

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ІНФОРМАЦІЙНА МЕРЕЖА ІоТ З ЦИФРОВИМИ ДВІЙНИКАМИ»

на здобуття освітнього ступеня магістр

за спеціальності 126 Інформаційні системи та технології

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

(підпис)

Ігор МОВЧАН

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав:

здобувач вищої освіти

група ІСДМ-63

Ігор МОВЧАН

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

к.т.н.

Олег СЕНЬКОВ

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

науковий ступінь,
вчене звання

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ІСТ

_____ Каміла СТОРЧАК

“_____” _____ 2024 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Мовчану Ігорю Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Інформаційна мережа ПоТ з цифровими
двійниками

керівник кваліфікаційної роботи: Олег СЕНЬКОВ к.т.н.

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних
технологій від “15” жовтня 2024 р. № 320

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «27» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

1. Принципи побудови та функціонування ПоТ.
2. Принцип побудови цифрових двійників.
3. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити):

1. Аналіз основних можливостей та технологій ПоТ.
2. Дослідження концепції цифрового двійника.
3. Проєктування та впровадження цифрових двійників в промислові процеси.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «15» жовтня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір технічної літератури	15.10-05.11.24	
2.	Аналіз основних можливостей та технологій ІоТ	06.11-12.11.24	
3.	Дослідження концепції цифрового двійника.	13.11-19.11.24	
4.	Проектування та впровадження цифрових двійників в промислові процеси.	20.11-03.12.24	
5.	Висновки по роботі	04.12-10.12.24	
6.	Розробка демонстраційних матеріалів, доповідь.	11.12-20.12.24	
7.	Оформлення бакалаврської роботи	21.12-27.12.24	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Ігор **МОВЧАН**

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Олег **СЕНЬКОВ**

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступня магістр: 62 стор., 17 рис., 12 джерел.

Мета роботи – дослідження процесу впровадження цифрових двійників в мережі IoT.

Об'єкт дослідження – інформаційна мережа IoT.

Предмет дослідження – технологія цифрових двійників для IoT.

Короткий зміст роботи. У магістерській роботі проведено аналіз архітектури та перспективних технологій для IoT. Визначено вимоги мереж IoT та проведено аналіз, яка з перспективних технологій може задовольнити певну вимогу. Проведено аналіз архітектур цифрового близнюка, порівняльний аналіз розподіленої та централізованої моделі, описано процес оцифрування цифрових двійників. Представлено підхід, який дозволяє обчислювати точність цифрового двійника з метою підвищення об'єктивності в процесі розробки цифрових двійників для промислових процесів. За допомогою логіки BPMN описано метод впровадження цифрових двійників в промислові процеси.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОМИСЛОВИЙ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, IoT, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, ПРОМИСЛОВИЙ ПРОЦЕС, ПРОЄКТУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА.

ABSTRACT

The text part of the qualifying work for obtaining a bachelor's degree: 62 pp., 17 fig., 12 sources.

The purpose of the work is to study the process of implementing digital twins in IIoT network.

The object of the research is the IIoT information network.

The subject of the research is the technology of digital twins for IIoT.

Summary of the work. The master's thesis analyzes the architecture and promising technologies for IIoT. The requirements of IIoT networks are determined and an analysis is carried out of which promising technologies can satisfy a certain requirement. An analysis of digital twin architectures is carried out, a comparative analysis of the distributed and centralized model is carried out, the process of digitizing digital twins is described. An approach is presented that allows calculating the accuracy of the digital twin in order to increase objectivity in the process of developing digital twins for industrial processes. Using BPMN logic, a method for implementing digital twins in industrial processes is described.

KEYWORDS: INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS, IIoT, DIGITAL TWIN, INDUSTRIAL PROCESS, DIGITAL TWIN DESIGN.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ	
ПоТ.....	11
1.1 Основні відомості про Промисловий Інтернет речей (ПоТ).....	11
1.2 Архітектура та компоненти ПоТ.....	18
1.3 Основні технології в ПоТ.....	20
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА.....	27
2.1 Характеристики цифрового двійника.....	27
2.2 Галузі використання цифрових двійників.....	33
2.3 Життєвий цикл цифрового двійника.....	38
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ	
ДВІЙНИКІВ В ПРОМИСЛОВІ ПРОЦЕСИ.....	43
3.1 Дослідження функціональних можливостей та еталонної архітектури	
зв'язку ЦД.....	43
3.1.1 Фундаментальна архітектура.....	43
3.1.2 Взаємодія між ЦД та фізичним світом.....	45
3.1.3 Цифровий зв'язок.....	49
3.2 Процес оцифровування.....	51
3.3 Аналіз моделей архітектури цифрового близнюка.....	55
3.4 Опис циклу проєктування цифрового двійника.....	58
3.5 Метод впровадження цифрових двійників в промислові процеси.....	66
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	71
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)	73

ВСТУП

Актуальність теми. Промисловий Інтернет речей (IIoT) — це технологічна еволюція, яка посилює виробничий та економічний вплив галузі. Впровадження IIoT в промисловість надає багато можливостей і переваг виробничому середовищу, включаючи збір даних, обробку даних і, нарешті, розумне прийняття рішень з обмеженим втручанням людини. Зі збільшенням кількості інтелектуальних датчиків, інтелектуальних приводів і пристроїв у пристроях, підключених до IIoT, буде збиратися й аналізуватися більше даних, що створить більше можливостей, зокрема збільшить виробництво, запровадить інтелектуальне виробництво для підвищення продуктивності, оптимізує ланцюг постачання та управління запасами, а також збільшить дохід за рахунок зниження витрат. Технологія Digital Twins (DT) повністю використовує такі дані, як фізичні моделі, оновлення датчиків і історію операцій, щоб інтегрувати багатодисциплінарні, мультифізичні, багатомасштабні та багатоімовірнісні процеси моделювання. Цифровий двійник може збирати різну інформацію про фізичні моделі за допомогою технології моделювання та відображення цифрового віртуального двійника реальних об'єктів інформації про фізичні моделі за допомогою технології моделювання та відображення цифрового віртуального двійника реальних об'єктів. У цьому сенсі цифровий двійник може контролювати цифрові сутності та робочі показники в режимі реального часу. Він проектує природний світ за допомогою накопичення даних і штучного інтелекту та повертає результати в реальний світ. Отже, впровадження моделі аналізу на основі цифрових двійників може сприяти розвитку IIoT та має високу теоретичну цінність.

Мета роботи – дослідження процесу впровадження цифрових двійників в мережі IIoT.

Для досягнення мети, у магістерській роботі успішно виконано наступні завдання:

- Аналіз основних можливостей та технологій IIoT.
- Дослідження концепції цифрового двійника.
- Проектування та впровадження цифрових двійників в промислові процеси.

Об'єкт дослідження – інформаційна мережа IoT.

Предмет дослідження – технологія цифрових двійників для IoT.

Методи дослідження. Під час написання магістерської кваліфікаційної роботи були використані методи теоретичного дослідження, імітаційного моделювання, моделювання процесу в нотації BPMN.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі запропоновано метод розрахунку точності цифрового двійника на етапі проєктування рішення та представлено модель процесу впровадження цифрових двійників в промисловість.

Практична значущість одержаних результатів. Отримані в роботі наукові результати можуть бути використані на практиці при прийнятті рішення про доцільність застосування цифрового двійника та при розрахунку точності цифрового двійника на етапі проєктування.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення і результати магістерської роботи доповідались на науково практичних конференціях, що проходили на базі Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ІоТ

1.1 Основні відомості про Промисловий Інтернет речей (ІоТ)

Промисловий Інтернет речей (ІоТ) означає взаємопов'язане автоматизоване використання датчиків, пристроїв і машин, які працюють у промислових програмах, для підвищення ефективності та надійності виробництва. Він забезпечує зв'язок між системами, машинами та людьми в промислових виробництвах. Багатьом компаніям необхідно покращити управління активами та технічне обслуговування шляхом зменшення відходів і витрат, щоб покращити свою конкурентну перевагу. ІоТ допомагає підвищити операційну ефективність у обробній промисловості шляхом інтеграції інформаційних технологій з операційними технологіями.

ІоТ також широко відомий як Індустрія 4.0, який працює на взаємопов'язаних інтелектуальних машинах, вбудованих сенсорних пристроях, аналітиці даних і автоматизованому прийнятті рішень із технологіями периферійних обчислень для підвищення продуктивності, підвищення ефективності ланцюжка поставок і покращення розподілу, потужності, управління ресурсами, безпека працівників і повернення інвестицій [2,3]. ІоТ інтегрує технології штучного інтелекту, з навчанням виробництва, аналізом великих даних в операціях і виробництвах. Ця інтеграція покращує продуктивність виробництва, масштабованість та ідеї, що лежать в основі еволюції та вдосконалення бізнесу, збираючи дані з датчиків і передаючи їх точно й узгоджено. Необроблені дані, зібрані з цих датчиків і активів, складаються з цифрових слідів виробничого продукту та процесу. Ці дані, проаналізовані, можуть надати інформацію про виробництво та ланцюжок поставок, які можна використовувати для прийняття рішень та оптимізації.

Інтеграція ІоТ у галузь має багато проблем, які необхідно вирішити, щоб зробити систему достатньо ефективною. Необхідно вирішити такі проблеми, як

безпека, конфіденційність і надійність, щоб інтегрувати у виробництво сучасні технології, особливо ті, які працюють в режимі реального часу. Крім того, впровадження ПоТ вимагає величезних капіталовкладень у системи, які можуть взаємодіяти з галузевим фізичним обладнанням, яке допомагає приймати рішення.

ПоТ надає різні переваги з точки зору масштабованості, зв'язку, надійності, економії часу, вартості та безпеки [1].

1. Прогнозне технічне обслуговування. Впровадження ПоТ може надавати інформацію про активи та обладнання на основі зібраних даних, які можна використовувати для прогнозування потенційної несправності обладнання. Дані про обладнання використовуються та аналізуються для виявлення та прогнозування потенційних несправностей і критичних проблем, які можуть виникнути за допомогою аналітики прогностичного технічного обслуговування до повного вимкнення системи. Після виявлення цих підозрілих змін і незначного погіршення продуктивності можна вжити відповідних заходів, щоб зменшити цей ризик. Це зменшить непотрібний час простою машини та підвищить ефективність за рахунок зменшення збитків для виробників. Аналіз показників роботи приладів дає змогу зрозуміти їх продуктивність і наступне планове технічне обслуговування, не впливаючи на їх рутинні завдання.

2. Підвищена ефективність. Аналізуючи та відстежуючи дані, що надаються датчиками, ПоТ може допомогти виробникам підвищити ефективність виробничого процесу шляхом раннього виявлення та вирішення проблем. Це також допомагає зменшити відходи, заощадити енергію, збільшити продуктивність і підвищити ефективність роботи. Крім того, це допоможе менеджерам, надаючи доступ до віддаленого моніторингу та керування цими машинами.

3. Видимість у реальному часі з відстеженням активів. Оскільки для відстеження великих об'єктів промисловості знадобляться значні ресурси, застосування ПоТ допомагає автоматизувати моніторинг активів. Теги RFID можна використовувати для відстеження активів або доступу до інформації під час робочого стану. Крім того, ця інформація може передаватися за допомогою таких технологій, як Bluetooth і вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT). Це дає

керівникам і наглядачам інформацію про ситуацію на заводі, допомагаючи їм визначати проблеми та їх першопричини.

4. Покращене керування об'єктами за допомогою управління запасами. ПоТ можна використовувати в управлінні запасами, коли інформація, надана датчиками, використовуватиметься для визначення стану в режимі реального часу. Такою інформацією, як рівень запасів, оптимальне впорядкування запасів і стан продукту, наприклад температура зберігання, можна керувати ефективніше за рахунок скорочення робочого часу. Одним із прикладів застосування Інтернету речей для управління запасами є Amazon, який використовує роботів, які можуть піднімати важкі пакунки, читати етикетки на пакунках за допомогою штучного інтелекту та комп'ютерного зору, а потім розміщувати пакунок у потрібному GoCart для переміщення в межах об'єктів. Це допомагає ефективніше автоматизувати ці завдання, які можуть бути виснажливими та небезпечними для людей.

5. Заощаджуйте час і зменшуйте витрати. Завдяки використанню ПоТ у галузі загальні витрати можна зменшити за рахунок мінімізації виробництва відходів і підвищення прибутковості бізнесу. Крім того, ПоТ може визначити можливості оптимізації, аналізуючи дані, зібрані під час виробничого процесу. Ця інформація може допомогти контролювати продукти під час транспортування, зменшуючи пошкодження предметів.

6. Покращена якість продукції. ПоТ дозволяє виробникам контролювати продукт уздовж виробничої лінії, від сировини до готового продукту. Дані, зібрані датчиками вздовж цієї лінії, можуть надати інформацію про продукт під час виробничого процесу. Це може допомогти виявити дефекти продукту під час виробничої лінії та допомогти відповідній особі усунути ці дефекти. Крім того, дані можна проаналізувати на основі відгуків клієнтів після покупки продукту. Це надає інформацію про якість продукту, задоволеність клієнтів і проблеми, пов'язані з продуктом, допомагаючи покращити його якість.

7. Контроль безпеки. ПоТ також допомагає контролювати оточення, поведінку працівників і дотримання правил безпеки працівників. Це допомагає виявляти небезпечні сценарії в робочому середовищі, таким чином допомагаючи

запобігти травмам на робочому місці. Таке обладнання, як розумні шоломи, куртки з датчиками та розумні пристрої, надають інформацію про статус співробітника, як-от рух, температуру тіла та потовиділення, а також про зовнішні умови навколишнього середовища. Аналіз цих даних може допомогти виявити аномальну поведінку, як-от падіння, вплив шкідливих газів, пожежі тощо, і повідомити або попередити працівників про ці умови.

Для успішного впровадження IoT потрібні ресурси та робоча сила. Крім того, інші чинники успішного впровадження IoT у різних секторах включають збільшення обчислювальної потужності комп'ютера та пропускну здатність зв'язку, розвиток глибокого навчання та технології ML, центри впровадження або станції, хмарні технології, підвищення рівня державних і муніципальних цифрових послуг, а також збільшення потенціалу людських ресурсів для допомоги та розвитку економіки. Використання хмарних обчислень в економіці та підвищення доступності та якості даних визначатиме нові тенденції, важливі для впровадження IoT у різних секторах. Нижче наведено деякі нові сектори, у яких за останні роки розвинулося впровадження IoT [1].

Автомобільна промисловість складається з підключених, напівавтономних і автономних транспортних засобів. IoT в автомобільній промисловості дозволив транспортним засобам збирати, підключатися та обмінюватися даними в режимі реального часу з іншими розумними та інтелектуальними транспортними засобами. Ці функції допомагають підвищити безпеку автомобіля, підвищити ефективність і покращити взаємодію з користувачем. З удосконаленням технологій і високим споживчим попитом за останні роки впровадження та інтеграція цих передових технологій різко зросла. Ці технології також допомагають досягти автономного водіння, роблячи транспортні засоби розумнішими та допомагаючи в розробці інтелектуальних транспортних систем. Аналіз даних дає змогу зрозуміти ринкову динаміку та потенційне зростання, зокрема частку ринку, фінансові прогнози, співвідношення попиту та пропозиції та ефективність ланцюжка поставок. Це також допомагає з'єднувати транспортні засоби та інші пристрої в дорозі або бездротове з'єднання з іншими транспортними засобами через Інтернет. Такі

функції, як сповіщення водіїв про умови дорожнього руху, рекомендації безпечніших маршрутів і допомога в автоматичному паркуванні автомобіля у вузьких місцях, виявляються корисними для цих транспортних засобів. Завдяки розширеним можливостям зв'язку, таким як 5G і штучний інтелект, автокеровані транспортні засоби стають більш реалістичними завдяки можливості тренувати модель за допомогою величезних обсягів даних, зібраних за допомогою цих технологій.

Галузь транспорту та логістики є одним із основних секторів, де застосовано ІоТ і який демонструє великий потенціал для майбутнього розвитку. Він здійснив революцію в цій галузі, використовуючи дані в реальному часі для оптимізації та підвищення ефективності мобільності товарів і послуг. Його функції, такі як відстеження активів, керування автопарком, управління трафіком, логістичний транспорт і управління ланцюгом постачання, принесли користь галузі, оскільки скоротили витрати, підвищили ефективність і дохід, зменшивши витрати на транспортування. Окрім цього, він також застосовувався в інших сферах, таких як розумне паркування, залізниці, інтелектуальний збір плати, автоматичні автомобілі та прогнозне технічне обслуговування. Дані в режимі реального часу, зібрані на основі продуктивності цих активів, допомогли підвищити енергоефективність, продуктивність і надійність транспортної та логістичної галузей.

Інтернет речей у сільськогосподарському секторі може принести велику користь фермерам, модернізувавши сільське господарство за допомогою інтелектуальної техніки та обладнання, яке може збирати дані в реальному часі. Ці дані можна використовувати для моніторингу та прогнозування кількості опадів, рівня живлення ґрунту та врожайності, покращуючи продуктивність і зменшуючи втрати врожаю. Наявність розумних виробничих пристроїв, таких як трактори для розпилення добрив, сільськогосподарські дрони, автоматичні сільськогосподарські машини та роботи, може допомогти в автоматизації сільського господарства без особливих людських зусиль. ІоТ було впроваджено в управління худобою, розумне зрошення та точне землеробство. Крім того, впровадження ІоТ у сільському господарстві може допомогти у великому високоякісному виробництві.

Недавні застосування ПоТ у сільському господарстві включають дрони, які можуть розпилювати пестициди на величезних сільськогосподарських угіддях, а також збирати й аналізувати дані про виробництво та стан посівів і продукції.

Застосування ПоТ у нафтовій і газовій промисловості було призначено для управління автопарком і оптимізації маршрутів. Така інформація, як рух нафтових цистерн, стан автомобіля, профілактичне технічне обслуговування, поведінка водія та належний моніторинг, використовується для відстеження транспортних засобів у реальному часі та керування маршрутами. Інші програми включають моніторинг трубопроводу, витоку та безперервного потоку нафти, зменшення вимушені простої та неминучі витрати. Це допомагає ефективно управляти активами та робочою силою, а також контролювати вантажі. Використання ПоТ може забезпечити ефективний маршрут для транспортування разом із плавним керуванням ланцюгом поставок. Інтеграція Інтернету речей у нафтову та газову промисловість може допомогти зменшити кількість людської праці разом із глобальною інформацією з даними в реальному часі.

Розумна електромережа дозволяє здійснювати двонаправлену передачу електроенергії та координацію між постачальниками електроенергії та споживачами. ПоТ автоматизує функції інтелектуальної мережі кількома способами, починаючи зі зменшення використання викопного палива, збільшення використання відновлюваних джерел енергії та покращення використання електроенергії. Також очікується, що енергетична технологія на основі ПоТ може автоматично вирішувати проблеми недоступних незалежних відновлюваних джерел енергії шляхом відстеження використання енергії, виробництва енергії та взаємодії з іншими джерелами.

ПоТ в охороні здоров'я є однією з найбільш передових областей. ПоТ можна запровадити в секторах охорони здоров'я, щоб зменшити кількість помилок і покращити загальний догляд за пацієнтами, систему охорони здоров'я та медичні заклади. Автентифікація пацієнта в режимі реального часу, моніторинг пацієнта за допомогою переносних пристроїв із датчиками, такими як моніторинг частоти серцевих скорочень, рівня глюкози, активності та сну, можуть відстежувати стан

здоров'я пацієнта. Ці зібрані дані можна надсилати в хмару, доступ до якої має весь пов'язаний персонал і медичні працівники, щоб надавати інформацію про поточні випадки. За допомогою цих технологій стан пацієнтів можна контролювати автоматично й безперервно без особливої участі людини в режимі реального часу. Система попереджатиме медичних працівників, лише якщо в зібраних даних буде щось незвичайне. Вони також можуть бути реалізовані віддалено з набагато більшою ефективністю. Це може допомогти вчасно виявити проблеми зі здоров'ям шляхом своєчасного інформування медичних працівників для відповідного медичного втручання. Однак це ускладнює уникнення крадіжки особистих даних і збереження конфіденційності даних пацієнтів.

Є ряд ключових вимог та факторів, які слід враховувати для успішного впровадження ПоТ у галузі.

1.Сумісність. Реалізація ПоТ вимагає взаємодії, яка може з'єднувати та передавати дані між різними пристроями та системами, виготовленими різними постачальниками. Ці системи повинні підтримувати інтеграцію різноманітних активів і складних систем з різними протоколами та надійно працювати з системами.

2.Масштабованість. Для реалізації ПоТ потрібні нові компоненти та пристрої. Більше датчиків і пристроїв буде інтегровано в систему, забезпечуючи величезні обсяги даних. Система має бути здатна ефективно обробляти ці величезні дані без проблем. Крім того, він повинен мати можливість масштабувати систему ПоТ шляхом інтеграції існуючої системи з необхідними оновленнями та розширеними процесами.

3. Безпека. Безпека є однією з ключових вимог і проблем, з якими стикається ПоТ. Захист підключених пристроїв і мереж, а також передача даних є ключовими для впровадження ПоТ у виробничих галузях. Вимоги безпеки ПоТ включають безпеку з точки зору мережі, моделей і методологій, транспортування даних, контролю потоку даних, конфіденційності даних, придатності до обслуговування, контролю доступу та автентифікації. Конфіденційність передбачає шифрування даних для передачі, контроль доступу та забезпечення конфіденційності та ізоляції

мережі. Цілісність включає послідовність, автентичність і точність. Доступність охоплює загальну надійність, резервування та децентралізацію системи.

Незважаючи на те, що ІоТ має додаткову цінність для бізнес-операцій, впровадження цих цифрових технологій все ще є важким для бізнесу. У країнах з економікою, що розвивається, повільне та низьке впровадження сповільнило прогрес у цих сферах. Крім того, з'єднання різних датчиків, приводів і контролерів із виробничими лініями та обладнанням для автоматичного виконання виробничого процесу без будь-якого або мінімального втручання людини спричинило додаткові проблеми з точки зору безпеки промислового виробництва.

1.2 Архітектура та компоненти ІоТ

Технологія ІоТ складається з чотирьох різних компонентів:

1. Рівень пристроїв: цей рівень складають периферійні пристрої, які залучаються до промислових операцій.
2. Рівень мережі: цей рівень включає в себе різні засоби зв'язку, такі як Wi-Fi, Bluetooth і засоби передачі.
3. Рівень обробки: на цьому рівні дані обробляються на різних платформах, наприклад хмара, ЦОД і веб-сервіси.
4. Рівень додатків: на цьому рівні технологія застосовується в різних програмах, таких як розумні міста та розумне виробництво.

На рисунку 1.1 показано різні рівні архітектури ІоТ та їх компоненти.

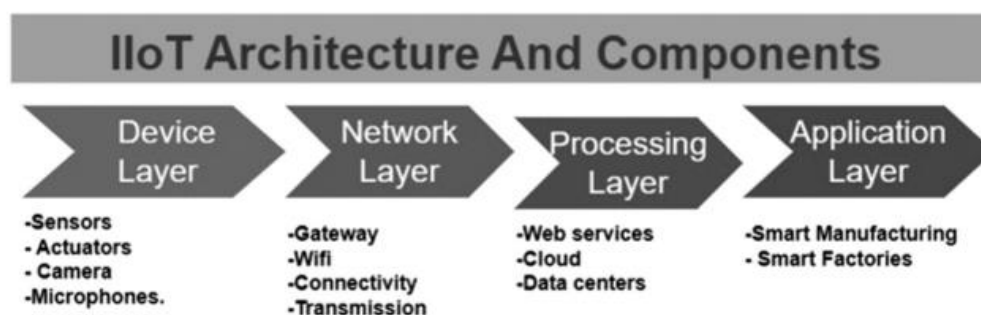


Рис.1.1 Архітектура ІоТ [1]

Розглянемо ці рівні архітектури ПоТ більш детально.

Рівень пристроїв. Цей рівень складають фізичні пристрої, які задіяні у промислових секторах, таких як датчики, виконавчі механізми, камери, процесори, лічильники, мікрофони, контролери та периферійні пристрої, які збирають дані та передають ці дані в мережу через периферійні шлюзи або шлюзи ПоТ. Ці шлюзи розташовані близько до краю системи. Більшість інтелектуальних пристроїв, які використовуються на цьому рівні, підключаються по бездротовій мережі за допомогою вбудованих мережевих можливостей, тоді як деякі застарілі пристрої, які не мають таких можливостей бездротової мережі, зазвичай підключаються через послідовні інтерфейси. Ці пристрої сприймають або контролюють речі на межі реального світу та підключаються до мереж по бездротовій мережі. Ці дані можуть бути зібрані з різних об'єктів або середовищ.

Рівень мережі. Дані, зібрані з датчиків, агрегуються та перетворюються на цифрові потоки та передаються через Інтернет на мережевому рівні. Ці рівні містять багато пов'язаних із безпекою інструментів і програм, таких як автентифікація, шифрування та захист від зловмисного програмного забезпечення для забезпечення безпеки даних. Ці рівні також вимагають високої потужності обробки через велику кількість оброблених даних, зібраних з різних датчиків, які безперервно передаються, а потім передаються через різні мережеві пристрої. Мережні рівні повинні мати шлюзи, які є портативними, гнучкими та здатними підтримувати різні платформи, а також повинні мати можливість адаптуватися до різних умов середовища. Деякі служби аналітики та керування даними також включені в ці рівні для аналізу потоків вхідних даних у реальному часі. Деякі програми периферійних обчислень можуть попередньо обробляти та виконувати аналітику отриманих даних з обмеженими можливостями обробки.

Рівень обробки. Після збору даних вони передаються через мережевий рівень у хмарний домен для глибшої та всебічної обробки. Ці високоякісні дані зберігаються, обробляються, аналізуються, керуються та робляться висновки за допомогою ІІІ. Цей рівень також включає хмарні технології та веб-сервіси на базі локальних центрів обробки даних або гібридних систем. Різні платформи, такі як

хмарні сервери та бази даних, використовуються для інтеграції пристроїв і даних у систему ПоТ. На цих рівнях дані обробляються та аналізуються, з цих даних витягується корисна інформація, яка потім застосовується до бізнес-додатків, інтегруючи автоматизовані процеси.

Рівень додатків. Цей рівень складається з компонентів, спрямованих на користувача. Він забезпечує інтерфейс для перегляду висновків з проаналізованих даних у формі звітів, аналізів і статистики, які інтерпретуються та реалізуються в різних програмах. Рівень додатків містить інтерфейсні корпоративні програми. Програми можуть отримувати доступ до даних із рівнів обробки в режимі реального часу, забезпечуючи промисловий інтелектуальний виробничий процес із розумними компонентами та обладнанням. Ці рівні також можуть мати центральне сховище даних із можливостями обробки та аналітики даних. На цих рівнях проілюстровано такі можливості кінцевого використання Інтернету речей, як прогнозоване технічне обслуговування, віддалений моніторинг, керування енергоспоживанням, продуктивність активів і глибше розуміння продуктивності.

1.3 Основні технології в ПоТ

Екосистема ПоТ складається з різних технологій, таких як автоматизація, Інтернет послуг, бездротові технології, обчислення, кіберфізичні системи (CPS), IoT і хмарні обчислення. Серед них розробка та вдосконалення CPS, периферійних обчислень і хмарних обчислень відіграють більшу роль у розвитку ПоТ для досягнення підвищення ефективності виробничого процесу.

На рис.1.2 показано деякі пов'язані з ПоТ ключові технології.

Кіберфізичні системи (CPS) - це інтелектуальна система, що включає електроніку та вбудоване програмне забезпечення, що взаємодіє з фізичними компонентами, підключеними до Інтернету або без нього. Концепція CPS складається з трьох основних компонентів: фізичних пристроїв, мереж зв'язку та систем керування.

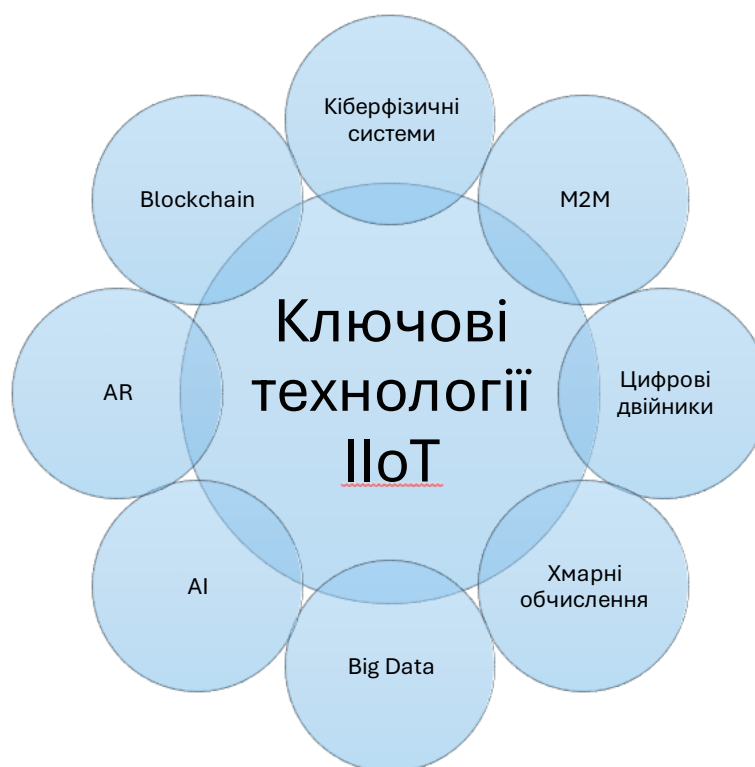


Рис.1.2 Ключові технології IIoT

Наразі CPS охоплює Інтернет речей (IoT), мережу розумних транспортних засобів та кілька інших технологій. CPS має відповідати багатьом критеріям для створення інтелектуальної виробничої системи для підтримки Industry 4.0. CPS пропонує збір даних у режимі реального часу, аналіз і прозорість усіх аспектів виробничих операцій. CPS використовується в промислових секторах для управління та контролю механізму, безпеки, відмовостійкості та автоматизації системи. Він надає критичні елементи, такі як обчислення та мережеві зв'язки для впровадження IIoT. Ця система складається з двох частин. Перша частина - це кіберсистема, яка включає в себе контроль, мережу та обчислювальні мережі, які здатні працювати, взаємозв'язувати та інтелектувати промислові системи, а друга частина - це фізична система, яка включає системи виробництва та автоматизації. Ця система збирає дані за допомогою датчиків і зберігає, оцінює та обробляє їх у цих мережах. CPS допомагає підвищити ефективність традиційних фізичних установок шляхом регулювання, самоконтролю та функціонування автономних операцій. Це допомагає дистанційно керувати виробничими системами через

архітектуру, що базується на Інтернеті.

Хмарні обчислення – це модель, яка надає інфраструктуру, платформу та програмні послуги, що мають обчислювальні, мережеві можливості та можливості зберігання. Вони використовують взаємопов’язані віддалені сервери, розміщені в Інтернеті, для зберігання, керування та обробки даних або інформації. Хмарні обчислення забезпечили більшу платформу та інфраструктуру для моніторингу, активації та керування пристроями та процесами з підтримкою ПоТ у режимі реального часу для виробництва та промислової автоматизації.

Хмарні обчислення надають послуги через інфраструктуру як послугу (IaaS), платформу як послугу (PaaS) і програмне забезпечення як послугу (SaaS). IaaS в основному використовуються як сервери для мереж і зберігання. Сервіси PaaS використовуються для керування БД, розробки інструментів і роботи системи. Вони використовуються для розробки, тестування та керування програмним забезпеченням і його додатками. SaaS — це модель доставки додатків, яка використовується для готових рішень. Він забезпечує доступ до програмного забезпечення або хостингу додатків і надається кінцевим користувачам через Інтернет. Багато компаній покладаються на хмарні обчислення для впровадження своєї технології ПоТ на машинах для ведення свого бізнесу, оскільки вона пропонує такі переваги, як об’єднання ресурсів, доступ до ресурсів і еластичність з покращеною обчислювальною потужністю та можливостями рендерингу.

Граничні обчислення - це розширення хмарних обчислень, яке допомагає швидше приймати рішення та аналізувати дані на рівні кінцевого пристрою. Це дозволяє виконувати обчислення на рівні кінцевих пристроїв, таких як фізичні пристрої, і на рівні локального шлюзу. Ця реалізація виявляється корисною в програмах реального часу, покращуючи продуктивність за рахунок зменшення передачі даних і споживання енергії. Граничні обчислення мають можливість збирати достатньо великі кількості якісних даних, які можна використовувати для навчання моделей ШІ з мінімальним обчислювальним часом, обмеженими вимогами до обробки та покращеним управлінням ресурсами. Це також допомагає оптимізувати продуктивність мережі за рахунок зниження витрат на смугу

пропускання, зменшення затримки зв'язку та покращення з'єднання та конфіденційності. Граничні обчислення переносять хмарні служби на край системи, покращуючи якість обслуговування (QoS) системи. Крім того, це зменшить навантаження на обробку та допоможе заощадити ресурси. Граничні обчислення використовуються для обробки даних на межі, зменшуючи навантаження на хмарні обчислення

Big Data Analytics (BDA). Технічно великі дані - це організовані/неорганізовані вихідні дані великого обсягу. Через широке використання датчиків і пристроїв Інтернету речей в Інтернеті речей існує величезна кількість даних, якими потрібно керувати, обробляти, аналізувати та візуалізувати, щоб отримати аналітичні дані. Ці необроблені дані можна впорядкувати й обробити, а потім можна зробити значущі висновки, які можуть надати суттєву цінність для аналізу та прийняття рішень. Ці великі дані можна обробляти у виробничій промисловості для досягнення оптимальності впровадження та виробництва в режимі реального часу з підвищеною ефективністю. В IoT BDA надає інструменти та аналітичні операції для візуалізації практичних знань у реальному часі. Інтегрований у бізнес-операції, він полегшує прийняття рішень, спрямованих на максимізацію прибутку та розвиток бізнесу.

III - це здатність керованого комп'ютером пристрою або програми виконувати завдання, які зазвичай пов'язані з людьми. Він містить численні галузі, такі як машинне навчання, робототехніка, оптимізація, алгоритми еволюції та багато інших. Переглядаючи «Індустрію 4.0», два підрозділи виникають як критичні підрозділи, перший — машинне навчання (ML), а другий — робототехніка. Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання зробила значний внесок у IoT для автоматизації широкого спектру галузевих дій. Різні алгоритми машинного навчання використовуються для отримання розуміння та отримання корисної інформації шляхом аналізу величезних даних, зібраних їхніми датчиками. Ця інформація використовується для прийняття ефективних та дієвих рішень шляхом розробки прогнозних і рекомендаційних моделей за допомогою навчання, яке допомагає підвищити надійність, підвищити продуктивність,

усунути проблеми в режимі реального часу та отримати задоволення клієнтів шляхом покращення відповіді в режимі реального часу. ML широко використовують для забезпечення систем самостійного прийняття рішень і вирішення проблем автоматизації, тоді як робототехніка може бути використана для сприяння ефективному цифровому розвитку за рахунок зменшення зусиль і взаємодії людини.

Блокчейн - це, по суті, вдосконалений механізм бази даних, який дозволяє організувати відкритий обмін інформацією у рамках бізнес-мережі. Децентралізована функція блокчейну особливо важлива для Industry 4.0 для покращення та прискорення зв'язку між компонентами системи. Оскільки безпека була однією з головних проблем, з якими стикаються під час впровадження ПоТ, було проведено багато досліджень для впровадження технології блокчейну, щоб зробити ланцюжок обробки більш безпечним, відстежуваним і прозорим. Технологія блокчейн забезпечує зашифрований обмін даними із збереженням конфіденційності. Блокчейн також гарантує довіру до даних у режимі реального часу. Інший важливий аспект блокчейну є наявність смартконтракту, який забезпечує метод довірчого виконання через мережевий робочий процес.

Бездротовий зв'язок є одним із важливих факторів безперебійного, всеосяжного та масштабованого з'єднання між різними датчиками, машинами та іншими пристроями для застосування ПоТ на розумних фабриках і в Industry 4.0. 5G забезпечує високонадійну, безпечну та високошвидкісну мережу зв'язку, яка дозволяє пристроям Інтернету речей збирати, аналізувати та передавати дані з датчиків і пристроїв. Він забезпечує надійний зв'язок із низькою затримкою, підтримує інтеграцію Ethernet, чутливу до часу мережу (TSN) і безпеку. Ці мережі забезпечують високу пропускну здатність для під'єднання та керування різними пристроями ПоТ. 5G може забезпечити наднизьку затримку та високу швидкість передачі даних, необхідну для ПоТ. Запровадження 5G піде на користь галузям промисловості, оптимізуючи виробничий процес, отримавши інформацію на основі зібраних даних і збільшивши прибутки.

Доповнена реальність (AR) включає низку технологій, які використовують

електронну систему для явного чи опосередкованого відображення віртуального середовища реального світу в поєднанні з віртуальними елементами. Що стосується Industry 4.0, AR дозволяє співробітникам спілкуватися віртуально, отримувати інформацію в реальному часі, а також відстежувати та контролювати системи. AR також може допомогти персоналу в контролі діяльності, надаючи письмові, візуальні або звукові вказівки. Інша сфера, в якій AR може допомогти Industry 4.0, це надання правильних деталей у потрібний момент, щоб запобігти помилкам і підвищити ефективність.

Зв'язок між машинами (M2M) - це повністю автоматичний зв'язок між пристроями без втручання людини. M2M - це технологія, яка дозволяє підприємствам розвивати бездротове з'єднання, зокрема між інформаційними центрами та машинами. До M2M з'єднання встановлювалося шляхом дозволу мережі віддаленої машини передавати інформацію.

Цифровий близнюк - це віртуальна модель, яка паралелізує та обробляє фізичний продукт протягом його життєвого циклу. Вони пропонують майже реальний міст між фізичним і цифровим світами. Цифровий близнюк цифровим способом розробляє віртуальні моделі для фізичних об'єктів для імітації їх поведінки. Цифрові моделі можуть розпізнавати стан фізичних об'єктів, сприймаючи дані, щоб очікувати, приблизно та оцінювати динамічні зміни. Одночасно фізичні об'єкти реагують на зміни моделюванням відповідно до налаштованої схеми. Віртуальні близнюки можуть досягти оптимізації всього виробничого циклу через кіберфізичний замкнутий цикл.

Таблиця 1.1 показує зв'язок між вимогами IIoT та описаними технологіями. Зв'язок у цій перспективі означає, що кожна технологія може задовольнити певну вимогу.

CPS - це комплексна термінологія, яка може сприяти задоволенню всіх потреб Індустрії 4.0 завдяки співпраці між трьома її компонентами. IIoT можна вважати основою для Industry 4.0 через обчислювальні засоби та гнучкість впровадження.

Талиця 1.1

Можливість описаних технологій задовільнити вимоги ІоТ

Вимога/ Технологія	CPS	M2M	Cloud Commputing	Big Data	AI	Digital Twin	AR	Blockchain
Автономність	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні
Обробка в реальному часі	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Та к	Ні
Безпека	Так	Так	Так	Ні	Так	Ні	Ні	Так
Управління ресурсами	Так	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні
сумісність	Так	Ні	Так	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Стандартизація організації	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Аналіз даних	Так		Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні
Модульність	Так	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

M2M є важливою технікою для досягнення певних вимог, особливо автономності та прийняття рішень. Оскільки багато функцій надаються як послуга, хмарні обчислення включають багато аспектів, таких як аналіз даних і керування ресурсами. Великі дані є фундаментальною технікою для будь-якої системи, яка вимагає обробки та аналізу даних і може сприяти з цієї точки зору. ШІ має широкий спектр методів і прийомів і може надати Industry 4.0 багато функцій, які відповідають необхідним вимогам, наприклад підтримку прийняття рішень і автоматизацію в режимі реального часу. Доповнена реальність і цифровий двійник є трендовими технологіями, які, як очікується, відповідатимуть вимогам Індустрії 4.0, особливо щодо модульності та автономності. Нарешті, блокчейн демонструє обіцяне бачення з точки зору безпеки завдяки численним функціям захисту даних і конфіденційності.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

2.1 Характеристики цифрового двійника

Цифровий двійник — це віртуальне представлення об'єктів і процесів реального світу, синхронізованих із заданою частотою та точністю. Цифровий двійник (рис.2.1) є віртуальною копією свого фізичного активу, побудованого в основному зі структурних і поведінкових моделей головним чином для базового контролю, моніторингу та оцінки його продуктивності.

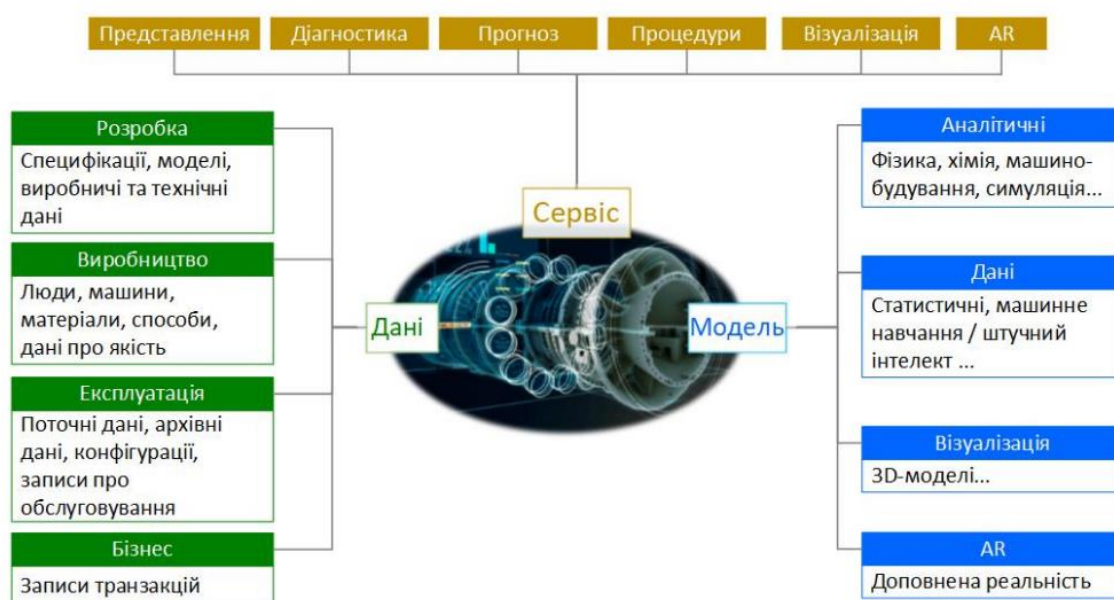


Рис.2.1 Загальна цифрова подвійна архітектура

Цифровий двійник, має наступні характеристики, які відрізняють його від імітаційних моделей:

1. Відображення в реальному часі: віртуальний простір, високо синхронізований із фізичним простором, є відображенням фізичного простору в реальному часі з багаторівневою точністю.
2. Взаємодія та конвергенція: ця характеристика далі поділяється наступним чином:

- a. Взаємодія та конвергенція у фізичному просторі: це повна інтеграція системних фаз, елементів, послуг та взаємодії. Дані, згенеровані в різних фазах фізичного простору, пов'язані та доступні.
 - b. Взаємодія та конвергенція між історичними даними та даними в реальному часі: маючи як мультифізичні моделі, так і підходи на основі даних, комплексний цифровий двійник містить як знання домену, так і оперативну інформацію про систему.
 - c. Взаємодія та конвергенція між фізичним і віртуальним просторами: цифровий двійник — це інтегрована платформа, що забезпечує плавне двонаправлене з'єднання між двома просторами.
3. Саморозвиток: цифровий двійник, здатний автоматично оновлювати свої дані в режимі реального часу, відображаючи свого фізичного двійника. Паралельне підключення дозволяє порівнювати між двома просторами, забезпечуючи постійне вдосконалення віртуальних моделей.

Цифровий двійник містить набір технологій для представлення в цифровому світі життєвого циклу реальних об'єктів, переважно обладнання та продуктів. З цих цифрових представлень є можливість систематично та динамічно:

- Збирайте дані з об'єктів реального світу, таких як обладнання та системи промислової автоматизації та керування, або з підключених до них датчиків;
- виконувати аналітику, моделювання та оптимізацію цих даних відповідно до конкретних властивостей відповідних об'єктів реального світу в конкретних прикладних контекстах, щоб отримати інформацію про їхні робочі стани чи статус;
- застосовувати ці знання, щоб динамічно приймати оптимальні рішення в промислових операціях.

Завдяки формуванню динамічних і майже двонаправлених зв'язків у реальному часі зі своїми аналогами в реальному світі, цифрові близнюки можуть сприяти замкнутим циклам зворотного зв'язку, повністю автоматизованим або частково за участі людини в циклі, від даних (зондування) до розуміння (аналітика), від розуміння до рішень і від рішень до дій. Завдяки цій петлі цифрові двійники можуть скоротити час простою обладнання, покращити виробничі процеси,

підвищити якість продукції, підвищити ефективність виробництва, зменшити витрати на матеріали та енергію та підвищити безпеку виробництва

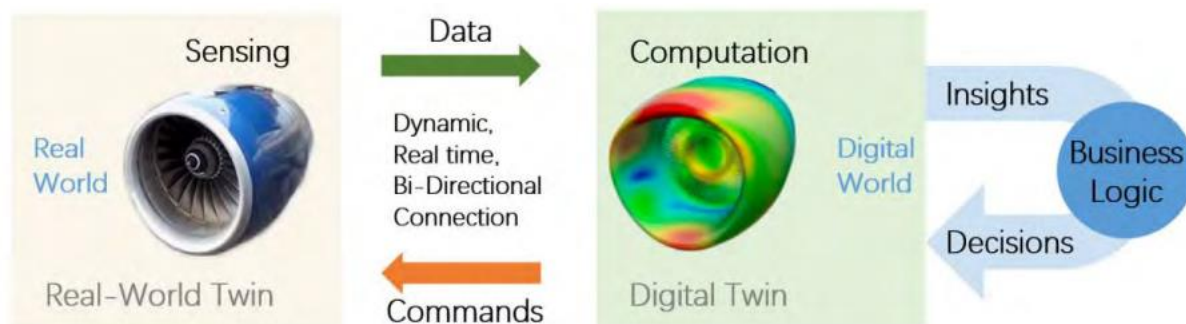


Рис.2.2 Цикл зв'язку між фізичним об'єктом і його цифровим двійником [5]

Виділяють три типи цифрових двійників:

- Цифровий двійник продукту.
- Цифровий двійник на рівні пристрою/системи.
- Цифровий двійник на рівні SoS.

Цифровий двійник продукту - це просто його цифрова конструкція, яка відображає окремий продукт у віртуальному просторі. Рівень його функціональності та комплексності залежить від фізичного близнюка та передбачуваного використання. Цифровий двійник продукту дозволяє виконувати різноманітні операції, зокрема:

1. Моніторинг та аналіз: за допомогою цифрових двійників можна постійно відстежувати стан продукту, визначати його ефективність, проблеми та можливості для покращення.
2. Прогнозування: аналізуючи дані про поведінку реального продукту, можна прогнозувати його майбутні характеристики, знос чи можливі поломки.
3. Оптимізація та тестування: цифровий двійник дозволяє проводити тестування продукту в різних умовах без необхідності фізичних експериментів, що значно знижує витрати та час на розробку.

4. Інтерактивна підтримка: на основі цифрового двійника можна створювати системи підтримки та обслуговування, забезпечуючи доступ до актуальної інформації про стан продукту в реальному часі.

Цифровий двійник на рівні одиниці систем CPS має найменшу можливу деталізацію. Такі невеликі одиниці включають компоненти та обладнання (наприклад, верстати з числовим програмним керуванням, роботи тощо), матеріали (транспортні засоби, такі як автоматизовані керовані транспортні засоби та іншу сировину з доданою вартістю) та розумне середовище. Цифровий двійник на системному рівні є інтегрованою орієнтованою на дані віртуальною копією всіх необхідних елементів процесу. Сюди входять усі цифрові двійники виробничого обладнання, потоку матеріалів, операційних систем, людських ресурсів та інших елементів потоку створення цінностей на рівні підрозділу. На системному рівні цеху розглянуті моделі включають моделі виробничих можливостей, моделі процесу для зв'язку параметрів, пов'язаних з процесом, з атрибутами дизайну продукту та відображення взаємодії між продуктом і моделлю його відповідної моделі виробничого процесу.

Основні аспекти цифрового двійника на рівні пристрою/системи:

1. Моделювання та візуалізація. Передбачається створення цифрової моделі пристрою чи системи, яка включає всі деталі його структури, функцій і характеристик. Також, надається можливість візуалізації роботи системи в режимі реального часу, що дозволяє розуміти процеси, що відбуваються всередині системи.

2. Моніторинг у реальному часі, що передбачає використання сенсорів та IoT-пристроїв для збору даних із фізичного пристрою або системи. Ці дані використовуються для оновлення цифрової моделі та моніторингу стану системи (температура, тиск, вібрації, навантаження тощо).

3. Прогнозування та оптимізація. Цифровий двійник дозволяє тестувати різні сценарії та прогнозувати майбутні стани пристрою або системи без ризику для фізичного об'єкта. За допомогою аналізу даних і моделювання можлива оптимізація роботи системи для підвищення ефективності та зниження витрат.

4. Інтеграція з іншими системами. Цифровий двійник може бути інтегрований з іншими цифровими двійниками пристроїв або систем для забезпечення більш комплексного аналізу взаємодії між компонентами (наприклад, у виробничих лініях чи транспортних мережах).

5. Технічне обслуговування та підтримка. Цифровий двійник дозволяє проводити віддалене обслуговування пристроїв і систем, прогнозувати можливі поломки та вчасно виконувати заходи для їх попередження (наприклад, запобігання зношенню частин, планування ремонтів).

Цифровий двійник на рівні SoS. Інтелектуальні сервісні платформи цифрових близнюків можна використовувати для досягнення співпраці між CPS системного рівня та цифровими близнюками. Це може бути співпраця на заводі, де виробничі лінії можуть взаємодіяти, або на різних заводах. Така інтегрована платформа забезпечує інтеграцію різних процесів життєвого циклу продукту, даних і ресурсів. Це сприятливе середовище для міжсистемного та міжплатформного взаємозв'язку, сумісності й оптимізації сервісів.

Основні характеристики цифрового двійника на рівні SoS:

1. Моделювання на більш високому рівні абстракції. SoS зазвичай складається з різних підсистем, кожна з яких може бути окремою організацією, технічним компонентом або навіть незалежною системою. Цифровий двійник на рівні SoS фокусується на моделюванні та управлінні цими підсистемами в контексті їх взаємодії та загальної мети.

2. Взаємодія між системами. Цифровий двійник на рівні SoS дозволяє моделювати не лише окремі елементи або частини системи, але й складні взаємозв'язки між ними. Це може включати інтеграцію даних, обмін інформацією та управління процесами між різними підсистемами, що дозволяє забезпечити ефективне функціонування загальної системи.

3. Динамічне оновлення та адаптація. Цифровий двійник на рівні SoS може бути використаний для динамічного моніторингу і коригування роботи всієї системи на основі поточних даних та умов. Це дозволяє забезпечити гнучкість, адаптивність і підвищену ефективність системи.

4. Аналітика та оптимізація. За допомогою цифрового двійника можна проводити аналіз різних сценаріїв розвитку, прогнозувати можливі зміни в поведінці систем і оптимізувати роботу SoS з урахуванням змін у середовищі чи вимогах.

5. Масштабування та інтеграція. Такі двійники дозволяють масштабувати процеси, інтегруючи нові компоненти або підсистеми в загальну архітектуру. Це може бути важливо для складних інфраструктур, таких як транспортні системи, енергетичні мережі або військові операції.

6. Ризик-менеджмент. Цифровий двійник може бути інструментом для оцінки ризиків на рівні всієї системи, допомагаючи виявляти потенційні проблеми в інтеграції різних елементів або визначати слабкі місця, які можуть бути неочевидними при розгляді тільки окремих підсистем.

Додавання цифрових близнюків вимагає інтеграції в архітектуру IoT і взаємодії цифрових близнюків. Взаємодія цифрових близнюків складається з двох областей.

Перша - у цифровій подвійній системі. Типове промислове застосування зазвичай керує багатьма одиницями обладнання різних типів з їхніми необхідними цифровими двійниками. Однак оператори та постачальники програмного забезпечення зазвичай не мають необхідного досвіду для створення цих цифрових двійників самостійно. З іншого боку, виробники оригінального обладнання зазвичай мають глибокі знання про обладнання, яке вони проектують і виготовляють, і тому є ідеальними учасниками для створення цифрових двійників обладнання, яке вони створюють, ідеально разом із доставкою фізичного обладнання за подвійною схемою доставки. Ці цифрові двійники, включаючи їхні моделі даних і обчислювальні моделі, надані виробниками, повинні працювати в прикладних системах, створених для конкретного операційного середовища, в ідеалі «підключи і працюй», працювати з даними з обладнання в цільовому середовищі. Для виробників комплектного обладнання створювати на замовлення цифрові двійники для кожного з середовищ своїх клієнтів є надзвичайно дорогим. Таким чином, для цього потрібна стандартизована структура цифрових близнюків

зі стандартними специфікаціями для окремих цифрових близнюків. Завдяки стандартизованій структурі цифрові двійники на основі стандартів можна створити один раз для певного типу обладнання та розгорнути в середовищі, що відповідає стандартам, з обмеженим налаштуванням.

Друга - між цифровими подвійними системами. У великих або складних промислових середовищах може існувати кілька промислових програм, кожна з яких має автономну цифрову подвійну систему. Взаємодія між цифровими двійниками в цих системах необхідна для забезпечення взаємодії між різними промисловими програмами.

Оскільки цифрові подвійні системи поширюються, багато з них незалежно розробляються та експлуатуються різними рівнями організацій для своїх конкретних операційних середовищ. Ці системи також дедалі більше пов'язуються одна з одною в межах підприємства або між підприємствами. Таким чином, ці цифрові системиблизнюки утворюють систему систем, де сумісність між системами є ще більш важливою.

2.2 Галузі використання цифрових двійників

Цифрові двійники знаходять все більш широке застосування в промисловості. Розглянемо основні галузі використання цифрових двійників та основний ефект від їх застосування.

Виробництво.

Більшість ЦД, які використовуються у виробництві на сьогодні, можуть забезпечити лише взаємодію зі своєю фізичною сутністю лише заради того, щоб залишатися в синхронізації з нею. Він також може діяти як шлюз для інших програм (наприклад, аналітики, моделювання) для взаємодії з фізичною сутністю. Аномалія, виявлена аналітикою даних, наданою фізичною особою через пов'язаний ЦД, може бути оброблена зовнішньою програмою, що призводить до команди, яка буде передана фізичній особі через ЦД.

Те саме стосується ЦД, пов'язаних із більшістю продуктів. Вони

створюються під час виробничого процесу та залишаються у власності виробника для зв'язку з фізичним продуктом протягом усього терміну його служби. Деякі з цих ЦД починають вбудовувати «інтелект» для виконання аналізу даних і допомоги фізичній особі. У певному сенсі це крихітні кроки до того, щоб стати автономним. Деякі також підключаються до кіберпростору, щоб автономно отримувати інші дані, які можна використовувати всередині.

Безпілотні автомобілі є очевидними користувачами для такого роду еволюції (отримати краще розуміння контексту шляхом спілкування -автономного- з іншими ЦД).

Будівельна галузь.

Будівельна галузь вже досить довго працює з цифровими моделями на основі ІМБ - інформаційного моделювання будівель. В останні роки все більше і більше датчиків -ІоТ- мають бути вставлені в будівлю під час будівництва, також відбувається їх встановлення у вже введені в експлуатацію будівлях. Під час проектування ЦД використовується для визначення бачення майбутньої будівлі, а коли будівля знаходиться на стадії будівництва, вони можуть використовуватися для відстеження доставки матеріалів для створення фізичного активу.

Коли цифровий двійник електричної системи підключається до цифрового двійника механічної системи підприємства чи будівлі, синхронізація виходить за рамки простого обміну даними. Ця взаємодія спрямована на оптимізацію використання енергії. Потім дані цієї взаємодії можна інтегрувати в інформаційну панель власника нерухомості, надаючи розуміння ефективності будівлі, гарантуючи вартість позичених активів, зміцнюючи довіру та розширюючи екосистему Digital Twin.

Генерація енергії.

General Electric, як уже згадувалося, кілька років працює над застосуванням ЦД для виробництва енергії, зокрема, використовуючи їх для моніторингу та керування вітровими турбінами. Вітряні електростанції є дорогими та складними системами, ефективність яких можна підвищити шляхом точного налаштування кута лопатей, що, у свою чергу, змінює потік повітря (вітер, що дме через вітрову

електростанцію). Тому під час точного налаштування необхідно враховувати вплив на інші вітряки, щоб досягти не локальної найкращої, а глобальної оптимізації. Крім того, моніторинг важливий для того, щоб уможливити профілактичне обслуговування, а не вдаватися до відновлення. Вітряні електростанції GE у всьому світі мають цифрові близнюки для кожного окремого вітряка, цифрові близнюки, що імітують процеси, і цифровий двійник для всієї ферми. Ці цифрові двійники «розміщуються» на Amazon AWS Cloud, забезпечуючи як локальну присутність, так і централізований хаб. Цифрові близнюки спілкуються один з одним як між тими, хто віддзеркалює обладнання на конкретній вітроелектростанції, так і між вітряними електростанціями. Машинне навчання використовується для створення знань і точного налаштування процесів і рішень щодо експлуатації/обслуговування як частина програмного забезпечення для управління продуктивністю.

Як показано на рис.2.3, цифровий двійник відіграє роль зв'язку фізичної сутності, вітряка, з усіма відповідними компонентами вітряної електростанції, і показано як це відображається у кіберпросторі. Цифровий близнюк робить набагато більше, ніж просто віддзеркалює вітряк. Він підключається до різноманітних об'єктів у кіберпросторі, включаючи процеси, інше обладнання та людей.

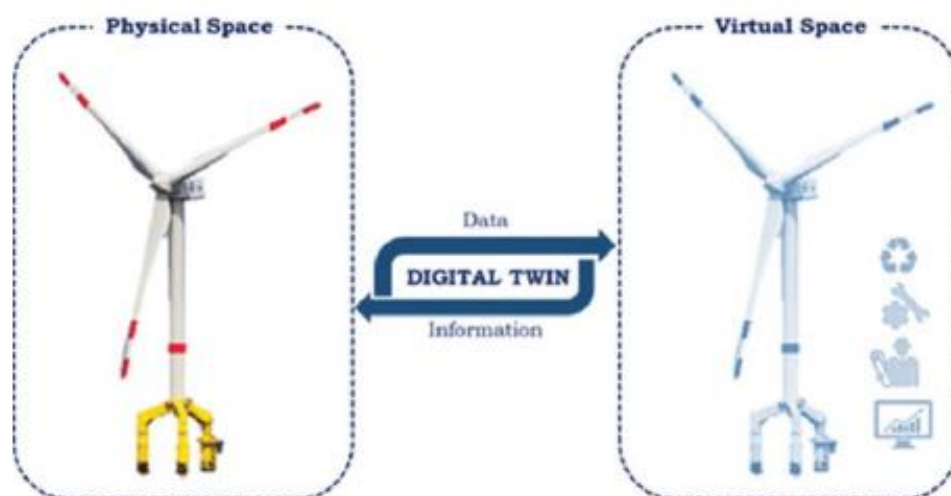


Рис.2.3 Цифровий двійник вітряка

Автомобільний сектор.

Автомобільний сектор запровадив технологію цифрового двійника у виробництво для відображення роботів на конвеєрі. В останні кілька років почали створювати та використовувати цифрові близнюки продукції, вироблених транспортних засобів. Сьогодні все більше і більше автомобільних компаній оснащують автомобілі (і вантажівки) IoT і отримують потік даних про стан різних компонентів автомобіля. Потік даних часто включає дані про місцезнаходження, і це може створити проблему конфіденційності. Деякі виробники, щоб уникнути подібних проблем, зберігають дані в автомобілі, і ці дані збираються лише тоді, коли власник вимагає перевірки автомобіля (деякі дані потрапляють у брелок). У цьому випадку весь аналіз даних відбувається в автомобілі.

Цілий новий клас чіпів із підтримкою Інтернету речей та штучного інтелекту, призначених для забезпечення інтелекту на межі (наприклад, серії STM 32), тепер забезпечує локальний інтелект і підтримку локальної роботи цифрового двійника. Цей місцевий інтелект зможе як сигналізувати водієві про виниклу проблему, так і повідомляти про проблему в сервісний центр для профілактичного обслуговування, можливо, на ходу, не порушуючи обслуговування (ЦД може вжити заходів самостійно або під керівництвом сервісного центру).

Tesla впровадила GD, еволюція CAD - автоматизованого проектування, яка використовує штучний інтелект для оптимізації проекту на основі поставленої мети. Пов'язуючи ІІ з цифровими близнюками автомобілів, які вже використовуються (з даними, наданими цими DT), можна врахувати зворотний зв'язок із «експлуатаційного» поля, у справжньому дусі Індустрії 4.0. Кожен автомобіль Tesla пов'язано з ЦД, і цей ЦД щодня повідомляє Tesla GB дані. Ця лавина даних аналізується за допомогою штучного інтелекту (і машинного навчання), що призводить до моніторингу, пропозиції послуг і покращення виробництва. Оскільки автомобілі Tesla — це, в основному, комп'ютери зі спеціальним програмним забезпеченням, можна оновлювати програмне забезпечення за потреби як для усунення збоїв, так і для надання нових функцій. Тут ми знову бачимо конвергенцію продуктів, послуг і знань.

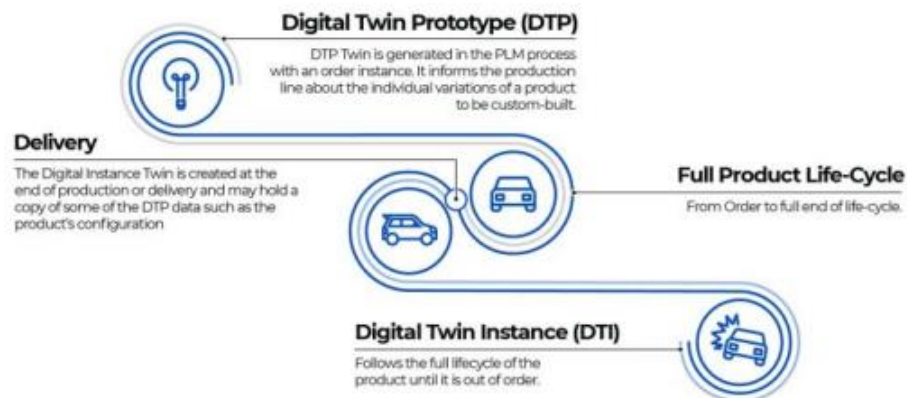


Рис.2.4 Графічне представлення створення, екземпляр використання цифрових близнюків, пов'язаних з кожним автомобілем Tesla

Охорона здоров'я.

Охорона здоров'я – це галузь зі складною інфраструктурою та великою кількістю обладнання. Це також дуже чутлива сфера з точки зору конфіденційності та вирішальна для добробуту окремої людини та суспільства. І останнє, але не менш важливе: це велика сфера витрат. Не дивно, що Digital Twins використовуються для підвищення ефективності цієї галузі.

Великі компанії (наприклад Philips) прийняли ЦД для моніторингу та керування медичним обладнанням і нещодавно почали використовувати персонального цифрового двійника для моніторингу пацієнтів. ПЦД також використовується фармацевтичними компаніями для підтримки розробки та випробувань ліків. На черзі – прийняття ПЦД медичними страховими компаніями та постачальниками медичних послуг (як підтримка телеконсультацій, діагностики, призначення). Рушійною силою еволюції стане використання чат-ботів. Вони перетворюються на ПЦД для надання персоналізованої допомоги. ЦД органів людини були розроблені та використані в моделюванні. Це невеликий крок вперед, щоб створити екземпляр цих ЦД для конкретного пацієнта, перетворивши їх на ПЦД. Кожна людина має зростаючий набір особистих даних, які можна використовувати для медичної оцінки та прийняття рішень щодо протоколу охорони здоров'я, від найпростіших даних, пов'язаних із характеристиками пацієнта, до медичних

записів пацієнта, поведінки пацієнта і успадкованих рис. Усе це доповнюється даними моніторингу, отриманими від носіїв (розумних годинників, ремінців, датчиків навколишнього середовища тощо) та медичних пристроїв, що забезпечують «відстеження».

На рис.2.5 показано використання персонального цифрового близнюка для моделювання ситуації пацієнта та можливого ефекту медичних процедур. З лівого боку фізичний простір пацієнта, який генерує дані та виконує процедури, з правого боку аналіз зібраних даних і моделювання впливу процедур.

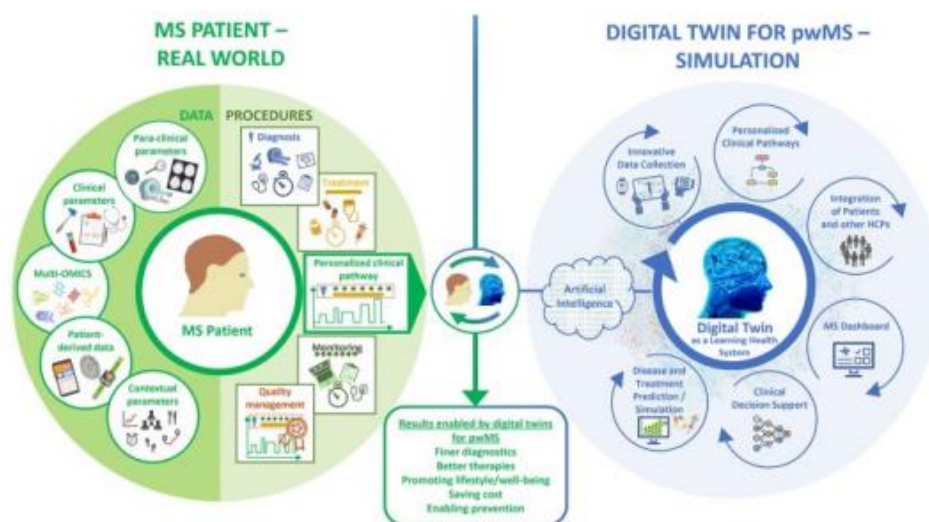


Рис.2.5 Використання персонального цифрового близнюка для моделювання ситуації пацієнта та можливого ефекту медичних процедур

2.3 Життєвий цикл цифрового двійника

У сфері передових технологій та інтелектуальних систем життєвий цикл ЦД виступає як важливий фундаментальний елемент, який повинен моделювати та представляти різну еволюцію ЦД через його внутрішні фази впродовж його еволюції. Можливість структурувати та моделювати життєвий цикл ЦД має бути фундаментальним елементом, що характеризує архітектуру ЦД з фокусом на задоволенні фундаментальних потреб і показу відмінних характеристик,

необхідних для його ефективного розгортання, що дозволяє використовувати зовнішні додатки, цифрові служби чи інші двійники, знати про стан цільового ЦД без будь-яких попередніх знань, специфічних для домену. Опис основних характеристик і фаз, пов'язаних із визначенням життєвого циклу ЦД з його фундаментальними аспектами, важливий для визначення вказівок для проектування архітектури щодо того, як життєвий цикл має бути реалізований на різних платформах із спільною та сумісною підхід.

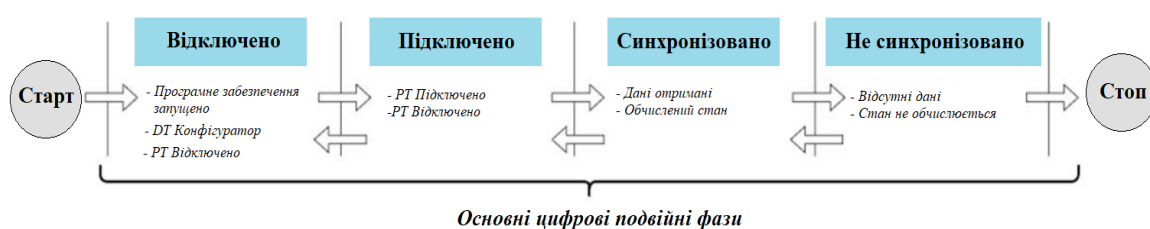


Рис.2.6 Високорівневе представлення фаз, що характеризують життєвий цикл ЦД

ЦД, який слугує динамічним мостом між фізичною та цифровою сферами, повинен мати систематичний і оркестрований життєвий цикл з кількох вагомих причин. Перш за все, структурований життєвий цикл забезпечує безперервне й оптимальне функціонування ЦД від ініціалізації до остаточного виходу з експлуатації, зберігаючи його актуальність і надійність протягом усього терміну експлуатації. Життєвий цикл враховує еволюцію фізичного активу, який він представляє. У міру того, як реальний аналог зазнає модифікацій, ЦД може плавно адаптуватися, забезпечуючи синхронізоване та точне цифрове представлення. У складній взаємодії між фізичною та цифровою сферами можуть виникати помилки та розбіжності. Чітко визначений життєвий цикл включає механізми для виявлення, виправлення та відновлення після помилок, забезпечуючи надійність ЦД. Ефективне управління життєвим циклом забезпечує ефективний розподіл ресурсів, гарантуючи, що ЦД раціонально використовує обчислювальні та операційні ресурси та залишається узгодженим з операційними цілями.

На рис.2.6 схематично зображено основні етапи, які повинні характеризувати життєвий цикл ЦД, кожна з яких відіграє вирішальну роль у його роботі та розвитку.

1. Початок. На початку свого життєвого циклу ЦД ініціалізується та запускаються необхідні програмні компоненти. Це означає початок його шляху до синхронізації з його фізичним аналогом.

2. Відключено. Після ініціалізації ЦД переходить у фазу відключення. Поки програмне забезпечення запускається та налаштовується, ЦД залишається непов'язаним зі своїм фізичним двійником (ФД), очікуючи на з'єднання.

3. Підключено. Після успішного підключення до ФД ЦД отримує докладні описи характеристик і функцій ФД. Цей обмін інформацією закладає основу для подальшої синхронізації.

4. Синхронізація. Коли дані надходять від ФД до ЦД, останній накопичує достатньо інформації для обчислення свого стану. Безперервно отримуючи та обробляючи дані, ЦД підтримує синхронізацію з часом, дотримуючись визначеної моделі.

5. Не синхронізовано. Під час життєвого циклу можуть виникати проблеми, що призводять до фази розсинхронізації. Це може виникнути через відсутність даних або помилки в обчисленнях, що унеможлиблює визначення дійсного стану. Крім того, отримані дані можуть бути недостатніми або мати неадекватну якість для обчислення стану.

6. Зупинка. Зрештою, життєвий цикл завершується фазою зупинки, коли ЦД припиняє роботу. Це рішення може виникнути через застарілість, нерелевантність або зміну контекстуальних вимог, що сигналізує про кінець його корисності в даному контексті.

Взаємозв'язки та переходи між цими фазами та фазами високого рівня можуть змінюватися в різних реалізаціях

ЦД має пройти фазу ініціалізації, запускаючись як програмне забезпечення або процес із завантаженням внутрішніх компонентів і модулів. Після активації всіх внутрішніх елементів близнюк повністю ініціалізований і готовий до запуску

внутрішніх процедур, враховуючи як фізичні, так і цифрові канали зв'язку, а також функції внутрішньої моделі, зберігання, керування та моніторингу. Згодом ЦД має встановити зв'язок зі своїм фізичним аналогом, полегшуючи двонаправлений потік подій і формуючи основу для синхронізованих взаємодій. На цьому етапі близнюк відкриває фізичні можливості, що дозволяє йому зрозуміти, що доступно на ФД, і визначає, які функції відповідають його моделі для цифровізації та синхронізації. Після успішної асоціації та ініціації зв'язку з пов'язаними фізичними аналогами (потенційно декількома ФД), вони повинні підготуватися до отримання даних і розпочати оцифрування та синхронізацію між фізичною та цифровою сферами. Після цього етапу має розпочатися процес відображення та оцифровування, відповідаючи за синхронізацію стану ЦД із фізичним активом, уможливорюючи динамічне (потенційно в реальному часі) відображення змін у фізичному світі з часом.

Під час процесу синхронізації можуть виникати потенційні помилки, наприклад проблеми з мережею, затримки або відсутність інформації. Життєвий цикл цифрового близнюка повинен враховувати ці умови, і повинні бути встановлені механізми, щоб зовнішні додатки або спостерігачі отримували сповіщення під час переходів, особливо коли ЦД стикається з проблемами точного оцифрування свого фізичного аналога.

Вирішення проблем із синхронізацією знаменує фазу відновлення життєвого циклу, підтверджуючи дійсність оцифрованої копії. Важливо відзначити, що зв'язок із зовнішніми цифровими об'єктами має здійснюватися через цифрові канали зв'язку ЦД. Щоб увімкнути цю функціональність, внутрішнє керування життєвим циклом ЦД має бути взаємопов'язане та відкрито для цифрової сторони ЦД, забезпечуючи його доступність у цифровій сфері. Цей взаємозв'язок забезпечує бездоганний міст між фізичними та цифровими аспектами ЦД, підвищуючи його загальну ефективність і адаптивність. У певний момент ЦД може бути зупинено, перериваючи стан синхронізації, зберігаючи його програмний об'єкт активним і доступним. Зупинений стан знаменує завершення його життєвого циклу, вказуючи на припинення активних операцій.

Протягом усього життєвого циклу ЦД зберігає детальну пам'ять і журнали подій, підвищуючи відстежуваність і пропонуючи розуміння історичних подій, станів і взаємодій. Внутрішньою характеристикою життєвого циклу ЦД є динамічна адаптивність. У міру розвитку фізичного активу ЦД може коригувати свій стан, властивості та взаємодію, забезпечуючи стійке та актуальне цифрове представлення. Підсумовуючи, життєвий цикл ЦД постає як критичний аспект, який слід брати до уваги при розробці та описі архітектури та інфраструктури ЦД, а також стратегічного підходу до підтримки оперативного розгортання, моніторингу та управління близнюками. Визначені фази та характеристики забезпечують не лише безперебійне функціонування ЦД, але й його адаптивність, стійкість до помилок та оптимізацію ресурсів, що разом сприяє його ефективності в різноманітних операційних ландшафтах.

РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ В ПРОМИСЛОВІ ПРОЦЕСИ

3.1 Дослідження функціональних можливостей та еталонної архітектури зв'язку ЦД

3.1.1 Фундаментальна архітектура

У фундаментальній архітектурі увага зосереджена на ефективній ідентифікації характеристик ЦД з точки зору потоків взаємодії та специфікацій зв'язку при проектуванні, реалізації та розгортанні стандартизованих і сумісних ЦД. Ефективне функціонування ЦД у сучасному взаємопов'язаному світі значною мірою залежить як від їх безперебійного зв'язку між різними комунікаційними компонентами, так і від потоків взаємодії з урахуванням як фізичного, так і цифрового рівнів разом зі структурованою архітектурою, здатною формувати поведінку ЦД разом із цим життєвим циклом, щоб підтримувати його розгортання та моніторинг і забезпечити гнучку керованість у розподілених екосистемах. Схематичне зображення цього процесу представлено на рис.3.1.

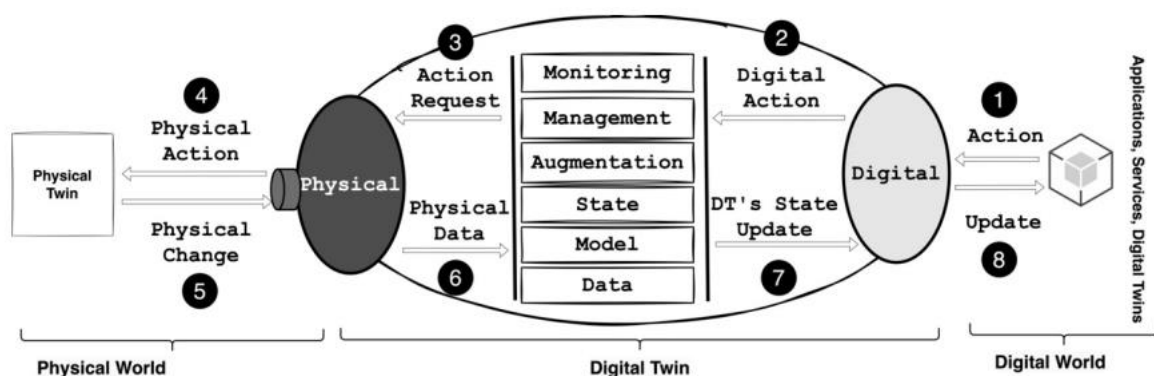


Рис.3.1 Високорівневе представлення кіберфізичних зв'язків і спілкування через Digital Twins

Комунікаційні рівні та компоненти ЦД, що охоплюють як фізичні, так і цифрові виміри ядра ЦД, формують основу для надійної взаємодії та співпраці,

зрештою створюючи бачення екосистеми взаємопов'язаних ЦД, які мають спільні архітектурні принципи, але які можна реалізувати та розгорнути в різних час виконання та розташування через континуум обчислень від краю до хмари. Підкреслюючи важливість структурованих каналів зв'язку, цей пункт нагадує основні особливості та передумови, важливі для проектування та побудови ефективної архітектури ЦД, що забезпечує взаємодію, гарантуючи, що ЦД можуть гармонійно співіснувати, обмінюватися критичними даними та сприяти ширшому робочому ландшафту. За своєю суттю, ЦД є складною організацією з декількома ключовими обов'язками та модулями, які разом забезпечують її багатогранні функції.

Модуль даних слугуватиме основоположним компонентом, який відповідає за обробку, розповсюдження, збір, обробку та зберігання інформації, отриманої з дзеркального фізичного активу. Він також повинен підтримувати поточний стан ЦД і зберігає історичний запис минулих станів, що включає реальні дані, такі як показання датчиків, стан обладнання та умови навколишнього середовища.

Модуль Компонент повинен формувати та втілювати суть ЦД, включаючи складну логіку для віддзеркалення та оцифровування цільових фізичних близнюків у точні цифрові копії. Він має підтримувати тісний зв'язок із модулем даних, використовуючи дані реального світу для створення детального цифрового представлення фізичного активу. Крім того, модуль моделі відповідає за обчислення стану нового ЦД на основі інформації, зібраної з фізичного світу та дизайну ЦД, що включає структуру, поведінку та атрибути фізичного активу.

Модуль стану відіграє ключову роль і повинен стежити за структуруванням поточного представлення ЦД як синхронізованого представлення його фізичного аналога. Він повинен взаємодіяти з моделлю для обчислень і фіксувати статус і стан близнюка як відображення взаємопов'язаного фізичного світу, відстежувати зміни та оновлення для забезпечення точного цифрового представлення. Крім того, модуль стану структурує та зберігає вичерпний список властивостей, подій, зв'язків і дій, доступних у близнюку протягом певного часу, підвищуючи взаємодію, надаючи загальну структуру для спільного використання кількох ЦД.

Модуль збільшення, зосереджений збільшенні адаптивності до ЦД, має дозволяти вдосконалення, модифікацію або розширення його можливостей з часом і має працювати пліч-о-пліч з моделлю та станом, щоб розширити характер і можливості цільового ЦД. Ця можливість адаптації включає додавання нових властивостей, зв'язків, поведінки або компонентів для підтримки синхронізації ЦД із змінними потребами.

Модуль управління повинен нести відповідальність за нагляд за життєвим циклом ЦД, включаючи створення, розгортання, роботу та виведення з експлуатації. Вони забезпечують бездоганну конфігурацію та інтеграцію в операційний контекст, одночасно керуючи взаємодією з іншими системами та службами.

Модуль моніторингу повинен відповідати за спостереження та оцінку продуктивності, здоров'я та поведінки ЦД, зосереджуючись на якості кіберфізичних відносин між ЦД та пов'язаними з ним фізичними близнюками. Він визначає проблеми, аномалії та можливості оптимізації, надаючи цінну інформацію про роботу ЦД та її вплив на фізичний актив.

Ці ключові компоненти разом утворюють розширену архітектурну мету, яка становить ЦД, поєднуючи фізичний і цифровий виміри, розширюючи можливості процесів прийняття рішень і надаючи безцінне розуміння для різних програм і галузей. Ці передбачувані модулі відіграють ключову роль у фізичних і цифрових комунікаціях, сприяючи реалізації кіберфізичних можливостей ЦД.

3.1.2 Взаємодія між ЦД та фізичним світом

Взаємодія з фізичним світом у сфері Інтернету речей (IoT) представляє багатогранний ландшафт, повний викликів і складнощів, які слід враховувати при створенні та визначенні цифрового близнюка. Одна з головних проблем пов'язана з різноманітністю пристроїв і систем, що входять до складу екосистеми IoT. Ці пристрої варіюються від простих датчиків, що збирають дані про навколишнє середовище, до складного промислового обладнання, яке керує складними

виробничими процесами. Кожен пристрій часто працює на основі своїх унікальних протоколів зв'язку, форматів даних та інтерфейсів, що ускладнює спроби інтегрувати їх у єдину цифрову структуру. Наприклад, розгортання розумного міста може включати датчики, що вимірюють температуру, вологість і якість повітря, кожен з яких використовує різні протоколи зв'язку, такі як Zigbee, LoRaWAN або Wi-Fi або рішення прикладного рівня, такі як MQTT, HTTP і CoAP. Узгодження цих розрізнених технологій для створення єдиного цифрового представлення вимагає ретельної оркестровки та стандартизації.

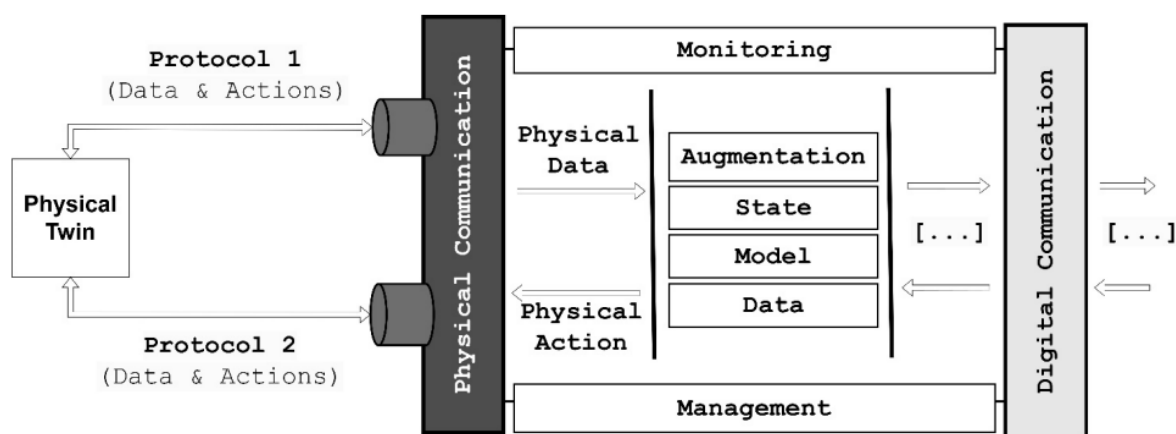


Рис.3.2 Фізична взаємодія між ЦД і фізичним світом

Збір і синхронізація даних у режимі реального часу створює ще одну серйозну проблему в контексті ЦД, керованих IoT. У середовищах, що характеризуються швидкими змінами та динамічними умовами, забезпечення того, щоб ЦД точно відображало стан свого фізичного аналога, стає першорядним.

Вирішуючи проблеми, пов'язані із взаємодією з фізичним світом у контексті IoT, організації можуть використовувати весь потенціал ЦД для стимулювання інновацій, ефективності та стійкості в епоху цифрових технологій. Ця фрагментація безпосередньо впливає на фізичний зв'язок ЦД, оскільки він взаємодіє з фізичними активами та датчиками, розподіленими в різних мережах IoT, здатність виявляти ці ресурси та отримувати доступ до них стає першорядною для його роботи. ЦД має включати структурований і модульний спосіб обробки

протоколів взаємодії та керування з фізичними двійниками (ФД) за допомогою різних протоколів і технологій, як показано на рис.3.2, щоб уникнути того, що ЦД може важко встановити з'єднання зі своїми фізичними аналогами, що призведе до зв'язку поломки, невідповідності даних і операційна неефективність. Взаємодія та зв'язок між ЦД та пов'язаним ФД має бути двонаправленим (якщо підтримується ФД), дозволяючи водночас як можливість зчитування зміни стану ФД, так і передачу дії фізичному аналогу для зміни статусу, запуску дій або змінити поведінку.

Крім того, фізична комунікаційна сторона архітектури ЦД має наглядати за відокремленням складності фізичного світу від ядра ЦД, яке має бути потенційно повторно використаним у різних екземплярах ЦД, пов'язаних з тим самим класом ФД, які використовують різні протоколи зв'язку або формат даних.

Розбиття фізичного каналу зв'язку ЦД на модульні частини має вирішальне значення. Цей підхід дає багато переваг, наприклад покращення гнучкості, масштабованості та зручності обслуговування. Коли фізичний канал зв'язку організований у модулі, кожен з яких обробляє різні завдання чи протоколи, ЦД може краще адаптуватися до різних потреб і ситуацій. Архітектура ЦД повинна забезпечувати модульність для взаємодії та зв'язку з ФД, дозволяючи повторне використання різних компонентів у кількох екземплярах-близнюках, розділення проблем у розробці та розгортанні разом із простотою прийняття різних протоколів, шаблонів зв'язку та форматів даних одночасно без втручання між активними суб'єктами.

Однією з головних проблем, коли мова заходить про ЦД та їх зв'язок із фізичним світом, особливо у сфері IoT, є розуміння того, як вони можуть знати, що знаходиться в їх фізичному аналогі, фізичному двійнику. В Інтернеті речей існує багато різних методів для пошуку та використання ресурсів і послуг, і це ускладнює для ЦД зрозуміти, що доступно в активі для оцифрування з точки зору властивостей, подій, дій і зв'язків. Як схематично зображено на рис.3.3, архітектура ЦД повинна підтримувати та дозволяти ЦД, щоб мати можливість виявляти цю інформацію, і це може відбуватися, взаємодіючи безпосередньо через протоколи

IoT, які нативно підтримують опис активів, також позначений як Physical Twin Description (PTD) і можливість виявлення (наприклад, CoAP), або за допомогою спеціальних конфігурацій, наданих ЦД, щоб допомогти йому знайти необхідну інформацію (наприклад, структурування тем MQTT, корисних для пошуку інформації, необхідної в ФД). Ця інформація включає такі речі, як властивості та дії ФД, і як цифровий близнюк може отримати до них доступ. По суті, опис ФД — це набір важливої інформації, яка допоможе ЦД розпочати процес цифровізації. Також у цьому випадку рівень фізичного зв'язку архітектури DT відповідає за відокремлення цього процесу виявлення від ядра ЦД, дозволяючи йому знати, що доступно на фізичній стороні, не піддаючись складності отримання необхідної інформації.

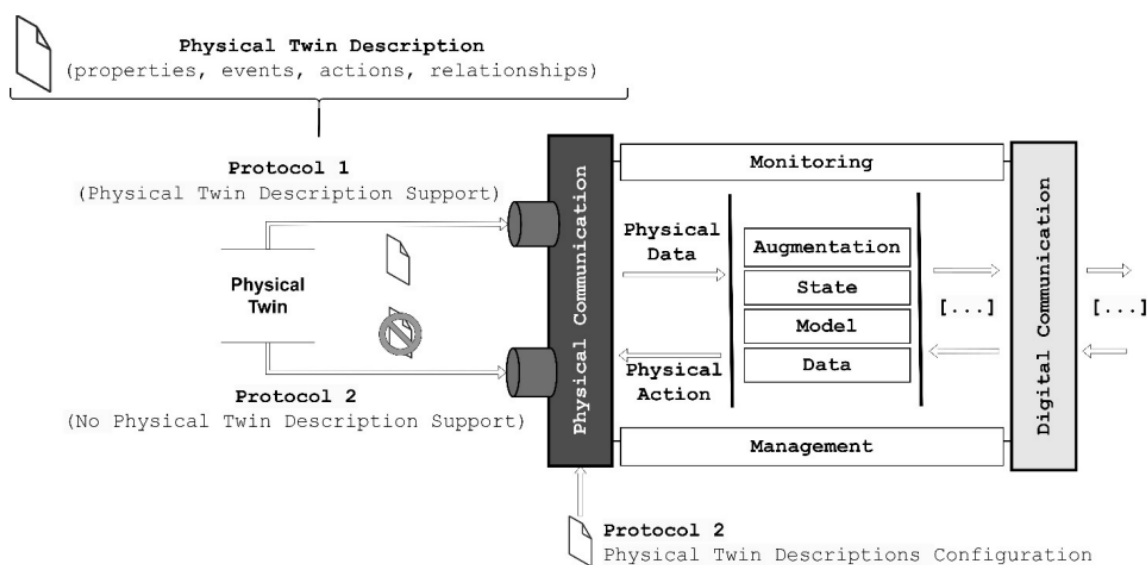


Рис.3.3 Відокремлення фізичної взаємодії від ядра ЦД фізичного двійника/опис активу

У ландшафті IoT інтеграція ЦД з фізичним рівнем представляє складну проблему, особливо щодо відокремлення основних функцій ЦД від тонкощів фізичних протоколів зв'язку. Після виявлення фізичних можливостей і ресурсів ядро ЦД має бути незалежним від цієї складності. Це вимагає, щоб фізичний інтерфейс або канал зв'язку ЦД приховував специфіку протоколів і замість цього зосереджувався виключно на описі фізичних можливостей пов'язаних об'єктів. Ця

абстракція має вирішальне значення для забезпечення сумісності та масштабованості, особливо коли ЦД відповідає за оцифрування кількох фізичних активів. Незалежно від базових протоколів зв'язку, які використовуються цими активами, ядро ЦД має спиратися на опис високого рівня, який залишається узгодженим на різних пристроях.

3.1.3 Цифровий зв'язок

Взаємодія з цифровим світом представляє кілька проблем і складнощів у створенні та визначенні архітектури ЦД, особливо щодо їх представлення для бездоганної взаємодії в цифровій екосистемі. Ключова проблема виникає через неоднорідність цифрових систем, кожна з яких використовує різні формати даних, протоколи зв'язку та платформи.

Модульність відіграє вирішальну роль у розробці архітектури ЦД і, зокрема, у створенні та визначенні цифрового каналу зв'язку ЦД, пропонуючи кілька ключових переваг, які підвищують гнучкість, масштабованість та зручність обслуговування. Архітектура ЦД повинна структурувати канал зв'язку на модульні компоненти, кожен з яких відповідає за певні функції або протоколи, ЦД повинні мати змогу більш ефективно адаптуватися до різноманітних вимог і середовищ. Наприклад, розглянемо ЦД, що працює в середовищі IoT, де йому потрібно взаємодіяти з кількома пристроями за допомогою різних протоколів зв'язку, таких як MQTT, CoAP і HTTP. Модулізуювши канал зв'язку, архітектура ЦД може включати окремі адаптери для кожного протоколу, що дозволяє безперебійно спілкуватися з різними пристроями без потреби в значних модифікаціях основної функціональності.

Крім того, модульність сприяє взаємодії, дозволяючи ЦД обмінюватися даними з широким спектром зовнішніх систем і служб. Кожен модульний компонент має бути розроблений відповідно до стандартизованих протоколів та інтерфейсів, сприяючи безперебійній інтеграції зі сторонніми додатками та платформами. По суті, модульність цифрового каналу зв'язку ЦД забезпечує

гнучкість, масштабованість, зручність обслуговування та взаємодію, що робить її фундаментальним аспектом її розробки та реалізації.

Архітектури ЦД повинні мати доступ до структурованого стану ЦД, доступного через цифровий зв'язок, з метою забезпечення уніфікованого, сумісного та потенційно стандартизованого представлення можливостей ЦД, забезпечуючи спрощену інтеграцію із зовнішніми системами, програмами та послугами. Відображаючи свій стан у структурованому форматі, ЦД може повідомляти про свій статус, властивості та функції в універсально зрозумілий спосіб, незалежно від протоколів або технологій, що лежать в основі зв'язку, і підтримуючи одночасно кілька протоколів і технологій зв'язку.

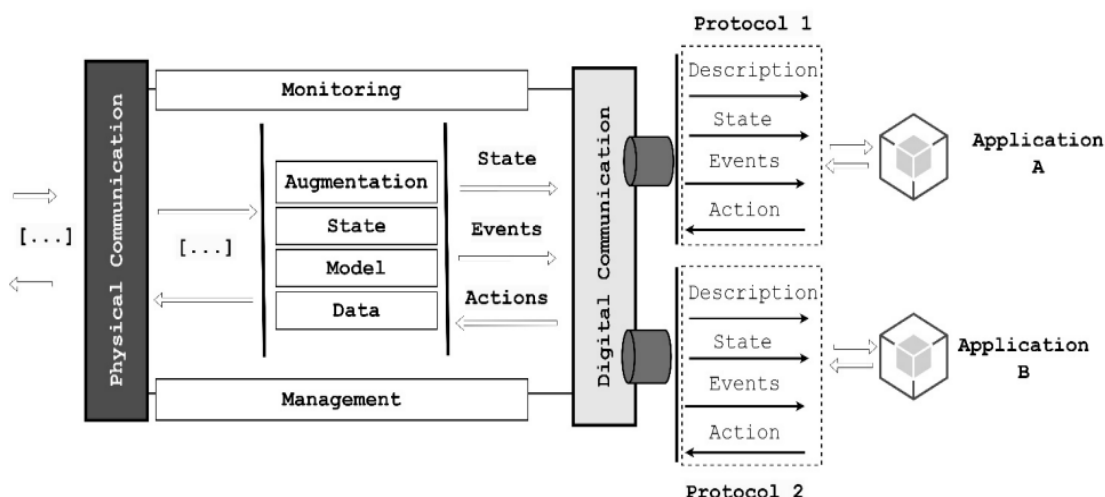


Рис.3.4 Представлення ЦД в цифровому просторі через його опис, поточний стан і події разом із підтримкою дій

Як показано на рис.3.4, архітектура ЦД має розкривати поточний стан ЦД як фундаментальну функціональність близнюка, відповідального за оцифровування ФД і забезпечення його цифрової копії та представлення в кіберпросторі. Крім того, структурований стан ЦД підвищує масштабованість і гнучкість екосистеми ЦД. Оскільки нові пристрої, датчики або функції додаються до ЦД, їх можна легко включити в його представлення стану, не вимагаючи значних модифікацій рівня зв'язку. Ця масштабованість гарантує, що ЦД залишається адаптованим до

мінливих вимог і може враховувати зміни в своєму середовищі або операційному контексті. Крім того, структурований стан ЦД підтримує ефективний моніторинг, контроль і керування примірником ЦД. Зовнішні системи можуть запитувати стан ЦД, щоб отримати інформацію про його статус у реальному часі, отримати та проаналізувати історичні дані або запустити певні дії на основі попередньо визначених умов. Ця можливість забезпечує проактивне прийняття рішень, прогнозне технічне обслуговування та оптимізацію продуктивності ЦД, що призводить до підвищення ефективності та продуктивності. Разом зі станом архітектура ЦД також повинна відображати на цифровій стороні події, створені близнюком і пов'язані, наприклад, із змінами його контексту та виявленими аномаліями. Оголошення потенційних генерованих подій має міститися в описі стану як частина природи та структури самого ЦД, тоді як генерація має передаватися через інший шаблон взаємодії. Необхідно надати опис екземпляра ЦД, щоб описати природу DT, активні внутрішні компоненти та контекстну інформацію, таку як поточна версія програмного забезпечення або середовище виконання, на якому виконується двійник, і він працює. Додатковим основним аспектом, який має бути прийнятий архітектурою ЦД у її можливостях цифрового зв'язку, є можливість отримувати цифрові дії, якими керує близнюк і потенційно пересилає їх у фізичний світ, щоб ініціювати певну поведінку та активізувати середовище.

Підсумовуючи, наявність структурованого та сумісного стану ЦД, доступного через рівень цифрового зв'язку, має важливе значення для полегшення безперебійної інтеграції, сприяння взаємодії, підвищення масштабованості та гнучкості, а також забезпечення ефективного моніторингу та керування примірниками ЦД.

3.2 Процес оцифровування

Процес оцифрування ЦД, також відомий як відображення або затінення, включає кілька етапів, щоб забезпечити точне представлення стану фізичного

активу в цифровій сфері та забезпечити двонаправлений зв'язок між фізичним і цифровим світами через модель ЦД.

Процес оновлення стану ЦД з його фізичного аналога включає кілька кроків, які слід враховувати при розробці та реалізації архітектури програмного забезпечення ЦД. По-перше, фіксуються будь-які відповідні зміни в стані фізичного активу.

Потім ці записані події передаються в модель цифрового близнюка, де вони інтерпретуються та обробляються. Модель покладається на інформацію, надану в Описі фізичних активів, щоб зрозуміти важливість цих подій та їхні наслідки для ЦД. Нарешті, на основі інформації, отриманої з фізичного світу та логіки, визначеної в моделі ЦД, стан цифрового двійника відповідно оновлюється. Це оновлення може передбачати зміну існуючих властивостей, створення нових або ініціювання подій у ЦД. Наприклад, у випадку системи «розумний дім» зміна температури, яка визначається датчиком термостата, може спонукати ЦД відповідно налаштувати параметри HVAC.

Потік 1 – від фізичного до цифрового:

T0- Синхронізований запуск. На початку як ФД, так і ЦД синхронізуються, а їхні стани вирівнюються відповідно до поточної моделі ЦД та попередніх взаємодій та обміну даними.

T1- Фіксуйте зміни фізичного стану. Процес починається з фіксації будь-яких відповідних змін у стані фізичного активу. Це включає виявлення таких подій, як показання датчиків, зміни стану обладнання або коливання середовища. На цьому етапі стан ФД перейшов з C0 до C1 але стан ЦД все ще знаходиться в попередньому стані C0.

T2- Поширення до моделі ЦД. Зафіксовані події потім поширюються в модель ЦД, де вони інтерпретуються та обробляються. Модель ЦД використовує інформацію, надану в описі ФД, щоб зрозуміти важливість цих подій і визначити їхній вплив на стан цифрового близнюка. На цьому кроці ЦД було повідомлено через фізичний канал зв'язку про варіацію ФД і розпочато процес оцифрування для обчислення нового стану, але стани все ще не узгоджені з C1 на ФД і C0 на ЦД.

ТЗ- Оновлення стану ЦД. На основі інформації, отриманої з фізичного світу, і логіки, визначеної в моделі ЦД, стан ЦД оновлюється відповідно. Це оновлення може передбачати зміну існуючих властивостей, створення нових або ініціювання подій у ЦД. Нарешті, на цьому кроці два стани ФД і ЦД синхронізуються та вирівнюються відповідно до моделі ЦД наС1.

Взаємодія та оцифрування між ФД і ЦД охоплює не тільки потік інформації з фізичної сфери в цифрову, але й поширюється на дії, що походять із цифрового світу. Наприклад, програми можуть ініціювати дії в межах ЦД, які вимагають перевірки та подальшого пересилання до ФД для виконання. Будь-які зміни, що виникають у ФД через ці дії, потім відображаються в ЦД, дотримуючись кроків, описаних раніше в Потоці 1. Ця двонаправлена взаємодія гарантує, що ЦД залишається синхронізованим зі своїм фізичним аналогом, полегшуючи моніторинг, контроль і прийняття рішень у реальному часі - створення в обох доменах.

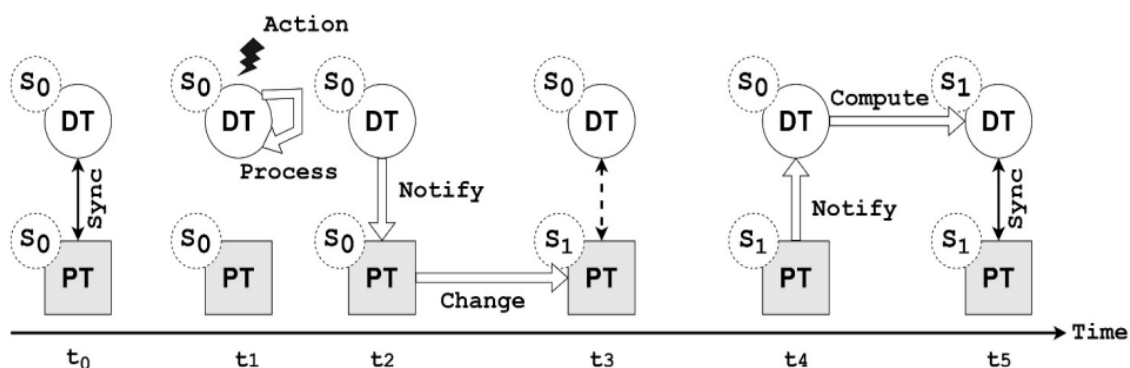


Рис. 3.5 Етапи, пов'язані з процесом кіберфізичної цифровізації ЦД від цифрового до фізичного

У Потоці 2 взаємодія від цифрової до фізичної сфери розгортається наступним чином. На початку і ФД, і ЦД починаються в синхронізованих станах, узгоджених відповідно до поточної моделі ЦД і попередніх взаємодій. Після цього ЦД отримує запит на дію від цифрового світу. Наприклад, програма розумного дому може наказати ЦД регулювати температуру термостата. Ця дія проходить перевірку за допомогою моделі ЦД, щоб забезпечити сумісність із можливостями

та обмеженнями фізичного активу, як зазначено в описі ФД. Після перевірки дія передається від ЦД до фізичного активу. Цей процес передбачає перетворення цифрової команди у формат, зрозумілий фізичній системі, і передачу її через відповідний канал зв'язку. Згодом фізичний актив виконує запитану дію, що потенційно може призвести до змін його стану, наприклад налаштування параметрів або активації компонентів.

Після цього записані події передаються в модель ЦД (ЦДМ) для інтерпретації та обробки. Ця інформація, отримана з опису ФД, спрямовує ЦД до розуміння наслідків змін фізичного активу для його стану. Після цього стан ЦД оновлюється на основі отриманої інформації та логіки, визначеної в моделі ЦД. Це оновлення вирівнює стан ФД із станом ЦД, забезпечуючи синхронізацію відповідно до моделі ЦД. Наприклад, якщо термостат розумного будинку регулює температуру, стан ЦД буде оновлено, щоб відобразити цю зміну, забезпечуючи узгодження між цифровим і фізичним доменами. Можна визначити наступні кроки з відповідними діями:

Потік 2 – від цифрового до фізичного.

T0- Синхронізований запуск. На початку як ФД, так і ЦД синхронізуються, а їхні стани вирівнюються відповідно до поточної моделі ЦД та попередніх взаємодій та обміну даними.

T1- Запит цифрової дії. На цьому кроці ЦД отримує запит на дію від цифрового світу. Це може бути команда для виконання певного завдання, налаштування параметра або ініціювання процесу. Отримана дія має бути підтверджена моделлю ЦД, щоб переконатися в її здійсненності та сумісності з фізичним активом. Модель перевіряє, чи відповідає запитана дія можливостям і обмеженням фізичного активу, як описано в описі ФД.

T2- Розповсюдження на фізичний актив. Після перевірки дія поширюється від ЦД до фізичного активу. Це може передбачати перетворення цифрової команди у формат, зрозумілий фізичній системі, і її передачу через відповідний канал зв'язку.

T3- Виконання за фізичним активом. Нарешті, фізичний актив виконує

запитану дію на основі отриманої команди. Ця дія може призвести до змін у фізичному стані, таких як коригування робочих параметрів, активація чи дезактивація компонентів або ініціювання процесу. На цьому етапі стан ФД перейшов з C0 до C1, але стан ЦД все ще знаходиться в попередньому стані C0.

T4- Поширення до моделі ЦД. Зафіксовані події потім поширюються в модель ЦД, де вони інтерпретуються та обробляються. Модель ЦД використовує інформацію, надану в описі ФТ, щоб зрозуміти важливість цих подій і визначити їхній вплив на стан цифрового близнюка. На цьому кроці ЦД було повідомлено через фізичний канал зв'язку про варіацію ФД і розпочато процес оцифрування для обчислення нового стану, але стани все ще не узгоджені з C1 на ФД і C0 на ЦД.

T5- Оновити стан ЦД. На основі інформації, отриманої з фізичного світу, і логіки, визначеної в моделі ЦД, стан ЦД оновлюється відповідно. Це оновлення може передбачати зміну існуючих властивостей, створення нових або ініціювання подій у ЦД. Нарешті, на цьому кроці два стани ФД і ЦД синхронізуються та вирівнюються відповідно до моделі ЦД на C1.

Протягом усього процесу оцифрування модель ЦД повинна служити важливим посередником, сприяючи безперебійному зв'язку та синхронізації між фізичною та цифровою сферами. Завдяки точному захопленню та обробці інформації з фізичного світу та перекладу цифрових команд на фізичні дії цифровий двійник забезпечує ефективний моніторинг, контроль і оптимізацію фізичних активів у режимі реального часу.

3.3 Аналіз моделей архітектури цифрового близнюка

Прийняття ЦД часто передбачає критичні рішення щодо архітектурного підходу. Організації можуть вибрати розподілені або централізовані моделі на основі таких факторів, як складність системи, вимоги до масштабованості та керування даними. Розподілені підходи дозволяють розподіляти обчислювальне навантаження між декількома вузлами, сприяючи стійкості та масштабованості, тоді як централізовані підходи зосереджують обробку та контроль в межах

окремого об'єкта, оптимізуючи управління та керування. Ці дві моделі представлено на рис.3.6.

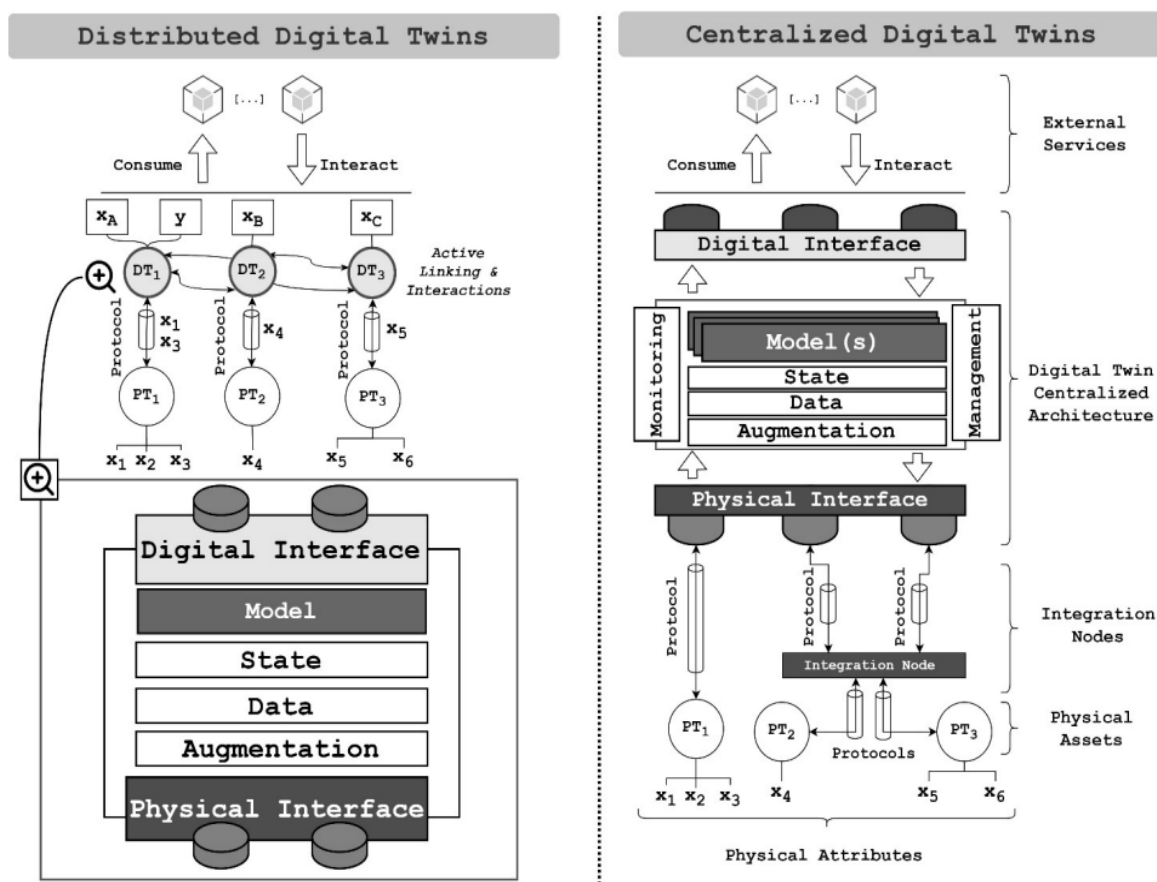


Рис.3.6 Схематичне зображення децентралізованої та централізованої архітектури ЦД і підходів до реалізації

При реалізації ЦД архітектурні рішення відіграють вирішальну роль у формуванні можливостей і масштабованості системи. Організації мають можливість гнучко вибирати між розподіленими та централізованими моделями на основі їхніх конкретних потреб і вимог домену програми або цільового сценарію використання. Крім того, навіть якщо будуть доступні різні реалізації як для централізованих, так і для децентралізованих рішень, взаємодія між ними та спільне використання загальних принципів і компонентів має бути спільним принципом через різні розгортання та програми, керовані ЦД.

Розподілені архітектури, такі як реалізації на основі мікросервісів,

розподіляють обчислювальні завдання між кількома незалежними вузлами. Цей підхід пропонує переваги з точки зору стійкості, масштабованості та відмовостійкості. Кожен екземпляр ЦД повинен функціонувати як незалежний мікросервіс і програмний компонент, відповідальний за керування власними операціями та взаємодіями та оцифровування еталонного ФД або групи ФД.

Наприклад, на виробничому підприємстві централізована система ЦД може контролювати й оптимізувати роботу різних виробничих ліній і обладнання. З архітектурної точки зору взаємодія та обов'язки в централізованих архітектурах ЦД мають бути такими:

Фізичний інтерфейс. Централізовані архітектури та реалізація ЦД повинні мати уніфікований ФД, що оптимізує процес інтеграції з ФД, дозволяючи спільне використання різних фізичних адаптерів для забезпечення зв'язку через різні протоколи та формати даних.

Модель. Різні моделі ЦД і ЦДМ повинні підтримуватися архітектурою в рамках одного централізованого рішення, що дозволяє реалізувати різні поведінки близнюків і їх відображення та оцифровування пов'язаних ФД, а також забезпечувати узгодженість і стандартизацію в усіх екземплярах ЦД.

Зберігання. Централізована система зберігання повинна пропонувати спрощене керування даними та легкий доступ до консолідованого пулу даних, що забезпечує структурований і контрольований доступ до збережених даних різних керованих двійників у межах архітектури.

Статус. Центральний об'єкт повинен підтримувати вичерпне та доступне представлення всіх DT для всіх примірників ЦД, якими керує рішення, забезпечуючи узгодженість і синхронізацію.

Цифровий інтерфейс. В архітектурі має бути доступний єдиний уніфікований DI з метою спрощення інтеграції із зовнішніми програмами та системами за допомогою різних цифрових адаптерів, які спільно використовуються різними екземплярами ЦД, що працюють на платформі.

Інтерфейси управління та моніторингу. Централізовані модулі моніторингу керування мають забезпечувати цілісне уявлення про всі запущені екземпляри ЦД

з урахуванням їхньої продуктивності та конфігурації, що полегшує керування та оптимізацію.

Незважаючи на відмінності в архітектурних підходах, дотримання загальних принципів, вимог і компонентів проекту є важливим для забезпечення сумісності між рішеннями, реалізаціями та розгортаннями. Незалежно від того, чи реалізовано ЦД як розподілену архітектуру мікросервісів чи централізовану монолітну систему, воно все одно має відповідати стандартизованим інтерфейсам, форматам даних і протоколам зв'язку. Ця узгодженість забезпечує бездоганну інтеграцію та взаємодію між різними примірниками ЦД, дозволяючи їм спілкуватися, обмінюватися даними та ефективно співпрацювати. Дотримуючись стандартизованої архітектури та принципів плану, організації можуть розгортати ЦД, забезпечуючи масштабованість, гнучкість і взаємодію в різних сценаріях використання та середовищах. Незалежно від того, розподілений чи централізований, двійник може використовувати загальні рамки та стандарти, щоб повністю розкрити свій потенціал у просуванні інновацій та ефективності в різних галузях і сферах.

3.4 Опис циклу проєктування цифрового двійника

Цифровий двійник є важливою концепцією в дослідженнях і на практиці. Незважаючи на увагу, практичних прикладів ЦД у проєктуванні та виробництві продукту мало. Однією з причин цього є недостатнє розуміння переваг. Організації стикаються з проблемами в прогнозуванні того, чи принесе застосування ЦД вигоду. Однак реалістичні очікування вигоди та якісне розуміння еволюції вигоди є важливими для успішного застосування ЦД. При цьому точність, як показник, є вирішальним фактором, що впливає на витрати та потенціал економії. Термін «точність» означає ступінь того, наскільки точно фізична реальність представлена у віртуальному світі. Щоб досягти переваг через впровадження ЦД, точність має бути розглянута вже на стадіях проєктування та розробки концепції. У більшості наукових публікацій відмічається, що ЦД слід моделювати з високою точністю.

Однак висока точність ЦД не завжди необхідна для практичного використання, оскільки вища точність призводить до вищих витрат. Тому визначення відповідного рівня точності для ЦД має вирішальне значення.

На рис.3.7 [7] представлено типовий розвиток витрат і потенціалу заощаджень як функції точності ЦД, зосереджуючись на відносних співвідношеннях замість абсолютних рівнянь.

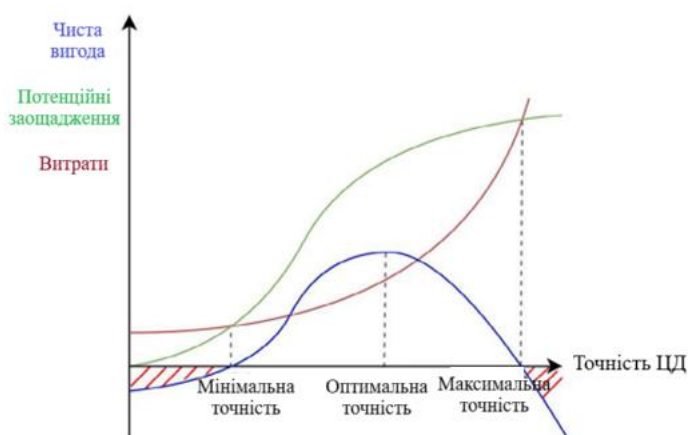


Рис.3.7 Співвідношення точності ЦД і переваг

Крива витрат перетинає ординату вище початку координат, оскільки початкові інвестиційні витрати вже понесені для реалізації ЦД. Це, наприклад, інвестиційні витрати на обладнання, програмне забезпечення та персонал. Оскільки ці витрати створюють необхідну основу для реалізації ЦД, вони не залежать від фактичної точності ЦД. Натомість вони значною мірою залежать від рівня зрілості цифровізації організації. Експоненціальна прогресія кривої витрат заснована на аналогії з витратами складності. Чим вища складність, тобто точність, тим вищі витрати на моделювання, обчислення, модифікацію та інтерпретацію результатів. Інструменти та ноу-хау вже здебільшого доступні на низькому рівні точності, тоді як зі збільшенням точності зростає розрив між наявним і необхідним досвідом. У результаті зусилля для досягнення вищої точності зростають із вищими абсолютними рівнями точності. Ефект, в принципі, протилежний ефекту кривої навчання, коли витрати зменшуються зі збільшенням досвіду. Крім того, реалізація

ЦД з надвисокими, майже атомарними рівнями точності вимагає індивідуального спеціалізованого програмного забезпечення або дорогих комбінацій багатьох програмних засобів. Інша аналогія — прогресування правила десяти. Чим пізніше в процесі розробки стає необхідною зміна, тим дорожче її впровадження, оскільки складність і залежності всієї системи з часом продовжують зростати. Цей зв'язок також можна перенести на точність ЦД. Адаптація та підтримка моделі з низькою точністю все ще є значно більш сприятливими, ніж адаптація моделі з високою точністю. Зусилля для оцінки та коригування невеликої кількості параметрів з низькою точністю є меншими, ніж коригування складного набору параметрів високої точності.

Що стосується потенціалу заощаджень, типова тенденція слідує за s-кривою. Спочатку збільшення знань за рахунок підвищення потенціалу або вирішення проблеми за допомогою ЦД є відносно низьким. Модель з низьким рівнем точності приносить мало нових ідей і, отже, мало переваг. На цьому етапі більшість ідей можна отримати за допомогою методів, відмінних від використання ЦД. Таким чином, на цьому етапі витрати перевищують валові вигоди. Таким чином, ЦД забезпечує негативну чисту вигоду, рівну збитку. Однак, вище певної мінімальної точності, потенціал заощаджень перевищує витрати, дозволяючи кривій чистої вигоди вперше стати позитивною. Цей перехід відбувається, оскільки зі збільшенням точності знання у формі нових потенціалів розкриваються та розглядаються ЦД. На даний момент результати, досягнуті за допомогою ЦД, вперше забезпечують значні переваги. Нахил кривої потенціалу заощаджень досягає максимуму в точці опори, яка залежить від цільового використання ЦД. З певного рівня підвищення точності ЦД більше не збільшує потенціал заощаджень. Прогресія є асимптотичною. Якщо, наприклад, користувач хоче збільшити використання ресурсів шляхом застосування ЦД, воно не може перевищувати 100%, навіть якщо використовується атомарна точність ЦД, яка відображає всі властивості та параметри до найглибших деталей. Потенціал економії більше не залежить від вірності з точки, де вона досягає свого асимптотичного значення. Натомість витрати домінують через експоненціальний курс після критичної

максимальної точності. У результаті чиста вигода стає від'ємною, як це відбувається, коли точність надто низька. Таким чином, застосування ЦД з метою, описаною потенціалом економії, більше не є економічно вигідним. З огляду на перспективу чистої вигоди, оптимум знаходиться десь між мінімальною та максимальною точністю. Важливо підкреслити, що оптимум залежить від передбачуваного випадку використання і тому не може бути визначений у загальному вигляді. Кінцева форма кривих витрат і вигод індивідуальна для кожного випадку використання ЦД. Таким чином, рис.3.7 показує лише типову, зразкову криву, характерну для ЦД.

Актуальним є розробка універсального процесу для виробничих організацій, який можна застосувати до кількох проблемних контекстів, тобто випадків використання, де потрібно розробити точність ЦД, щоб забезпечити максимальну вигоду від впровадження цього рішення. Процес проектування ЦД, складається з трьох етапів: цільове встановлення ЦД (1), концептуалізація ЦД (2) і використання ЦД (3). Етап визначення точності слід реалізовувати під час процесу проектування ЦД, і він підтримується на етапі концептуалізації.

На початку проекту ЦД дуже важливо визначити конкретні цілі використання ЦД. Узгодити, що ЦД є відповідним рішенням для вирішення проблеми або використання потенціалу. Оскільки вимоги до точності можуть відрізнятися серед зацікавлених сторін, ці цілі мають бути узгоджені з усіма зацікавленими сторонами проекту. Отже, оптимальна точність ЦД безпосередньо залежить від спільної мети. Зокрема, визначення та залучення всіх відповідних зацікавлених сторін наразі недостатньо запроваджено на практиці. Або зацікавлені сторони не залучені взагалі, або недостатньо залучені до визначення мети та ініціалізації проекту. Інша проблема полягає в тому, що цілі визначені нечітко. Тому особливо важливо визначити конкретні ключові показники ефективності (KPI) (цільові зміни), які можна використовувати для вимірювання бажаних покращень. Вони впливають із загальних цілей: якість, вартість, час, стійкість і гнучкість.

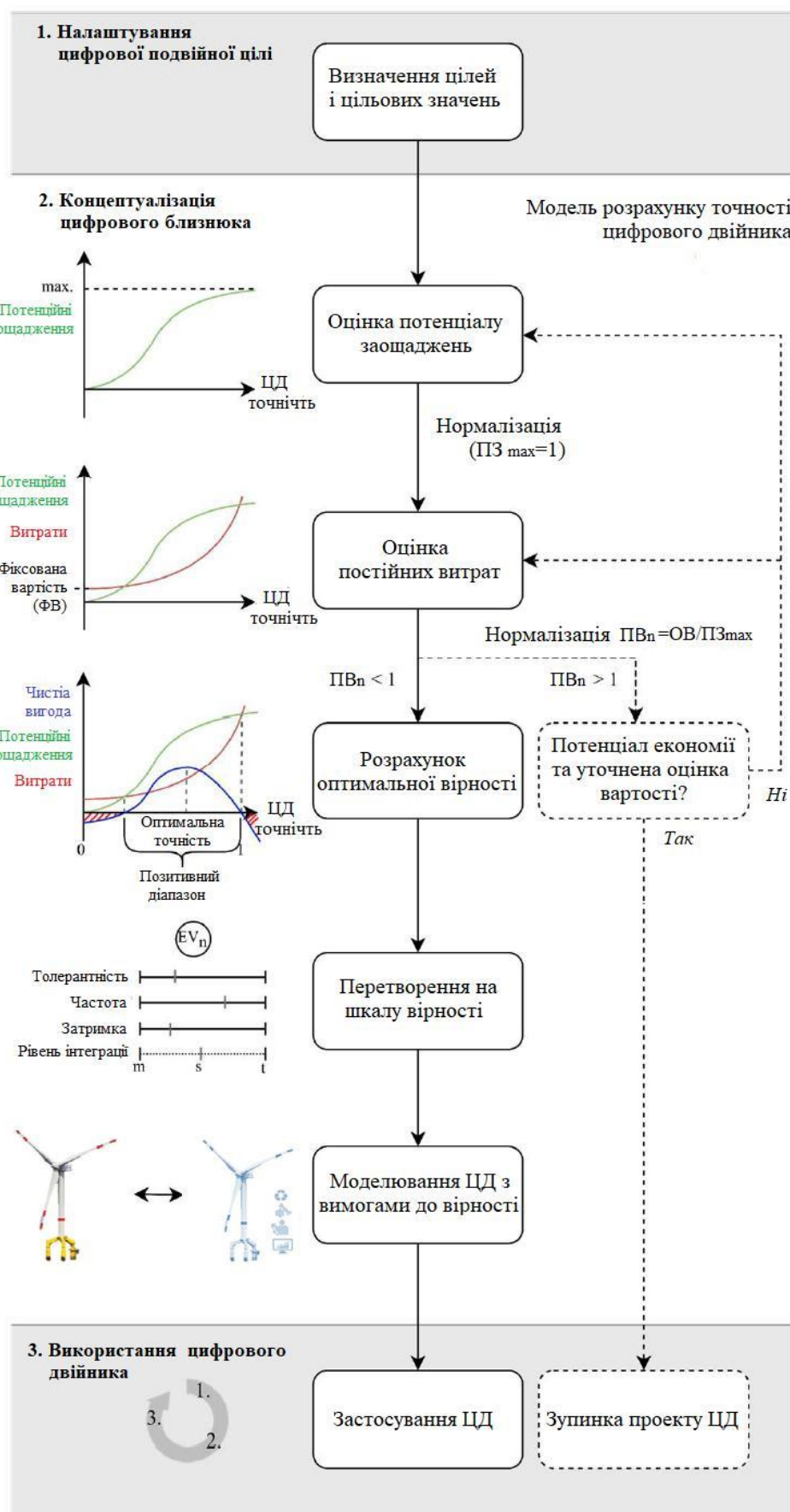


Рис.3.8 Цикл проектування ЦД з оцінкою рівня точності на етапі концептуалізації

Оптимальна точність для ЦД повинна бути розрахована залежно від цільового використання. Цей крок складається з п'яти підетапів:

1. оцінка потенціалу економії;
2. оцінка вартості;
3. обчислення оптимальної точності;
4. перетворення на шкалу точності ЦД;
5. моделювання ЦД з вимогами до точності.

Оцінка потенціалу заощаджень.

Дивлячись на криву потенційних заощаджень (ПЗ), вона визначається її асимптотикою. Значення асимптоти змінюється залежно від мети. Він характеризує максимальний потенціал заощаджень (ПЗмакс), які можуть бути досягнуті в залежності від попередньо визначених цілей. Через низьку зрілість ЦД на практиці та труднощі вимірювання переваг, наразі бракує емпіричних даних для проведення оцінки ПЗмакс. Отже, необхідно оцінити потенціал заощаджень, якого можна досягти шляхом впливу на бажану ціль. Максимально досяжний потенціал заощаджень обмежений технічними, організаційними чи соціальними обмеженнями. Наприклад, використання машини не може перевищувати 100% часу. Грошова сума, яка отримана як оцінка для ПЗмакс потім нормалізується та встановлюється рівним 1. Цей крок є важливим для наступного розрахунку оптимальної точності.

Оцінка постійних витрат.

Далі оцінюються витрати на досягнення бажаних змін за допомогою ЦД. Витрати характеризуються експоненціальним ходом. На цьому кроці для підготовки наступного розрахунку потрібна лише оцінка постійних витрат (ПВ). ПВ – це, наприклад, необхідні інвестиції в персонал, обладнання та програмне забезпечення. Характерна початкова точка ПВ кривої витрат позначає перетинок з ординатою та представляє основні інвестиції, необхідні для використання ЦД. Якщо ПВ більше ПЗмакс, може знадобитися переоцінити потенціал економії та витрати. Додатковий потенціал оптимізації можна розкрити, визначивши подальші сценарії застосування, які збільшують потенціал економії або зменшують витрати.

Якщо після повторної оцінки ПВ залишається більшим за ПЗмакс, проект ЦД слід зупинити, оскільки постійні витрати вже перевищують максимально досяжний потенціал економії. В іншому випадку будуть чисті втрати, навіть якщо не буде понесено додаткових витрат на моделювання з відповідною точністю. Як показано на рис.3.8, ПВ нормується на основі ПЗмаксі тому має бути менше 1.

Для цього кроку були визначені математичні функції, які представляють хід якісно визначеного кривої вигоди цифрових двійників в нормалізованому інтервалі $[0;1]$. Рівень точності 0 означає, що ще не існує віртуальної моделі, тоді як 1 означає, що всі характеристики та властивості фізичної реальності відображені з найвищим можливим рівнем деталізації. Для кількісного розрахунку оптимальної точності потрібні математичні функції. Нижче наведено функції:

1. Потенціал економії.

$$f(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{x-1}\right)^{-\alpha}} \quad (3.1)$$

2. Витрати:

$$g(x) = x^\beta + FC \quad (3.2)$$

3. Чиста вигода:

$$n(x) = f(x) - g(x) \quad (3.3)$$

Параметри α і β впливають на крутизну кривих у визначеному інтервалі $[0;1]$. Ця характеристика залежить від рівня зрілості ЦД організації. Чим менше досвіду та ноу-хау в організації, тим більшого потенціалу економії можна досягти за допомогою ЦД з низькою точністю. Таким чином, крутизна в цьому випадку буде досить високою. Однак крива витрат має протилежну поведінку: чим нижчий рівень зрілості, тим крутіша крива витрат, оскільки, наприклад, досвід, ноу-хау та моделі ще не доступні та все ще повинні бути створені. Це може бути через те, що доступний досвід і ноу-хау в організації зменшуються зі збільшенням точності, тобто збільшенням складності.

За оптимальної точності чиста вигода є максимальною. Іншими відповідними

точками є точки перетину кривої потенційних заощаджень $f(x)$ і кривої витрат $g(x)$, відповідно нулі результуючої кривої вигоди $p(x)$. Вони вказують на мінімальну та максимальну точність, коли користь є позитивною, тобто межі, за яких застосування ЦД є розумним для визначеної мети. Цей діапазон точності також називається позитивним діапазоном. Окрім позитивного діапазону, основним результатом цього кроку є оптимальна точність для даного випадку використання, яка є числовим показником вірності від 0 до 1. Існує конкретна оптимальна точність для кожної можливої мети. Таким чином, необхідна точність, ймовірно, змінюватиметься з часом у міру розвитку сценаріїв застосування ЦД. Отже, точність ЦД повинна бути перерахована, коли змінюються цільові цілі або оцінки потенційних заощаджень або постійних витрат.

В подальшому оцінка повинна бути перетворена в окремі виміри точності ЦД. Точність ЦД складається з таких чотирьох параметрів: толерантність, частота, затримка та рівень інтеграції. Для кожного відповідного EV необхідно вказати чотири виміри. Обмеження масштабу відповідного виміру залежать від конкретного випадку використання та, отже, відрізняються залежно від програми. Наприклад, у деяких випадках використання 0,1 мм є низьким допуском, в інших сценаріях це високий допуск. Тому на цьому етапі для кожної елементарної змінної необхідно визначити мінімуми та максимуми для кожного виміру. Потім вони нормалізуються для представлення масштабу $[0;1]$. Тут рівень точності 0 представляє найгірше можливе значення, тоді як рівень точності 1 представляє найкраще можливе значення. Припускаючи, що всі чотири виміри однаково зважені, моделювання Монте-Карло використовується для пошуку комбінацій, які досягають розрахованого оптимального показника точності ЦД, оскільки можливі декілька комбінацій. Виконуючи перевірку правдоподібності, потрібно вибрати відповідну комбінацію, яка є максимально легко реалізуємою на практиці, наскільки це можливо, на основі всіх відомих обмежень.

3.5 Метод впровадження цифрових двійників в промислові процеси

Незважаючи на прогрес у розробці та моделюванні цифрових двійників у виробництві, все ще бракує методологічної бази для їх практичного впровадження. Багато з представлених фреймворків і моделей тестуються в контрольованому або змодельованому середовищі без чітких вказівок щодо впровадження в реальних виробничих середовищах.

У цьому розділі представлено підхід до впровадження ЦД у виробництво. Метод розділений на три модулі відповідно до трьох основних рівнів концепції цифрового близнюка (фізичного, віртуального та рівня з'єднання), кожен з яких підтримує технічну реалізацію одного з рівнів моделі. Цей підхід організовує керівні принципи проектування в логічному та оперативному порядку. Для візуалізації представлено модель бізнес-процесу та нотація (BPMN). Цей тип нотації обраний, оскільки це широко використовуваний тип нотації в промисловості.

Візуалізація методичного підходу представлена на рисунку 3.9. Модуль I – Фізичний рівень конфігурації. У першому модулі визначаються основні умови. Це включає в себе визначення потоку цінностей і визначення варіанту використання в управлінні потоком створення цінності (УПСЦ). У межах двох кроків визначаються фізичні системні межі потоку цінностей. Згодом визначається межа щодо вимог до даних на основі варіанту використання. Виходячи з цього, має місце введення вимог до даних. Тут визначено конкретні точки даних для кожного етапу процесу, щоб забезпечити постійний збір і обробку даних. Матриця вимог до даних підтримує ідентифікацію та призначення точок даних. Слідом за визначення конкретних точок даних перевіряє, які з них уже застосовуються в різних ІТ-системах або потребують впровадження. Результатом є повна матриця вимог до даних яка надає огляд відсутніх точок даних. Нарешті, реалізація відсутніх точок даних робиться для заповнення бази даних і забезпечення повного уявлення про потік створення цінностей.

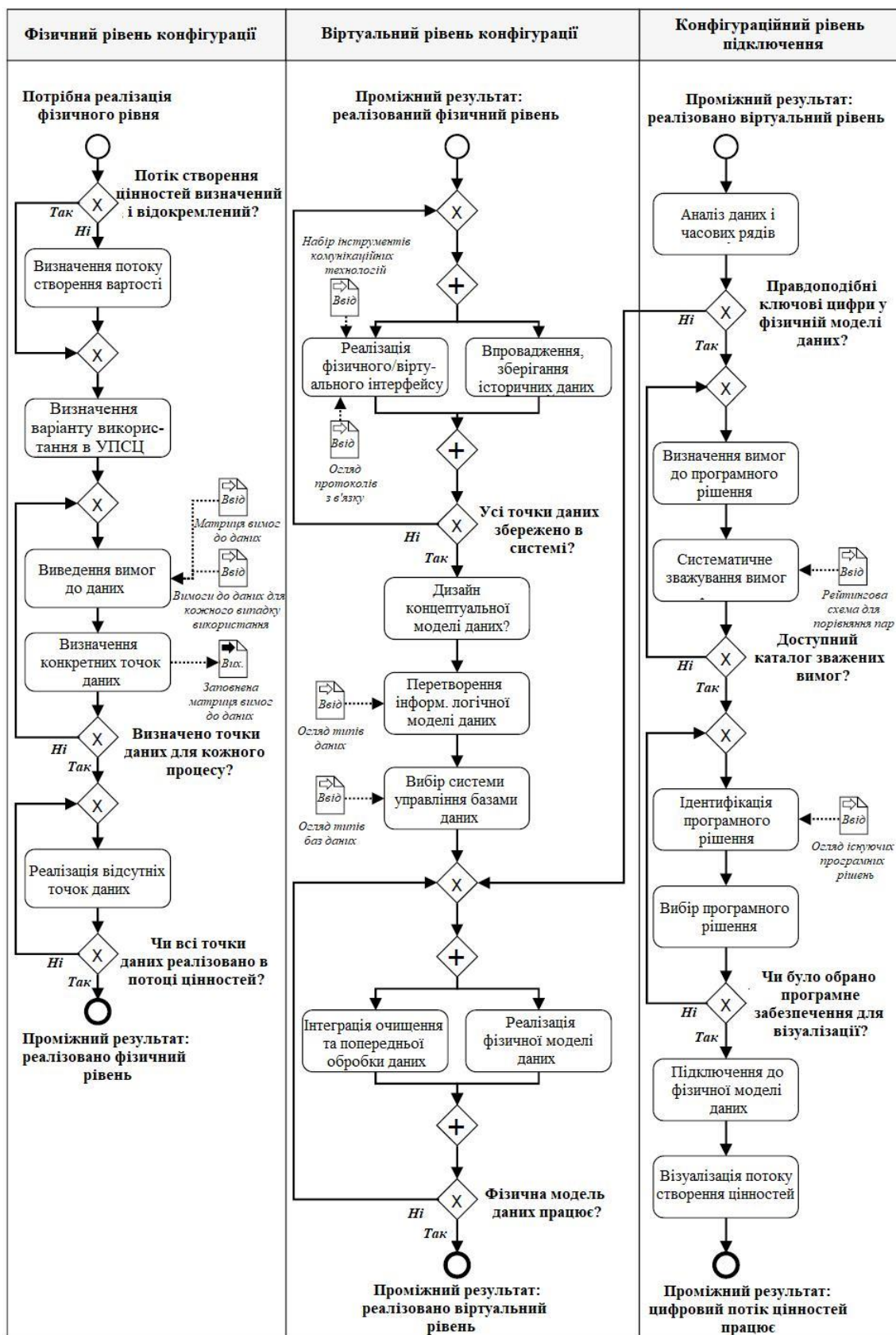


Рис.3.9 Методологічний підхід

Цей крок має вирішальне значення для здатності організації приймати

ефективні рішення та досягати безперервності покращення потоку створення цінностей. Після того, як відсутні точки даних інтегровано в потік цінностей, фізичний рівень реалізовано, і можна почати реалізацію віртуального рівня.

Модуль II. Віртуальний рівень конфігурації. Конфігурація віртуального рівня починається з двох паралельних процесів – реалізація фізичного/віртуального інтерфейсу і впровадження сховища даних. Користувачі отримують допомогу в реалізації інтерфейсу через інструментарій комунікаційних технологій і огляд існуючих протоколів зв'язку. Зберігання історичних даних зосереджується на деталізації, з якою слід зберігати дані. У цьому контексті доцільно записувати кожен компонент на кожному етапі процесу.

Після успішного запису всіх необхідних точок даних концептуальна модель даних є розробленою. Це передбачає визначення об'єктів потоку створення цінностей, їхніх атрибутів та взаємозв'язків. Потім ці елементи систематично перетворюються на аналогічну модель даних використання первинних або зовнішніх ключів і визначення типів даних для атрибутів.

Наступне - вибір системи управління базою даних, що є критичним кроком, який впливає на подальші дії та має враховувати доступні типи баз даних. Щоб полегшити цей крок відбувається, огляд типів баз даних який можна використовувати для моделювання потоку цінностей. Після вибору системи керування базами даних виконуються два ключові процеси: інтеграція очищення та попередньої обробки даних, і реалізація фізичної моделі даних. Ці процеси є важливими для функціональності системи та виконуються паралельно, щоб уникнути надмірності. Останнім кроком є перевірка того, що фізична модель даних готова до роботи. Реалізація віртуального рівня досягається після завершення цього кроку.

Модуль III – Рівень з'єднання конфігурації. Останній модуль присвячений переходу з віртуального рівня на фізичний. Процес починається з аналізу доступних даних, досліджуючи як статичні, так і динамічні моделі, щоб отримати глибоке розуміння ефективності потоку створення цінностей. Це розуміння є фундаментальним для подальшого визначення вимог до конкретного програмного

рішення, оскільки це визначає функціональні вимоги. Систематичне зважування вимог гарантує, що всі відповідні вимоги включені в процес прийняття рішень і визначені пріоритети відповідно до їх важливості. Після визначення вимог, слід переходити до визначення потенційних програмних рішень. Цей процес передбачає детальний аналіз ринку, щоб гарантувати вибір найкращого доступного рішення. Огляд існуючих програмних рішень допомагає в процесі ідентифікації. Після оцінки та порівняння визначених програмних рішень, робиться остаточний вибір. На останньому кроці вибрано програмне рішення підключається до фізичної моделі даних, яка служить основою для обробки та аналізу даних. Фінал потоку створення цінності є можливість використання цифрового двійника.

ВИСНОВКИ

В роботі всебічно аналізується застосування цифрових двійників в контексті Індустрії 4.0. Виявлено, що цифрові двійники є ключовою технологією в промисловому виробництві майбутнього. Цифрові двійники можуть створити цінність, скоротити час виходу на ринок, оптимізувати заводське обладнання та продуктивність готової продукції.

У роботі проведено аналіз літератури щодо концепції цифрового двійника. Зроблено детальний опис даної концепції, проаналізовано сфери її застосування. Проведено аналіз архітектур цифрового близнюка, порівняльний аналіз розподіленої та централізованої моделі. Детально описано процес оцифрування DT. Воканано високорівневе представлення фаз, що характеризують життєвий цикл цифрового двійника, яка може бути взята як основа в процесі розробки та опису архітектури та інфраструктури цифрового двійника, а також стратегічного підходу до підтримки оперативного розгортання, моніторингу та управління близнюками.

В роботі представлено підхід, який дозволяє обчислювати точність цифрового двійника з метою підвищення об'єктивності в процесі розробки точності цифрового двійника для виробничих процесів. Модель розрахунку точності цифрових двіників на основі цифрових кривих переваг пропонує систематичну процедуру, яка підвищує ймовірність отримання переваг шляхом застосування цифрових двійників. Це допомагає розробити відповідні рівні точності для попередньо встановлених цілей. Таким чином, він служить інструментом підтримки прийняття рішень, який може допомогти вирішити не тільки чи є цифровий двійник придатним інструментом для досягнення покращення бажаних цільових значень, але також вирішити, як цифровий двійник має бути розроблений для максимізації чистої переваги.

Описано метод впровадження цифрових двійників, який структурує керівні принципи проектування, логічним та оперативним способом за допомогою логіки BPMN.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Shakya, Sarbagya & Jha, Sudan. (2024). Introduction to Industrial Internet of Things (IIoT) – toward the future internet.
2. K. P. Jan Stentoft Kent Adsboll Wickstrøm and A. Haug, “Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: Empirical evidence from small and medium-sized manufacturers,” *Prod. Plan. Control*, vol. 32, no. 10, pp. 811– 828, 2021, <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>.
3. V. Vijayaraghavan and J. Rian Leevinson, “Internet of Things applications and use cases in the era of Industry 4.0,” In *The Internet of Things in the Industrial Sector: Security and Device Connectivity, Smart Environments, and Industry 4.0*, Z. Mahmood, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 279–298, https://doi.org/10.1007/978-3-030-24892-5_12.
4. Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P. et al. (2 more authors) (2022) Digital twin in manufacturing : conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35 (8). pp. 831-858. ISSN 0951-192X
5. Shi-Wan Lin (Yo-I Information Technologies, Co. Ltd), Kym Watson (Fraunhofer IOSB), Guodong Shao (NIST), Ljiljana Stojanovic (Fraunhofer IOSB), Bassam Zarkout (IGnPower Inc.) Digital Twin Core Conceptual Models and Services Essential Models for Interoperability An Industry IoT Consortium Best Practices Paper 2023-11-02
6. Roberto Saracco «Digital Twins: Evolution in Manufacturing» IEEE Digital Reality 23 May 2022.
7. C. Kober, B. N. Algan, M. Fette, and J. P. Wulfsberg, “Relations of Digital Twin Fidelity and Benefits: A Design-to-Value Approach,” *Procedia CIRP*, 2023.
8. C.Kobera,*, M. Fettea , J.P. Wulfsberga «A Method for Calculating Optimum Digital Twin Fidelity» 56th CIRP Conference on Manufacturing Systems, CIRP CMS ‘23, South Africa.
9. F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415,

2019.

10. C. Kober, M. Benfer, F. Gomez Medina, J. P. Wulfsberg, V. Martinez, and G. Lanza, “Digital Twin Stakeholder Communication Model - Facilitating Communication Across Stakeholders,” *International Journal of Production Economics*, 2023

11. E. Oztemel and S. Gursev, “Literature review of Industry 4.0 and related technologies,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 31, no. 1, pp. 127– 182, 2020.

12. SmartM2M; Digital Twins: Functionalities and communication Reference Architecture. ETSI TS 103 846 V1.1.1 (2024-08).

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

Промисловий Інтернет речей IIoT — це взаємопов'язане автоматизоване використання датчиків, пристроїв і машин, які працюють у промислових програмах, для підвищення ефективності та надійності виробництва

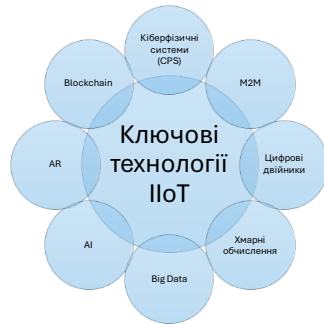


Рис 1. Ключові технології IIoT

Можливість описаних технологій задовольнити вимоги IIoT

Вимога/Технологія	CPS	M2M	Cloud Computing	Big Data	AI	Digital Twin	AR	Blockchain
Автономність	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні
Обробка в реальному часі	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Ні
Безпека	Так	Так	Так	Ні	Так	Ні	Ні	Так
Управління ресурсами	Так	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні
Гнучкість	Так	Ні	Так	Ні	Так	Ні	Ні	Ні
Стандартизація організації	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
Аналіз даних	Так	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні
Модульність	Так	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

4

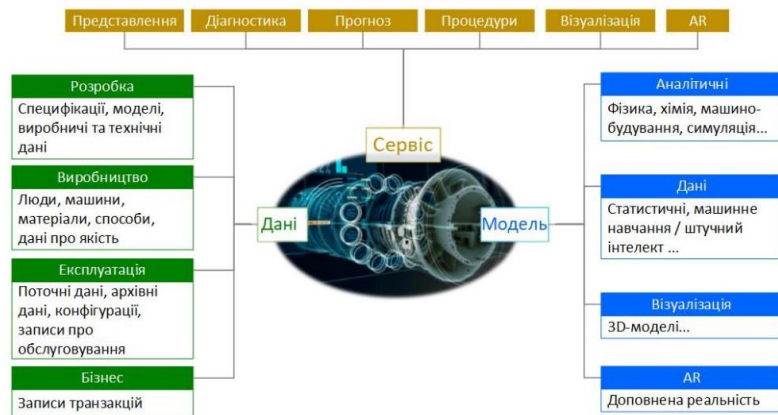
Цифровий двійник — це віртуальне представлення об'єктів і процесів реального світу, синхронізованих із заданою частотою та точністю.

- ✓ Цифрові двійники використовують дані датчиків, встановлених на фізичних об'єктах, щоб відобразити їх статус, робочий стан або положення майже в реальному часі.
- ✓ Цифрові двійники можна використовувати для візуалізації з метою моніторингу, діагностики, прогнозування та управління.



СКЛАДОВІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

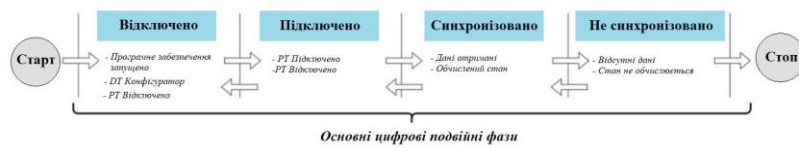
5



- ✓ Цифровий двійник продукту.
- ✓ Цифровий двійник на рівні пристрою/системи.
- ✓ Цифровий двійник на рівні SoS.

ВИСОКОРІВНЕВЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ФАЗ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ДТ

6



Початок (старт). На початку свого життєвого циклу ДТ ініціалізується та запускаються необхідні програмні компоненти. Це означає початок його шляху до синхронізації з його фізичним аналогом.

Відключено. Після ініціалізації ДТ переходить у фазу відключення. Поки програмне забезпечення запускається та налаштовується, ДТ залишається непов'язаним зі своїм фізичним двійником (РТ), очікуючи на з'єднання.

Підключено. Після успішного підключення до РТ ДТ отримує докладні описи характеристик і функцій РТ. Цей обмін інформацією закладає основу для подальшої синхронізації.

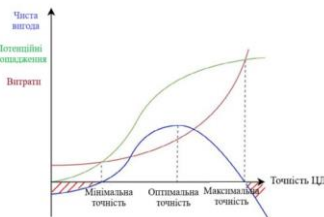
Синхронізація. Коли дані надходять від РТ до ДТ, останній накопичує достатню інформації для обчислення свого стану. Безперервно отримуючи та обробляючи дані, ДТ підтримує синхронізацію з часом, дотримуючись визначеної моделі.

Не синхронізовано. Під час життєвого циклу можуть виникати проблеми, що призводять до фази розсинхронізації. Це може виникнути через відсутність даних або помилки в обчисленнях, що унеможливило визначення дійсного стану. Крім того, отримані дані можуть бути недостатніми або мати неадекватну якість для обчислення стану.

Зупинка (стоп). Зрештою, життєвий цикл завершується фазою зупинки, коли ДТ припиняє роботу. Це рішення може виникнути через застарілість, нерелевантність або зміну контекстуальних вимог, що сигналізує про кінець його корисності в даному контексті.

ЦИКЛ ПРОЄКТУВАННЯ ЦД З ОЦІНКОЮ РІВНЯ ТОЧНОСТІ НА ЕТАПІ КОНЦЕПТУАЛІЗАЦІЇ

7



Співвідношення точності ЦД і переваг від його впровадження

1. Потенціал економії.

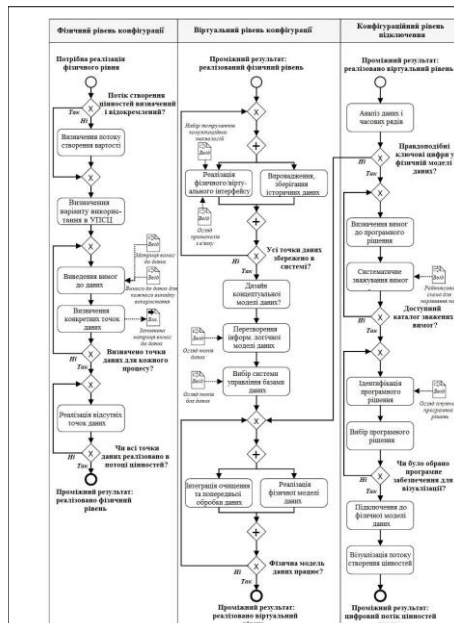
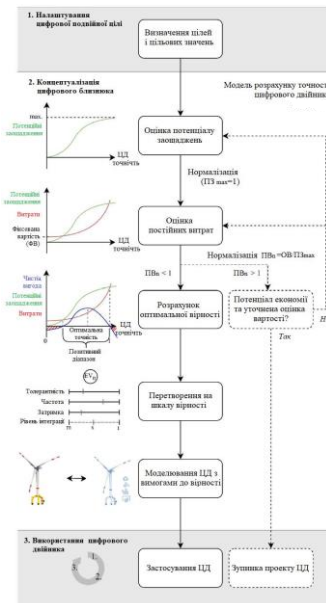
$$f(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{x-1}\right)^a}$$

2. Витрати:

$$g(x) = x^b + FC$$

3. Чиста вигода:

$$h(x) = f(x) - g(x)$$



МЕТОД ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА У ВИРОБНИЦТВО

8

Модуль I – Фізичний рівень конфігурації. У першому модулі визначаються основні умови.

Модуль II – Віртуальний рівень конфігурації.

Модуль III – Рівень з'єднання конфігурації. Цей модуль описує перехід з віртуального рівня на фізичний.