УДК 004.9 **doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.127**

В. Р. Щеглов, О. І. Морозова

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ГАРАНТОЗДАТНИХ СИСТЕМ ІНДУСТРІАЛЬНОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. Із розвитком виробництв через промислову революцію 4.0, активну цифровізацією аспектів життя від транспорту до торгівлі, доступності технологій як інтернет речей (IoT), штучний інтелект й хмарні обчислення, зростає попит на цифрові двійники (ЦД), які здатні підвищити безпеку й скоротити витрати шляхом збору даних, їх аналізу на моделях реальних об'єктів для прийняття ефективних рішень у реальному часі. Метою цієї статті є огляд концепції ЦД, аналіз ключових доменів разом із прикладами їх використання, особливостями, проблемами, обмеженнями та перевагами, а також формалізації загальних проблем та обмежень у ЦД. У роботі було розглянуто концепт ЦД, які допомагають у прийнятті рішень в реальному часі для підвищення ефективності роботи, а також пом'якшення або запобігання неочікуваних подій протягом життєвого циклу реального об'єкта. Існує три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання. Інший погляд на ЦД – це використання за ієрархією – двійники компонентів, майна, систем та процесів. ЦД можуть представляти прості датчики та насоси, або ЦД можуть бути як системи та об'єднувати і моделювати кілька виробничих підсистем. Концепція ЦД може бути застосована майже в усіх сферах діяльності, але в цій статті розглядаються найпоширеніші галузі, які можна вважати основними або які впливали на розвиток цифрових двійників. Проведено аналіз ключових індустрій для використання ЦД, визначено особливості та проблеми застосування у кожному із розглянутих доменів. Було сформульовано які існують загальні виклики, переваги та особливості у цифрових двійниках.

Ключові слова: цифрові двійники, індустрії цифрових двійників, індустрія 4.0, інтернет речей, прогнозне виробництво.

Вступ

Сучасні виробництва стикаються із необхідністю адаптувати сучасні інформаційні технології до нових викликів і вимог ринку. Революція у виробництві, яка спрямована на досягнення максимальної ефективності через використання автоматизації, аналітики великих даних, прогнозованого обслуговування та IoT, зазвичай називають «промисловою революцією 4.0» (Industry 4.0) або «розумним виробництвом» [1]. Розумне виробництво може виконувати складні задачі без втручання людини, знижуючи витрати та підвищуючи безпеку працівників і обладнання, зменшуючи кількість відходів у середовище, а також уникаючи втручання людини до небезпечних, брудних і важких робіт.

Цифрові двійники (ЦД) разом з інтернетом речей (IoT), аналізом великих даних, машинним навчанням (ML), кіберфізичними системами (CPS), розвиток 4G і 5G можна вважати ключовими факторами, що сприяють промисловій революції 4.0 [2]. ЦД спрямований на створення точної цифрової моделі фізичного об'єкта або процесу, яка здатна збирати інформацію з реального середовища, виконувати перевірку, оцінювання, оптимізацію та прогнозування на цій моделі перед безпечним застосуванням результатів на фізичний об'єкт або процес. Це допомагає у прийнятті рішень в реальному часі для підвищення ефективності роботи, а також пом'якшення або запобігання неочікуваних подій протягом життєвого циклу реального об'єкта [3].

Одна з перших концепцій ЦД була реалізована NASA в рамках програми «Аполлон». На її основі було побудовано два ідентичних космічних апарата – один із них встановився на космічному кораблі, а інший використовувався для віддзеркалення поведінки першого у різних умовах під час місії, щоб заздалегідь прийняти більш точні рішення для управлінням космічним апаратом [4]. Ідею ЦД вперше описав у 1991 році Девід Гелернтер у своїй книзі «Дзеркальні світи». А пізніше, у 2002 році, доктор Майкл Грівз представив і описав концепцію цифрових двійників [5]. Назва «Digital Twin» (DT) була представлена NASA в чернетці технологічної дорожньої карти в 2010 році як система моделювання «для відображення життя його літаючого двійника» [6].

Відтоді технологія ЦД привернула увагу дослідників і стала однією з ключових технологій у сучасному виробництві. У 2020 році розмір світового ринку ЦД оцінювався в 3,1 млрд доларів США [7], а до 2027 року очікується, що він досягне 63,5 млрд доларів США. За прогнозами IDC, з 2021 по 2027 рік кількість нових фізичних активів і процесів, які моделюються як ЦД збільшиться з 5% до 60%, що призведе до оптимізації операційної продуктивності [8]. Зі значним збільшенням числа інтелектуальних пристроїв, підключених до кіберпростору, зростанням популярності та розвитком хмарних обчислень, аналітики великих даних і машинного навчання, інтеграція ЦД стає більш природною та доступною для сучасних виробництв і бізнесу, які можуть зменшити час на розробку продуктів – від концепції до поставки, можуть оптимізувати діяльність, покращити безпеку, мати більше контролю та знизити витрати на обслуговування [6].

Метою цієї статті є огляд концепції ЦД, аналіз ключових доменів разом із прикладами їх використання, особливостями, проблемами, обмеженнями та перевагами, а також формалізації загальних проблем та обмежень у ЦД.

Зміст структуровано таким чином: у розділі 1 наведено огляд видів ЦД, у розділі 2 наведені використані джерел разом із їхньою класифікацією, аналіз цих джерел відповідно до класифікації описано в

© Щеглов В. Р., Морозова О. І., 2022

розділі 3, загальний підсумок джерел і підходів у розділі 4. Далі наведено висновок і подальші напрямки роботи.

1. Огляд видів ЦД

ЦД активно розвиваються і формуються як сучасна технологія. Їй досі не вистачає стандартизації, інструментів, а іноді й успішно реалізованих прикладів в різних галузях, а також чітко визначеної термінології та визначень [9]. Оскільки ЦД працюють з гетерогенними системами, а також включають інші дисципліни та технології, їх можна класифікувати за різними аспектами. Розглянемо основні типи категоризації ЦД.

Одним із основних інструментів у ЦД є моделювання. Модель дозволяє виконувати обчислення, виконувати прогнозування збоїв, оптимізувати поведінку перед застосуванням до фізичного об'єкта. Існує три основні підходи до моделювання: фундаментальне моделювання, моделювання на основі даних і гібридне моделювання [9]. За допомогою **фундаментального моделювання** можливо створити складну модель відповідно до законів фізики, математики або хімії, вона вимагає менше даних, є більш загальною та може бути застосована до іншого двійника з такими ж фундаментальними характеристиками. Але це вимагає більше обчислювальних ресурсів і може бути неточним через деякі індивідуальні особливості конкретних об'єктів. У деяких випадках не можливо створити або знайти фундаментальну модель, або обчислювальні ресурси для фундаментальної моделі надто великі, або для створення точної моделі для конкретного об'єкту зі своїм набором індивідуальних характеристик. У цьому випадку можна застосувати **моделювання на основі даних (data-driven)**. В свою чергу **гібридне моделювання** – це компроміс між двома попередніми варіантами. Наприклад, навіть у випадках, коли можливе моделювання на основі даних, слід застосувати деякі основні фізичні закони для покращення якості моделі.

Ієрархія ЦД. Інший погляд на ЦД – це використання за ієрархією – двійники компонентів (part/component twin), майна (asset twin), систем та процесів (рис. 1) [6]. ЦД можуть представляти прості датчики та насоси, або ЦД можуть бути як системи та об'єднувати і моделювати кілька виробничих підсистем.

Рис. 1. Класифікація ЦД за ієрархією

Інші види ЦД. ЦД може використовуватися по різному протягом життєвого циклу продукту (ЦД прототип та ЦД сутність) [6]. Можна розділяти цифрові двійники за рівнем інтеграції – за зв'язністю та наявністю зворотного зв'язку між фізичним та цифровим двійником (Цифрова Модель, Цифрова Тінь, Цифровий Двійник) [6, 10]; за рівнем зрілості – описовий, інформативний, прогнозний, адаптивний ЦД, автономний/розмуний ЦД (рис. 2) [6]; за архітектурою, структурою та багатьма іншими аспектами. Але в цій роботі ми зосередимося на контексті, сферах і галузях, де можна застосовувати ЦД.

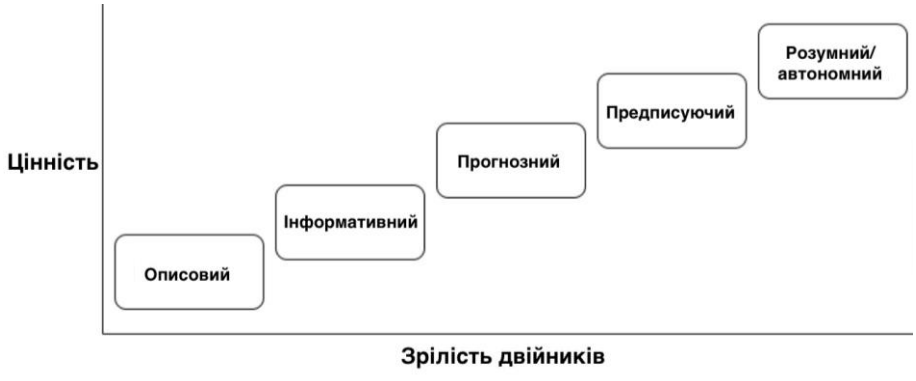

Рис. 2. Класифікація ЦД за зрілістю

Огляд джерел за доменами ЦД. Так, у пов'язаній роботі [3] було виконано аналіз тематичного моделювання ЦД, який надав чітку картину стосовно визначень та наукових напрямів ЦД, визначив 5 основних тематичних кластерів статей ЦД. Крім того, було застосовано аналіз формальної концепції, щоб зрозуміти тенденції та стратегії ЦД, де можна використовувати ЦД і які функції вони виконують в різних галузях. Інша оглядова робота [11] намагається усунути неправильні уявлення щодо поточних і попередніх визначень ЦД, визначити, які є приклади застосування, виклики та сприятливі технології пов'язані з IoT/Industrial IoT (IIoT), аналітикою даних і ЦД. Роботи [12, 13] надають більш детальну інформацію про застосування ЦД у різних галузях, в тому числі промисловості.

2. Класифікація джерел

Концепція ЦД може бути застосована майже в усіх сферах діяльності, але в цій статті розглядаються найпоширеніші галузі, які можна вважати основними або які впливали на розвиток цифрових двійників. Таким чином, було переглянуто низку оглядових робіт щодо ЦД, щоб зрозуміти найбільш обговорювані домени з точки зору (табл. 1). Виробництво, розумні міста та галузі охорони здоров'я можна знайти майже в кожній оглядовій статті чи роботі ЦД. Табл. 1 це підтверджує. Автомобільна та аерокосмічна промисловість завершують п'ятірку найбільших за популярністю ЦД галузей. Це галузі були обрані основними для огляду для поточної статті. Ще три галузі будуть розглянуті через цікаві роботи та для поширенню контексту при аналізі індустрії ЦД, а саме освіта, будівництво та залізничний транспорт. Було розглянуто додаткові роботи із конкретними прикладами впровадження ЦД у кожній із індустрій.

Таблиця 1 – **Галузі та оглядові роботи, в яких ці галузі аналізувалися**

	Галузь	**Оглядові роботи**
1	Аерокосмічна	[12, 3, 6]
2	Автомобільна	[12, 6, 13]
3	Виробництво	[12, 3, 6, 10, 2, 13, 11]
4	Гірничодобувна	[12]
5	Морський транспорт	[12, 3]
6	Енергетика	[12, 10]
7	Паливна	[12]
8	Сільське господарство	[12, 6]
9	Розумні міста	[12, 3, 6, 10, 13, 11]
10	Освіта	[12, 6]
11	Медицина	[12, 3, 6, 13, 11]
12	Торгівля	[12]
13	Будівництво	[12]
14	Транспорт	[10, 13]

Повний перелік галузей, які будуть розглянуті, і пов'язані роботи можна знайти в табл. 2.

Таблиця 2 – **Перелік індустрій для огляду та аналізу**

#	Галузь	Роботи за напрямками
1	Виробництво	1. Оглядові статті, що включають галузь [2, 3, 6, 10-13] 2. Discovering the Digital Twin Web – From singular applications to a scalable network [14] 3. Towards a Cyber-Physical Manufacturing Cloud through Operable – Digital Twins and Virtual Production Lines [15] 4. A Digital Twin for the Logistics System of a Manufacturing Enterprise Using Industrial IoT [16] 5. Digital representations of physical assets [17] 6. An Integrated Mobile Augmented Reality Digital Twin Monitoring System [18] 7. The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions [19]
2	Автомобільна	1. Оглядові статті, що включають галузь [6, 12, 13] 2. Traffic Safety Detection System by Digital Twins and Virtual Reality Technology [20] 3. Automotive overview - Top 5 Use Cases of Digital Twin in Automotive Industry in 2022 [21]
3	Медицина	1. Оглядові статті, що включають галузь [3, 6, 11-13] 2. Best Digital Twin Applications & Use Cases in Healthcare in 2022 [22] 3. A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin [23]
4	Аерокосмічна	1. Оглядові статті, що включають галузь [3, 6, 12] 2. UAV, Using Digital Twins and Drones to Capture Physical Environments [7] 3. Structural Digital Twin of the UAV that was used to monitor vehicle structural health and drive dynamic flight planning decisions [24] 4. Shaun Waterman. Air Force Goes All in on Digital Twinning – for Bombs As Well As Planes [25]
5	Розумні міста	1. Оглядові статті, що включають галузь [3, 6, 10-13] 2. The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning [26] 3. A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities - [27] 4. Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management [28] 5. City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda [29]
6	Освіта	1. Оглядові статті, що включають галузь [6, 12] 2. Development of a digital twin of a flexible manufacturing system for assisted learning [30] 3. Tangibles and Digital Twins: Toward Meaningful Learning Support in Cyber- Physical System Development [31]
7	Будівництво	1. Оглядові статті, що включають галузь [12] 2. Building Lifecycle Management, Cognitive Digital Twins [32] 3. Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management [33]
8	Залізничний транспорт	1. Оглядові статті, що включають галузь [10, 13] 2. Digital twins for managing railway maintenance and resilience [40] 3. Digital Twins in Railways [41] 4. The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions [42] 5. Towards a Data-driven Operational Digital Twin for Railway Wheels [43]

3. Аналіз джерел та підходів з а різними індустріями ЦД

Для визначення переваг і проблем у ЦД, а також формульовані загальних викликів і особливостей, було прийнято рішення проаналізувати ключові й деякі відносно нові індустрії по використанню ЦД.

Це дозволить більш широко дивитися на можливості технології та перевикористання підходів із різних доменів ЦД. У цьому розділі будуть детально розглянуті та проаналізовані обрані галузі ЦД. Кожен із параграфів по галузі містить загальний опис, особливості цього домену, проблеми та приклади використання.

3.1. Виробництво. Сьогодні виробництво є найпопулярнішою сферою для прикладів із впровадження та інтеграції цифрових двійників. Цей сектор включає різні формати використання ЦД на кожному із етапів життєвого циклу продукту – від проектування та створення прототипу до виробництва, логістики та обслуговування. ЦД може допомогти з прогнозуванням відмови обладнання, контролем точності та продуктивності виробництва, оцінювати концепції перед їх впровадженням, а також покращувати досвід користувачів через візуалізацію [3]. Очікується, що ЦД стане головним інструментом в MBSE (model-based systems engineering) або системній інженерії на основі моделі, оскільки ЦД можна застосовувати на кожному етапі життєвого циклу системи/продукту. Цілком можливо, що вироблені продукти матимуть свої ЦД, які допоможуть у забезпеченні ефективної підтримки продукту та персоналізованого обслуговування та досвіду використання [6].

Одним із викликів у виробничих системах є автоматизація та масове виробництво економічно ефективним способом. ЦД може допомогти в оцінці та аналізі ефективності виробництва, а також кожного із факторів проектування на етапах життєвого циклу.

В роботі [2] було запропоновано модель із 3 типами застосувань у цехах, які фокусуються на різних аспектах виробництва:

- ЦД продукту – вихід або результат виробничого процесу;
- ЦД процесу – робочий процес виробничої лінії, як працює процес;
- операційні ЦД – моніторинг, операційні процедури та контроль;

В іншій роботі пропонується додати ще 4-й пункт до розглянутої класифікації – утилізація та переробка відходів [12].

У дисертаційній роботі [15] пропонується працездатна модель ЦД кіберфізичної виробничої хмари, яка успадковує функції моніторингу із хмари, що відкриває двері для майбутніх виробничих систем. В рамках дисертаційної роботи [14] були побудовані ЦД, орієнтовані на дизайн виробничого обладнання, зокрема на промисловому мостовому крані. У роботі [17] було представлено набір інструментів FA3ST (Fraunhofer-advanced AAS tools for digital twins) як репрезентативну реалізацію загальної та гнучкої архітектури для управління ЦД, яка фокусується на функціональності на завершальній стадії виробництв.

ЦД також можуть бути корисними під час навчання інженерів або для допомоги та контролю низькокваліфікованих операторів. Операторам потрібні глибокі знання обладнання, щоб швидко приймати важливі рішення під час технічного обслуговування або виробничих процесів. У статті [18] пропонується використовувати мобільну систему віддаленого моніторингу доповненої реальності, щоб допомогти операторам із низькою кваліфікацією полегшити робочий процес. Таку систему було побудовано для баштового крана.

Логістика – ще одна проблема сучасного виробництва. У статті [16] автори розглядають застосування ЦД для логістичної системи виробничого підприємства з використанням IIoT. Також було розглянуто кейс для ПрАТ «ФЕД». Система була розроблена з метою розрахунку оптимального розташування виробничих потужностей для максимізації продуктивності на виробництві.

ЦД у виробництві мають власний перелік проблем:

- проблема роботи ЦД у режимі реального часу – виробництво вимагає швидкої реакції. В той же час ЦД потребує потужності для моделювань та передбачень
- великі дані – величезна кількість субдоменів та взаємозв'язків ускладнює систему та видає великий потік даних.

3.2. Автомобільна галузь. Сучасні автомобілі вже оснащені великою кількістю телеметричних датчиків, що генерують величезну кількість даних для подальшого аналізу – таким чином сучасні авто вже більше менш відповідають необхідному рівню цифровізації та готові для впровадження ЦД. Проте це лише частина системи ЦД, і цей сектор активно розвивається. Переважна кількість існуючих робіт зосереджено на процесах виробництва та прототипування, а також валідації характеристик майбутніх автомобілів [13]. Більшість рішень із виробничого сектору ЦД можна також застосувати і в автомобільному виробництві, але автомобільна промисловість має свої особливості.

Виробники можуть скористатися функціями прогнозованого технічного обслуговування. Це стосується не тільки виробничих роботів, а й технічного обслуговування автомобілів [6, 12, 21]. ЦД можуть зменшити витрати та кількість помилок шляхом застосування віртуального тестування для перевірки автомобіля [13]. Механіки можуть надавати швидші та більш персоналізовані рішення за коротший час.

Службам прокату буде легше слідкувати за станом автомобіля у реальному часі [6]. ЦД також використовується для отримання більш персоналізованого досвіду водіння автомобіля – виробники можуть аналізувати поведінку водія та налаштовувати під них автомобілі або надавати індивідуальні функції, які задовольняють потреби клієнтів [12]. Іншим фактором є покращення досвіду продажів – покупці можуть перевірити продукт у різних конфігураціях та поведінку за допомогою симуляції, інструментів VR та AR, що стимулюють продажі через створення позитивного досвіду користувача [12, 21].

Деякі сучасні автомобільні компанії вже інтегрували ЦД у свій бізнес. Tesla Motors використовує ЦД у кожному автомобілі. Це дозволяє швидко оновлювати автомобіль відповідно до виявлених індивідуальних проблем, як наприклад, віддалено компенсувати проблеми з дверима шляхом налаштування гідравліки [12]. Volkswagen використовує ЦД з одним зі своїх роботів при плануванні виробництва. Це економить близько трьох тижнів часу та 40 квадратних метрів виробничої площі [12]. Maserati також інтегрувала ЦД у свій виробничий процес, щоб оцінити, як зміни автомобіля впливають на виробничі процеси [12]. Крім того, у роботі [20] досліджується прогнозування типів водіння транспортного засобу для підвищення точності визначення безпеки руху.

Величезні дані, які генеруються автомобілями, можна вважати одним із головних викликів. Підраховано, що компанії аналізують лише 12% доступних даних [21]. Це означає, що ефективну модель неможливо побудувати з такою низькою швидкістю обробки даних.

Крім того, сам автомобіль може бути оффлайн, тому необхідно обробляти це відповідним образом. Іншою проблемою є безпека – атака на ЦД автомобілів на сервері, що впливає на рішення, або навіть керує автомобілем, може поставити під загрозу процес водіння в цілому.

3.3. Медицина. У секторі охорони здоров'я ЦД можуть покращити ефективність організації, забезпечити більш персоналізоване лікування та контроль. Рішення на основі ЦД у медицині можуть підвищити точність аналізу стану організму та встановлення діагнозу, допомогти з розподілом медичних ресурсів та хірургічним асистуванням, лікарі можуть призначати плани лікування на основі даних у реальному часі. Для пацієнтів ЦД може контролювати та аналізувати стан їхнього тіла та надавати зворотний зв'язок у режимі реального часу.

ЦД в медицині можна розділити на три основні категорії [22]:

1) **ЦД закладу охорони здоров'я.** ЦД можна використовувати для створення лікарні-двійника, щоб зрозуміти, як справлятися з труднощами в різних ситуаціях, наприклад, пожежа в будівлі або надмірна потреба в травматичних кабінетах. Крім того, ЦД може допомогти з управлінням активами та обладнанням, як в випадку, щоб зрозуміти, чи є дефіцит ліжок чи іншого обладнання під час пандемії в поточний момент;

2) **ЦД організму людини.** Віртуальні двійники тіла або його компонентів забезпечують більш детальне уявлення про фізіологічний стан, що дозволяє точніше та персоналізовано діагностувати хвороби та планувати лікування. Крім того, такі рішення можуть допомогти виявити патології та інші захворювання ще до того, як порушення стануть очевидними – це приклад прогнозного лікування;

3) **ЦД для медицини та розроблення пристроїв.** На етапі розроблення нового медичного пристрою завжди важливо оцінити та перевірити, як він працює та чи відповідає певним критеріям. ЦД можна використовувати для практичного тестування нових пристроїв або функцій перед їх використанням. Ту саму концепцію можна застосувати й до ліків – віртуальні біохімічні моделі ліків можуть допомогти вченим у модифікації або розробленні нових методів лікування.

Концептуальну модель людського ЦД або human digital twin (HDT) було розглянуто в [13]. Ідея полягає в тому, щоб відтворити тіло людини в кіберфізичному просторі. Дані з датчиків і медичних карт постійно аналізуються та використовуються для надання більш персоналізованого лікування або моніторингу стану організму. Робота [13] розглядає деякі приклади HDT, такі як вимірювач серцебиття, вимірювач кроків та ін. SmartFit допомагає з персоналізованими порадами та відстеженням стану тіла. Іншим застосуванням є хірургічне планування та виконання [11]. ЦД були використані для створення «Cardio Twin» для запобігання ішемічній хворобі серця та інсульту [6]. Стаття [23] пропонує нову концепцію ЦД охорони здоров'я, яка була створена для впровадження таких послуг, як моніторинг у режимі реального часу для людей похилого віку. Крім того, в цій роботі [23] стверджує, що дослідження моделювання охорони здоров'я зосереджені переважно на освіті в галузі охорони здоров'я, а більшість досліджень ЦД у медицині зосереджено на платформах для моніторингу.

Сфера охорони здоров'я має свої проблеми. Однією з найпоширеніших проблем є безпека даних. Під час лікування, аналізів збирається значна кількість індивідуальних даних, які слід зберігати та обробляти безпечним способом. У деяких випадках лише клініки можуть зчитувати дані пацієнтів, а це означає, що моделювання та прогнозування можна виконувати лише локально в клініках або із обфускованими та анонімоманими даними. Крім того, якість даних і злиття даних (data fusion) – це більш загальні проблеми, актуальні для всіх напрямів ЦД [22]. З медичної точки зору іноді біологічні явищ погано вивчені або їх важко змоделювати, наприклад проблема моделювання емоцій. Тому експертна валідація моделей є дуже важливою для оцінювання надійності моделей, а також для якості їх роботи [13]. Ще одна досить цікава тема, яка може бути проблемою, це проблема соціальної етики [13]. Наприклад, як сприймають люди факт масової цифровізації внутрішніх частин і процесів тіла для проведення подальших моделювань?

3.4. Аерокосмічна галузь. ЦД також використовуються в аерокосмічній промисловості. Аерокосмічні компанії почали використовувати ЦД, щоб мінімізувати час простою двигунів і компонентів, використовують переваги прогнозованого технічного обслуговування, а також використання віртуального моделювання для перевірки поведінки літаків і кораблів в різних середовищах та умовах, наприклад, в екстремальних погодних умовах [3]. ЦД можна використовувати на етапі виробництва для розроблення та тестування продуктів. Моделювання та тестування з точки зору оптимізації продуктивності також є місцем для використання ЦД [12].

Переваги можна формалізувати таким чином:

– безпечніші місії, максимізується точність та їх успішність;

– дешевші космічні апарати, менші витрати на експлуатацію та обслуговування;

– перевірка продукту та його моделювання перед виробництвом.

NASA розробило ЦД ракетного двигуна для прогнозування умов польоту, впливу цих умов і способів оптимізації запуску двигуна [12]. Крім космічних кораблів і літаків, безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть розглядатися як предмет інтеграції ЦД в рамках аерокосмічної сфери. Але сам БПЛА часто використовується як інструмент для впровадження нових ЦД. Наприклад, робота [7] містить огляд того, як БПЛА можна використовувати для захоплення фізичного середовища та зйомки ЦД дахів, зйомки полів, щоб аналізувати стан рослин. [24] провели дослідження із використання ЦД БПЛА для моніторингу його справності та динамічної зміни рішень щодо планування польоту відповідно до стану та рекомендацій моделі машинного навчання – такий концепт використання масштабується і на літаки з космічними кораблями.

Ще один спосіб використання ЦД в аерокосмічній галузі – це моделювання та випробування нових кораблів перед вибором найкращого варіанту для виробництва. Наприклад, реактивний літак повітряних сил США eT-7 Red Hawk був розроблений і випробуваний з використанням концепції ЦД [25]. Тобто валідація концепту із конкурентами та оцінювання його ефективності були ще проведені до моменту виробництва прототипів.

Аерокосмічну галузь можна віднести до систем реального часу або критичної інфраструктури. Тому вимоги до безпеки та відклику мають бути на високому рівні.

Одним із викликів аерокосмічної галузі є комунікації. ЦД вимагають величезної кількості даних для передачі з кораблів у хмару та у зворотному напрямі. Тому обговорюється можливість застосування 5G для зв'язку. Через значний обсяг даних, тут зустрічаються й відповідні загальні проблеми в обробленні даних. Крім того, відсутність відповідних знань про проектування ЦД, інструментів і стандартизації може бути проблемою для інтеграції ЦД в аерокосмічну галузь.

3.5. Розумні міста. Міста стають розумнішими та вони виробляють інформацію з різних джерел, таких як вуличні камери, міський транспорт, управління водопостачанням, розумні світлофори тощо. ЦД у індустрії містобудування в основному зосереджені на покращенні середовища та якості життя громадян, мобільності та доступності послуг для громадян, безпеці, та щоб технологічний прогрес був орієнтований на людей [3, 13]. Подібно до виробництва, розумні міста включають широкий спектр субдоменів – від транспорту до міського планування. Близько 118 міст використовували ЦД у проектах Smart City [10].

Оскільки ЦД у місті часто використовуються для фізичного моделювання, можна виділити наступні технології, які дозволяють будувати такі моделі: фотографія зі зсувом та нахилом, безпілотний літальний апарат (БПЛА), 3D лазерне сканування та система глобального позиціонування (GPS) [27]. Ще один важливий технологічний фактор – 5G зв'язок, що допомагає з'єднати в одну мережу різні частини розумного міста [27].

ЦД для управління і соціального контролю міста. Через цифровізацію процесів, збір даних та можливість моделювати різні сценарії, ЦД стають важливим інструментом в управлінні міста. Влада міста може приймати оптимальні рішення, опираючись на дані, отриманні з моделі. Крім того, відкриті дані та моделі міст є в тому числі й інструментом соціального контролю або демократії, оскільки в такому випадку кожна людина може перевірити забруднення повітря біля будинку, чому в її районі більше ДТП, або чому температура поверхні вулиці (будівлі, дороги) значно більша за сусідню вулицю, що може потім переходити у конкретні запити або дії по усуненню проблеми. Робота [27] розглядає концепцію ЦД міста і те, як вона може змінити структуру та правила управління містом.

ЦД міста для безпеки та досліджень. ЦД можуть будувати моделі руху людей і автомобілів, щоб знайти рішення для надзвичайних ситуацій і підвищити ефективність транспортної системи. 3D-моделювання та твіннінг (створення двійників) будівель можуть допомогти створювати якісні моделі якості повітря та моніторингу або прогнозування температури повітря в різних частинах міста у відповідь на погодні умови, стихійні лиха чи різні міські сценарії [3]. Усе це дозволяє підвищити громадську безпеку, покращити мобільність громадян, зменшити витрати та викиди вуглекислого газу, а також допоможе пом'якшити негативний вплив різноманітних аварій та катастроф [10]. Так одна із зон використання «розумного міста» – це стихійні лиха, які негативно впливають на громадські системи, завдаючи шкоди інфраструктурі, переміщуючи населення та порушуючи окремі системи та їхню взаємодію. В роботі [28] розглядаються ЦД розумного міста для моделей управління катастрофами. Також, у роботі [12] зазначено, як ЦД району Доклендс у Дубліні був побудований для прогнозування повеней і попередження людей про можливі повені.

В той же час, ЦД можна використовувати для планування та моделювання типових процесів у місті – від кількості туристів до прогнозування температури. В роботі [26] автори описали ЦД міста Цюріха, що використовується від дослідження урбанізації віртуального туризму та дослідження багатоповерхівок до симуляції шуму на вулицях, забруднення повітря та випромінювання мобільних телефонів. У 2018 році Національний дослідницький фонд Сінгапуру створив віртуальну модель міста, що поєднує 3D-карти та платформу даних із деталями про текстури, будівельні матеріали, геометрію та інші компоненти [12]. Вважається, що таке моделювання буде корисно урядам, громадянам і дослідникам для управління. Міста швидко змінюються, вони постійно розвиваються, і такі технології можуть не тільки покращити якість життя та безпеку, але й зробити життя більш зрозумілішим, оскільки кожен може отримати доступ до різних симуляцій міста, даних із відкритою статистикою.

З точки зору викликів, домени розумних міст пов'язані з проблемами даних: одна з найбільших

проблем – це складність і оброблення даних. Розумне місто являє собою гетерогенну систему з широким спектром підсистем і субдоменів, які потребують високого рівня інтеграції. Інша проблема полягає в точності побудови моделі, відсутності деталей для складного моделювання в рамках усього міста за різними аспектами. Також, через те, що місто є середовищем, в якому живуть люди, виникає проблема приватності через надмірну цифровізацію всіх аспектів міського життя.

3.6. Освіта. Останнім часом активніше в галузі освіти почали застосовувати ЦД. Основними інструментами є симуляції та технології AR, VR. Вони можуть покращити досвід навчання, візуалізуючи різні аспекти процесів та надаючи можливість взаємодії із змодельованою системою, що призводить до кращого розуміння. Крім того, це може зменшити витрати. Ось деякі з переваг ЦД в галузі освіти:

– покращена доступність – можна отримати віддалений доступ до обладнання;

– вирішує проблему з обмеженими ресурсами, оскільки кожен студент може мати персональне віртуальне обладнання;

– можливість автоматизації системи оцінювання та отримання зворотного зв'язку в режимі реального часу;

– поліпшення досвіду навчання, покращена мотивація та інтерес до процесу навчання;

– безпека для учнів та обладнання;

– здатність навчатися у віртуальних умовах, які важко організувати в реальному житті.

Більшість робіт, які пов'язані із ЦД, згадують освіту як одну з проблем бізнесу чи виробництва. Наприклад, допомога малодосвідченим операторам або підготовка інженерів до майбутньої роботи. У дослідженні [30] пропонується використання ЦД як альтернативної навчальної платформи для курсів виробничої техніки. Автори зосереджені на високоякісному відтворенні фізичної системи, що покращує інформативність від спостереження за процесами та більш детального вивчення учнями. Робота [31] представляє спосіб розробки міждисциплінарної інженерної програми, обговорюючи спільні риси між розробкою CPS (Clicks Per Second) тестів та освітою для розвитку. Подібний підхід був використаний для створення тестового стенда ЦД для студентів, які можуть досліджувати складності та поведінку системи, взаємодіючі з цим ЦД інженерної системи [12].

Одним із викликів застосування ЦД в освіті є точність відтворення та моделювання процесів та обладнання, щоб студенти могли зрозуміти, як воно працює з необхідним рівнем деталізації, уникаючи помилкового досвіду навчання. Крім того, важко оцифрувати деякий досвід навчання, як наприклад ручне навчання, або роботи в команді. ЦД в освіті – це чудовий інструмент для підвищення продуктивності, мотивації та безпеки студентів під час навчального процесу.

3.7. Будівництво. Будівництво – це трудомістка та затратна за часом галузь. Крім того, генерується величезна кількість даних у процесі будівництва – від проектування та планування до фізичного розроблення будівлі та її перевірки. Сучасні проєкти стають все більшими та складними, ними стає все важче керувати, до того ж сучасні будівлі часто необхідно перевіряти на енергоефективність, безпеку, інтегрувати автоматичні системи вентиляції, опалення, встановлювати різні датчики та інші пристрої. Все це необхідно вміти спроектувати, побудувати та розмістити значну кількість даних у потрібному місці, оброблюючи їх та отримуючи користь від цих даних.

Підходи із ЦД можуть допомогти у більш чіткому контролі та валідації якості процесів будівництва для команд інженерів, а також наддасть можливість заздалегідь та більш комплексно оцінити хід робіт, та деякі особливості зацікавленим сторонам, як наприклад інвесторам або майбутнім клієнтам.

Як і у виробництві, так і у будівельній галузі ЦД можуть використовуватися на різних етапах життєвого циклу проєкту. Використання ЦД може допомогти на етапі прототипування для перевірки та тестування проєктів, це може перевірити деякі особливості, стійкість і поведінку у різних умовах ще перед початком будівництва. Крім того, це може допомогти безпечно застосувати зміни до проекту в середині будівництва через деякі термінові ситуації [12]. Після будівництва існуючу модель можна використовувати для посилання у разі надзвичайних ситуацій, для підтримки будівлі у ході експлуатації тощо. Часто ЦД є частиною вже існуючих Building Information Modeling (BIM) систем.

ЦД для безпеки й контролю процесів будівництва. Безпека й контроль йдуть нерозривно із життєвим циклом будівництва. В багатьох роботах пропонується поєднати у єдину систему управління сам проєкт, а також оцінювання й контролю якості. Так, згідно з роботами, розглянутими в [33], ЦД можуть покращити планування будівельних проектів, здатність швидко вирішувати конкретні потреби та проблеми, такі як фактори вібрації, коливання температури, прогнозувати поведінку у несподіваних подій, допомагати менеджерам у прийнятті рішень та контролі у ході будівництва та експлуатації або зменшити ризики. В роботі [32] автори досліджують застосовність, сумісність та інтегрованість адаптованої моделі когнітивного ЦД для управління життєвим циклом будівлі. В іншій пов'язаній роботі розглядається література з управління будівельними проєктами через призму ЦД [33]. Автори пропонують триетапну структуру для аналізу та контролю за розвитком ЦД у будівельному секторі. У роботі [39] було запропоновано модель використання ЦД для контролю процесів на об'єкті – сенсори, візуалізація поєднуються із моделлю для автоматичної синхронізації будівельних робіт та підвищення безпеки.

Будівельний сектор стикається з тими ж проблемами, що й виробництво та сектори розумних міст. Багато концепцій взято з цієї області для вирішення проблем будівництва. Але будівництво часто нерозривно йде із досвідом майбутніх користувачів, стейкхолдерів, що потребує якісних інструментів контролю та візуалізації, то ж цей сектор, частіше використовує AR, VR технології, разом із різними симуляціями для пок-

риття цих потреб. Застосування нових технологій, таких як ЦД, може підвищити безпеку, зменшити витрати на будівництво, покращити планування і контроль, відкриваючи нові можливості для більш складних проектів, як ще більші мости, дамби та тунелі.

3.8. Залізничний транспорт. Зі зростанням населення збільшується й попит до стійких рішень та ефективного управління транспортними системами. Залізниця вважається екологічно чистим («зеленим») видом транспорту порівняно з іншими, як автомобілі, літаки, кораблі тощо. Із активним просуванням концепції збалансованості (sustainability), підвищується й попит до екологічно чистих перевезень. Для контролю вибросів, підвищення ефективності потоків пасажирів та транспорту, прогнозування збоїв та контролю ресурсів і обладнання, необхідно підвищити рівень цифровізації системи у цілому, а також запроваджувати сучасні технології як ЦД.

Як і у багатьох секторах ЦД у залізничній сфері може бути застосований на різних етапах життєвого циклу (проектування, реалізація, експлуатація).

На **етапі проектування** актуальні вже розглянуті схожі підходи – це створення моделі, тестування та валідація деяких аспектів ще до початку виробництва. Наприклад, інструменти Bentley OpenRail від Siemens дозволяють проектувати залізнодорожні проєкти виключно у цифровому форматі, створюючи не тільки 3D та CAD моделі, а й моделі фізичних активів для моніторингу, та перевірки гіпотез. Або DigitalTrains інструмент від DVRS, що дозволяє створювати моделі залізнодорожнього полотна із пересувним составом, моделювати поведінку на поворотах або при використанні упорів для зупинки транспорту.

Етап реалізації проєкта тісно пов'язаний із попереднім, та може часто використовувати єдину систему. Так, наприклад, у роботі [40] пропонується використовувати підходи BIM (Building Information Modeling) систем у поєднанні із ЦД для чіткого контролю, верифікації та оптимізації процесів на будівництві об'єкту. Крім того, таке середовище покращує можливості для співпраці між командами та відділами через єдине віртуальне середовище.

Тепер розглянемо основні напрямки у **етапі експлуатації** [41]:

- технічне обслуговування, моніторинг та безпека – прогнозне обслуговування та моніторинг поїздів, залізничного полотна, обладнання, вузлів та ін.;
- планування трафіку – управління потоками транспорту та пересування пасажирів/вантажів;
- управління та політика – управління фізичними активами (рухомий склад та інфраструктура), загальні бізнес процеси на станції;
- обслуговування пасажирів – аналіз поведінки пасажирів для покращення досвіду користувача у період очікування та посадки, додаткової інформативності та навігації по станції.

ЦД для безпеки залізничного транспорту. Кожен аспектів важливий, в той же час у роботі [40] після аналізу джерел за напрямком вказано, що більшість наукових робіт виконано саме у аспекті безпеки та підтримки роботи залізнодорожніх шляхів, вагонів та обладнання. Три основні фактори сприяють виникненню дефектів на найбільш вразливих компонентах як залізничні компоненти, стрілочні переводи та провідні рейки залізничних колій і залізничного составу:

- несподівані ситуації, що виникають під час експлуатації та обслуговування;
- вплив навколишнього середовища;
- стирання та ерозія, що спричиняє пошкодження.

Саме тому більшість робіт сфокусована або на створенню ЦД для залізнодорожніх вузлів, щоб виконувати прогнозне передбачення та моніторинг, або схожі дії тільки до критичних компонентів пересувного составу як колеса, трансмісія та зчіпні пристрої. Так у роботі [42] було проаналізовано та створено ЦД для залізничних стрілок, що збирає дані про навколишнє середовище, температуру, вібрації та стан самого компонента. Все це використовується у моделі для прогнозного обслуговування та моніторингу критичного вузла. Іншими прикладом [43] може бути схожа реалізація ЦД для коліс составу, що прогнозує відмови, або попереджає у разі знайдених аномалій у даних.

4. Висновки за оглядом напрямків

ЦД все ще є досить новою концепцією, яка активно розвивається, але існує широкий спектр успішних впровадження та прикладів, де ЦД вже впроваджено та почало приносити переваги з точки зору безпеки, зниження витрат, прогнозованого обслуговування та оцінки концепції.

Відповідно до зробленого огляду та аналізу можна зробити висновок, що провідними галузями промисловості з точки зору дослідження та впровадження ЦД є: виробництво, розумне місто, охорона здоров'я, аерокосмічна та автомобільна промисловість. Однак ЦД все активніше застосовуються в освіті, будівництві, залізничному транспорті та інших сферах. У табл. 3 підсумовано основні характеристики та проблеми для кожного розглянутих доменів. Багато концепцій і проблем ЦД є загальними для галузей. Це тому, що існує багато проблем, які ортогональні до доменів і можуть бути застосовані до будь-якої галузі. Наприклад, ЦД як інструмент для навчання можна використовувати для підготовки автомобільних інженерів або щоб допомогти дослідникам вивчити та візуалізувати деякі процеси.

Іншим аспектом, який виділяється в кожній галузі техніки, є застосування ЦД на різних рівнях протягом життєвого циклу розроблення продукту. Як під час створення медичного пристрою, так і під час будівництва нової будівлі початковий прототип може бути протестований, припущення підтверджене у віртуальному середовищі, перед початком виробничого процесу. І двигуни літака, і виробнича машина вимагають технічного обслуговування, яке можна оптимізувати за допомогою ЦД і методів прогнозного технічного обслуговування.

Переваги. Основні переваги ЦД майже однакові від домену до домену, різниця лише в тому, як його застосовують до проблеми цільового домену. До основні переваг можна винести:

Таблиця 3 – **Особливості та проблеми розглянутих галузей ЦД**

№	Галузь	Особливості	Виклики
1	Виробництво	Прогнозне обслуговування та моніторинг виробничої лінії; моделювання та перевірка продукту перед виробництвом; підтримка операторів через ЦД обладнання та досвід AR/VR; ЦД як інструмент для інженерного навчання	Обробка великих даних; безпека даних; безпека ЦД; складність системи для багатопрофільних і багатоступінчастих виробничих процесів; висока вартість впровадження й розроблення системи
2	Автомобільна	Моделювати поведінку та стан автомобіля у різних середовищах та умовах; моніторинг поточного стану автомобіля та прогнозне обслуговування; покращений досвід продажів із ЦД та AR/VR; індивідуальні функції та виправлення	Оброблення та безпека великих даних; безпека автомобіля у разі перехоплення контролю над ЦД; комунікація – автомобіль може бути оффлайн
3	Медицина	ЦД людини; ЦД органів – вища точність діагностики та прогнозування лікування; прогностичне виявлення хвороби; моделювання біологічних процесів; ЦД для системи управління медичним центром і контролю обладнання	Етичні питання до ЦД людей; конфіденційність медичних даних і складність оброблення через цю конфіденційність; важко змоделювати або зрозуміти деякі біологічні процеси
4	Аерокосмічна галузь	Моделювання місій; авіамоделювання та тестування компонентів перед виробництвом; моніторинг стану повітряного судна; динамічне прийняття рішень за поточним станом апарату	Низька пропускна здатність і висока затримка для ЦД на землі для зв’язку з літаком; високі вимоги до безпеки – критична система
5	Розумні міста	Здатність досліджувати та моделювати соціальну діяльність для різних ситуацій; модель відкритого міста як інструмент демократії та управління; містобудування та моделювання аварій/катастроф	Розумне місто – гетерогенна система з великою кількістю інтеграцій; величезний обсяг даних та їх складність; конфіденційність громадян
6	Освіта	Покращена доступність; кожен учень може мати свою модель; здатність змоделювати ситуації, які важко знайти в реальності; безпека людей та обладнання	Проблеми з помилковим досвідом навчання (неточна модель), ЦД для навчання ручної діяльності та роботи в команді
7	Будівництво	Моделювання конструкції перед виробництвом; моніторинг на кожному етапі будівництва; розширена точність і нові моделі систем управління будівлею	Складні процеси в будівельній галузі. Вимоги до безпеки та роботи у реальному часі проти точності – важко обробляти високоточні моделі будівель у режимі реального часу
8	Залізничний транспорт	Прогнозне обслуговування та безпека транспорту і залізнодорожніх вузлів або полотна. Моделювання трафіку та поведінки людей на станції для скорочення простою та покращення досвіду очікування пасажирів	Велика кількість та щільність критичних компонентів, що повинні бути цифровізовані для повного контролю

– швидке створення прототипів, а також редизайн продукту;

– прогнозування проблем / планування системи – прогнозне обслуговування;

– безпека та зменшення ризиків – допомога передбачити аварії або простої системи;

– підвищує продуктивність і знижує витрати;

– доступність – фізичний пристрій можна контролювати та використовувати віддалено або у віртуальному середовищі;

– зменшення відходів – може допомогти уникнути виробництва непотрібних продуктів, уникнення надмірного використання ресурсів;

– навчання – стає більш доступним, можливим, привабливим та безпечним.

Виклики. Проблеми в основному пов'язані зі складністю систем ЦД, точністю моделі та безпекою. Причиною цього є те, що системи ЦД гетерогенні, мультидисциплінарні та включають широкий спектр складних технологій. У цьому випадку проблеми кожної технології актуальні також для ЦД. Їх можна підсумувати таким чином:

– складність – неоднорідні мультидисциплінарні системи включають занадто багато деталей, які важко зрозуміти, а також вимагають висококваліфікованих спеціалістів;

– відсутність стандартизації та інструментів – ЦД все ще активно розвиваються, досі немає чітко визначених протоколів, стандартів, фреймворків, які можуть допомогти побудувати такі системи, та іноді визначених термінів. Проблема полягає в тому, що навіть деякі ключові технології ЦД, такі як IoT, все ще мають деякі проблеми зі стандартизацією;

– вартість – для використання повного потенціалу необхідно створити складну систему з великими моделями, залучити значні обчислювальні та людські ресурси. Якість ЦД залежить від якості віртуального представлення, і чим більше побудовано систем високої точності, тим більшу це має вартість. Підприємства повинні розуміти, як це може принести їм переваги та зробити інвестиції у ЦД на початку;

– дані – ЦД містять величезну кількість даних, датчики на виробництві, автомобільні компоненти, різні роботи та пристрої, які постійно надсилають дані у хмару до віртуального двійника для подальшого аналізу. Оскільки ЦД є мультидисциплінарними і можуть включати різні технології, надзвичайно важливо добре організувати потоки даних, структури та очистити дані, щоб мати можливість їх ефективно використовувати. Об’єднання даних вважається однією з поширених проблем ЦД;

– безпека та конфіденційність – оскільки велика кількість даних передається з різних джерел, важливо розробити безпечні з’єднання та механізми аутентифікації. Особливо це важливо для конфіденційних даних, таких як датчики медичних пристроїв, компоненти критичних систем, персональні дані;

– дані у реальному часі проти точності – чим точніша модель ЦД, тим ефективніше вона працює.

Але такі точні моделі включають величезну кількість даних, які важко обробляти у реальному часі. Тому часто доводиться шукати компроміс.

Треба додати до загальних проблем те, що кожен домен може мати деякі унікальні виклики. Приклади для деяких доменів було розглянуто вище.

В той же час сучасні дослідження ЦД намагаються вирішити ці завдання, паралельно розширюючи зону їх застосування. Багато рішень активно обговорюються в рамках суміжних напрямків, таких як хмарні обчислення, IoT або аналітика великих даних. Але незважаючи на ці виклики, ЦД вважається однією з провідних технологій у космічному, військовому та виробничому секторах. Ринок ЦД та науковий інтерес до теми постійно зростає. В той же час очікується, що ЦД будуть активно інтегровані в наше життя, не тільки в дослідженнях та виробництві, але й у звичайному житті: як громадяни на вулиці, як пацієнти в медичних центрах, як пасажири у транспорті, і як клієнти в торгових центрах або онлайн-магазинах.

5. Подальші напрямки роботи

В подальшому планується розвивати тему «Методи та технології розроблення цифрових двійників для гарантоздатних систем індустріального інтернету речей». Як зазначалося раніше, виробництво є однією з провідних галузей для ЦД, яка має високі вимоги з точки зору безпеки.

До надійних систем належать надійність, готовність, працездатність, інформаційна та функціональна безпека, живучість. Такі показники можна оцінювати та покращувати за допомогою підходів ЦД по прогнозному обслуговуванню та моніторингу.

У згаданому напрямку роботи пропонується глибоко дослідити, як ЦД можуть вплинути на цілісність промислової системи, підвищити її безпеку та захист, а також продуктивність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jamwal A., Agrawal R., Sharma M., Giallanza A (2021), Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: a systematic review and future research directions, Applied Sciences 2021, 11(12), 5725.
2. da Silva Mendonca R., de Oliveira Lins S., de Bessa I. V., de CarvalhoAyres F. A. Jr., de Medeiros R. L. P., de Lucena V. F. Jr (2022), Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges, Processes 2022, 10, 744.
3. Concetta Semeraro, Mario Lezoche, Hervé Panetto, Michele Dassisti (2021), Digital twin paradigm: A systematic literature review, Computers in Industry, Elsevier, 2021, 130, pp.103469.
4. Why IoT is the Backbone for Digital Twin (2020), available at: https://www.ptc.com/en/blogs/corporate/iot-digital-twin (accessed August, 2022).
5. Top 10 Digital Twin Companies Impacting Industry 4.0 Innovations in 2021 (2022), available at: https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-digital-twin-companies-impacting-industry-4-0-innovations-in-2021 (accessed August, 2022).
6. Singh M., Fuenmayor E., Hinchy E. P., Qiao Y., Murray N., Devine D (2021), Digital Twin: Origin to Future, Applied System Innovation 2021, 4, 36.
7. Kite-Powell J, Using Digital Twins And Drones To Capture Physical Environments (2021), available at: https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2021/12/28/using-digital-twins-and-drones-to-capture-physical-enironments/?sh=31ca46e2556e (accessed August, 2022).
8. Asia/Pacific* Leads the Shift to Digital-First with 1 in 3 Companies Generating More Than 30% Revenues from Digital Products and Services By 2023 , IDC Predicts (2021), Available at: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP48347921 (accessed August, 2022).
9. Dozortsev Victor, Digital twins in industry: genesis, composition, terminology, technologies, platforms, prospects. Part 2. Key technologies of digital twins. Types of a physical object modeling (2020). Automation in Industry, 2020, No. 11, 3-10.
10. Qian C., Liu X., Ripley C., Qian M., Liang F., Yu W, Digital Twin – Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions (2022), Future Internet 2022, 14, 64.
11. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C, Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research (2020), IEEE Access 2020, 8, 108952–108971.
12. Singh M., Srivastava R., Fuenmayor E., Kuts V., Qiao Y., Murray N., Devine D (2022), Applications of Digital Twin across Industries: A Review, Appl. Sci. 2022, 12, 5727.
13. Botín-Sanabria D.M., Mihaita A.-S., Peimbert-García R.E., Ramírez-Moreno M.A., Ramírez-Mendoza R.A., Lozoya-Santos J.d.J, Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review (2022), Remote Sensing 2022, 14, 1335.
14. Autiosalo Juuso, Discovering the Digital Twin Web - From singular applications to a scalable network (2021), available at: https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/111416 (accessed August, 2022).
15. Shahriar M. (2020), Towards a Cyber-Physical Manufacturing Cloud through Operable Digital Twins and Virtual Production Lines, available at: https://scholarworks.uark.edu/etd/3739 (accessed August, 2022).
16. Vyacheslav Kharchenko, Olga Morozova. Digital Twin for Logistics System of the Manufacturing Enterprise Using Industrial IoT (2019), vol. 45, no. 1 (2019): pp-zz.
17. Stojanovic L., Uslander T., Volz F., Weibenbacher C., Muller J., Jacoby M., Bischoff T, Methodology and Tools for Digital Twin Management – The FA3ST Approach (2021), IoT 2021, 2, 717–740.
18. He F., Ong S. K., Nee A. Y. C, An Integrated Mobile Augmented Reality Digital Twin Monitoring System (2021), Computers 2021, 10, 99.
19. Kampczyk A., Dybeł K, The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions (2021), Sensors 2021, 21, 5757.
20. Z. Lv D. Chen and M. S. Hossain, Traffic Safety Detection System by Digital Twins and Virtual Reality Technology (2022), IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2022, pp. 1-6.
21. Hazal Şimşek, Top 5 Use Cases of Digital Twin in Automotive Industry in 2022 (2022), available at: https://research.aimultiple.com/digital-twin-automotive/ (accessed August, 2022).

22. Hazal Şimşek, Best Digital Twin Applications & Use Cases in Healthcare in 2022 (2022), available at: https://research.aimultiple.com/digital-twin-healthcare/ (accessed August, 2022),
23. Y. Liu et al., A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin (2019), in IEEE Access, vol. 7, pp. 49088-49101, 2019.
24. Cory Kays & team (Aurora Flight Sciences), David Knezevic & Phuong Huynh (Akselos), Michael Kapteyn (MIT PhD student), Jacob Pretorius (Jessara Group), Development of a Predictive Digital Twin (2021), available at: https://kiwi.oden.utexas.edu/research/digital-twin (accessed August, 2022).
25. Shaun Waterman, Air Force Goes All in on Digital Twinning—for Bombs As Well As Planes (2021), available at: https://www.airforcemag.com/air-force-goes-all-in-on-digital-twinning-for-bombs-as-well-as-planes/ (accessed August, 2022).
26. Schrotter G., Hürzeler C, The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning (2020), PFG 88, 99–112 (2020).
27. Tianhu Deng, Keren Zhang, Zuo-Jun (Max) Shen, A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities, Journal of Management Science and Engineering (2021), Volume 6, Issue 2, 2021, Pages 125-134, ISSN 2096-2320.
28. David N. Ford, Charles M. Wolf, Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management (2020), Journal of Management in Engineering Vol. 36, Issue 4 (July 2020).
29. Shahat Ehab, Chang T. Hyun, Chunho Yeom, City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda (2021), Sustainability 13, no. 6: 3386.
30. Joe David, development of a digital twin of a flexible manufacturing system for assisted learning (2018), Available at: https://www.researchgate.net/publication/335234337_Development_of_a_digital_twin_of_a_flexible_manufacturing_system_for_assisted_learning (accessed August, 2022).
31. Christian Stary, Claudia Kaar, Sabrina Oppl, Dominik Schuhmann, Johannes Kepler University Linz, Tangibles and Digital Twins: Toward Meaningful Learning Support in CyberPhysical System Development (2022), ISBN: 978-1-912532-28-5.
32. Yitmen I., Alizadehsalehi S., Akıner ˙I., Akıner M. E, An Adapted Model of Cognitive Digital Twins for Building Lifecycle Management (2021), Applied Sciences 2021, 11, 4276.
33. Salem T., Dragomir M, Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management (2022), Applied Sciences 2022, 12, 2928.
34. What is industry 4.0? (2016), available at: http://www.industriall-union.org/industry-40-the-industrial-revolution-happening-now/ (accessed August, 2022).
35. Aheleroff S., Xu X., Zhong R. Y., Lu Y, Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model (2021), Advanced Engineering Informatics 2021, 47(2), 101225.
36. Padovano A., Longo F., Nicoletti L., Mirabelli G, A Digital Twin based Service Oriented Application for a 4.0 Knowledge Navigation in the Smart Factory (2018), IFAC-PapersOnLine 2018, 51(11), 631–636.
37. Al-Ali A. R., Gupta R., Batool T. Z., Landolsi T., Aloul F., Al Nabulsi A, Digital Twin Conceptual Model within the Context of Internet of Things (2020), Future Internet 2020, 12, 163.
38. Start Innovating with Digital Twins Technology, Available at: https://www.perforce.com/p/resources/vcs/digital-twins-technology (accessed August, 2022).
39. Hou Lei, Shaoze Wu, Guomin Zhang, Yongtao Tan, and Xiangyu Wang, Literature Review of Digital Twins Applications in Construction Workforce Safety (2020), Applied Sciences 11, no. 1: 339.
40. Kaewunruen Sakdirat, Sresakoolchai Jessada, Lin Yi-hsuan, Digital twins for managing railway maintenance and resilience (2021), Open Research Europe. 1. 91. 10.12688/openreseurope.13806.1.
41. Dirnfeld Ruth, Digital Twins in Railways (2022), 10.13140/RG.2.2.32690.68804.
42. Kampczyk Arkadiusz, Dybeł Katarzyna, The Fundamental Approach of the Digital Twin Application in Railway Turnouts with Innovative Monitoring of Weather Conditions (2021), Sensors. 21(17). 5757. 10.3390/s21175757.
43. Katharina Rombach, Towards a Data-driven Operational Digital Twin for Railway Wheels (2022) available at: https://youtu.be/5igWA9wuDdw (accessed August, 2022).

Received (Надійшла) 04.09.2022
Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

Methods and technologies for the development of digital twins for guarantee-capable systems of the industrial Internet of Things

V. Shchehlov, O. Morozova

Abstract. With the development of industries through industrial revolution 4.0, active digitization of aspects of life from transport to commerce, the availability of technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence and cloud computing, there is a growing demand for Digital Twings (DT), that can improve safety and reduce costs by collecting data, their analysis on models of real objects to make effective decisions in real time. The purpose of this article is to review the concept of DT, analyze the key domains together with examples of their use, features, problems, limitations, and benefits, and formalize common problems and limitations in DT. The paper reviewed the concept of DTs, which help in making decisions in real time to increase the efficiency of work, as well as to mitigate or prevent unexpected events during the life cycle of a real object. There are three main modeling approaches: fundamental modeling, data-driven modeling, and hybrid modeling. Another view of DT is the use of hierarchy - duplicates of components, assets, systems and processes. DTs can represent simple sensors and pumps, or DTs can be like systems and combine and model several production subsystems. The concept of DT can be applied to almost all fields of activity, but this article examines the most common industries that can be considered the main ones or that have influenced the development of Digital Twins. The analysis of key industries for the use of DT was carried out, the features and problems of application in each of the considered domains were determined. It was formulated what are the common challenges, advantages and features of digital twins.

Keywords: digital twins, digital twin industries, industry 4.0, IoT, predictive maintanence.