

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Запорізька політехніка»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних робіт з дисципліни  
**“ТЕХНОЛОГІЇ DIGITAL TWINS ”**

для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти  
спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка»  
(освітня програма «Автоматизація, мехатроніка та робототехніка»)  
усіх форм навчання

2024

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Технології Digital Twins» для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» (освітня програма «Автоматизація, мехатроніка та робототехніка») усіх форм навчання / Уклад. : Н. О. Миронова, Є.Р. Твердохліб, С.В. Шаптала, Д. О. Білка – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 23 с.

Укладачі:            Наталя МИРОНОВА, к.т.н., доцент каф. ІТЕЗ;  
                             Євгеній ТВЕРДОХЛІБ, асистент каф. ІТЕЗ;  
                             Станіслав ШАПТАЛА, ст. викладач каф. ІТЕЗ;  
                             Денис БІЛКА, студент каф. ІТЕЗ;

Рецензент:           Микола ЄФИМЕНКО, д.т.н., доцент каф. ІТЕЗ;

Відповідальний  
за випуск:           Наталя МИРОНОВА, к.т.н., доцент каф. ІТЕЗ;

Затверджено на засіданні  
кафедри ІТЕЗ протокол № 1  
від 10.09.24 р.

Рекомендовано до видання на  
засіданні НМК ФІБЕК  
протокол № 2 від  
19.09.24р.

**ЗМІСТ**

Вступ.....	4
Лабораторна робота №1 Реалізація прототипу апаратної частини робототехнічного пристрою .....	5
Лабораторна робота №2 Розробка програмного рішення для прототипу робототехнічного пристрою .....	9
Лабораторна робота №3 Розробка програмного рішення для отримання та обробки даних з робототехнічного пристрою.....	13
Лабораторна робота №4 Обробка зібраних даних для створення цифрового двійника.....	16
Лабораторна робота №5 Система симуляції цифрових двійників Ansys Twin Builder.....	19
ЛІТЕРАТУРА .....	22

## ВСТУП

Метою лабораторних робіт є вивчення концепції цифрових двійників, ознайомлення з методами та технологіями проектування та реалізації цифрових двійників, опанування технологій та навичок, необхідних для створення прототипу цифрового двійника на прикладі робототехнічного пристрою.

Кожному студенту при підготовці до виконання лабораторної роботи потрібно ознайомитись з методичними вказівками та конспектом лекцій по даному розділу. Виконання лабораторної роботи розбивається на два етапи. На першому етапі необхідно ознайомитись з конспектом лекцій. На другому етапі виконується індивідуальне завдання до лабораторної роботи. Наприкінці заняття результати роботи подаються викладачу для перевірки. Звіт з лабораторної роботи оформлюється на стандартних аркушах паперу формату А4 (297x210мм).

Лабораторна робота обов'язково захищається на наступному після виконання роботи навчальному занятті. За несвоєчасний захист роботи оцінка знижується. Захист лабораторних робіт проводиться під час навчальних занять. Студент не допускається до виконання наступної роботи, якщо має дві незахищені роботи.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОТОТИПУ АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ РОБОТОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ

## 1.1 Мета роботи

Навчитись створювати прототипи цифрових двійників на прикладі реалізації прототипу апаратної частини робототехнічного пристрою.

## 1.2 Теоретичні відомості

Для реалізації цифрового двійника необхідно обрати відповідні апаратні компоненти, які забезпечують збір даних, обробку та виконання фізичних дій.

Для виконання поставленої задачі можна використовувати наступні апаратні компоненти: мікроконтролери, модулі Wi-Fi, акселерометри, гіроскопи та інші сенсори, актуатори.

Мікроконтролер ESP8266 / ESP32 – потужний мікроконтролер із вбудованим модулем Wi-Fi.

Основні можливості мікроконтролеру:

- висока обчислювальна потужність для обробки даних з датчиків;
- вбудовані можливості бездротового зв'язку для передачі даних;
- підтримка численних інтерфейсів для підключення датчиків і виконавчих механізмів;
- використовується для управління всією системою цифрового двійника, збору та обробки даних з датчиків, а також для комунікації з іншими пристроями.

Модулі Wi-Fi ESP8266 – забезпечують бездротову передачу даних.

Основні можливості модулів:

- підключення до бездротової мережі для передачі даних;
- підтримка протоколів HTTP/HTTPS, MQTT для інтеграції з сервером та іншими пристроями;
- використовується для забезпечення бездротової комунікації між цифровим двійником і центральним сервером або іншими системами.

Arduino Uno R4 Wi-Fi – це мікроконтролер на базі чіпа ATmega328P з вбудованим Wi-Fi модулем, що забезпечує можливість бездротового підключення.

Основні характеристики:

- процесор: ATmega328P;
- частота процесора: 16 МГц;
- пам'ять: 2 КБ SRAM, 32 КБ флеш-пам'яті;
- вбудований Wi-Fi модуль;
- підтримка TCP/IP, UDP, http;
- GPIO: 14 цифрових і 6 аналогових входів/виходів;
- інтерфейси: SPI, I2C, UART.

Акселерометр MPU-6050 – використовується для вимірювання лінійного прискорення.

Основні можливості акселерометру:

- вимірювання тривимірного лінійного прискорення;
- інтерфейс I2C для легкої інтеграції з мікроконтролером;
- застосування: збір даних про рух і позицію цифрового двійника.

Гіроскоп MPU-6050 – використовується для вимірювання

кутової швидкості.

Основні можливості гіроскопу:

- вимірювання кутових швидкостей у трьох вимірах;
- інтерфейс I2C для легкої інтеграції з мікроконтролером;
- вимірювання обертальних рухів цифрового двійника.

Виконавчі механізми:

а) мотори та серводвигуни: забезпечують рух системи:

- 1) виконання механічних рухів з високою точністю;
- 2) можливість керування швидкістю та позицією;
- 3) застосування: виконання необхідних рухів і дій у фізичному світі на основі команд від мікроконтролера;

б) сервоприводи: виконують точні механічні рухи:

- 1) забезпечення точного позиціонування;
- 2) можливість інтеграції з керуючою електронікою;
- 3) Застосування: виконання складних рухів і операцій, що вимагають високої точності.

### 1.3 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями та матеріалами лекції.
2. Виконати індивідуальне завдання. Розробити загальну схемотехнічну діаграму, що показує взаємозв'язки між мікроконтролером, сенсорами та актуаторами.
3. Відповісти на контрольні питання.
4. Оформити звіт та завантажити до «Системи дистанційного навчання» НУ «Запорізька політехніка».

#### 1.4 Індивідуальні завдання

1. Реалізувати прототип робототехнічного пристрою на базі мікроконтролеру NodeMCU V3 ESP8266. Виконати підключення гіроскопу та акселерометру на платі MPU-6050.

2. Реалізувати прототип робототехнічного пристрою на базі мікроконтролеру Arduino Uno R4 WiFi. Виконати підключення гіроскопу та акселерометру на платі MPU-6050.

При неможливості використання реального обладнання для виконання завдання дозволяється використовувати симулятори, такі як <https://wokwi.com/> або <https://www.tinkercad.com>

#### 1.5 Контрольні запитання

1. Які основні компоненти апаратної частини робототехнічного пристрою? Описати складові частини, такі як двигуни, датчики, мікроконтролери, плати живлення тощо.

2. Які критерії вибору компонентів для робототехнічного пристрою? Які характеристики повинні мати двигуни, сенсори та процесори для конкретної задачі?

3. Що таке система керування роботом? Пояснити принципи роботи системи керування на основі мікроконтролера або одноплатного комп'ютера, як-от Raspberry Pi.

4. Які типи датчиків використовуються в робототехніці та для чого вони призначені? Описати роботу та застосування таких датчиків, як ультразвукові, інфрачервоні, гіроскопи, акселерометри тощо.

5. Як вибрати джерело живлення для робототехнічного пристрою? Обговорити фактори вибору: ємність батареї, напруга,

вимоги до потужності пристрою.

6. Які протоколи зв'язку використовуються для взаємодії компонентів робота? Описати популярні протоколи, такі як I2C, SPI, UART, CAN, та їх особливості.

7. Що таке плата розширення і для чого вона потрібна? Розкрити поняття плати розширення (наприклад, HAT для Raspberry Pi) та її роль в розширенні можливостей робота.

8. Які основні етапи складання апаратної частини робототехнічного пристрою? Описати послідовність дій під час створення прототипу: від складання механічної частини до інтеграції електронних компонентів.

9. Як відбувається інтеграція апаратної та програмної частин робота? Пояснити процес підключення та налаштування апаратної частини для взаємодії з програмним забезпеченням.

10. Які проблеми можуть виникати під час складання апаратної частини робота і як їх вирішувати? Обговорити типові проблеми, такі як конфлікти вживання електронних компонентів, проблеми живлення, фізична несумісність деталей.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ПРОТОТИПУ РОБОТОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ

### 2.1 Мета роботи

Навчитись розробляти програмне забезпечення для отримання даних з сенсорів робототехнічного пристрою та передачі отриманих даних для збереження та подальшої обробки в системі цифрового двійника.

### 2.2 Теоретичні відомості

Для виконання поставленої задачі можна використовувати наступне програмне забезпечення ESP8266 або Arduino Uno R4 Wi-Fi.

Прошивка ESP8266 або Arduino Uno R4 Wi-Fi:

- ініціалізація: налаштування I2C для зв'язку з MPU6050 та налаштування Wi-Fi для підключення до мережі;

- збір даних: читання даних з MPU6050 (акселерометр та гіроскоп), обробка та фільтрація даних, передача даних, підключення до сервера через HTTP/HTTPS або MQTT, відправка зібраних даних на сервер;

- інструменти та бібліотеки: Arduino Core for ESP8266: основні бібліотеки для роботи з ESP8266, Wire.h: бібліотека для роботи з I2C, Adafruit\_MPU6050.h: бібліотека для роботи з MPU6050; DHT.h: бібліотека для роботи з DHT22; ESP8266WiFi.h або WiFiNINA.h (для Arduino Uno R4 Wi-Fi): бібліотеки для підключення до Wi-Fi, ESP8266HTTPClient.h або для HTTP;

- програмне забезпечення сервера: серверне програмне забезпечення: отримання даних, обробка та зберігання даних, збереження даних у базі даних (MySQL); попередня обробка даних (нормалізація та фільтрація);

- аналіз даних в реальному часі для виявлення аномалій або трендів;

- використання 3D моделей для наочного представлення даних;

- інструменти та технології: MySQL для зберігання даних;

- інтеграція з Blender Або Unity: використання Unity для створення інтерактивних 3D візуалізацій;

- інтеграція даних з реального світу в Unity для створення

цифрового двійника.

Arduino Core for ESP8266 – це основний набір бібліотек та інструментів, що дозволяють програмувати мікроконтролери ESP8266 за допомогою середовища розробки Arduino IDE. Цей пакет надає підтримку для основних функцій мікроконтролера, включаючи роботу з GPIO, аналоговими і цифровими інтерфейсами, Wi-Fi, та багато іншого [12].

Основні можливості:

- підтримка стандартних функцій Arduino (`digitalRead`, `digitalWrite`, `analogRead`, `analogWrite` тощо);
- робота з Wi-Fi (підключення до мережі, створення точок доступу, сканування мереж);
- підтримка SPI, I2C, UART;
- бібліотеки для роботи з HTTP, MQTT та іншими протоколами;
- інструменти для завантаження прошивок і відлагодження.

`Wire.h` надає можливість роботи з інтерфейсом I2C (Integrated Circuit), що дозволяє підключати та взаємодіяти з різними I2C пристроями, такими як датчики, дисплеї та інші периферійні пристрої [13].

Основні можливості:

- ініціалізація I2C шини як майстра або підлеглого;
- надсилання і отримання даних через I2C;
- підтримка багаторазових пристроїв на одній I2C шині;
- зручні методи для читання та запису даних.

`ESP8266WiFi.h` та `WiFiNINA.h` – це бібліотеки для підключення до Wi-Fi мереж. `ESP8266WiFi.h` використовується для ESP8266, а `WiFiNINA.h` – для Arduino Uno R4 Wi-Fi [14].

Основні можливості:

- підключення до Wi-Fi мережі;
- створення точок доступу;
- сканування доступних Wi-Fi мереж;
- отримання інформації про підключення.

`ESP8266HTTPClient.h` – бібліотека для роботи з HTTP протоколом, що дозволяє відправляти HTTP запити та отримувати відповіді. `PubSubClient.h` – бібліотека для роботи з MQTT протоколом, що дозволяє взаємодіяти з MQTT брокерами для публікації та підписки на повідомлення.

Основні можливості ESP8266HTTPClient.h:

- відправка GET, POST, PUT, DELETE запитів;
- обробка відповідей сервера;
- підтримка HTTPS.

Основні можливості PubSubClient.h:

- підключення до MQTT брокера;
- публікація повідомлень;
- підписка на топіки;
- обробка вхідних повідомлень.

### **2.3 Порядок виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями та матеріалами лекції.
2. Виконати індивідуальне завдання відповідно до апаратної платформи, обраної при виконанні лабораторної роботи №1.
3. Оформити звіт.
4. Зробити висновки.
5. Відповісти на контрольні запитання.

### **2.4 Індивідуальні завдання**

З використанням бібліотек, відповідних до апаратної платформи, обраної при виконанні лабораторної роботи №1, реалізувати програмне рішення для підключення до плати MPU6050, отримання даних з датчиків та передачі отриманих даних за допомогою мережевого підключення.

Варіант 1. Організувати передачу даних за допомогою протоколу MQTT.

Варіант 2. Організувати передачу даних за допомогою HTTP запитів.

### **2.5 Контрольні запитання**

1. Які основні кроки розробки програмного забезпечення для збирання даних з сенсорів робототехнічного пристрою? Описати етапи: підключення сенсорів, калібрування, тестування.

2. Які протоколи використовуються для отримання даних з сенсорів? Пояснити роботу з такими протоколами як I2C, SPI, UART, що забезпечують взаємодію з сенсорами.

3. Як реалізувати збір даних з декількох сенсорів одночасно? Обговорити методи асинхронного збирання даних або обробку з використанням черг (multithreading, multiprocessing).

4. Які формати використовуються для передачі даних з сенсорів? Пояснити формати передачі даних, такі як JSON, XML, CSV, або власні бінарні формати.

5. Що таке система цифрового двійника та яке її призначення? Описати концепцію цифрового двійника та його застосування у робототехніці для моделювання та аналізу роботи реального пристрою.

6. Які методи використовуються для передачі даних з робототехнічного пристрою до системи цифрового двійника? Обговорити можливі способи передачі даних: через MQTT, HTTP/REST API, WebSocket, або використання системи хмарних обчислень.

7. Як забезпечити надійну передачу даних з сенсорів на великій відстані або через мережу інтернет? Пояснити техніки забезпечення надійності передачі даних, зокрема використання повторних спроб, перевірок цілісності даних, шифрування.

8. Як зберігати дані з сенсорів для подальшої обробки у системі цифрового двійника? Обговорити використання баз даних, файлів або хмарних сховищ для збереження даних.

9. Які методи використовуються для обробки та аналізу даних з сенсорів у системі цифрового двійника? Описати методи машинного навчання, аналізу великих даних (Big Data), або статистичні методи.

10. Як тестувати програмне забезпечення для роботи з сенсорами і цифровими двійниками? Пояснити процес тестування на основі симуляцій або використання даних реальних сенсорів, інтеграційних тестів і систем для емуляції.

11. Як синхронізувати роботу реального робота з його цифровим двійником в режимі реального часу? Обговорити методи синхронізації даних і забезпечення низької затримки при передачі даних між реальним пристроєм і цифровим двійником.

12. Які проблеми можуть виникати при зборі та передачі даних з сенсорів і як їх вирішувати? Обговорити типові проблеми, як-то втрата даних, затримки, перешкоди в передачі, некоректне калібрування сенсорів, і шляхи їх вирішення.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ ДАНИХ З РОБОТОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ**

### **3.1 Мета роботи**

Навчитись реалізовувати програмні компоненти системи цифрового двійника для рішення задач отримання та збереження зібраних даних.

### **3.2 Теоретичні відомості**

Серверне програмне забезпечення забезпечує отримання, обробку та зберігання даних у базі даних або іншому типі сховища, а також дає можливості подальшої обробки, аналізу даних в реальному часі і наочного представлення даних за допомогою різноманітних інтеграцій з метою створення цифрового двійника.

### **3.3 Порядок виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями та матеріалами лекції.
2. Виконати завдання до лабораторної роботи відповідно до апаратної платформи, обраної при виконанні лабораторної роботи №1 та розробленого програмного рішення, при виконанні лабораторної роботи №2.
3. Оформити звіт.
4. Зробити висновки.
5. Відповісти на контрольні запитання.

### **3.4 Завдання до лабораторної роботи**

1. З використанням мови програмування Python реалізувати отримання даних від прототипу робототехнічного пристрою з використанням протоколу відповідно до варіанту, обраного при виконанні лабораторної роботи №2: MQTT або HTTP.

Для отримання даних по MQTT протоколу потрібно сконфігурувати та запустити MQTT брокер (наприклад, RabbitMQ, NanoMQ, FlashMQ тощо [<https://mqtt.org/software/>]). Програма для

отримання та збереження даних з роботизованого пристрою має бути реалізована у вигляді MQTT клієнта.

Для отримання даних по HTTP протоколу, програма для отримання та збереження даних з робототехнічного пристрою має запускатися за допомогою веб сервера (наприклад, Nginx або Apache HTTP Server) та мати можливість приймати POST або PUT запити.

2. З використанням СКБД (PostgreSQL, MySQL або sqlite) створити базу даних та таблицю зі структурою, необхідною для збереження отриманих даних.

### 3.5 Контрольні запитання

1. Що таке цифровий двійник робототехнічного пристрою? Описати концепцію цифрового двійника, його призначення та основні функції.

2. Які типи даних необхідні для створення цифрового двійника робота? Обговорити типи даних: кінематичні параметри, дані про роботу сенсорів, телеметрія, фізичні характеристики та ін.

3. Які методи використовуються для обробки даних з сенсорів перед їх використанням у цифровому двійнику? Описати методи фільтрації шумів, калібрування, нормалізації, усереднення та інші техніки попередньої обробки.

4. Як дані про стан робототехнічного пристрою впливають на точність моделювання в цифровому двійнику? Пояснити, як реальні дані використовуються для покращення точності симуляції або моделювання роботи робота.

5. Які алгоритми або методи моделювання використовуються для побудови цифрового двійника робототехнічного пристрою? Обговорити фізичне моделювання, методи кінематики, динаміки, алгоритми прогнозування та штучного інтелекту.

6. Як використовуються історичні дані для навчання і вдосконалення цифрового двійника? Пояснити, як дані з минулих сесій роботи робота допомагають вдосконалювати модель, наприклад, через машинне навчання або адаптивне налаштування.

7. Які методи верифікації використовуються для порівняння поведінки цифрового двійника та реального робота? Обговорити процес тестування цифрового двійника, включаючи порівняння результатів з реальними даними робота.

8. Як забезпечити ефективну передачу та обробку даних у режимі реального часу між реальним роботом і цифровим двійником? Описати методи синхронізації даних і оптимізацію обробки в режимі реального часу.

9. Які можливості цифрового двійника у прогнозуванні майбутньої поведінки робототехнічного пристрою? Пояснити, як цифровий двійник може використовувати зібрані дані для прогнозування потенційних збоїв або необхідності технічного обслуговування.

10. Як забезпечується безпека даних, що передаються між реальним роботом і цифровим двійником? Обговорити заходи захисту, такі як шифрування, автентифікація та контроль доступу.

11. Як відбувається оптимізація управління робототехнічним пристроєм на основі даних цифрового двійника? Пояснити, як цифровий двійник може автоматично налаштовувати роботу робота на основі аналізу даних і симуляції різних сценаріїв.

12. Які проблеми можуть виникати при створенні цифрового двійника на основі даних, зібраних з реального пристрою? Описати типові виклики, як-то неповні або некоректні дані, затримки у передачі інформації, і можливі способи їх вирішення.

13. Як використання цифрового двійника може вплинути на процес технічного обслуговування та діагностики робототехнічного пристрою? Пояснити, як цифровий двійник може допомагати у діагностиці несправностей та прогнозуванні необхідності технічного обслуговування.

14. Які сценарії використання цифрового двійника можуть бути корисними в автономних робототехнічних системах? Розглянути приклади застосування: автономна навігація, адаптивне навчання, оптимізація ресурсів тощо.

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ОБРОБКА ЗІБРАНИХ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА**

### **4.1 Мета роботи**

Ознайомитись з можливостями обробки та використання даних, зібраних на попередніх етапах, для реалізації на їх основі цифрового двійника робототехнічного пристрою.

### **4.2 Теоретичні відомості**

Цифровий двійник робототехнічного пристрою – це віртуальна модель, яка точно відтворює поведінку реального робота на основі даних, зібраних із сенсорів та інших джерел. Такий підхід дозволяє проводити аналіз, оптимізацію і тестування робототехнічної системи без фізичного втручання в реальний пристрій.

Процес створення цифрового двійника починається зі збору даних про роботу робота, таких як положення суглобів, швидкість руху, споживання енергії, температурні режими тощо. Ці дані проходять етапи обробки: очищення, нормалізацію, фільтрацію шумів і калібрування для забезпечення точності.

Математичні моделі в основі цифрового двійника описують фізичні процеси робототехнічної системи за допомогою рівнянь, які враховують механічну динаміку, електричні характеристики і взаємодію з середовищем. Наприклад, для опису руху суглобів використовуються диференціальні рівняння, які допомагають передбачити положення робототехнічного пристрою у відповідь на команди керування.

Симуляційні моделі, що реалізовані в таких програмних середовищах, як ANSYS або ROS (Robot Operating System), дозволяють віртуально відтворити роботу робота, перевірити різні сценарії руху та інтегрувати реальні дані з сенсорів у модель. Це дозволяє в режимі реального часу симулювати поведінку робота, виявляти потенційні проблеми, прогнозувати несправності та тестувати нові алгоритми керування. Таким чином, цифровий двійник стає важливим інструментом для розробки, діагностики та оптимізації робототехнічних систем.



### **4.3 Порядок виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями та матеріалами лекції.
2. Виконати індивідуальне завдання відповідно до варіанту, обраного при виконанні лабораторної роботи №3.
3. Оформити звіт.
4. Зробити висновки.
5. Відповісти на контрольні запитання.

### **4.4 Індивідуальні завдання**

1. Зібрати реальні дані з сенсорів (наприклад, температурні, тиску, прискорення або інші фізичні параметри) за допомогою протоколів збирання даних через мікроконтролери та зберегти у відповідному файлі.

2. Виконати очищення зібраних даних: видалити шум, аномальні значення та некоректні записи, нормалізацію даних, щоб привести їх до загального діапазону для подальшого аналізу, провести калібрування, якщо це потрібно, для отримання точних показників.

3. Використовуючи отримані дані, створити математичну або симуляційну модель об'єкта. Розробити спрощену цифрову модель системи в програмному середовищі (наприклад, Python або ANSYS). Інтегрувати дані з сенсорів у модель для точного моделювання її поведінки.

4. Використати методи аналізу даних (машинне навчання або регресійний аналіз) для виявлення залежностей у даних. На основі зібраних даних спрогнозувати поведінку системи в майбутньому (наприклад, передбачити можливі збої).

5. Провести верифікацію створеної моделі цифрового двійника, порівнявши її результати з реальними даними. Оцінити точність моделі.

6. Написати скрипт або програму для автоматизації процесу збору та обробки даних.

### **4.5 Контрольні запитання**

1. Які типи даних потрібні для створення цифрового двійника? Описати, які дані збираються з сенсорів та інших джерел для побудови цифрової моделі.

2. Які методи обробки даних використовуються перед їх

застосуванням у цифровому двійнику? Пояснити, як проводиться фільтрація шумів, нормалізація, калібрування даних.

3. Що таке очищення даних і чому воно важливе для створення цифрового двійника? Обговорити процес очищення даних і його вплив на точність моделі.

4. Як інтегрувати дані з різних сенсорів для побудови єдиної цифрової моделі? Пояснити методи об'єднання та синхронізації даних з різних джерел.

5. Які інструменти та технології використовуються для обробки великих обсягів даних (Big Data) при створенні цифрового двійника? Розглянути платформи для обробки великих обсягів даних, такі як Hadoop, Apache Spark, або спеціалізовані хмарні рішення.

6. Які алгоритми використовуються для аналізу даних при створенні цифрового двійника? Обговорити алгоритми машинного навчання, статистичної обробки або методи аналізу часових рядів.

7. Як забезпечити точність даних, які використовуються для створення цифрового двійника? Пояснити методи перевірки та валідації даних перед їх використанням у моделі.

8. Що таке реальні та симуляційні дані і як вони взаємодіють у цифровому двійнику? Обговорити, як реальні дані використовуються для калібрування симуляційної моделі.

9. Як дані з сенсорів використовуються для прогнозування поведінки об'єкта в цифровому двійнику? Пояснити, як аналіз даних допомагає передбачити можливі збої або зміни в роботі системи.

10. Як використовуються історичні дані для поліпшення роботи цифрового двійника? Описати, як накопичені дані з минулих сесій можуть бути використані для навчання або покращення моделі.

11. Які методи стиснення даних можна застосовувати для зменшення обсягу переданих даних без втрати важливої інформації? Обговорити методи стиснення, які не впливають на якість аналізу даних.

12. Як забезпечити захист і конфіденційність даних, зібраних для створення цифрового двійника? Пояснити методи шифрування, контроль доступу та безпеки передачі даних.

13. Як автоматизувати процес обробки даних для створення цифрового двійника? (Необхідно розглянути інструменти автоматизації обробки даних та побудови моделей, такі як скрипти або інтеграційні платформи)

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 СИСТЕМА СИМУЛЯЦІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ANSYS TWIN BUILDER**

### **5.1 Мета роботи**

Ознайомитись та вивчити можливості програмного забезпечення ANSYS Twin Builder для створення, симуляції та аналізу цифрових двійників робототехнічних пристроїв.

### **5.2 Теоретичні відомості**

Цифровий двійник – це віртуальна модель фізичного об'єкта або системи, яка відображає його реальну поведінку на основі даних з сенсорів і інших джерел. Він дозволяє виконувати симуляції, передбачати збої, аналізувати ефективність та оптимізувати роботу без необхідності втручання в реальну систему.

Система ANSYS – програмне забезпечення для інженерних розрахунків, яке включає широкий набір інструментів для моделювання фізичних процесів, таких як механіка, терміка, електромагнетизм, а також для створення цифрових двійників.

ANSYS Twin Builder – це платформа ANSYS для створення та симуляції цифрових двійників. Вона дозволяє інтегрувати фізичні моделі з реальними даними, зібраними за допомогою сенсорів, для точного моделювання роботи пристрою в режимі реального часу [<https://www.ansys.com/products/digital-twin>].

Процес створення цифрового двійника в ANSYS складається з кількох етапів:

- моделювання робототехнічних пристроїв за допомогою інструментів ANSYS;
- збір та аналіз реальних даних з сенсорів або інших джерел для налаштування моделі;
- інтеграція даних з реального світу в модель для симуляції роботи в різних умовах;
- аналіз поведінки системи на основі моделі та передбачення потенційних збоїв або оптимізація роботи.

### **5.3 Порядок виконання лабораторної роботи**

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями та матеріалами лекції.
2. Виконати індивідуальне завдання відповідно до варіанту, обраного при виконанні лабораторних робіт 1-4.
3. Оформити звіт.
4. Зробити висновки.
5. Відповісти на контрольні запитання.

### **5.4 Індивідуальні завдання**

1. Ознайомлення з ANSYS Twin Builder, вивчення інтерфейсу, функціональних можливостей та його основних компонентів.

2. Створити цифровий двійник робототехнічного пристрою, використовуючи доступні модулі ANSYS Twin Builder. Визначити необхідні параметри, які повинні бути представлені в моделі.

3. Інтегрувати реальні дані з сенсорів (температура, тиск, позиція) у модель цифрового двійника, щоб забезпечити точність симуляції.

4. Провести симуляцію роботи цифрового двійника в різних сценаріях, що включають зміну умов роботи, тестування на навантаження і перевірку реакцій системи на зовнішні впливи. Провести аналіз результатів симуляцій, порівнюючи їх із теоретичними передбаченнями та даними, зібраними з реального пристрою.

### **5.5 Контрольні запитання**

1. Які основні етапи створення цифрового двійника в системі ANSYS? Описати процес моделювання, збору даних і симуляції.

2. Які можливості надає ANSYS Twin Builder для створення цифрових двійників? Описати інструменти та функції, що підтримуються цією платформою.

3. Які типи даних необхідні для побудови точного цифрового двійника? Розглянути джерела даних та сенсори, які використовуються для збору інформації.

4. Як інтегрувати реальні дані з сенсорів у модель цифрового двійника? Пояснити процес налаштування моделі на основі отриманих даних.

5. Як цифрові двійники можуть бути використані для прогнозування несправностей? Описати алгоритми або методи аналізу для прогнозування потенційних проблем у роботі системи.

6. Які фізичні процеси можна моделювати за допомогою ANSYS? Навести приклади процесів (механіка, термодинаміка, електромагнітні процеси), які можна симулювати в ANSYS.

7. Які переваги використання цифрових двійників у порівнянні з традиційними методами діагностики та аналізу? Обговорити економічні та технічні переваги.

8. Як здійснюється верифікація цифрового двійника у системі ANSYS? Пояснити процес перевірки точності моделі відносно реальних даних.

9. Які методи можна використовувати для симуляції роботи цифрового двійника в реальному часі? Описати можливості ANSYS для симуляції у реальному часі та синхронізації з реальними об'єктами.

10. Як цифрові двійники можуть допомогти в оптимізації роботи робототехнічних систем? Пояснити, як цифровий двійник може використовуватися для покращення параметрів системи.

11. Як забезпечується безпека даних при інтеграції цифрового двійника з реальними об'єктами? Обговорити аспекти захисту даних під час передачі між цифровим двійником і реальним об'єктом.

12. Які виклики можуть виникати при створенні цифрового двійника в системі ANSYS? Описати типові проблеми, такі як обробка великого обсягу даних або затримки в симуляції.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Верифікація та валідація цифрових систем управління / Г. В. Табунщик, Т. І. Каплієнко, О. О. Каплієнко, Д. Ван Мероде –Запоріжжя : Дике Поле. - 2017. – 150 с.
2. Віддалений та віртуальний інструментарій в інжинірингу : монографія / А. В. Пархоменко, Г. В. Табунщик, М. О. Поляков, О. М. Гладкова, Т. І. Каплієнко, Т. Ю. Ларіонова; за заг. ред. Карстена Хенке. – Запоріжжя: Дике Поле, 2015. – 250 с.
3. Digital Twin: Architectures, Networks, and Applications [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/378088481\\_Digital\\_Twin\\_Architectures\\_Networks\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/378088481_Digital_Twin_Architectures_Networks_and_Applications)
4. Digital Twins for Industrial Applications [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.iiconsortium.org/pdf/IIIC\\_Digital\\_Twins\\_Industrial\\_Apps\\_White\\_Paper\\_2020-02-18.pdf](https://www.iiconsortium.org/pdf/IIIC_Digital_Twins_Industrial_Apps_White_Paper_2020-02-18.pdf)
5. Шаптала С.В. Впровадження технології цифрових двійників для робототехніки / С.В. Шаптала, Н.О. Миронова // Управління розвитком складних систем. – 2023. – №53. – С.45-51. <https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.45-51>
6. Білка Д.О. Розробка прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою для відтворення руху в просторі / Д.О. Білка, С.В. Шаптала, Н.О. Миронова// Електротехніка і електроенергетика. – 2024.
7. Ansys Twin Builder Getting Started (Self-paced Learning Available) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/digital-twin/ansys-twin-builder-getting-started>
8. Digital Twins [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.researchgate.net/publication/367314465\\_Digital\\_Twin\\_Benefits\\_use\\_cases\\_challenges\\_and\\_opportunities](https://www.researchgate.net/publication/367314465_Digital_Twin_Benefits_use_cases_challenges_and_opportunities)
9. Стефанюк О. П. Дослідження методів та засобів створення цифрових двійників фізичних об'єктів : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „122 – комп'ютерні науки“ / О. П. Стефанюк. – Тернопіль : ТНТУ, 2023. – 73 с.
10. Мадзей П. А. Цифрові двійники для технологічних ліній в

«розумному місті» : дипломна роботи магістра за спеціальністю „124 – системний аналіз“/ П. А. Мадзей. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – 106 с.

11. Franz T. Piller, Digital Twins for Digital Transformation: Innovation in Industry 4.0. 2021 Edition.

12. Nassim Khaled, Salim Haddad, Digital Twin Development and Deployment on the Cloud. 2020 Edition.