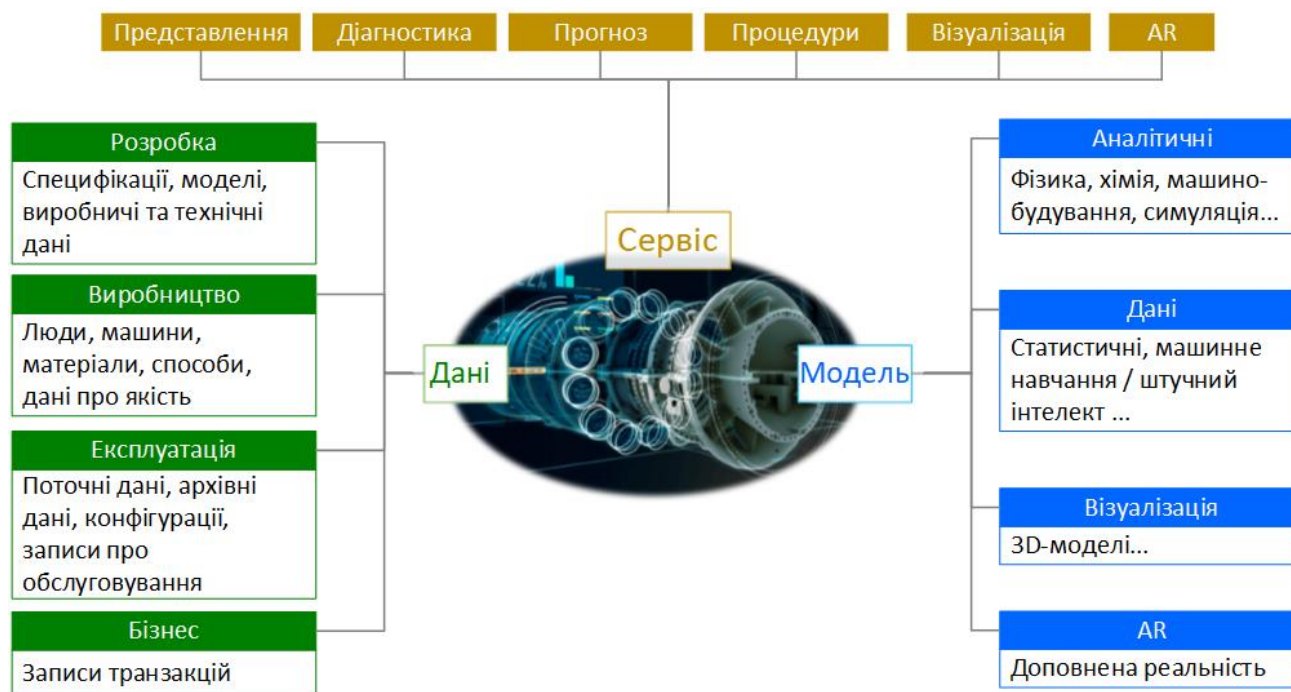


Рис. 7 – Складові цифрового двійника

*Моделі:* для відображення, розуміння та прогнозування робочих станів і поведінки двійників цифрова копія повинна включати в себе розрахункові або аналітичні моделі, а також моделі, які використовуються для призначення дій, заснованих на бізнес-логіці та цілях відповідного об'єкта фізичного світу. Такі моделі можуть включати моделі на основі фізики чи хімії, інженерні чи імітаційні моделі, моделі даних на основі статистики, машинного навчання та штучного інтелекту. Для допомоги людині у розумінні поточних робочих станів та поведінки об'єкту також можуть бути просторові моделі і моделі з елементами доповненої реальності.

*Сервіси (інтерфейси):* для доступу до своїх даних та використання своїх можливостей цифровий двійник має містити набір сервісних інтерфейсів для промислових застосунків чи інших двійників.

Хоча форма і зміст об'єктів реального світу дуже відрізняються, повинні існувати високорівневі інваріантні конструкції з деякими спільними для кожного цифрового двійника атрибутами даних та моделей, щоб до них можна було одноманітно звертатися та викликати їх.

Можна будувати цифрових двійників відповідно до типів їх реальних аналогів (рис. 8). Екземпляри створюються на основі шаблонів їх типів у відповідності до конфігурації середовища. Так само можна встановити логічні зв'язки між екземплярами залежно від їх типів.

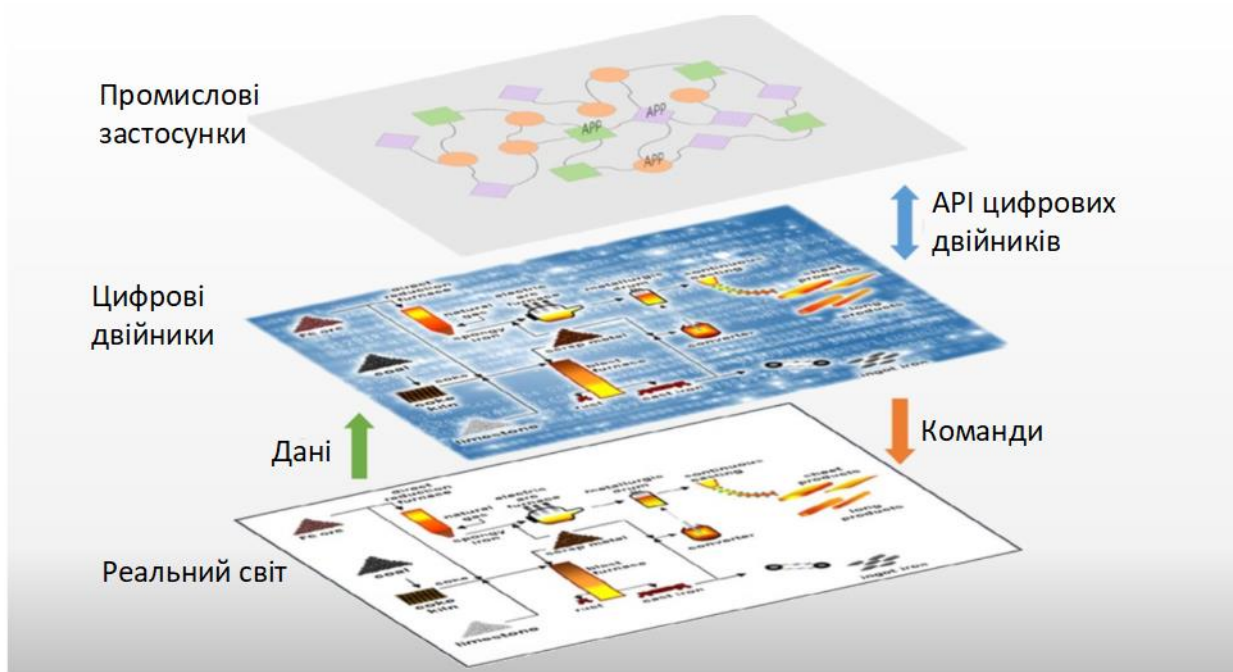


Рис. 8 – Цифрові двійники поєднують Розробку та Використання

## Технічні аспекти цифрового двійника

Деякі технічні аспекти цифрового двійника, що будуть пояснені далі, зображені на рис .9.

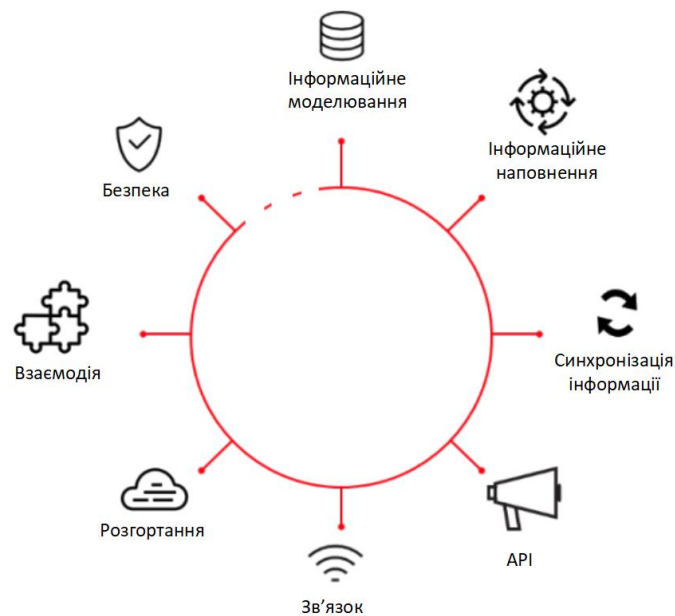


Рис. 9 – Технічні аспекти цифрового двійника

*Інформаційне моделювання.* Основний елемент цифрового двійника – це інформація, яка стосується різних етапів життєвого циклу сутності. Тут мають бути прийняті ряд ключових рішень. Наприклад:

- мета-модель цифрових двійників, яка описує різні внутрішні моделі для різних застосувань;
- механізми структурування та модульності вмісту цифрових двійників, а також розширення вмісту, коли впродовж життєвого циклу об'єкту стають доступними нові види інформації про нього;
- стандарти, які мають бути прийнятими для визначення структури і вмісту цифрових двійників, щоб полегшити обмін даними між компаніями;
- механізми для співставлення існуючої інформації з такими стандартами;
- механізми моделювання відношень між інформацією в середині одного цифрового двійника та
- засоби моделювання різних збірок цифрових двійників.

*Інформаційне наповнення.* Інформація для цифрових двійників надходить з різних джерел. Деякі можуть міститися в середині самих двійників. Наприклад, якщо застосунок розширеної аналітики використовує вміст цифрового двійника як свій вхід, то застосунок може лише зберігати результати аналізу в цьому двійнику. У відношенні до інформаційного наповнення цифрових двійників залежно від джерел інформації мають бути прийняті різні принципові рішення, механізми для:

- наповнення інформації з різних джерел, таких як пристрої, застосунки, бази даних чи інші цифрові двійники;
- копіювання інформації в цифрові двійники чи посилання на неї чи комбінація цих дій по запити;
- кешування інформації та
- наповнення інформації он-лайн та оф-лайн (наприклад, для постійного моніторингу реальних об'єктів чи автономних симуляційних тестів).

*Синхронізація інформації.* Тут такі міркування:

- засоби синхронізації інформації між цифровим двійником та відповідними джерелами інформації в обох напрямках – від джерел до двійника і навпаки;
- механізми синхронізації інформації між багатьма цифровими двійниками, які є частинами різних складених форм;
- політики (такі як безпека та частота синхронізації) виконання синхронізації та
- стандарти і засоби забезпечення сумісності цифрових двійників та їх інформаційних джерел для полегшення синхронізації.

*API:* Цифрові двійники взаємодіють з іншими компонентами. Для полегшення взаємодії мають бути різні програмні інтерфейси (API). Потрібні інтерфейси:

- що підходять до різних типів застосунків (таких як програми для моделювання в реальному часі, аналітичні застосунки та застосунки зі штучним інтелектом), які використовують та наповнюють вміст цифрового двійника;
- для взаємодії з іншими цифровими двійниками, можливо навіть між постачальниками;
- для взаємодії із відповідною сутністю для полегшення збору інформації та керування нею та
- для взаємодії з іншими інформаційними джерелами для збагачення та синхронізації вмісту цифрових двійників.

По відношенню доступу до інформації також повинні бути прийняті принципи рішення, такі як:

- Механізми автономного (offline) доступу до інформації (наприклад, у формі файлів з різними форматами);
- Механізми доступу до інформації в режимі онлайн (наприклад, у формі RESTful API);
- Механізми потокового або порційного обміну інформацією;
- API для взаємодії на рівнях хмарних сервісів, граничних пристроїв та приладів (напр., хмара-хмара, пристрій-хмара та хмара-пристрій) та
- Стандарти інтерфейсів для полегшення взаємодії між постачальниками.

*Зв'язок* є ключовим фактором взаємодії між цифровими двійниками. Різні ключові рішення мають стосуватися і зв'язку. Наприклад:

- Механізми унікальної ідентифікації двійника та пов'язаної з ним сутності для встановлення зв'язку між ними;
- Механізми автоматичного виявлення базової сутності у мережі для встановлення зв'язку з його цифровим двійником;
- Механізм виявлення інших цифрових двійників для встановлення зв'язку між ними та
- Стандарти зв'язку для полегшення взаємодії між постачальниками

*Розгортання*. Цифрові двійники можуть бути розгорнуті будь-де від граничного пристрою до хмари, залежно від вимог застосування. Вибір, як правило, базується на таких факторах, як:

- Вимоги до затримки та часу відгуку;
- Взаємодія та інтеграція з іншими системами;
- Вимоги до керування та
- Вимоги до складності та продуктивності аналітики.

Для розгортання цифрових двійників потрібні будуть механізми, які:

- Розгортають вміст цифрового двійника у певному місці, як-то пристрій IoT, граничний пристрій чи хмарне середовище;
- Виявляють окремі цифрові двійники, розподілені по різних місцях, щоб об'єднати їх у структуру композитного цифрового двійника;
- Підтримують поліморфних цифрових двійників, що означає, що цифровий двійник може бути розгорнуто у різних форматах на різних місцях розгортання.

Один екземпляр цифрового двійника повинен розглядатися як мастер-копія (рис. 10) з її основними моделями, основними даними та відповідними визначеннями, які зберігаються в репозиторії. Інші екземпляри можуть бути адаптовані для різних використань. Наприклад, для потреб моделювання використовуються автономні (offline) екземпляри, а для віддаленого моніторингу – онлайн-екземпляри. В останньому випадку інформація буде оновлюватися постійно, відбиваючи поточний стан реального об'єкту. Інколи цифровий двійник може бути розгорнутий поряд з фізичним екземпляром, щоб гарантувати швидкий зворотний зв'язок від активу для місцевого моніторингу чи забезпечення аналізу активу в близькому до реального часу.

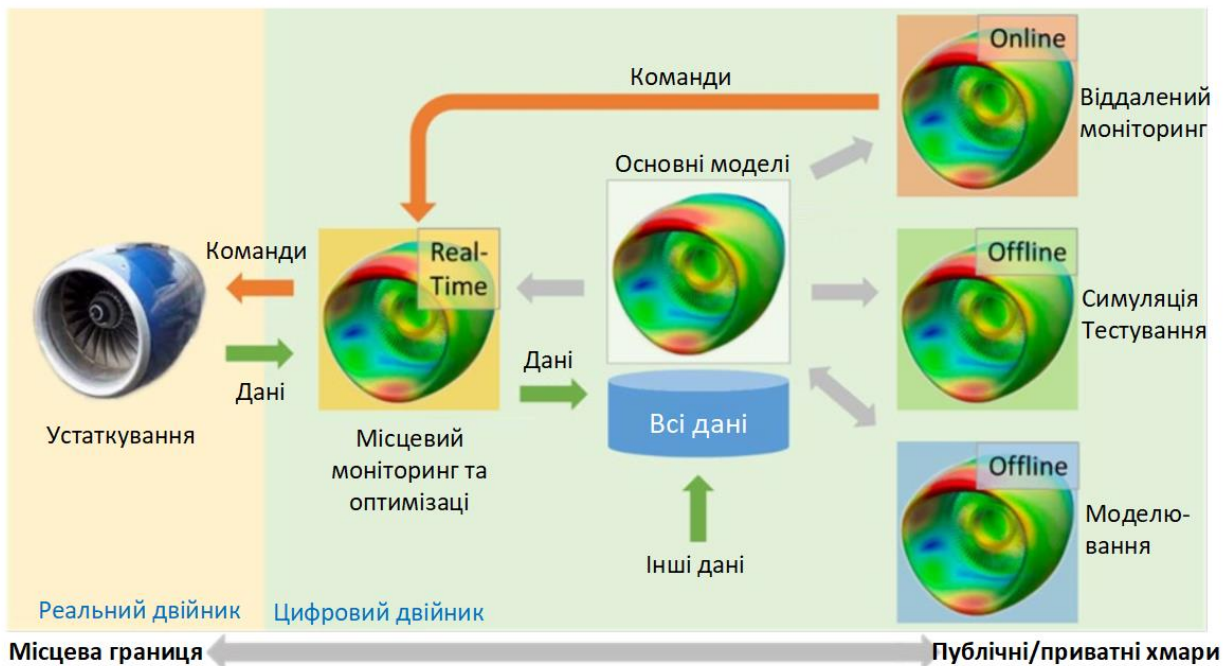


Рис. 10 – Модель розгортання цифрових двійників

**Безпека:** взаємодія цифрових двійників з різними сутностями заснована на різних міркуваннях щодо безпеки. По відношенню до розгортання цифрових двійників потрібно прийняти ряд ключових рішень. Наприклад:

- Механізми для забезпечення доступу до вмісту окремого цифрового двійника, наприклад, за допомогою контролю доступу на основі рольової моделі;
- Механізми для забезпечення доступу до окремих цифрових двійників, що надаються різними постачальниками, у складі збірних цифрових двійників;
- Механізми для забезпечення взаємодії з базовим об'єктом через його цифрового двійника;

- Методи забезпечення достовірності інформації, моделей та інших метаданих, таких як ідентифікаційні дані компонентів, їх криптографічні ключі, а також права та привілеї доступу;
- Методи безпечного розгортання цифрових двійників та забезпечення правильних, незмінених версій програмного забезпечення для підвищення надійності рішення, що може допомогти захистити інтелектуальну власність певних типів цифрових двійників та
- Методи, де це доцільно, для допомоги у вирішенні суперечок, якщо це буде потрібно для встановлення походження або часу певної інформації.

*Взаємодія* – це «здатність двох або більше систем чи застосунків обмінюватися інформацією та взаємно використовувати отриману інформацію». Для забезпечення сумісності<sup>1</sup> для визначення синтаксису інформації, її семантики, очікуваної поведінки та правил обміну інформацією потрібні міжнародні стандарти або загально визнані комунікаційні протоколи. Для цього аспекту цифрових двійників мають бути прийняті різні ключові рішення. Наприклад:

- Механізми та стандарти для забезпечення взаємодії багатьох цифрових двійників між собою;
- Механізми та стандарти для забезпечення взаємодії різних програмних застосунків з цифровими двійниками;
- Механізми та стандарти для забезпечення взаємодії цифрових двійників та їх базових об'єктів та
- Механізми та стандарти для забезпечення взаємодії цифрових двійників з базовими інформаційними джерелами.

## Стандарти та фреймворки

Навколо стандартизації концепції цифрових двійників ведеться багато роботи, навіть якщо там не фігурує термін «Цифровий двійник». Загально визнаний стандарт MEK 62832, який визначає структуру цифрового заводу з цифровими активами в центрі, також не називає їх цифровими двійниками. ISO/IEC JTC1 оприлюднив звіт своєї об'єднаної консультативної групи з Нових технологій та Інновацій (JETI) про технологічні тенденції. У ньому «Цифровий двійник» визначений як першочергова сфера, що потребує поглибленого вивчення, в якій JETI також розглядає, як можна співпрацювати<sup>2</sup> зі спільнотою відкритого вихідного коду.

У 2019 році консультативна група ISO/TC 184 відмітила, що «в ISO відсутня стандартизована архітектура даних для цифрового двійника»<sup>3</sup>. Як результат, була створена група для вивчення можливості формалізації цифрових двійників. До того ж, у 2019 році IEEE Standards Association запустила проект IEEE P2806, метою якого було визначення системної архітектури цифрового

<sup>1</sup> ISO/IEC Organization. 2019. ISO/IEC 21823-1 Internet of things (IoT)– Interoperability for iot systems – Part 1: Framework.

<sup>2</sup> <https://jtc1info.org/technology/jeti/>

<sup>3</sup> ISO/TC 184/SC 1 N417. Ad Hoc Group: Data Architecture of the Digital Twin. 2019-06-25

представлення фізичних об'єктів у заводських умовах. Подібний підхід використовується в Digital Twin Manufacturing Framework ISO / AWI 23247 в рамках ISO TC 184 / SC4 / WG15. Цей фреймворк розрахований на просте підключення елементів двійників, фокусуючись в основному на інтерфейсах та функціях цифрових двійників.

Німецька платформа Industrie 4.0 запустила Asset Administration Shell<sup>4</sup> як впровадження цифрового двійника у розумне виробництво, IEC PAS 63088. Це стало можливим завдяки партнерству Франції, Італії та Німеччини<sup>5</sup>.

ISO TS 18101-1 «містить вимоги, специфікації та керівництво для незалежної від постачальника архітектури промислової цифрової екосистеми» з фокусом на взаємодії в нафто-газовій галузі. У цьому контексті цифровий двійник визначається як «цифровий актив, на якому можуть надаватися послуги, що приносять цінність організації». Цифрові активи не обов'язково мають бути фізичними.

Активізується діяльність open source спільноти. У проекті Eclipse BaSys<sup>6</sup>, пропонуються набори для розробки програмного забезпечення (SDK), засоби перегляду та розробки цифрових двійників, які відповідають специфікації Asset Administration Shell. Eclipse Ditto разом з Eclipse Vorto, як частина Eclipse IoT<sup>7</sup>, пропонують універсальний фреймворк для цифрових двійників.

Окрім класичних організацій по розробці стандартів (SDO), таких як International Organization for Standardization (ISO) та International Electrotechnical Commission (IEC), над специфікаціями цифрового представлення речей в контексті IoT працюють й інші консорціуми, зокрема W3C Web of Things (WOT).

## Цифровий двійник на практиці

Різними компаніями та дослідниками пропонується велика кількість прикладів цифрових двійників. Цей розділ містить кілька прикладів з різних галузей.

### Цифровий двійник на виробництві

До складу комерційного літака входять різні компоненти від різних постачальників. Це, наприклад, двигуни, шасі, авіоніка тощо. Тобто цифровий двійник літака – це збірка двійників цих

---

<sup>4</sup> Details of the Administration Shell. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). ZVEI & Plattform Industrie 4.0. Online: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Details-of-theAsset-Administration-Shell-Part1.html>

<sup>5</sup> Structure of the Administration Shell. Trilateral Perspectives from France, Italy and Germany. Ministry of Economy and Finances & Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). Alliance Industrie du Futur, Piano Industria 4.0 & Plattform Industrie 4.0. Online: <https://www.plattform40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/hm-2018-trilaterale-coop.html>

<sup>6</sup> Details of the Administration Shell. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). ZVEI & Plattform Industrie 4.0. Online: <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/2018-details-ofthe-asset-administration-shell.html>

<sup>7</sup> <https://projects.eclipse.org/projects/iot>

частин. Авіакомпанії – це оператори, які зазвичай купують або орендують літаки у компанії, що відповідає за весь літак. У результаті, на момент доставки літака, за його цифрового двійника нестиме відповідальність виробник літака. Виробник, у свою чергу, покладатиметься на виробників цифрових двійників основних компонентів, таких як двигуни. Ці двійники повинні мати можливість взаємодіяти на єдиній або споріднених платформах. З часом, цих двійників треба обслуговувати, щоб підтримувати в актуальному стані.

Щодо цінності для бізнесу, цифровий двійник літака корисний у предиктивному обслуговуванні, ефективності експлуатації (наприклад, ефективності споживання палива) та розробці стратегії обслуговування активів. Зважаючи на те, що строк експлуатації літака може сягати десятків років та вартість технічного обслуговування літака впродовж строку служби може перевищити його початкову вартість, то використання цифрових двійників є важливою перевагою.

### Цифровий двійник в енергетиці та житлово-комунальному господарстві

У процесі гранулювання необхідне ефективне керування піччю та супутнім обладнанням - для енергоефективності, забезпечення високої продуктивності печі та вимог щодо якості.

Цифровий двійник печі гранулювання (рис. 11) працює в тандемі з розподіленою системою керування заводу. Він використовується для неперервної оптимізації роботи в режимі реального часу, пропонуючи оператору оптимальні уставки. Цифровий двійник включає в себе попередню обробку даних, імітаційну модель поведінки обладнання (як на основі даних, так і фізичних властивостей) та модулі самонавчання і рішення (які оптимізують вхідні дані з урахуванням процесів, якості, безпеки та поточних обмежень). У цифровому двійникові для прогнозування невідомих витрат, температур та концентрації рециркульованих газів використовуються дані з понад 7000 датчиків та програмних сенсорів.

Цифровий двійник для сталеливарної промисловості включає:

- Цифрового двійника на рівні обладнання для контролю кожної одиниці устаткування;
- Субблоків, які роблять можливим створення цифрових двійників на рівні обладнання;
- Зв'язки між цифровими двійниками та існуючими системами автоматичного керування;
- Цифрового двійника технологічного процесу, що контролює обладнання у процесі та
- Цифрового двійника рівня заводу, що контролює послідовності процесів на заводі.

Під час висунення вимог до функціональної сумісності, необхідно враховувати стандарти функціональної взаємодії для зв'язку між блоками. Наприклад так, як показано нижче.

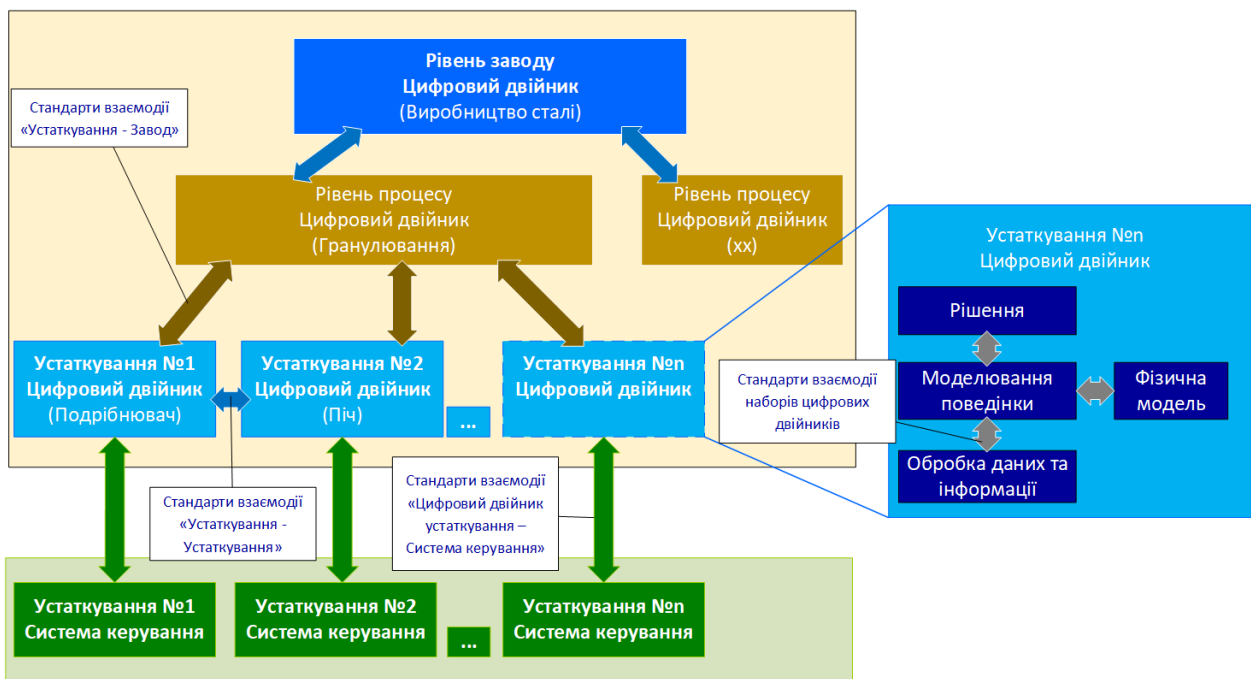


Рис. 11 – Цифровий двійник для процесу гранулювання

У цьому сценарії цифровий двійник приносить таку цінність бізнесу:

- Оптимізація ключових параметрів в реальному часі забезпечує зниження споживання палива на 2%, підвищення продуктивності на 3% та
- Розрахунок у режимі реального часу різних показників якості, таких як міцність на стискання гранул, та робочих параметрів печі, наприклад температура шару, допомагає оператору приймати швидкі та правильні рішення без необхідності проводити лабораторні тести й припущення.

### Цифровий двійник в нафто-газовій галузі

Робота цифрового двійника для моніторингу підземних свердловин впродовж всього життєвого циклу нафтової свердловини починається на етапі розвідки, коли для запуску свердловини використовуються імітаційні моделі на основі сейсмічних та інших підземних даних. Цифровий двійник свердловини – це складна система: модель буріння складається з чотирьох унікальних незалежних елементів, кожен з яких сам по собі являється композитним цифровим двійником. Це – надра, стовбур свердловини, бурова та наземна техніка. Надра, у свою чергу, включають в себе оточуючі геологічні утворення, пласт та призабійні зони. Ці чотири складні первинні елементи даних можна розглядати як приклади того, що потрібно промодельовувати, щоб отримати інформацію для будівництва свердловини:

- Стовбур свердловини;
- Фізичку бурильної колони;
- Контроль тиску (властивості бурового розчину) та

- Склад та цілісність пласта (поряд зі стовбуром).

Датчики контролю свердловини та бурової установки, у поєднанні з можливостями штучного інтелекту у скануванні величезних об'ємів геологічних та робочих даних в екземплярі двійника, забезпечують оперативний контроль та взаємодію між наземними та підземними операціями. Цифровий двійник моніторингу підземної свердловини розвивається разом із її життєвим циклом задля додаткових рішень у видобуванні, обслуговуванні, завершенні експлуатації та консервуванні.

Цей двійник несе таку цінність для компанії:

- Надає механізм для оцінки стратегій зменшення витрат, оптимізації бурових операцій та видобування. Цей цифровий двійник забезпечує краще розуміння фінансових, технічних та робочих параметрів для керування свердловинами у режимі реального часу.
- Цифровий двійник підземної свердловини може покращити загальний показник цілісності свердловини та процеси будівництва свердловин, підтримуючи розробку гнучких та ефективних робочих процесів та полегшуючи процедури прийняття рішень у відношенні найвигідніших варіантів розвідки, буріння, видобування та завершення експлуатації.

## Цифровий двійник у гірничій справі

Цифровий двійник для гірничих робіт з акцентом на технічне обслуговування виробничих активів містить інформацію, яка необхідна для прийняття найкращих рішень щодо обслуговування: за допомогою аналізу поточного стану чи прогнозу. Він також надає інформацію для планування пріоритетності робіт, базуючись на фактичних параметрах та поточних показниках активу.

Цифровий двійник технічного обслуговування активів використовується у багатьох задачах компанії, і тому, для забезпечення точності та повної відповідності інформації зв'язаному активу, а також потрібного користувачу рівня деталізації, потребує доступу до різних систем.

Цифровий двійник взаємодіє з:

- системами керування активами підприємства (Enterprise Asset Management, EAM);
- локальними та загальновиробничими базами даних;
- ІТ-системами замовників та
- існуючими системами автоматичного керування.

У цьому випадку цифровий двійник формує таку комерційну цінність:

- Здатність покращити середній час між відмовами (MTBF) та середній наробіток на відмову, допомагаючи у практиках керування виробничими активами. Це стає можливим завдяки своєчасності надання інформації, ближче до реального часу, ніж раніше. Поєднання цього з важливою інформацією системи EAM в середині цифрового двійника сприяє прийманню ключових рішень;
- Реалізація всього потенціал шахт для мінімізації втрат через проблеми в обслуговуванні устаткування.

- Збільшення точності планування, що, в свою чергу, сприяє кращому контролю обладнання та переходу до прогностичного обслуговування активів.
- Зменшення загальних витрат за рахунок більшої прозорості процедур обслуговування активів.

## Цифровий двійник в автоматизації технологічних процесів

Цифровий двійник партії хімічної продукції об'єднує всю потрібну інформацію про цю партію. Цікавою інформацією тут є технологічні параметри (такі як температура, тиск та вологість) під час виробництва кожної конкретної партії.

Цифровий двійник надає інформацію для контролю відповідних показників (в'язкість, рівень рН, агрегатний стан) поточного стану продукції. На основі цих даних можна провести симуляцію та спрогнозувати оптимальні технологічні параметри для наступних виробничих етапів, щоб забезпечити заплановану якість продукції.

Зміни у властивостях продукції можуть зберігатися в базах даних часових рядів, що дозволяє відстежити критично важливі для якості значення до певного часу та місця, тим самим виявивши першопричину. Ця функціональність робить цифрового двійника продукції ключовим елементом процесу керування якістю.

Оскільки цифровий двійник партії хімічної продукції дає розуміння історичних даних цієї партії, його можна надавати замовнику разом з реальною продукцією. Зібрані дані допомагають покупцеві у наступних етапах обробки чи у кінцевому застосуванні.

За такого сценарію цифровий двійник генерує комерційну цінність у тому, що:

- Прозорість та простежуваність технологічних параметрів можуть використовуватися в реакції на скарги;
- Погана якість продукції може бути виявлена безпосередньо, що перешкоджає виконанню подальших дорогих виробничих кроків;
- Аналіз якості продукції та попередніх виробничих параметрів призводить до кращого розуміння виробництва;
- Загальна якість продукції може зрости завдяки інтелектуальному моделюванню технологічних параметрів.

## Висновки

Хоча більшість компаній пропонують цифрових двійників як частину своїх IoT рішень, це поняття існувало ще до IoT, під різними іменами та визначеннями. Як наслідок, траплялися різні інтерпретації цифрових двійників, обумовлені прикладами використання, де вони відігравали якусь роль. Хоча набір рішень, з якими стикаються архітектори при розробці різних цифрових двійників, перетинається, таке різностороннє розуміння є перепорою до пропозиції узагальнених, але абстрактних архітектур для цифрових двійників та їх місця в промислових системах.

У цій білій книзі зроблено крок вперед до конкретного визначення цифрового двійника з точки зору Industrial Internet Consortium (IIC) та детально розглянуті випадки, коли цифровий двійник грає важливу роль у підвищенні ефективності поточних варіантів використання та продукує нові. Перелічені технічні аспекти та рішення для розробки цифрових двійників ляжуть в основу подальшої роботи по інтеграції цифрових двійників в Industrial Internet Reference Architecture (IIRA)<sup>8</sup>. Відповідно до цього, оскільки безпека та функціональна сумісність являються двома важливими якісними характеристиками цифрових двійників, надалі провадитиметься робота по пропозиції засобів для виконання цих якісних характеристик.

## Додаток

### Визначення

#### Цифровий двійник

Цифрове представлення, достатнє для виконання вимог до використання.

Примітка: у цьому контексті сутністю визначення цифрового представлення, як правило, є актив, процес чи система.

Джерело: Industrial Internet Vocabulary Technical Report, IIC

#### Актив

Основне застосування, загальна система підтримки, високорівнева програма, фізична установка, критично важлива система, персонал, обладнання або логічно пов'язана група систем.

Джерело: NISTIR 7298, rev 2

#### Цифрове представлення

Інформація, що відображає характеристики та поведінку сутності.

Джерело: Industrial Internet Vocabulary Technical Report, IIC

#### Об'єкт

Суб'єкт, який має впізнаване та виразне існування.

Примітка, наприклад, людина, організація, пристрій, підсистема чи група таких суб'єктів.

Джерело: ISO/IEC 24760-1:2011

---

<sup>8</sup> <https://www.iiconsortium.org/IIRA.htm>

## Атрибут

Характеристика чи властивість об'єкта, яку можна використовувати для опису його стану, зовнішнього вигляду чи інших аспектів

Джерело: ISO/IEC 24760-1:2011

## Authors and Legal Notice

This document is a work product of the Industrial Internet Consortium Digital Twin Interoperability Task Group, co-chaired by Somayeh Malakuti (ABB Corporate Research Center, Germany) and Pieter van Schalkwyk (XMPPro).

Authors:1 The following persons contributed substantial written content to this document: Somayeh Malakuti (ABB Corporate Research Center, Germany), Pieter van Schalkwyk (XMPPro), Birgit Boss (Robert Bosch GmbH), Chellury Ram Sastry and Venkat Runkana (TCS), Shi-Wan Lin (Yo-i Information Technology), Simon Rix (Irdeto), Gavin Green (XMPPro), Kilian Baechle (CONTACT Software), Shyam Varan Nath (Oracle)

Editors: Somayeh Malakuti (ABB Corporate Research Center, Germany) and Pieter van Schalkwyk (XMPPro)

Contributors: The following persons contributed valuable ideas and feedback that significantly improved the content and quality of this document: Mitch Tseng (Tseng Infoserv LLC), Christopher Ganz (ABB)

Technical Editor: Stephen Mellor (IIC staff) oversaw the process of organizing the contributions of the above Authors, Editors and Contributors into an integrated document.

Copyright© 2020 Industrial Internet Consortium, a program of Object Management Group, Inc. ("OMG").

--

Перекладено з дозволу та за підтримки ІІС на Кафедрі автоматизації теплоенергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського

<https://atep.kpi.ua/> [facebook.com/atep.kpi.official](https://facebook.com/atep.kpi.official)

Автори перекладу: Олександр Степанець, Олена Некрашевич