

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МАРІУПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІКО-ПРАВОВИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

До захисту допустити:
Завідувач кафедри

_____ Мартинюк Г.В.
(підпис) (ПІБ завідувача кафедри)

« ____ » _____ 20__ р.

**«МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ DIGITAL TWIN
ДЛЯ МІСТА МАРІУПОЛЬ У ПІСЛЯВОЄННИЙ ПЕРІОД»**

Кваліфікаційна робота
здобувача вищої освіти першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньо-професійної програми
« _____ Комп'ютерні науки _____ »
(назва освітньо-професійної програми)

Касьяненко Ірина Володимирівна
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

Науковий керівник:
_____ Мнацаканян М.С., к.т.н.
(прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання)

Рецензент:
_____ Лукашенко В.В., к.т.н., доцент
(прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, місце роботи)

Кваліфікаційна робота захищена
з оцінкою _____
Секретар ЕК _____
« ____ » _____ 20__ р.

**МАРІУПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЕКОНОМІКО-ПРАВОВИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Рівень вищої освіти Бакалавр
Шифр та назва спеціальності 122 Комп'ютерні науки
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерні науки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри К.Т.Н., доцент,
(науковий ступінь, вчене звання)

Мартинюк Г.В.
(ПІБ завідувача кафедри)

« » 20 р.

ПЛАН ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Касьяненко Ірини Володимирівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Моделювання технології Digital Twin для міста Маріуполь у післявоєнний період»

керівник роботи Мнацаканян М.С., к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Маріупольського державного університету від « » 20 р. №

2. Строк подання здобувачем роботи 30.05.2023

3. Вихідні дані до роботи (мета, об'єкт, предмет) Мета: вивчення основних принципів та методів створення цифрових двійників, а також моделювання концепції цифрового двійника Маріуполя та аналіз застосування цієї концепції в контексті управління міськими ресурсами та розвитку інфраструктури; об'єкт: інтерактивна модель інфраструктури міста Маріуполь; предмет: моделювання концепції цифрового двійника міста Маріуполь, що передбачає створення точної копії міста у віртуальному середовищі.

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Розділ 1. Аналіз сутності поняття «Цифровий двійник»: типи, архітектура, функції, цілі та задачі

Розділ 2. Побудова концепції роботи цифрового двійника великих міст в сучасних умовах

Розділ 3. Розробка алгоритму побудови і функціонування цифрового двійника міста Маріуполь

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання 01.03.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сутності поняття «Цифровий двійник»: типи, архітектура, функції, цілі та задачі	21.03.2023	
2	Побудова концепції роботи цифрового двійника великих міст в сучасних умовах	04.04.2023	
3	Розробка алгоритму побудови і функціонування цифрового двійника міста Маріуполь	01.05.2023	
4	Оформлення кваліфікаційної бакалаврської роботи	15.05.2023	
5	Розробка графічного матеріалу для презентації роботи	19.05.2023	

Здобувач

_____ (підпис)

Касьяненко І.В.

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник роботи

_____ (підпис)

Мнакацян М.С.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Моделювання технології Digital Twin для міста Маріуполь у післявоєнний період» поєднує в собі наступні розділи: аналітичний, дослідницький та проєктний.

У першому розділі аналізуються сутність поняття та види цифрових систем, проводиться аналіз архітектури та механізму роботи, досліджуються основні функції та можливості цифровий двійників, визначаються типи двійників за різними класифікаційними ознаками. Надається характеристика видам цифрових двійників за сферою застосування, за рівнем складності візуальної моделі та за етапами виробництва продукту. Розглядається використання цифрових двійників в найрізноманітніших галузях для різних застосувань і цілей, наводяться приклади їх застосування у світі.

У другому розділі досліджується операційний механізм роботи цифрового двійника міста та його технічні особливості, проводиться детальний опис ключових елементів будівництва цифрових двійників для великих міст та наводиться світовий приклад впровадження цифрового двійника міста.

У третьому розділі пропонується архітектура цифрового двійника міста Маріуполь для застосування при розробці, розроблена докладна схема структури цифрового двійника та її опис, створена у хронологічному порядку подієва стрічка з описом кожного етапу розробки цифрового двійника Маріуполя, проаналізований вплив впровадження цифрового двійника для міста на різні сфери його роботи.

SUMMARY

The explanatory note to the qualification work on the topic "Modeling Digital Twin Technology for the City of Mariupol in the Postwar Period" combines the following sections: analytical, research, and design.

The first section analyzes the essence of the concept and types of digital systems, analyzes the architecture and mechanism of operation, explores the main functions and capabilities of digital twins, and identifies types of twins according to various classification criteria. The types of digital twins are characterized by the field of application, by the level of complexity of the visual model and by the stages of product production. The use of digital twins in a wide variety of industries for various applications and purposes is considered, and examples of their use in the world are given.

The second section examines the operational mechanism of the digital twin city and its technical features, provides a detailed description of the key elements of building digital twins for large cities, and provides a global example of the implementation of a digital twin city.

The third section proposes the architecture of the digital twin of the city of Mariupol for use in the development, develops a detailed diagram of the digital twin structure and its description, creates a chronological event feed describing each stage of the development of the digital twin of Mariupol, and analyzes the impact of the implementation of the digital twin for the city on various areas of its work.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУТНОСТІ ПОНЯТТЯ «ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК»: ТИПИ, АРХІТЕКТУРА, ФУНКЦІЇ, ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ	10
1.1 Поняття «Цифровий двійник»	10
1.2 Дослідження архітектури цифрової двійникової системи.....	12
1.3 Дослідження основних функцій та можливостей цифрового двійника .	14
1.4 Класифікація цифрових двійників	16
1.4.1 Типи цифрових двійників за сферою застосування	16
1.4.2 Типи цифрових двійників за рівнем складності візуальної моделі	18
1.4.3 Типи цифрових двійників за етапами виробництва продукту	18
1.5 Задачі та цілі цифрового двійника	19
Висновки до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА КОНЦЕПЦІЇ РОБОТИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ВЕЛИКИХ МІСТ В СУЧАСНИХ УМОВАХ.....	23
2.1 Механізм роботи цифрового двійника міста.....	23
2.2. Моделювання концепції цифрового двійника для великих міст	26
2.3 Світовий приклад цифрового двійника міста	30
Висновки до розділу 2	32
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МІСТА МАРІУПОЛЬ	34
3.1. Архітектура цифрового двійника міста Маріуполь	34
3.2 Структура цифрового двійника міста Маріуполь.....	39
3.3 Етапи створення цифрового двійника міста Маріуполь	42
3.4 Поліпшення Маріуполя за допомогою цифрового двійника міста	45
Висновки до розділу 3	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

ВСТУП

Технологія Digital Twin у сучасному світі посідає вагоме місце в житті людини. Цифрові двійники застосовуються в різних галузях, зокрема й у міському управлінні. Однією з перспективних концепцій, яка може істотно поліпшити якість життя городян, є концепція цифрового двійника міста.

Цифровий двійник міста є віртуальною моделлю міста, яку створюють на основі даних, отриманих із різних джерел, таких як датчики, камери спостереження та інші. Ця модель дає змогу аналізувати і прогнозувати різні аспекти життя міста, як-от рух транспорту, завантаженість доріг, рівень забруднення повітря тощо.

Тема диплома є актуальною і перспективною у світлі сучасних тенденцій розвитку міського управління та використання цифрових технологій. Маріуполь, як важливий економічний центр Донецької області, має великий потенціал для розвитку. Створення цифрового двійника Маріуполя дасть змогу більш ефективно управляти міською інфраструктурою, аналізувати та прогнозувати різні аспекти життя міста, скоротити витрати та час на відбудову міста та розв'язання різних інших проблем. У майбутньому це підвищить рівень комфорту життя городян і поліпшить якість міського середовища.

Незважаючи на розвинену економіку та інфраструктуру, будь-які міста, а також Маріуполь, стикаються з рядом проблем. Наприклад проблеми транспорту, а саме перевантаженість доріг, недостатня кількість громадського транспорту, неефективна організація паркування та інше. Екологічні проблеми, головною із яких є забруднення повітря внаслідок викидів від автомобілів, промислових підприємств та домашніх печей, а також накопичення сміття та відходів, які можуть бути небезпечними для здоров'я та навколишнього середовища, якщо не обробляються та утилізуються правильно та вчасно. Або проблеми безпеки, які в свою чергу впливають на рівень злочинності, тероризму, екстремізму та число аварій. Впровадження цифрового двійника міста полегшить вирішення цих проблем у Маріуполі, а

саме, прискорить процес ухвалення рішень, завдяки можливості аналізувати дані про стан інфраструктури та прогнозувати її розвиток та удосконалить міську інфраструктуру, підвищить її ефективність і стійкість;

Об'єктом дослідження цього дипломного проекту є інтерактивна модель інфраструктури міста Маріуполь.

Предметом дослідження є моделювання концепції цифрового двійника міста Маріуполь, що передбачає створення точної копії міста у віртуальному середовищі.

Тема створення цифрових двійників міст та їхнього застосування для управління міською інфраструктурою і підвищення якості життя населення є досить новою і нині активно вивчається в спеціальній науковій літературі. Дослідники активно вивчають технічні аспекти створення цифрових двійників міст, а саме, збирання й аналіз даних, моделювання міської інфраструктури, прогнозування й оптимізація, а також аспекти соціально-економічного впливу цієї концепції на місто та його жителів. Однак, незважаючи на активність досліджень, ця тема все ще перебуває на початковій стадії розвитку, і її подальше вивчення та розвиток є актуальним і перспективним напрямом наукових досліджень.

Метою дослідження є вивчення основних принципів та методів створення цифрових двійників, а також моделювання концепції цифрового двійника Маріуполя та аналіз застосування цієї концепції в контексті управління міськими ресурсами та розвитку інфраструктури.

Основні завдання дослідження:

- Аналіз літератури та методів впровадження цифрових двійників в різні галузі;
- Дослідження механізму роботи та ключових елементів для створення цифрового двійника міста;
- Вивчення наявних підходів до створення цифрових двійників міст та розглядання їх застосування у світі;

- Розробка концепції цифрового двійника міста Маріуполь, визначення архітектури і структури, які будуть враховуватися при моделюванні;
- Визначення результатів впровадження цифрового двійника міста Маріуполь.

Для дослідження теми була використана велика джерельна база, що включає наукові статті, звіти з наукових конференцій та форумів та інші матеріали, опубліковані в різних джерелах. Аналіз був спрямований на виявлення поточного стану та перспектив розвитку концепції цифрових двійників міст, а також на пошук прикладів успішної реалізації подібних проєктів. Джерельна база дослідження дала змогу отримати широкий огляд поточного стану і перспектив розвитку концепції цифрових двійників міст, а також розробити модель цифрового двійника міста Маріуполь.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУТНОСТІ ПОНЯТТЯ «ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК»: ТИПИ, АРХІТЕКТУРА, ФУНКЦІЇ, ЦІЛІ ТА ЗАДАЧІ

1.1 Поняття «Цифровий двійник»

Цифрові двійники – це віртуальні образи, які виступають як цифровий еквівалент фізичних пристроїв, об'єктів чи систем у реальному часі [1]. Цифровий двійник – програмний аналог фізичного пристрою, що моделює внутрішні процеси, технічні характеристики та поведінку реального об'єкта в умовах впливу перешкод та навколишнього середовища [2].

Цифровий двійник можна використовувати в багатьох видах діяльності, довкола цієї технології існує безліч різних понять. З усіх цих визначень дослідники розрізняють їх за рівнем інтеграції технології з реальним світом. Усі 3 типи (рис.1.1.) представляють у цифровому вигляді існуючий актив, але можливість обмінюватися даними у всіх різна.

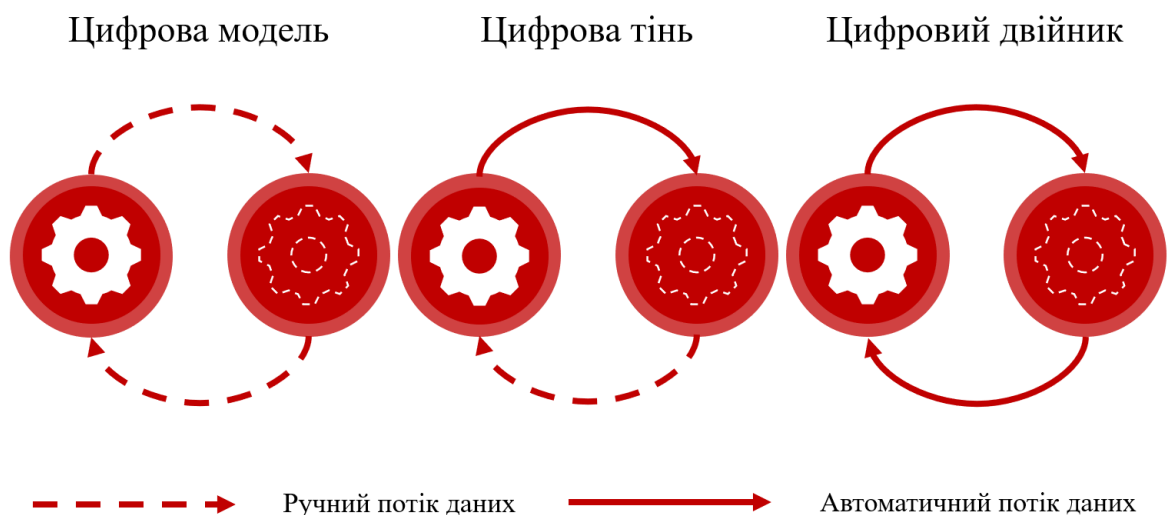


Рисунок 1.1 – Рівні інтеграції технології цифрових двійників з реальним світом

Вказані на малюнку типи можна представити так:

1. Цифрова модель

Цифрові моделі - це симуляції навколишнього середовища та людей у певній галузі. Цифрова модель є тривимірним уявленням продукту. Цифрова модель не автоматизує обмін даними від фізичної до цифрової моделі. Весь потік даних здійснюється вручну, крім того, жодні зміни у стані фізичної чи цифрової моделі не мають прямих наслідків в обох [3].

2. Цифрова тінь

Цифрові тіні є віртуальними копіями, які ми створюємо для взаємодії з іншими людьми та середовищами.

Здебільшого цифрові тіні засновані на сканованих лазерних даних. З іншого боку, потік даних є одностороннім процесом. Це означає, що дані можуть передаватися лише з одного місця до іншого. Зміна у фізичному об'єкті може вплинути на цифровий, але зворотного не відбувається [3]. Можна створювати цифрові тіні цифрових двійників, оскільки вони можуть вловлювати і спрощувати безліч інформації, що проходить через двійника у час доби.

3. Цифровий двійник

Цифровий двійник – це віртуальне уявлення фізичного аналога. Це неймовірна нова технологія, яка може змінити те, як ми виробляємо та проектуємо продукти, оптимізувати обладнання та будівлі, а також збирати дані для прийняття рішень [4]. Існує потік даних між фізичним об'єктом та цифровим і навпаки. Як Цифрова Тінь, фізичне може контролювати цифрове, а й цифрове у разі втручається у фізичне. Цей постійний потік повністю інтегрований, і є те, що робить цифровий двійник [3].

Якщо казати коротко, то цифровий двійник – це уявлення у цифровому форматі реально існуючих об'єктів чи систем. По суті, це така комп'ютерна програма, яка створює симуляцію реального світу за допомогою вхідних даних і може передбачити роботу цього об'єкту, системи або процесу в різних умовах. Ця технологія дозволяє отримати глибоке уявлення про внутрішні операції будь-якої системи, взаємодію між різними частинами системи та

майбутню поведінку їх фізичного аналога у формі, зручній для дій користувачів та зацікавлених сторін [5].

Він складається з трьох елементів:

1. Фізичний об'єкт у реальному світі
2. Цифровий двійник у вигляді програмного забезпечення
3. Дані, які пов'язують ці два елемента

Цифровий двійник може бути цифровою копією майже будь-якого об'єкта у фізичному світі, наприклад вітряна електростанція або реактивний двигун, або навіть більш великі об'єкти, такі як будинки, райони або цілі міста. Він також є унікальним для цього об'єкта, а не просто загальний для всієї категорії. Цифрові двійники двох ідентичних об'єктів зазвичай зовсім різні.

1.2 Дослідження архітектури цифрової двійникової системи

Система цифрових двійників містить апаратні та програмні компоненти з проміжним програмним забезпеченням для управління даними між ними.

(рис. 1.2)



Рисунок 1.2. – Архітектура цифрової двійникової системи

Апаратні компоненти. Датчики Інтернету речей (IoT) – ключова технологія цифрового двійника. Вони ініціюють обмін інформацією між активами та їх програмним представленням. Виконавчі механізми апаратної

частини перетворюють цифрові сигнали в механічні рухи, мережеві пристрої, такі як маршрутизатори, периферійні сервери, шлюзи Інтернету речей тощо.

Проміжне програмне забезпечення для управління даними. Централізоване сховище для накопичення даних з різних джерел – це базовий елемент проміжного програмного забезпечення. В ідеалі, ця платформа також виконує такі завдання, як підключення, інтеграція даних, обробка даних, контроль якості даних, візуалізація даних, моделювання та управління даними тощо. Прикладами таких рішень є загальні платформи IoT та промислові платформи (IIoT), які часто постачаються із заздалегідь вбудованими інструментами цифрового двійника.

Програмні компоненти. Важливою частиною є аналітичний механізм, який перетворює сирі спостереження на цінні бізнес-інсайти. У багатьох випадках він працює на основі моделей машинного навчання. Іншими обов'язковими частинами цифрового двійника є інформаційні панелі для моніторингу в режимі реального часу, інструменти для моделювання та програмне забезпечення для імітаційного моделювання.

Маючи всі необхідні компоненти, можна з'єднати фізичні системи та їхні віртуальні репрезентації в замкнутий цикл або цифровий потік (рис 1.3.).

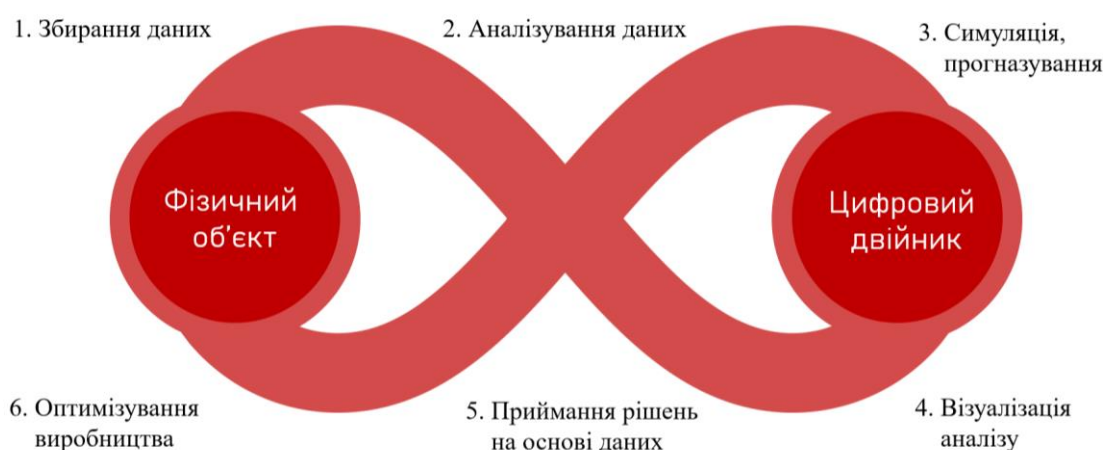


Рисунок 1.3. – Цифровий потік

У представленому замкнутому циклі виконуються наступні ітеративні операції:

1 - Дані збираються з фізичного об'єкта та його оточення і надсилаються до централізованого сховища.

2 - Дані аналізуються і готуються до передачі в цифровий двійник.

3 - Цифровий двійник використовує свіжі дані, щоб відобразити роботу об'єкта в реальному часі, перевірити, що станеться, якщо середовище зміниться, і знайти перешкоди. На цьому етапі можна застосувати алгоритми штучного інтелекту, щоб скоригувати розробку продукту або виявити нездорові тенденції та запобігти дорогим простоям.

4 - Результати аналізу візуалізуються та представляються на інформаційній панелі.

5 - Зацікавлені сторони приймають дієві рішення на основі даних.

6 - Параметри фізичного об'єкта, процесу або графіки технічного обслуговування коригуються відповідним чином.

Потім процес повторюється на основі нових даних.

1.3 Дослідження основних функцій та можливостей цифрового двійника

Дослідження основних функцій та можливостей цифрового двійника показало, що їх можна розділити на (рис.1.4.):



Рисунок 1.4. – Функції та можливості цифрового двійника

1. Управління документацією. Всі документи (креслення, інструкції тощо), пов'язані з обладнанням протягом його життєвого циклу [6].

2. Модель. Цифрова копія фізичного об'єкту точно відтворює його властивості та характеристики. Цифрові двійники дозволяють користувачам створювати 3D-моделі фізичних об'єктів у створеному середовищі та відстежувати їхню поведінку.

3. 3D-представлення. 3D- представлення - це точна візуальна копія фізичного об'єкту. Воно створює майже реальний досвід, допомагаючи швидко зрозуміти дані в аналітичних звітах. Властивості фізичного пристрою (виміряні або змодельовані), перенесені в 3D цифрове представлення [6].

4. Моделювання. Програмне забезпечення для симуляції цифрового двійника поміщає віртуальну модель фізичного пристрою у віртуальне середовище. Він також змінює параметри середовища, щоб відстежувати поведінку пристрою в різних умовах.

5. Модель даних. Цифровий двійник здатен надати користувачам модель даних у реальному часі. Він візуалізує зв'язки між елементами фізичного пристрою або системи. Він дозволяє маркувати дані та забезпечує прозорий перегляд операцій і процесів.

6. Візуалізація. Ця функція дозволяє користувачам переглядати моделі на окремій робочій станції або мобільному пристрої. Це дає миттєве розуміння деталей, пов'язаних з функціональністю пристрою або системи.

7. Синхронізація моделі. Ця чудова функція вирівнює цифрову модель з параметрами реального світу. Сучасне програмне забезпечення для моделювання здатне робити це в режимі реального часу. Ви миттєво бачите відображення всіх фізичних змін у цифровому двійнику.

8. Підключена аналітика. Аналітика дає вам дані на основі вимірних властивостей фізичного пристрою. Цифровий двійник використовує алгоритми та обчислення машинного навчання. Таким чином, ви отримуєте уявлення про роботу та поведінку вашого пристрою або системи.

1.4 Класифікація цифрових двійників

1.4.1 Типи цифрових двійників за сферою застосування

Цифрові двійники здатні моделювати все - від окремих компонентів до цілих систем. Хоча кожен тип цифрових двійників по суті робить одне й те саме - віртуально моделює реальний об'єкт або систему - їхні цілі та сфера застосування значно різняться між собою. Існує чотири основні типи цифрових двійників:



Рисунок 1.5 - Типи цифрових двійників за сферою застосування

1. Двійники компонентів / деталей

Двійники компонентів - це цифрові уявлення окремої частини системи чи виробу, наприклад, шестерні чи гвинта. Це компоненти, які не такі важливі, але схильні до постійних високих або стрибкоподібних впливів [7]. Вони можуть використовувати програмне забезпечення для моделювання, щоб проаналізувати, як поводитиметься аналізований компонент при статичних або теплових навантаженнях та інших реальних сценаріях. Конструктори та інженери зможуть побачити, як можна покращити деталі, щоб забезпечити їхню цілісність у ймовірних сценаріях.

2. Двійники активів

Двійники активів - це наступний рівень цифрових двійників. Вони описують, як окремі компоненти працюють разом як єдине ціле [7]. Двійники активів дозволяють вивчати взаємодію цих компонентів, створюючи безліч даних про продуктивність, які можна обробити і потім перетворити на практичні висновки. Хоча технічно двійники активів можуть складатися з багатьох двійників компонентів, їх мета - зрозуміти, як різні частини працюють разом в рамках одного реального продукту. Наприклад, вітряна

турбіна може мати відповідний двійник активу, який використовується для моніторингу її роботи та виявлення можливого виходу з ладу деталей в результаті звичайного зношування. Вони надають інформацію про робочий стан активу, даних про продуктивність та умови довкілля в режимі реального часу. Це допомагає організаціям скоротити час простою та підвищити ефективність роботи.

3. Двійники системи / блоку

Двійники систем – це цифрові моделі цілих систем чи процесів. Вони дозволяють організаціям відстежувати та аналізувати роботу системи та визначати області, в яких можуть бути зроблені покращення [8]. Системні двійники забезпечують наочність взаємодії активів та можуть запропонувати підвищення продуктивності. Двійник системи може бути таким великим, як багатоповерхова будівля, електрична мережа або навіть ціле місто, яке можна розглядати як систему систем. Однак інвестиції у створення такої копії у багатьох випадках можуть не відповідати очікуваній віддачі. Саме тому двійники системи не так поширені, як інші види цифрового двійника.

4. Двійники процесів

Двійники процесів – це цифрові уявлення систем, що працюють разом. Наприклад, якщо двійник системи може моделювати виробничу лінію, двійник процесу може моделювати весь завод, аж до співробітників, що обслуговують верстати на заводі. Двійники процесів можуть допомогти визначити точні часові схеми, які зрештою впливають на загальну ефективність. Тільки на цьому рівні стає по-справжньому зрозумілою вся складність моніторингу з допомогою цифрових двійників. Адже процес стає функціональним та ефективним лише тоді, коли всі одиниці, активи та компоненти виконують своє завдання [7].

1.4.2 Типи цифрових двійників за рівнем складності візуальної моделі

За рівнем складності візуальної моделі цифрового двійника виділяють 4 рівні: початковий цифровий двійник (Pre-Digital Twin), цифровий двійник, адаптивний цифровий двійник (Adaptive Digital Twin) та інтелектуальний цифровий двійник (Intelligent Digital Twin) (табл. 1.)

Таблиця 1 – Рівні складності візуальної моделі цифрового двійника [9]

Рівень	Складність моделі	Фізичний двійник	Збір даних із фізичного двійника	Застосування машинного навчання
1.Початковий цифровий двійник	Модель віртуальної системи з акцентом на технології / зниження технічних ризиків	Не існує	Не застосовується	Відсутнє
2.Цифровий двійник	Віртуальна модель системи фізичного двійника	Існує	Продуктивність, стан здоров'я, обслуговування; пакетні оновлення	Відсутнє
3.Адаптивний цифровий двійник	Віртуальна модель системи фізичного двійника з адаптивним інтерфейсом користувача	Існує	Продуктивність, стан здоров'я, обслуговування; оновлення в режимі реального часу	Частково
4.Інтелектуальний цифровий двійник	Віртуальна модель системи фізичного двійника з адаптивним інтерфейсом користувача та навчання з підкріпленням	Існує	Продуктивність, стан здоров'я, обслуговування, довкілля; пакетне оновлення / оновлення в режимі реального часу	Наявне

Для дослідження фізичного об'єкта може використовуватись цифровий двійник другого, третього та четвертого рівнів.

1.4.3 Типи цифрових двійників за етапами виробництва продукту

Існує 3 типи цифрових двійників, залежно від етапу виробництва продукту:

1. Цифрові двійники-прототипу (*Digital Twin Prototype, DTP*).

DTP-двійник містить інформацію, необхідну для опису та створення фізичних версій екземплярів виробу [2]. Хоча вважається, що цифровий двійник – це "двійник" існуючого продукту, насправді цей тип цифрового двійника створюється до появи фізичного продукту [10]. Він складається з проектів, аналізів та процесів, необхідних для створення фізичної версії продукту. Ця інформація включає геометричну та конструктивну моделі, технічні вимоги та умови; вартісну модель, розрахункову (конструкторську) та технологічну модель виробу. DTP-дублікат можна вважати умовно постійною віртуальною моделлю виробу.

2. Цифрові двійники-примірники (Digital Twin Instance, DTI).

Цей тип цифрового двійника описує конкретний фізичний продукт, з яким окремий цифровий двійник залишається пов'язаним протягом усього терміну служби цього фізичного продукту [10]. Цей прототип створюється коли реальний продукт вже існує; у цьому випадку цифровий двійник використовується для проведення випробувань у різних середовищах, де може бути застосований. Залежно від необхідних сценаріїв використання цей тип цифрового двійника може містити безліч різних типів інформації: геометричну інформацію, інформацію про обслуговування, зміни деталей, тощо. DTI-двійник виробу піддається змін відповідно до змін фізичного екземпляра під час його експлуатації [2].

3. Агреговані двійники (Digital Twin Aggregate, DTA).

DTA – це сукупність багатьох DTI. На відміну від DTI, DTA може бути незалежною структурою даних. Інформація та дані, отримані раніше від реального продукту, використовуються для прогнозування та визначення його можливостей.

1.5 Задачі та цілі цифрового двійника

Цифрові двійники використовуються в найрізноманітніших галузях для різних застосувань і цілей. Деякі з найвідоміших прикладів включають:

1. Виробництво. Оскільки цифрові двійники покликані відображати весь життєвий цикл продукту, не дивно, що цифрові двійники стали повсюдно використовуватися на всіх етапах виробництва, супроводжуючи продукти від дизайну до готового продукту, а також на всіх етапах між ними [11]. Цифрові двійники можуть зробити виробництво більш продуктивним і впорядкованим, скорочуючи при цьому час проходження даних. Ford була однією з перших компаній, яка впровадила стратегію цифрових двійників. Компанія використовує цифрових двійників для моніторингу та управління своїми виробничими процесами в режимі реального часу, переконуючись, що продукція виробляється максимально ефективно, а ресурси використовуються раціонально [8].

2. Комунальні послуги та енергетика. Енергетичні компанії впроваджують цифрові двійники для проектування, моніторингу та обслуговування електростанцій, електромереж, передачі та споживання електроенергії. Технологія також може допомогти підвищити ефективність систем відновлюваної енергетики, таких як сонячні та вітрові електростанції, чие виробництво менш передбачуване, ніж на станціях, що спалюють викопне паливо. Цифрові двійники процесів можуть колись стати дзеркальним відображенням цілих електромереж.

3. Роздрібна торгівля та електронна комерція. За межами виробництва та промисловості цифрові двійники використовуються в секторі роздрібної торгівлі для моделювання та покращення клієнтського досвіду, як на рівні торгового центру, так і в окремих магазинах. Рітейлери почали використовувати цифрових двійників для моделювання розміщення товарів, подорожі покупця магазином і впливу нових макетів магазинів.

Intermarché, французька мережа супермаркетів, використовує цифрові двійники для підвищення якості обслуговування клієнтів у своїх магазинах. Цифровий двійник відстежує рух клієнтів та аналізує їхню взаємодію з продуктами, тому Intermarché може отримати уявлення про те, які продукти цікавлять людей і як вони з ними взаємодіють. Потім цю інформацію можна

використовувати для покращення розміщення та дизайну продукту, а також створення цільових маркетингових кампаній [8].

4. Охорона здоров'я. Так само, як за допомогою цифрових двійників можна профілювати продукти, так само можна профілювати пацієнтів, які отримують медичні послуги. Однотипна система сенсорних даних може бути використана для відстеження різноманітних показників здоров'я та отримання ключової інформації [11]. Медичний сектор отримав вигоду від цифрових двійників у таких сферах, як донорство органів, підготовка хірургів і зниження ризиків при проведенні процедур. Системи також моделюють потік людей через лікарні і відстежують, де можуть існувати інфекції і хто може бути в небезпеці через контакт.

Найпоширеніший спосіб використання цифрових двійників в охороні здоров'я - це їхня здатність контролювати, управляти та вдосконалювати фізичні медичні заклади, такі як лікарні. Використовуючи цифрових двійників, медичні працівники можуть моделювати повсякденні обов'язки свого персоналу і наявність критично важливих ресурсів, таких як лікарняні ліжка або апарати штучної вентиляції легенів, щоб покращити догляд за пацієнтами і загальну організаційну ефективність.

5. Боротьба зі стихійними лихами. Глобальна зміна клімату в останні роки вплинула на весь світ, але цифровий двійник може допомогти в боротьбі з цим явищем шляхом створення більш розумної інфраструктури, планів реагування на надзвичайні ситуації та моніторингу зміни клімату.

6. Розумні міста. Цифрові двійники також можуть бути використані, щоб допомогти містам стати більш економічно, екологічно та соціально стійкими. Віртуальні моделі можуть спрямовувати рішення щодо планування та пропонувати рішення для багатьох складних викликів, з якими стикаються сучасні міста. Наприклад, реагування на проблеми в режимі реального часу може ґрунтуватися на інформації від цифрових двійників, що дозволяє таким об'єктам, як лікарні, реагувати на кризові ситуації в реальному часі. Інженерам-будівельникам та іншим фахівцям, які займаються міським

плануванням, значно допомагає використання цифрових двійників, які можуть показувати 3D і 4D просторові дані в реальному часі, а також інтегрувати системи доповненої реальності в побудоване середовище [11].

Висновки до розділу 1

1. Цифровий двійник - це цифрове представлення об'єкта або системи, які реально існують; це комп'ютерна програма, яка використовує вхідні дані для створення симуляції реального світу та може передбачити, як цей об'єкт, система чи процес працюватимуть за різних умов.

2. Технологія цифрових двійників надає розуміння внутрішньої роботи будь-якої системи, взаємодії між різними частинами системи та майбутньої поведінки її фізичних аналогів у формі, яка доступна користувачам і зацікавленим сторонам.

3. Датчики Інтернету речей (IoT) є ключовою технологією цифрового двійника. Вони ініціюють обмін інформацією між активом і його програмним представленням. Також важливою частиною цифрового двійника є механізм аналітики, який перетворює необроблені спостереження на цінну інформацію для бізнесу.

4. Цифрові двійники здатні симулювати все, від окремих компонентів до цілих систем. Є чотири основні типи цифрових двійників: двійники компонентів/частин, двійники активів, двійники систем та двійники процесів. Хоча кожен тип цифрових двійників робить, по суті, те саме — фактично імітує реальний об'єкт або систему, — їхні цілі та масштаби досить різні. Крім того, цифрові двійники відрізняються за складністю візуальної моделі та за етапом виробництва продукту.

5. Цифрові двійники використовуються в різних галузях промисловості для різних застосувань і цілей.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА КОНЦЕПІЇ РОБОТИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ВЕЛИКИХ МІСТ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

2.1 Механізм роботи цифрового двійника міста

Цифровий двійник міста - це, по суті, віртуальна копія реального міста, яку можна використати для підвищення його ефективності.

Операційний механізм цифрового двійника міста (рис. 2.1) складається з декількох етапів.

1. В режимі реального часу за допомогою IoT, інформаційного моделювання та повсюдної мережі збираються дані про міські операції, дорожній рух та екологічні умови. Це дозволить відобразити та поєднати реальність та віртуальність.

2. Карти знань і алгоритми аналізу великих даних, засновані на схемах роботи міста, допоможуть проаналізувати проблеми в цифровому просторі та сформулювати наукові рекомендації для політиків

3. Завдяки дистанційному керуванню та інтерактивному інтерфейсу IoT за допомогою віртуального механізму можна контролювати реальне місто та створити: 1) послуги з управління всім життєвим циклом фізичного міста; 2) оптимізацію та вдосконалення роботи міста; 3) сталий розвиток економіки.

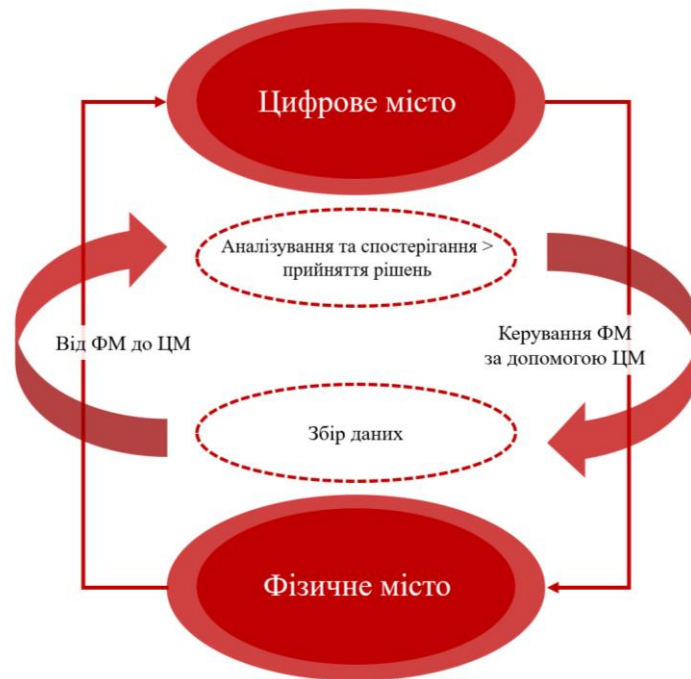


Рисунок 2.1 - Операційний механізм цифрового двійника міста

Цифровий двійник міста має чотири технічні особливості (рис. 2.2) [12]:

- 1) точне відображення фізичного міста і цифрового міста; 2) аналіз та висновки з цифрового міста; 3) віртуально-реальна взаємодія між цифровим та фізичним містом; 4) інтелектуальне застосування ідей із цифрового міста до фізичного міста.

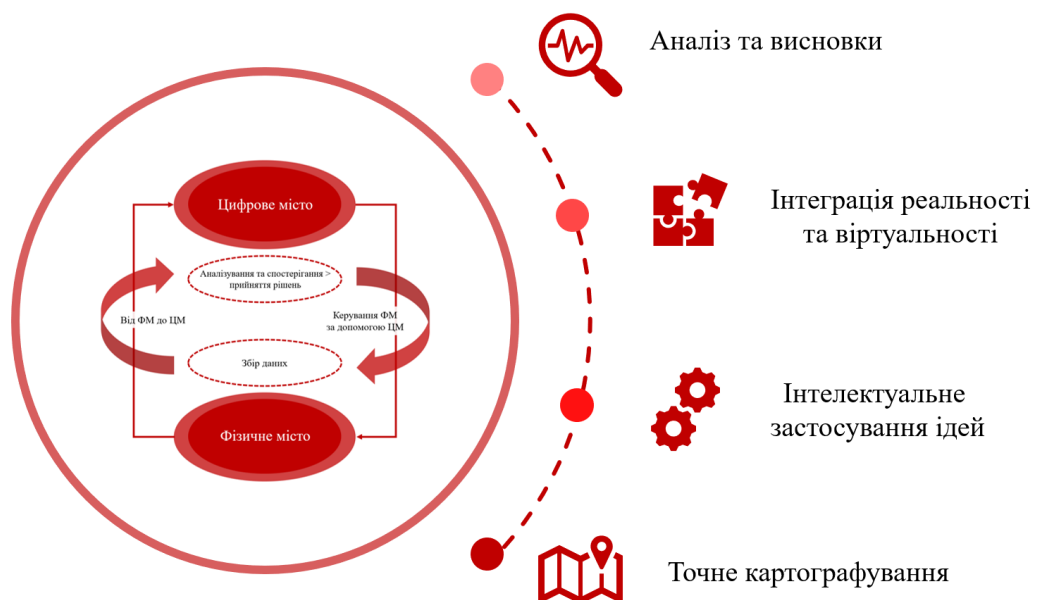


Рисунок 2.2 – Технічні особливості цифрового двійника міста

1. Точне відображення фізичного міста і цифрового міста

Технології Інтернету речей, географічні інформаційні системи (ГІС) та інформаційне моделювання будівель (ВІМ) допомагають цифровому двійнику міста представити повну картину роботи фізичного міста на декількох рівнях та масштабах, включаючи статичні географічні об'єкти, такі як будівлі, дороги, рослинність, системи водопостачання, міські компоненти та трубопроводи, а також транзитні елементи, такі як люди, транспортні засоби, пристрої та організації.

2. Аналіз та висновки з цифрового міста.

На основі злиття та інтеграції даних у цифровому просторі, зібраних у фізичному місті, можна аналізувати такі фактори, як міські затори, енергоспоживання будівель, міське планування та підземні трубопроводи. В результаті містобудівники можуть зрозуміти ризики, пов'язані з роботою міста, і представити сценарії реального світу за допомогою цифрового моделювання, що може допомогти їм покращити логістику міста, наприклад, змінити час роботи світлофорів, контролювати об'єкти з високим енергоспоживанням та розробити відповідні стратегії з покращення міста.

3. Віртуально-реальна взаємодія між цифровим та фізичним містом.

Завдяки створенню цифрового двійника фізичне місто збагачується, розширюється та збільшується у цифровому просторі. Наприклад, міські менеджери можуть взаємодіяти з фізичним містом через інтерфейс цифрової платформи для пошуку конкретних об'єктів, вибирати 3D-простір для статистичного аналізу, змінювати планування міста та моделювати зміни різних міських показників, наприклад, пов'язаних із заторами та екологією.

4. Інтелектуальне застосування ідей із цифрового міста до фізичного міста.

У цифровому просторі платформа цифрового двійника міста може представити стан міських операцій у режимі реального часу. У разі аварії, катастрофи або іншої надзвичайної ситуації у фізичному місті, міські керуючі можуть ефективно приймати рішення та вжити відповідних заходів. Крім того, за допомогою глибокого навчання та моделювання, платформу можна

використовувати для прогнозування можливих проблем чи ризиків у місті. Виявивши ризики та проблеми заздалегідь, можна запобігти зменшенню втрат майна та захистити людей.

2.2. Моделювання концепції цифрового двійника для великих міст

Будівництво цифрового двійника міста потребує охопити дев'ять ключових елементів, являючи собою структуру "4+5" (рис. 2.3) [12].

Ця структура включає чотири основні елементи: 1) інфраструктура; 2) ресурси даних; 3) місткість платформи; 4) сценарії застосування. Та п'ять зовнішніх елементів: 1) стратегія і механізми; 2) зацікавлені сторони; 3) фінансування та бізнес-моделі; 4) стандарти та оцінка; 5) кібербезпека.

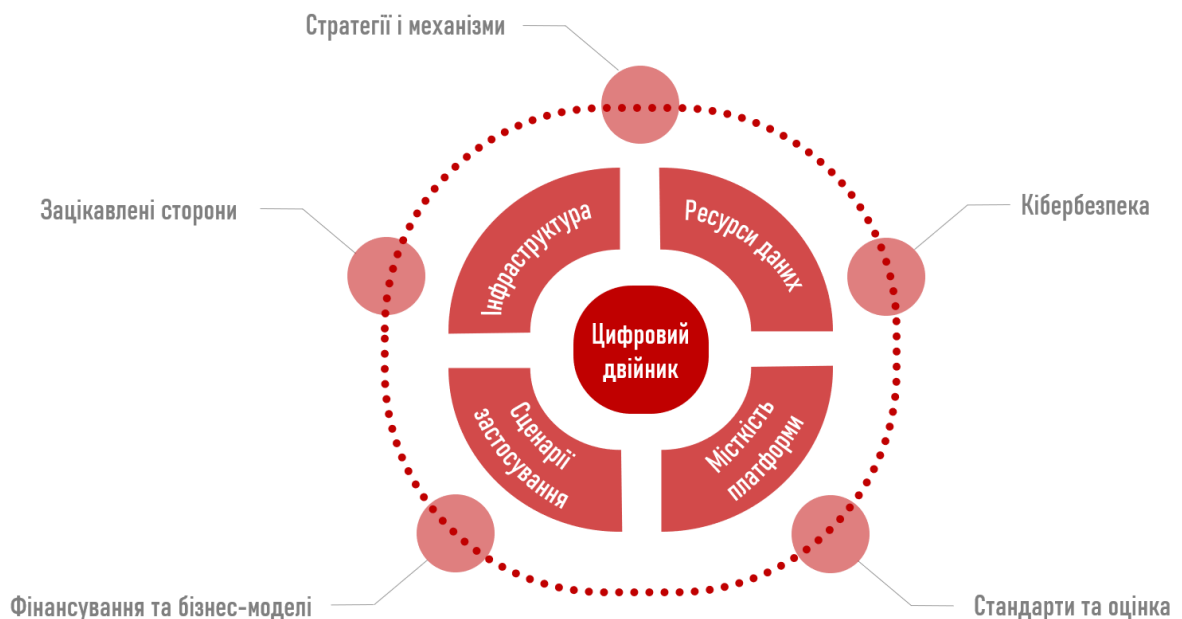


Рисунок 2.3 – Ключові елементи цифрового двійника міста

До внутрішніх елементів можна віднести:

- *Інфраструктура*

Інформаційна інфраструктура стає базою даних цифрового двійника міста. Датчики та платформи IoT міського рівня визначають умови роботи міста і забезпечують відправну точку для дистанційного курування міськими компонентами. Попит на масову агрегацію даних і обробку даних цифрового

двійника в режимі реального часу збільшує потребу у ресурсах міської хмарної мережі. Мережеві засоби, такі як мережі 5G, вузькосмугові повсюдні мережі і повністю оптичні мережі, забезпечують канали для комплексного взаємозв'язку; багаторівневі центри зберігання даних і хмарні центри обробки даних задовольняють потребу в повному зберіганні даних у всьому домені; передові обчислювальні засоби, такі як високопродуктивні обчислення, розподілені обчислення, обчислення зі штучним інтелектом, хмарні обчислення і периферійні обчислення, забезпечують надійну обробку даних для цифрового двійника.

- Ресурси даних

Повноцінні та повнооб'ємні інформаційні ресурси є важливою частиною цифрового двійника фізичного міста. Наразі будівництво цифрових міст-двійників не лише сприяє об'єднанню даних від уряду і промисловості, а й відкритому доступу до міських просторово-часових даних; це включає безперервну інтеграцію даних з різних джерел, таких як дані про будівлі, мости, дороги, муніципалітети та інші дані з традиційної інфраструктури, а також збір даних у режимі реального часу з датчиків IoT. У той же час обладнання і можливості для збору даних постійно вдосконалюються. Географічні дані збираються за допомогою косоного фотографування і лазерного сканування, а 3D-дані збираються автоматично за допомогою технологій штучного інтелекту, таких як глибоке навчання. Усі ці заходи сприяють формуванню інтегрованого, високоточного цифрового двійника міста, який проектує фізичне місто у всіх аспектах для впорядкованого розвитку міста та надання зручних послуг для громадян.

- Місткість платформи

Створення цифрового двійника міста має підтримуватися платформою на рівні міста, яка забезпечує єдиний діалоговий інтерфейс, операційну систему та середовище розробки для цифрового міста-побратима. Платформа міського рівня слугує основним центром. Знизу платформа об'єднує різні інфраструктури та агрегує дані з різних джерел про роботу міста та його

компонентів; зверху платформа забезпечує доступну та багатofакторну платформу для розробки різноманітних програм, це значно зменшує витрати уряду та підприємств. У той же час, платформа надає різні технічні можливості, такі як моделювання цифрового двійника та просторові обчислення, що забезпечує багатовимірну підтримку у розробці цифрових додатків для підприємств, а громадянам – у використанні послуг віртуально-реальної інтеграції.

- *Сценарій застосування*

Сценарії застосування оживляють цифровий двійник міста. Наприклад, за допомогою цифрових двійників можна моделювати інтенсивність світла і тіні. Це дає змогу оптимізувати міське освітлення для досягнення балансу між вимогами безпеки та цілями енергозбереження, сприяючи низьковуглецевій трансформації міст та покращуючи умови життя. Міські планувальники також можуть покращити використання, експлуатацію та обслуговування енергетичних систем, фіксувати вуглецеву траєкторію міста та сприяти вуглецевій нейтральності. Водночас технологія цифрових двійників може допомогти відстежувати і прогнозувати переміщення людей, місць і об'єктів у місті, що робить можливим комплексне і систематичне попереднє планування і проектування, уникаючи високих витрат та випадкового знесення через проблематичне будівництво.

До зовнішніх допоміжних елементів можна віднести:

- *Стратегія та механізм*

Формулювання стратегій і механізмів оптимізує політичне середовище цифрового двійника міста та сприятиме стандартизованому, упорядкованому і здоровому розвитку.

Стратегії та механізми в основному включають 1) стратегії інформатизації, плани впровадження та плани дій на різних рівнях, таких як національний, регіональний та міський; 2) політику заохочення, політику підтримки та механізми стимулювання для сприяння розвитку галузей,

пов'язаних з цифровими двійниками; 3) принципи управління та етичні норми для регулювання розвитку цифрових двійників.

- *Зацікавлені сторони*

Зацікавлені сторони є важливими розробниками та користувачами технологій цифрового двійника міста, вони важлива частина екосистеми цифрового двійника. Цифрове місто-побратим передбачає участь багатьох зацікавлених сторін, таких як органи місцевого самоврядування, постачальники послуг ІКТ (інформаційно-комунікаційних технологій), громадяни, регуляторні органи, міські оператори та забудовники. Ключами до координації та об'єднання цих зацікавлених сторін є: механізм довіри між зацікавленими сторонами; екологія альянсу різних постачальників; механізм широкої та активної участі громадян; та механізм міського оператора для довгострокового розвитку.

З боку пропозиції уряд і підприємства повинні сприяти обміну даними та санкціонованому використанню даних через механізм довіри. Слід заохочувати підприємства до створення галузевих альянсів або спільнот цифрових двійників, а кожен постачальник повинен створювати відповідні системи або проекти, які відповідають його власним інтересам у своїй галузі. Що стосується попиту, слід вживати більше заходів для заохочення та підтримки громадян брати участь у будівництві та експлуатації цифрового двійника міста.

- *Фінансування та бізнес-модель*

Фінансування та бізнес-моделі є ключовими засобами оптимізації розподілу ресурсів, а також процесів створення та функціонування програм цифрового двійника міста, та впливають на його ефективність. Наразі основним джерелом фінансування цифрових міст-побратимів залишаються державні закупівлі. Основним режимом роботи програм цифрового двійника міста є співпраця між урядом і підприємством, тобто уряд інвестує та забезпечує громадську інфраструктуру, а підприємства будують віртуальне місто. Після завершення роботи уряд використовує віртуальне місто для

прогнозування та прийняття рішень, а також для надання послуг населенню регіону.

- Стандарти та оцінка

Стандарти та оцінки є правилами побудови цифрового міста-близнюка, також вони є важливими посиланнями для оцінки його діяльності.

На даний момент немає єдиного стандарту приймання та дієвої системи оцінки експлуатації. Стандарти оцінки приймання, тестування, пробних запусків та експлуатації кожного проекту не є єдиними, і користувачі стикаються з певними ризиками та труднощами під час оцінки завершення проекту та наслідків будівництва. У майбутньому необхідно буде створити систему оцінки рівня завершеності та відповідні методи оцінки для проекту цифрового двійника міста, виходячи з очікуваних результатів.

- Кібербезпека

Побудова цифрового двійника міста охоплює всю технологічну екосистему хмарних обчислень, інтернету та пристроїв. Оскільки об'єднання даних і масштаби користувачів досягають безпрецедентних висот для цифрового двійника міста, кібербезпека стає необхідним елементом. З точки зору застосування технологій, цифровий двійник включає багато передових технологій, таких як штучний інтелект, блокчейн і Інтернет речей, а рівень зрілості безпеки ще недостатній. З точки зору агрегації даних, цифровий двійник має широкий діапазон точок даних і високий ступінь концентрації, стикаючись з проблемами захисту безпеки даних та захисту персональних даних. Під час будівництва цифрового міста-близнюка необхідно дотримуватися двоколісного руху безпеки та розвитку, а концепція безпеки даних повинна бути реалізована у всіх аспектах планування, будівництва, експлуатації обслуговування та використання.

2.3 Світовий приклад цифрового двійника міста

Найсучаснішим цифровим двійником міста на 2022 рік є цифровий двійник Сінгапуру, як стверджує Всесвітній економічний форум [13].

Насправді, Сінгапур широко визнаний одним з найбільш розвинених цифрових двійників розумних міст. Країна навіть запустила "Віртуальний Сінгапур" – цифрову репрезентацію країни - ще 2014 року. Цей цифровий двійник було розроблено для того, щоб допомогти урядовим установам співпрацювати, тестувати нові технології та підтримувати політичні рішення в рамках реальної моделі міста.

Компанія AAM Group, яка отримала у 2014 році конкурсний контракт на зйомку та реалізацію першої фази проекту національної 3D-карти, використала дволітаковий підхід, щоб максимально ефективно використовувати обмежену кількість вікон для зйомки [14].

Перші версії проекту "Національне 3D-картографування Сінгапуру" було завершено в 2015 і 2017 роках, в результаті чого були створені основні геодані, такі як цифрова модель місцевості (DTM), цифрова модель поверхні (DSM), ортофото, 3D-моделі будівель з різними рівнями деталізації, знімки та хмари точок. Під час мобільного картографування вулиць було знято всі дороги загального користування в Сінгапурі, внаслідок чого було отримано не менше 600 мільярдів хмар точок та три мільйони панорамних зображень, що становило близько 25 ТБ даних. Ця кількість даних продовжуватиме зростати, тому що шлях до того, щоб стати і залишатися розумною та стійкою країною, вимагає постійного оновлення даних для підтримки актуальності інформації.

Для того, щоб цифровий двійник залишався актуальним у довгостроковій перспективі та повністю реалізував свій потенціал, життєво важливо підтримувати геопросторові дані у актуальному стані. Сінгапур застосовує дві стратегії для забезпечення цього: 1) була створена програма картографування, що забезпечує постійне фінансування безперервного збору даних для оновлення 3D-моделей міста, та 2) дослідження та інвестування в технології швидкого картографування, такі як лідарні рішення для збору даних та 3D-моделювання з урахуванням штучного інтелекту [15].

Мета полягає в тому, щоб раз на п'ять років складати карту всієї країни за допомогою аерофотозйомки та раз на два роки оновлювати дані вуличної

мобільної картографії. Такі технології, як дистанційне зондування та наземна зйомка, застосовуються в нелітні роки, щоб можна було виявити зміни на місцевості та за необхідності оновити дані. Тим часом Сінгапур стежить за розвитком подій в інших країнах, спостерігаючи за тим, як інші міста та картографічні агенції проводять свої кампанії.

Країна швидко впровадила технологію цифрового двійника завдяки зусиллям та ініціативам різних компаній та навіть державних структур. У лютому 2022 року компанія GPS Lands Singapore завершила роботу над першим у світі цифровим двійником усієї країни, а невдовзі після цього компанія Vizzio Technologies представила, як вона стверджує, "найбільший у світі" цифровий двійник країни.

Сінгапур - острівна держава, і підвищення рівня моря викликає серйозне занепокоєння. Інтегрована інфраструктура цифрового двійника вже допомагає Сінгапуру реагувати на різні виклики, такі як вплив зміни клімату. Єдина, точна, надійна та послідовна модель рельєфу допомагає національним агентствам з управління водними ресурсами, плануванню та захисту узбережжя.

Шлях перетворень у Сінгапурі визначається твердою вірою у те, що міста майбутнього спиратимуться на концепцію цифрового двійника. SLA (Singapore Land Authority) переконана, що 3D-картографія та 3D-моделювання міст стануть основою для створення цифрових двійників у масштабах міста [15].

Висновки до розділу 2

1. Використовуючи дані реального часу і штучний інтелект, цифровий двійник міста стає віртуальними, живим дзеркалом свого фізичного аналога, надаючи можливості для моделювання всього - від інфраструктури та будівництва до схем руху і споживання енергії.

2. Цифровий двійник міста має чотири технічні особливості: 1) точне картографування – представити повну картину роботи фізичного міста на

декількох рівнях та масштабах цифровому двійнику допомагають IoT, ГІС та BIM; 2) аналіз та висновки – можна аналізувати різні фактори на основі злиття та інтеграції даних фізичного міста у цифровому просторі; 3) інтеграція реальності та віртуальності – зацікавлені сторони можуть взаємодіяти з фізичним містом через інтерфейс цифрової платформи; 4) інтелектуальне застосування ідей – завдяки інформації зібраної у реальному часі керуючі можуть ефективно приймати рішення та вжити відповідних заходів, платформу також можна використовувати для прогнозування можливих проблем чи ризиків у місті.

3. При будівництві цифрового двійника міста треба враховувати чотири основні елементи: 1) інфраструктура; 2) ресурси даних; 3) потенціал платформи; 4) сценарії застосування. Та п'ять зовнішніх елементів: 1) стратегія і механізми; 2) зацікавлені сторони; 3) фінансування та бізнес-моделі; 4) стандарти та оцінка; 5) кібербезпека.

4. У 2022 році був створений найсучасніший та найбільший цифровий двійник Сінгапуру. Сінгапурський цифровий двійник використовується для підвищення стійкості та зменшення екологічних проблем.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МІСТА МАРІУПОЛЬ

3.1. Архітектура цифрового двійника міста Маріуполь

Цифровий двійник міста ґрунтується на шести шарах інформації у місті (рис. 3.1) [16]. Перші п'ять шарів будуються один на одному, додаючи додаткову інформацію про місцевість, будівлі, інфраструктуру, мобільність та IoT-пристрої в місті. Цифровий шар використовується для збору даних із міста, які потім будуть передані Віртуальному шару/Цифровому двійнику. Цифровий двійник використовує дані, отримані в місті, для додаткового моделювання оптимізації мобільності, розміщення будівель або, наприклад, проектування відновлюваних джерел енергії. Потім ця інформація передається назад через шари моделі, де вона реалізується у фізичному світі.

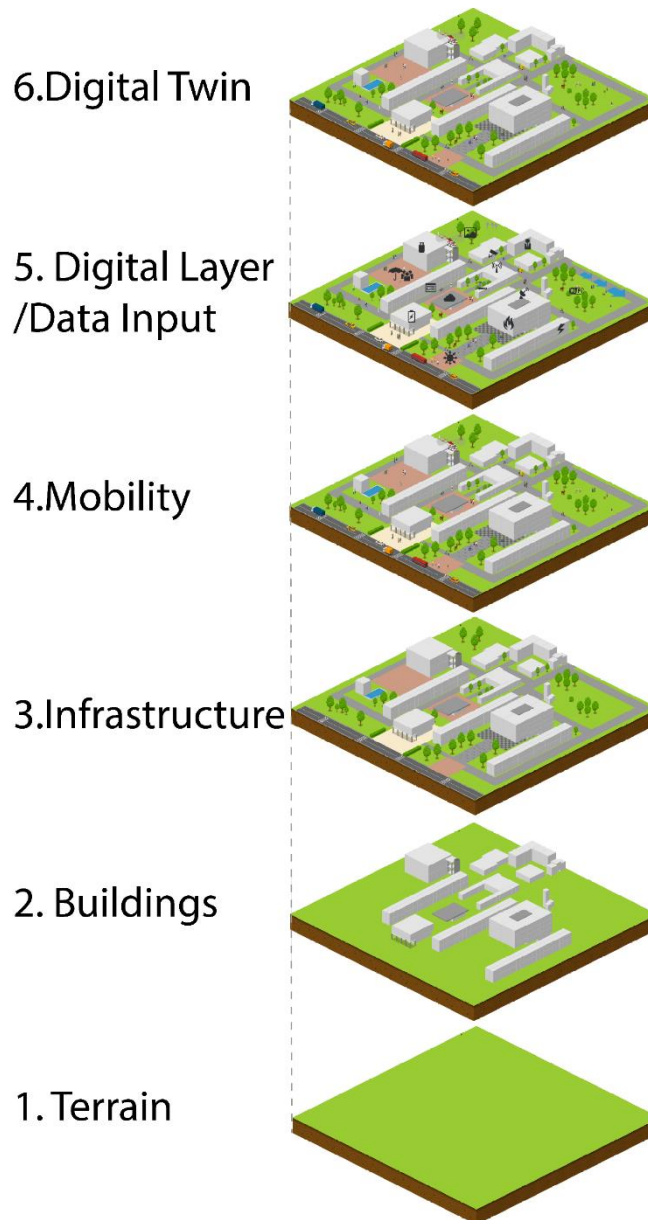


Рисунок 3.1 – Шари цифрового двійника міста [16]

1. Рельєф місцевості

Нульовим шаром проекту цифрового двійника міста є місцевість, на якій побудовано місто. Це основна інформація про місто, визначаються прибережна частина Маріуполя, річки Кальчик та Кальміус, які проходять через місто, всі круті схили чи пагорби та вся інформація про ґрунт: яка частина міста складається з піску, які райони міста мають родючий ґрунт, які території можна використовувати для вирощування сільськогосподарських культур, які райони міста можуть викликати проблеми через поганий дренаж

грунту. Ґрунтова карта (рис. 3.2) та топографічна карта (рис. 3.3) можуть бути використані для включення цієї інформації до моделі.

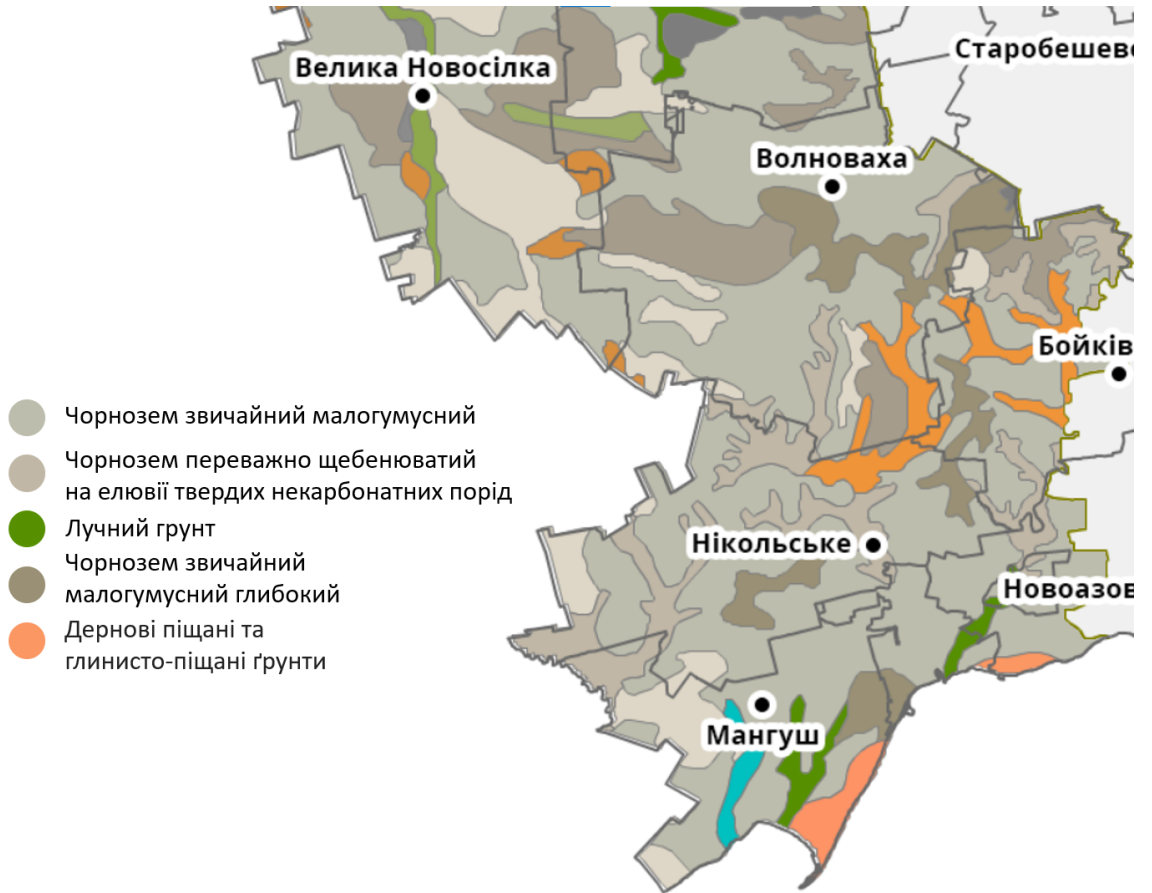


Рисунок 3.2 – Ґрунтова карта міста Маріуполь та прилеглих районів [17]

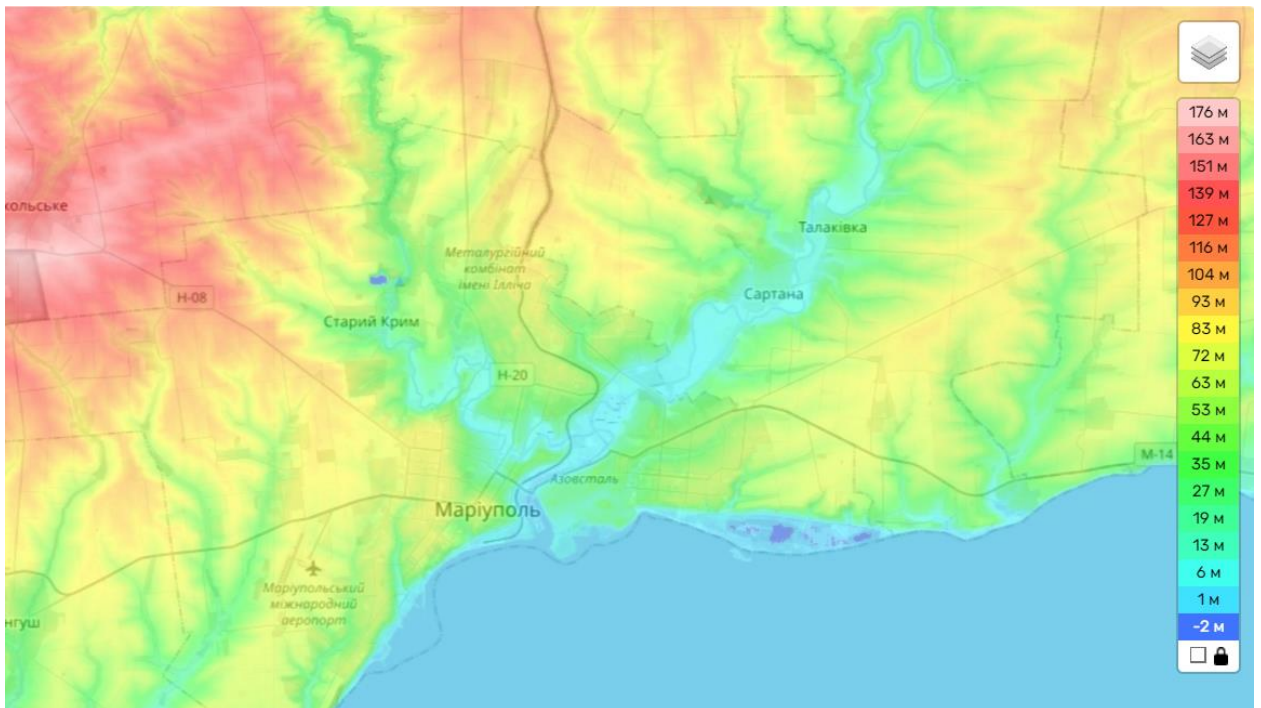


Рисунок 3.3 – Топографічна карта міста Маріуполь [18]

2. Будинки

На першому шарі моделі цифрового двійника міста додаються існуючі в Маріуполі будівлі. Ці будівлі мають високоточні моделі інформаційного моделювання будівель (BIM), які можна використовувати як цифрові двійники будівель. 3D-дані про будівлі також можна отримати за допомогою стереоскопічної аерофотозйомки.

3. Інфраструктура

На другому рівні моделі цифрового міста додається інфраструктура навколо існуючих будівель міста. Це основні фізичні та організаційні структури та об'єкти (дороги, джерела харчування, телекомунікації), необхідні для функціонування суспільства чи підприємства. Дані про інфраструктуру можна отримати з Google Maps або OpenStreetMap (рис. 3.4), де міститься інформація про громадський транспорт, автомагістралі, шосе та благоустрій. Дані також можуть бути отримані в процесі 3D-картографування.



Рисунок 3.4 – Карта Маріуполя з OpenStreetMap [19]

4. Мобільність

Третій рівень моделі цифрового двійника додає мобільність до інфраструктурного та будівельного рівня. Мобільність - це переміщення людей під час їхнього щоденного маршруту та переміщення товарів, які допомагають їм у різних аспектах їхнього життя. Для моделювання міської мобільності можна використовувати таку програму, як SUMO (рис. 3.5) [20]. SUMO дозволяє моделювати інтермодальні транспортні системи, що включають дорожні транспортні засоби, громадський транспорт та пішоходів. [20] Інші доступні моделі - це залізниці та водні колії.

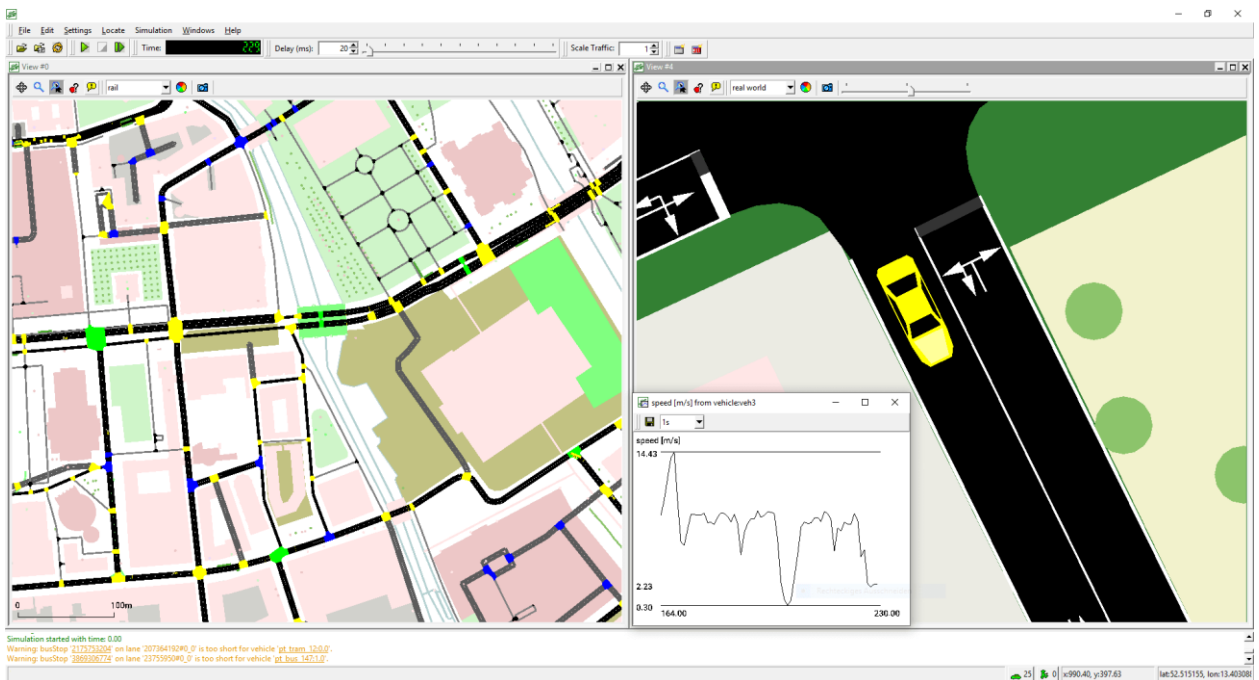


Рисунок 3.5 – Програма SUMO для моделювання міської мобільності [20]

5. Цифровий шар

Цифровий шар відповідає за збір усіх даних, необхідних для моделювання у віртуальному шарі/цифровому двійнику, з усіх попередніх шарів. Результати цих симуляцій у вигляді інформації потім передаються назад у всі інші шари міста. Дані можуть надходити від громадян, пристроїв та активів, які можуть бути мобільними та розташовуватися по всьому Маріуполі. Громадяни можуть використовувати свої мобільні телефони та розумні годинники, щоб повідомляти дані міській владі. Підключені автомобілі можуть повідомляти дані про дорожній рух в управління дорожнього руху, щоб допомогти скласти графік роботи світлофорів для

оптимізації транспортного потоку. По всьому місту може бути розташовано безліч підключених камер відеоспостереження для стримування злочинності, а також для використання як докази злочинної поведінки.

6. Віртуальний шар/цифровий двійник

Віртуальний шар/цифровий двійник ґрунтується на даних, отриманих за допомогою цифрового шару. Існує зв'язок між віртуальним та цифровим шаром. З цифрового шару надходять дані про мобільність, інфраструктуру, будівлі та місцевість у Маріуполі. Ці дані використовуються для проведення симуляцій у віртуальному шарі, які потім можуть бути передані у вигляді інформації через шари міста.

Цифровий двійник може бути використаний для допомоги у будівництві будівель у місті. Використовуючи дані зондування, зібрані в цифровому шарі, можна створити симуляцію, щоб побачити, як ці будівлі впливатимуть на сонячне світло у місті, наприклад, чи будуть вони загороджувати сонце від існуючих парків. Дані про вітри та шторми, зібрані в цифровому шарі, також можуть бути використані при проектуванні нових будівель. Після створення цифрового двійника нових будівель вони можуть бути протестовані на відповідність відомим проблемам міста.

3.2 Структура цифрового двійника міста Маріуполь

Загальну структуру цифрового двійника Маріуполя можна поділити на три основні блока (рис. 3.6): мережа зондування (датчики, виконавчі механізми, мікроконтролери), канали зв'язку (дротові та бездротові способи зв'язку, протоколи та стандарти для передачі повідомлень) та обчислювальна платформа, яка в свою чергу ділиться на внутрішню (база даних, аналітика даних, IoT-додатки та безпека) та зовнішню частину (інтерфейс користувача API). Докладніша схема представлена на рисунку 3.7.



Рисунок 3.6 – Загальна структура цифрового двійника Маріуполя

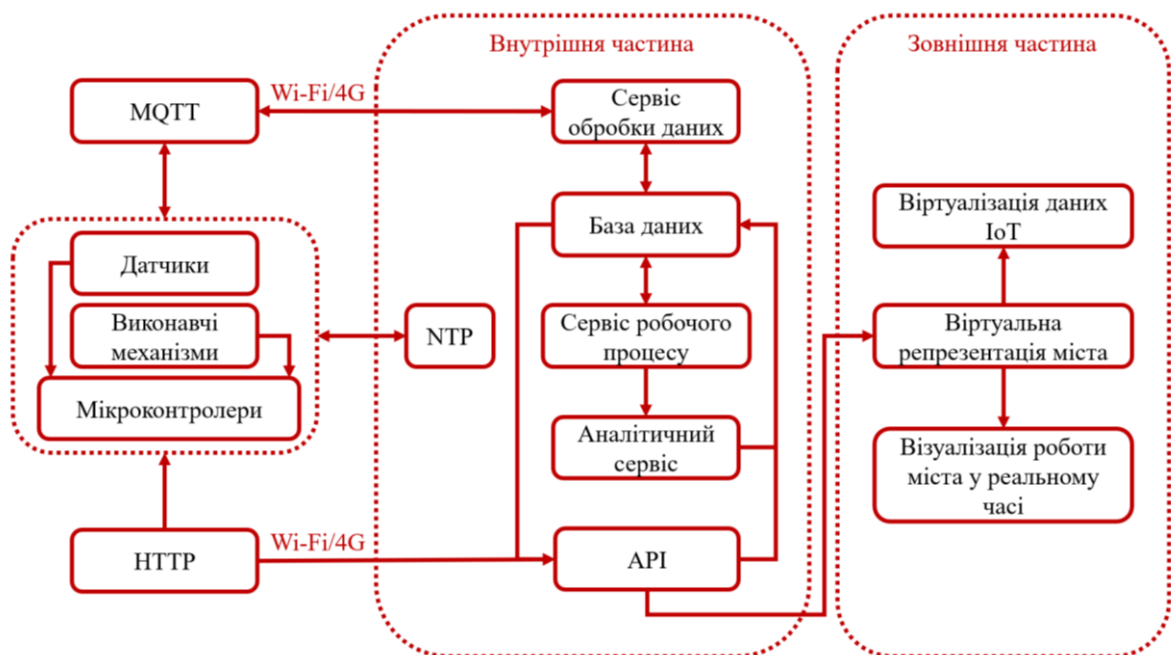


Рисунок 3.7 – Докладна схема структури цифрового двійника міста Маріуполь

Інтелектуальні пристрої мережі зондування одержують дані від фізичного міста за допомогою датчиків, які перетворюють фізичний стан об'єктів міста у сигнал. Виконавчі механізми запускають дію при отриманні сигналу. До них підключені мікроконтролери, які обробляють цифрові сигнали датчиків і виконавчих механізмів та перетворюють їх на інформацію. Вибір, кількість та розташування датчиків мають вирішальне значення для уловлювання всього міста та його роботи.

Обмін даними між пристроями цифрового двійника здійснюється за допомогою IoT. У представленій структурі використовуються бездротові

канали зв'язку Wi-Fi та стільникова мережа. Ці канали використовують протоколи MQTT та HTTP, які відносяться до стандарту TCP/IP. Шифрування по мережі може здійснюватися за допомогою SSL, допомагаючи захистити інформацію, що передається, від перехоплення або іншої підробки.

MQTT вибрано як основний канал зв'язку завдяки своїй легкості та можливості швидкої передачі повідомлень. HTTP використовується як вторинний канал, призначений для прийому подій та підтримки веб-інтерфейсу API разом зі статусом моніторингу в реальному часі. Через HTTP кожному датчику присвоюється унікальна IP-адреса для полегшення її ідентифікації та зв'язку.

За допомогою мережного протоколу часу (NTP) внутрішня частина обчислювальної платформи та інтелектуальні пристрої мережі зондування синхронізуються, щоб забезпечити реагування в реальному часі та синхронізацію подій.

Інтерфейс користувача дозволяє керувати даними, що надходять від пристроїв IoT за протоколом HTTP, та надавати користувачам доступ до даних у режимі реального часу. Для API використовується сервіс-орієнтована архітектура (SOA), тому програми розглядаються як сервіси, що надаються між компонентами через їх відповідні API та протоколи зв'язку, до яких можна отримати віддалений доступ, діяти та оновлювати незалежно один від одного.

У запропонованій структурі цифрового двійника міста є три основні сервіси: аналітичний сервіс, сервіс робочого процесу та сервіс обробки даних. Сервіс обробки даних керує даними цифрового двійника та дозволяє об'єднувати дані з різних інтелектуальних пристроїв у єдиний формат та зберігати їх у базі даних. При необхідності сервіс обробки даних може також взаємодіяти з підключеними інтелектуальними пристроями через MQTT для надсилання запитів даних та забезпечення їх конфігурації. Аналітична служба забезпечує моделювання структурної моделі віртуального міста поряд із навчанням за допомогою ймовірнісних висновків. Сервіс робочого процесу

керує взаємозв'язками між іншими сервісами та контролює необхідну інформацію або дані для обміну між ними.

Зовнішня частина обчислювальної платформи допомагає кінцевим користувачам легко керувати доступною інформацією, що надає віртуальну репрезентацію міста, віртуалізацію даних IoT та показує його роботу в реальному часі.

3.3 Етапи створення цифрового двійника міста Маріуполь

Створення цифрового двійника міста Маріуполь включає кілька етапів, які можуть змінюватись в залежності від конкретних цілей і потреб проекту. Проте ось мій погляд на розробку цифрового двійника (рис. 3.8):



Рисунок 3.8 – Етапи створення цифрового двійника міста Маріуполь

Крок 1. Визначення вимог

Першим кроком процесу створення є визначення мети цифрового двійника та вираш від його використання. Основними аспектами цього кроку є:

Цілі цифрового двійника міста

Цілі створення цифрового двійника Маріуполя полягають у оптимізації процесу відбудови Маріуполя, покращенні якості життя городян, сприянні сталому міському розвитку, а також підтримці економічного зростання та інновацій.

Необхідні дані

Створення цифрового двійника міста Маріуполя потребує різноманітних даних із різних джерел: геопросторові дані, дані з датчиків, дані про дорожній рух, демографічні дані, економічні дані, дані соціальних мереж, історичні дані та інші. Ці дані можуть бути використані для створення точної та всеосяжної моделі міста, інформування про прийняття рішень та оптимізацію використання ресурсів.

Обмеження

Створення цифрового двійника Маріуполя стикається з низкою обмежень та проблем, включаючи доступність даних, питання конфіденційності та безпеки, технічні знання, вартість, залучення зацікавлених сторін, а також культурні та соціальні чинники. Ці проблеми необхідно вирішити для того, щоб цифровий двійник був точним, ефективним та був прийнятний місцевою спільнотою.

Крок 2. Розробка інформаційного потоку

Важливою частиною розробки цифрового двійника міста Маріуполь є збір та зберігання даних. Треба врахувати такі аспекти:

Джерела даних

Визначення джерел даних, які будуть використовуватись для створення цифрового двійника Маріуполя. Це можуть бути датчики, супутникові знімки, архіви, соціальні мережі тощо.

Збір даних

Після визначення джерел даних йде збирання даних. Це може включати встановлення датчиків у місті, проведення опитувань серед населення або збір даних із існуючих баз даних, наприклад, розміщення комунальних мереж, мапи яких зберігаються у міських комунальних службах.

Зберігання даних

Дані необхідно зберігати в безпечному та масштабованому вигляді. Для зберігання та керування даними у цифровому двійнику Маріуполя може допомогти Microsoft Azure. Ця платформа включає в себе хмарне сховище

Azure Data Lake Storage, яке дозволяє економічно ефективно зберігати великі обсяги даних, з високою доступністю та безпекою.

Крок 3. Розробка віртуальної репрезентації

Віртуальна репрезентації фізичного міста може бути виконана різними способами, залежно від зацікавлених сторін та типів даних для конкретної задачі чи операції. Наприклад, будівельній компанії може знадобитися 3D-модель фізичного міста в середовищі AR/VR для того, щоб подивитись як майбутня будівля впишеться у місто, або продивитись де знаходяться комунальні мережі для майбутньої забудови, тоді як енергетичній компанії може знадобитися тільки приладна панель (2D-модель) для перегляду даних датчиків для моніторингу поточного енергоспоживання у фізичному місті та фактичної інформації для ухвалення рішень.

Найкращим варіантом для цифрового двійника міста Маріуполь буде розробити віртуальну репрезентацію, яка пов'язує 3D та 2D моделі міста. Будь-яка зацікавлена сторона зможе вибрати найкращий для неї варіант.

Крок 4. Розробка системи обміну даними

Канал зв'язку між цифровою моделлю та фізичним містом – важлива частина роботи цифрового двійника. Зв'язок може бути реалізований за допомогою бездротового з'єднання Wi-Fi та 4G. Після встановлення з'єднання, може знадобитися їх очищення та попередня обробка даних (наприклад, процес фільтрації) Це включає виявлення та виправлення помилок та невідповідностей у даних.

На цьому кроці також встає питання безпеки даних, що потребує комплексного підходу. Це включає технічні засоби контролю, політику та процедури, а також постійний моніторинг та оцінку. Впроваджуючи надійні заходи безпеки, Маріуполь зможе захистити дані своїх громадян та забезпечити довгостроковий успіх свого цифрового двійника.

Крок 5. Розробка методу аналізу

Реальна цінність цифрового двійника Маріуполя полягає у розкритті значної інформації з великого обсягу даних, зібраних із різних джерел. Вибір

типу аналізу для цифрового міста-близнюка залежить від різних факторів, таких як складність даних, конкретне завдання аналізу та досвід.

Загалом у цифровому двійнику Маріуполя може використовуватися комбінація типів аналізу, залежно від конкретної задачі аналізу та наявного досвіду. Ручний аналіз може використовуватися для завдань, що вимагають високої кваліфікації людини, наприклад в таких сферах як соціологія, медицина, психологія тощо. Напівавтоматичний аналіз може використовуватися для завдань, що вимагають поєднання людської кваліфікації та автоматизації, він може надати фахівцю для аналізу початкові рішення. Автоматичний аналіз може використовуватися для завдань, що потребують високого рівня автоматизації, наприклад, передиктивне моделювання та виявлення аномалій.

Крок 6. Тестування

Цифровий двійник Маріуполя необхідно перевірити, щоб переконатися, що він імітує поведінку свого фізичного аналога з незначними допустимими відхиленнями, досягає визначених цілей і враховує вимоги зацікавлених сторін. На цьому кроці потрібно у тестовому режимі запустити декілька сценаріїв, щоб визначити, що цифровий двійник коректно та правильно видає можливі результати.

Крок 7. Використання

За допомогою штучного інтелекту виявлення проблем роботи міста та тестування рішень цих проблем у цифровому двійнику. Віртуальне тестування відбудови інфраструктури у цифровому двійнику Маріуполя до ухвалення рішень про дорогі реальні інвестиції.

3.4 Поліпшення Маріуполя за допомогою цифрового двійника міста

Будівельна сфера

Основна перевага цифрового двійника Маріуполя у будівництві полягає в тому, що він допоможе покращити аналітичні можливості інформаційного

моделювання будівель. Завдяки цифровому двійнику власники та менеджери об'єктів зможуть відтворити усі метрики фізичної структури у цифровому середовищі. Цифровий двійник зможе спроектувати майбутні райони, сквери, парки, транспортну систему та систему водо-, газо- та електропостачання. Моделюючи реальні процеси та події у місті, цифровий двійник дозволяє отримати точне уявлення про кінцевий вигляд будь-якого об'єкта або системи.

Будівельні компанії також зможуть експериментувати у цифровому форматі та аналізувати очікувані результати, перш ніж вносити зміни, що впливають на реальну фізичну будівлю, споруду або робочий майданчик. За допомогою цифрового двійника Маріуполя можна буде побудувати модель майбутньої будівлі або цілого кварталу та спрогнозувати, як вона буде виглядати у середовищі та витримає кліматичні умови.

Коли об'єкт завершено, цифровий двійник можна використовувати для його подальшого покращення, або ж усунення проблем. Наприклад, для прогнозування майбутніх запланованих ремонтів або визначення розташування несправності з комунальними мережами, для швидкого та ефективного вирішення.

Транспортна сфера

Безперебійна робота транспортної інфраструктури є вкрай важливою для життя будь-якого міста, а також для Маріуполя.

Поєднуючи дані з радара, відео, Інтернету та дорожньої мережі, цифровий двійник Маріуполя забезпечуватиме точну кількісну оцінку роботи міських доріг на макро-, мезо- та мікрорівнях. Макроскопічно двійник дасть огляд міста, показуючи, наприклад, індекс затримки через затори та регіональну швидкість руху; мезоскопічно він покаже точне відображення руху автомобілів за рахунок їх оцифрування та повного відтворення траєкторій транспортних засобів; мікроскопічно він надасть ефективність транспортного потоку на перехрестях з індикаторами рівня смуги руху, такими як довжина черги, швидкість потоку та затримка; він також вплине на

безпеку дорожнього руху, фіксуючи будь-які дорожні пригоди або порушення ПДР.

За допомогою цієї інформації пристрої на місцях, зможуть контролювати час роботи світлофора в залежності від кількості заторів, часу доби та погодним умовам. Цифровий двійник у майбутньому допоможе усунути необхідність розширення доріг у Маріуполі, налаштувавши транспортну систему на максимальне використання доступного простору. Також можна оптимізувати маршрути громадського транспорту за допомогою камер та датчиків на зупинках та автобусах, які будуть слідкувати за кількістю людей та часом відправки.

Громадська безпека

Цифровий двійник може підвищити безпеку жителів Маріуполя та прискорити час реагування на інцидент. Правоохоронні органи зможуть швидко отримувати докладну інформацію про події в місті у реальному часі. Інформація буде збиратися за допомогою камер з систем розпізнавання автомобільних номерів та осіб, повідомляючи особисті дані правопорушників та їх місцезнаходження. Інформація з мікрофонів у місті допоможе швидко ідентифікувати постріли, щоб попередити про місце злочину, а також про кількість можливих стрільців.

Безпека жителів також залежить від стану об'єктів місті. За допомогою датчиків можна контролювати наявність пошкоджень та несправностей у будівлях, світлофорах, пожежних сигналізаціях, підземних переходах тощо. Якщо будівля або будь-який інший об'єкт пошкоджено, датчики зможуть виявити ці зміни та попередити відповідних посадових осіб задля усунення небезпеки.

Також цифровий двійник Маріуполя зможе попередити про стихійні лиха. Він допоможе прогнозувати шторми, повені та сильні вітри, аналізуючи дані в режимі реального часу, та попереджати мешканців та екстрені служби про потенційну небезпеку.

Екологія

Цифровий двійник Маріуполя надасть можливість ефективного збереження та скорочення непотрібних витрат води та електроенергії. Датчики у будівлях дозволять швидко виявляти протік у трубах та усувати пошкоджені ділянки за менший час. Датчики на вуличних ліхтарях дозволять регулювати інтенсивність світла на основі даних реального часу. Ці датчики також можна запрограмувати на виявлення руху, включення при виявленні руху на проїжджій частині та затемнення, коли дороги вільні. Це дозволить оптимізувати міське освітлення для досягнення балансу між вимогами безпеки та цілями енергозбереження.

Датчики якості повітря допоможуть виміряти рівень забруднення та визначити його джерело. Цифровий двійник Маріуполя також може знизити вуглецевий слід нових будівель та споруд за рахунок оптимізації енергоефективності процесу будівництва, а також за рахунок відстеження та контролю ланцюжків постачання матеріалів та виробів для зниження рівня уречевлення вуглецю.

Висновки до розділу 3

1. Архітектура цифрового двійника Маріуполя ґрунтується на шести шарах інформації. Перші п'ять шарів дають інформацію, яку збирає Цифровий шар та передає Цифровому двійнику. Цифровий двійник використовує дані, отримані в місті, для додаткового моделювання оптимізації мобільності, розміщення будівель або, наприклад, проектування відновлюваних джерел енергії.

2. Загальна структура цифрового двійника Маріуполя ділиться на: мережу зондування, канали зв'язку та обчислювальну платформу, яка в свою чергу ділиться на внутрішню та зовнішню частину.

Обмін даними між пристроями цифрового двійника Маріуполя здійснюється за допомогою IoT, використовуючи бездротові канали зв'язку Wi-Fi та стільникова мережа.

3. У запропонованій структурі цифрового двійника міста є три основні сервіси: аналітичний сервіс, сервіс робочого процесу та сервіс обробки даних.

Сервіс обробки даних керує даними цифрового двійника та дозволяє об'єднувати дані з різних інтелектуальних пристроїв у єдиний формат та зберігати їх у базі даних. Аналітична служба забезпечує моделювання структурної моделі віртуального міста поряд із навчанням за допомогою ймовірнісних висновків. Сервіс робочого процесу керує взаємозв'язками між іншими сервісами та контролює необхідну інформацію або дані для обміну між ними. Зовнішня частина обчислювальної платформи допомагає кінцевим користувачам легко керувати доступною інформацією.

4. Створення цифрового двійника міста Маріуполь включає 7 етапів: визначення вимог, розробка інформаційного потоку, розробка віртуальної репрезентації, розробка системи обміну даними, розробка методу аналізу, тестування та використання.

5. За допомогою цифрового двійника Маріуполя можна поліпшити багато сфер роботи міста: покращити аналітичні можливості інформаційного моделювання будівель, забезпечити точну кількісну оцінку роботи міських доріг на різних рівнях, підвищити безпеку жителів Маріуполя та прискорити час реагування на інцидент, надати можливість ефективного збереження та скорочення непотрібних витрат води та електроенергії

ВИСНОВКИ

Нині дедалі більшу увагу приділяють створенню цифрових двійників міст, які можуть стати потужним інструментом для управління міською інфраструктурою та підвищення якості життя населення. Цифрові двійники міст мають величезний потенціал для управління міським простором, що може стати ключовим елементом для досягнення сталого розвитку міст.

У рамках цього дослідження було розроблено модель цифрового двійника міста Маріуполь, а саме його архітектуру, докладну структуру та етапи розробки.

Аналіз результатів впровадження цифрового двійника Маріуполя показав, що він може стати ефективним інструментом для аналізу й оптимізувати роботу міської інфраструктури. У запропонованій моделі цифрового двійника Маріуполя можуть використовуватися різні джерела даних, такі як державні органи, датчики, системи моніторингу та інші пристрої, які пов'язані в єдину систему для отримання та обробки даних.

Використовуючи сучасні технології - хмарні обчислення, аналіз великих даних, машинне навчання і штучний інтелект - цифровий двійник Маріуполя може забезпечити аналіз і прогнозування різних сценаріїв розвитку міста та ухвалення ефективних рішень для поліпшення якості життя населення. Зокрема, він може бути використаний для оптимізації міського транспорту, поліпшення роботи міських служб, підвищення безпеки та поліпшення екології. Крім того, запропонований двійник може допомогти міській владі в ухваленні рішень про будівництво нових об'єктів інфраструктури та організації заходів міського масштабу.

Також цифровий двійник Маріуполя може бути використаний для розроблення нових інноваційних проєктів, які допоможуть знизити витрати на енергію, скоротити тимчасові та фінансові витрати на ремонт і обслуговування інфраструктури, підвищити рівень безпеки й ефективності міської транспортної системи, поліпшити якість послуг, які надають населенню, і залучити більше інвестицій у розвиток міста.

Таким чином, цифровий двійник Маріуполя може стати потужним інструментом для управління та розвитку міської інфраструктури, який допоможе міській владі та бізнесу ухвалювати обґрунтовані рішення на основі актуальних даних, що зробить Маріуполь зручнішим, безпечнішим і комфортнішим місцем для життя.

Однак для ефективного використання цифрового двійника міста необхідно вирішити низку технічних, організаційних і правових питань. Зокрема, необхідно розробити єдині стандарти оцінки роботи цифрового двійника саме для Маріуполя, виходячи з поставлених перед ним цілей, а також організувати спільну роботу державних і приватних структур. Крім того, необхідно забезпечити конфіденційність і безпеку даних, зібраних у рамках цифрового двійника міста.

У результаті проведеного дослідження було розроблено модель цифрового двійника Маріуполя, яка може бути використана для подальшого розвитку теорії та практики його створення. Також було проведено дослідження впливу цифрового двійника на різні сфери роботи міста, що допомогло визначити важливість його впровадження.

Насамкінець можна зазначити, що дослідження зі створення моделі цифрового двійника міста Маріуполь є важливим внеском у розвиток теорії та практики управління міською інфраструктурою. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності міської інфраструктури, поліпшення умов життя городян і розвитку економіки міста. Однак необхідно продовжувати дослідження в цій галузі для того, щоб забезпечити ефективне та безпечне функціонування цифрового двійника міста Маріуполь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Top 10 Digital Twin Companies Impacting Industry 4.0 Innovations in 2021. 2022. URL: <https://www.emergenresearch.com/blog/top-10-digital-twin-companies-impacting-industry-4-0-innovations-in-2021> (дата звернення: 20.03.2023)
2. Digital Twins. URL: <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation/cifrovoj-dvojnuk-digital-twin> (дата звернення: 21.03.2023)
3. Andre Andrade. The 3 Levels of the Digital Twin Technology – 2023. 2022. URL: <https://vidyatec.com/blog/the-3-levels-of-the-digital-twin-technology-2/> (дата звернення: 25.03.2023)
4. Wizata. Difference between Digital Twin, Digital Model, and Digital Shadow. URL: <https://www.wizata.com/knowledge-base/difference-between-digital-twin-digital-model-and-digital-shadow> (дата звернення: 25.03.2023)
5. Diego Botin, Mihaita Adriana Simona, Rodrigo E. Peimbert-García, Mauricio Adolfo Ramírez Moreno etc. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/359139097_Digital_Twin_Technology_Challenges_and_Applications_A_Comprehensive_Review (дата звернення: 25.03.2023)
6. K. Eric Harper, Christopher Ganz, Somayeh Malakuti. Digital Twin Architecture and Standards. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/337673936_Digital_Twin_Architecture_and_Standards (дата звернення: 22.03.2023)
7. Thomas Plank. Digital Twins: The 4 types and their characteristics. 2019. URL: <https://www.tributech.io/blog/the-4-types-of-digital-twins> (дата звернення: 22.03.2023)
8. Digital Directions Team. 4 Types of Digital Twins (Basic Overview with Examples). 2022. URL: <https://digitaldirections.com/4-types-of-digital-twins-basic-overview-with-examples/> (дата звернення: 22.03.2023)
9. Azad M. Madni, Carla C. Madni, Scott D. Lucero. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. 2019. URL:

- https://www.researchgate.net/publication/330749986_Leveraging_Digital_Twin_Technology_in_Model-Based_Systems_Engineering (дата звернення: 25.03.2023)
10. Michael Grieves. The Evolution of the Digital Twin – A visionary product concept brings big changes for the future. 2018. URL: http://eprints.bournemouth.ac.uk/30514/7/digital_twins.pdf (дата звернення: 25.03.2023)
 11. IBM. What is a digital twin? URL: <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin> (дата звернення: 26.03.2023)
 12. World Economic Forum. Digital Twin Cities: Framework and Global Practices. 2022. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Digital_Twin_Cities_Framework_and_Practice_2022.pdf (дата звернення: 03.04.2023)
 13. World Economic Forum. Digital twins: What are they and why do they matter? 2022. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/digital-twin-technology-virtual-model-tech-for-good/> (дата звернення: 03.04.2023)
 14. Brian Nicholls, Daniel Kruimel. Singapore: Towards a Smart Nation. 2017. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/singapore-towards-a-smart-nation> (дата звернення: 03.04.2023)
 15. Wim van Wegen. Singapore's journey towards a nationwide digital twin. 2022. URL: <https://www.gim-international.com/content/article/singapore-s-journey-towards-a-nationwide-digital-twin> (дата звернення: 03.04.2023)
 16. Diego M. Botín-Sanabria, Jorge G. Lozoya-Reyes, Roberto C. Vargas Maldonado, Karen L. Rodríguez-Hernández, Ricardo A. Ramírez-Mendoza, Mauricio A. Ramírez-Moreno, Jorge de J. Lozoya-Santos. Digital Twin for Urban Spaces: an Application. 2021. URL: <http://ieomsociety.org/proceedings/2021-monterrey/479.pdf> (дата звернення: 03.04.2023)
 17. Карта ґрунтів України. Донецька область. 2023. URL: <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy#w1n4> (дата звернення : 03.04.2023)
 18. Топографічна карта України. URL: <https://en-us.topographic-map.com/map-drd57/Donetsk-Oblast/> (дата звернення : 03.04.2023)

19. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org/#map=12/47.1229/37.5428> (дата звернення: 03.04.2023)
20. Simulation of Urban MObility. 2023. URL: <https://www.eclipse.org/sumo/> (дата звернення: 03.04.2023)