УДК 004.94:681.5

РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА РОБОТОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ РУХУ В ПРОСТОРІ

БІЛКА Д.О. магістр кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: naulkx@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9717-5171;

ШАПТАЛА С.В. аспірант, асистент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: stas.shaptala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2617-5904;

МИРОНОВА Н.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: natali.myronova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7484-559X;

Мета роботи. *Розробка прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою, який дозволяє відтворювати рух об'єкта в реальному часі з високою точністю.*

Методи дослідження. *Для досягнення поставленої мети було використано такі методи: інтеграція мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi з сенсором MPU6050, розробка прошивки на мові програмування C++ в середовищі Arduino IDE, створення серверного програмного забезпечення за допомогою PHP-скриптів та бази даних MySQL, а також розробка інтерактивної системи візуалізації даних у середовищі Unity. Також були застосовані методи фільтрації та калібрування даних для забезпечення їхньої точності.*

Отримані результати. *Було розроблено прототип цифрового двійника, який точно відтворює рухи фізичного об'єкта на основі даних з сенсорів MPU6050. Система забезпечує надійний збір та передачу даних з мікроконтролера на сервер без значних втрат або спотворень. Дані успішно зберігаються у базі даних MySQL та доступні для подальшого аналізу та візуалізації через інтерактивні 3D-моделі в Unity. Впроваджені механізми перевірки цілісності даних та стабільності з'єднання забезпечують високу надійність системи протягом тривалого часу.*

Наукова новизна. *Запропоновано підхід до розробки цифрового двійника, який об'єднує мікроконтролери ESP8266 та Arduino Uno R4 Wi-Fi з сенсором MPU6050 для збору та обробки даних з використанням алгоритмів фільтрації та калібрування даних для підвищення їхньої точності в режимі реального часу.*

Практична цінність. *Розроблений прототип цифрового двійника робототехнічного пристрою розширює можливості вивчення та дослідження технології цифрових двійників в робототехніці.*

Ключові слова: цифровий двійник; робототехнічний пристрій; моніторинг даних у реальному часі; методи фільтрації та калібрування даних, візуалізація даних; інтернет речей.

I. ВСТУП

Цифрові двійники стрімко перетворюються на незамінний інструмент у сучасних технологіях, забезпечуючи точне відтворення фізичних об'єктів у віртуальному просторі. Вони дозволяють здійснювати моніторинг, аналіз та оптимізацію об'єктів у реальному часі, що знаходить застосування у робототехніці, охороні здоров'я, промислових процесах та управлінні міською інфраструктурою.

Інтеграція цифрових двійників із технологіями Інтернету речей (IoT) сприяє розширенню їхніх можливостей через об'єднання даних із численних сенсорів для створення розподілених систем моніторингу та управління. Сенсори руху забезпечують високоточні вимірювання, що є критично важливими для реалізації реалістичних віртуальних моделей. З розвитком програмного забезпечення для обробки та візуалізації даних, цифрові двійники відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності систем.

Попри це, існують значні виклики, пов'язані з вибором апаратних компонентів, обробкою даних у реальному часі та створенням цифрових моделей двійників. Зокрема, питання інтеграції мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi із сенсорами, такими як MPU6050, залишаються відкритими через їхню залежність від точності калібрування та стабільності передачі даних.

Дана стаття зосереджується на розробці прототипу цифрового двійника робототехнічного при-

© Білка Д.О., Шаптала С.В., Миронова Н.О., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-4-5

строю, що дозволяє точно відтворювати рух об'єкта у просторі в реальному часі. Основну увагу приділено інтеграції апаратних і програмних компонентів, розробці алгоритмів для обробки даних та візуалізації у 3D середовищі Unity.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛИКАЦІЙ

У сучасній науковій літературі концепція цифрових двійників активно розвивається, особливо в контексті IoT та автоматизації. Цифрові двійники використовуються для моделювання фізичних об'єктів, що дозволяє здійснювати їх моніторинг, аналіз та оптимізацію в реальному часі. Огляд останніх досліджень демонструє еволюцію цієї технології від простих моделей до комплексних інтегрованих систем, що включають різноманітні сенсори та програмні рішення.

Перші роботи в галузі цифрових двійників зосереджувалися на створенні віртуальних моделей промислових процесів для оптимізації виробництва. Наприклад, в дослідженні [1] запропоновано, що використання цифрових двійників у поєднанні з IoT, аналізом великих даних та динамічним керуванням кейсами дозволяє оптимізувати процеси обслуговування обладнання, зменшуючи витрати та підвищуючи ефективність через передбачувальну діагностику та проактивне управління. Ці ранні роботи заклали основу для подальшого розвитку цифрових двійників, підкреслюючи їхню важливість у підвищенні ефективності та надійності промислових систем.

З розвитком сенсорних технологій та збільшенням обсягів даних, зібраних з різних джерел, увага науковців переключилася на інтеграцію цих даних у єдину систему. Дослідження [2] розглядає методи об'єднання даних з різних сенсорів для створення більш точних та надійних цифрових двійників. Однією з ключових проблем, яка висвітлюється у цих роботах, є забезпечення точності та узгодженості даних, отриманих з різних джерел, що є критично важливим для коректного функціонування цифрового двійника.

Останні роки характеризуються значним прогресом у розробці алгоритмів для обробки та аналізу даних у реальному часі. Дослідження [3] демонструє використання машинного навчання для виявлення аномалій у даних, що збираються сенсорами. Це дозволяє створювати більш адаптивні та самонавчаючі цифрові двійники, які можуть автоматично реагувати на зміни умов експлуатації об'єкта. Подібні підходи сприяють підвищенню гнучкості та ефективності систем моніторингу.

Вибір архітектурних шаблонів також є важливим аспектом у розвитку цифрових двійників. У роботі [4] порівнюються різні архітектурні шаблони, використовувані для створення цифрових двійників, з акцентом на їхні функціональні характеристики та можливості інтеграції у різні системи. Наприклад, було проаналізовано шаблони Digital Monitor та Digital Control щодо їхньої здатності забезпечувати ефективний моніторинг та управління фізичними об'єктами в реальному часі. Результати показали, що вибір відповідного шаблону дозволяє оптимізувати взаємодію між фізичними та цифровими компонентами системи, підвищуючи ефективність та надійність цифрового двійника. Це сприяє гнучкості та адаптивності системи до різних вимог та умов експлуатації, що особливо важливо при застосуванні цифрових двійників у різних галузях, таких як сільське господарство та харчова промисловість. Крім того, робота демонструє, як використання архітектурних шаблонів підтримує різні етапи життєвого циклу системи, забезпечуючи структуроване та масштабоване рішення для розробки цифрових двійників. Таким чином, системний підхід до вибору архітектурних шаблонів дозволяє створювати адаптивні цифрові двійники, що відповідають сучасним технологічним вимогам.

Вибір методів візуалізації також є важливим аспектом у розвитку цифрових двійників. У роботі [5] здійснено всебічний огляд існуючих підходів візуалізації, що застосовуються для цифрових двійників, з метою їх класифікації за типами даних, конкретними випадками використання, вимогами до інтерактивності та складністю систем. Наприклад, дослідження виділяє різні підходи візуалізації, такі як графіки, діаграми та 3D-моделі, та розподіляє їх відповідно до специфічних потреб різних доменів застосування. Результати показали, що така класифікація дозволяє розробляти та впроваджувати інтерфейси візуалізації даних для цифрових двійників, забезпечуючи ефективний аналіз та прийняття рішень на основі інтегрованих даних.

В даному досліджень існує потреба в розробці інтегрованих рішень, які не тільки забезпечують збір та обробку даних, але й їх подальшу візуалізацію у зручному для користувача форматі. Особливо актуальною є інтеграція сучасних технологій, таких як Unity, для створення інтерактивних 3D-візуалізацій, що дозволяють користувачам взаємодіяти з цифровими двійниками у реальному часі. Це сприяє підвищенню інтуїтивної зрозумілості системи та її практичній корисності.

В [6] розглянуто можливості інтеграції цифрових двійників з платформами для візуалізації, спрямовані на покращення взаємодії між фізичними об'єктами та їхніми віртуальними моделями. Інтеграція включає створення інтуїтивних інтерфейсів для моніторингу та аналізу в реальному часі за допомогою віртуальної та доповненої реальності. Дослідження охоплює стандартизацію даних, забезпечення сумісності платформ та оптимізацію обробки великих обсягів інформації, приділяючи особливу увагу безпеці даних. Наведені приклади успішної інтеграції у виробництві, охороні здоров'я та міському управлінні демонструють ефективність візуалізаційних платформ у прийнятті рішень та оптимізації ресурсів. Висновки підкреслюють важливість міждисциплінарного підходу та співпраці між розробниками, інженерами та користувачами для

успішної реалізації інтеграції цифрових двійників з візуалізаційними системами.

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що хоча значний прогрес був досягнутий у сфері цифрових двійників, існують ще багато напрямків для подальшого розвитку. Основні проблеми, що залишаються нерозв'язаними, стосуються інтеграції даних з різних сенсорів, оптимізації програмного забезпечення для реального часу та покращення методів візуалізації даних. Ці проблеми визначають напрямок подальших досліджень та розробок, спрямованих на створення більш ефективних та надійних цифрових двійників.

Тому актуальної є задача розробки прототипу цифрового двійника, який включає оптимальний вибір апаратних компонентів, розробку програмного забезпечення та інтеграцію сучасних методів обробки та візуалізації даних.

III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою, який дозволяє відтворювати рух об'єкта в реальному часі з високою точністю. Досягнення поставленої мети базується на інтеграції апаратних компонентів (мікроконтролери та сенсори) із програмним забезпеченням для збору, обробки та візуалізації даних.

Розроблений прототип повинен забезпечувати: точний збір параметрів руху, таких як лінійні прискорення та кутові швидкості; надійну передачу та збереження даних у базі даних; інтерактивну візуалізацію в 3D-середовищі для аналізу в реальному часі. Ця робота також спрямована на вирішення проблем масштабованості та стабільності цифрових двійників шляхом оптимізації програмного забезпечення та використання передових технологій візуалізації.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розробка апаратної частини. Розробка апаратної частини прототипу цифрового двійника вимагає ретельного вибору та інтеграції апаратних компонентів для забезпечення точного збору, обробки та передачі даних. В даному дослідженні основну роль відіграють два типи мікроконтролерів – ESP8266 NodeMCU v3 [7] та Arduino Uno R4 Wi-Fi [8], а також сенсор руху MPU6050 [9]. Кожен з цих компонентів був обраний на основі своїх технічних характеристик, можливостей інтеграції та відповідності вимогам проєкту.

Мікроконтролери ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi були вибрані як основні обчислювальні платформи для проєкту з кількох причин. ESP8266 NodeMCU v3 відзначається високою продуктивністю та компактними розмірами, що робить його ідеальним для проектів, де важлива невелика вага та розміри пристрою. Цей мікроконтролер оснащений 32-бітним процесором Tensilica Xtensa LX106, який працює з частотою до 160 МГц, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для виконання складних алгоритмів обробки даних у реальному часі. Крім того, ESP8266 має 80 КБ SRAM та до 4 МБ флеш-пам'яті, що дозволяє зберігати великі обсяги інформації, необхідної для функціонування системи. Вбудований Wi-Fi модуль забезпечує безперебійну бездротову комунікацію з сервером, що є критично важливим для безперебійної передачі даних.

Рисунок 1. Плата мікроконтроллеру Esp8266wifi

Arduino Uno R4 Wi-Fi, з іншого боку, пропонує більшу кількість аналогових входів, що є критично важливим для систем, що потребують підключення великої кількості сенсорів одночасно. Він оснащений мікроконтролером ATmega4809 з частотою 16 МГц, 6 КБ SRAM та 48 КБ флеш-пам'яті, що забезпечує стабільну роботу системи при обробці даних з численних джерел. Вбудований Wi-Fi модуль підтримує протоколи TCP/IP, UDP та HTTP, що дозволяє ефективно передавати дані на сервер без додаткових налаштувань. Крім того, Arduino Uno R4 Wi-Fi має 14 цифрових входів/виходів та 6 аналогових входів, що дозволяє підключити більше сенсорів, забезпечуючи гнучкість та масштабованість системи.

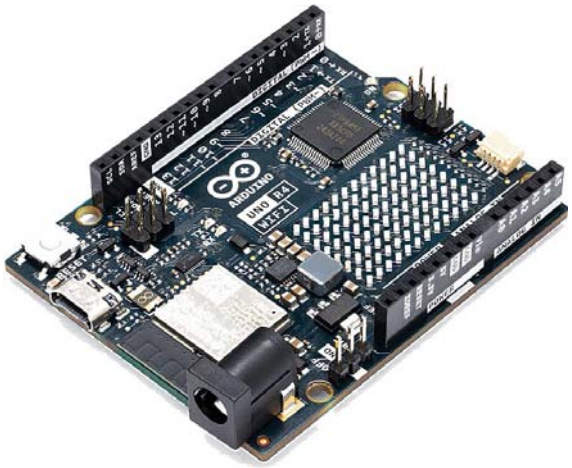

Рисунок 2. Плата Arduino uno R4 WIFI

Вибір ESP8266 та Arduino Uno R4 Wi-Fi обумовлений специфікою проекту. ESP8266 забезпечує висо-

ку швидкість обробки даних та більшу пам'ять флеш, що є перевагою для проєктів, що вимагають великої кількості зберігання та обробки інформації. Arduino Uno R4 Wi-Fi, з іншого боку, пропонує більше аналогових входів, що робить його придатним для систем, де необхідно підключити велику кількість сенсорів. Це дозволяє створити гнучку та масштабовану систему, яка може адаптуватися до різних вимог проекту.

Основним сенсором, використаним у проекті, є MPU6050 – 6-осьовий датчик руху, що включає 3-осьовий акселерометр та 3-осьовий гіроскоп [9]. Цей сенсор забезпечує вимірювання лінійних прискорень та кутових швидкостей, що є критично важливими для створення точних цифрових двійників. MPU6050 має діапазон вимірювань акселерометра від ±2g до ±16g та гіроскопа від ±250 до ±2000 градусів за секунду. Вбудований 16-бітний АЦП забезпечує високу роздільну здатність вимірювань, а цифрове фільтрування допомагає зменшити шум та підвищити точність даних.

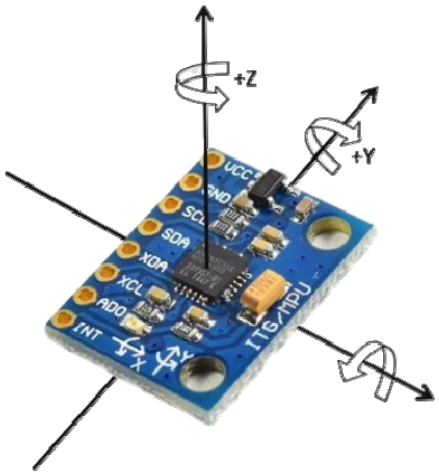

Рисунок 3. Модуль акселерометру та гіроскопу MPU6050

Інтеграція сенсора MPU6050 з мікроконтролерами ESP8266 та Arduino Uno R4 Wi-Fi здійснюється через інтерфейс I2C, що забезпечує стабільну та швидку комунікацію між пристроями. Це дозволяє збирати та передавати дані про рух об'єкта на сервер для подальшого аналізу та візуалізації. Крім того, для забезпечення стабільного живлення системи використовуються відповідні блоки живлення: 3.3V для ESP8266 та 5V для Arduino Uno R4 Wi-Fi. Це дозволяє уникнути перевантаження компонентів та забезпечити їхню надійну роботу протягом тривалого часу.

Підключення сенсора MPU6050 до мікроконтролера ESP8266 NodeMCU v3 здійснюється за допомогою наступних пінів: VCC до 3.3V, GND до GND, SDA до D2 та SCL до D1. Для Arduino Uno R4 Wi-Fi підключення здійснюється наступним чином: VCC до 5V, GND до GND, SDA до A4 та SCL до A5. Це забезпечує надійне з'єднання між сенсором та мікроконтролером, що є критично важливим для точності та стабільності збору даних. Крім цього, було впроваджено додаткові заходи для захисту сенсора від перенапруги та електромагнітних завад, що може впливати на точність вимірювань.

Розміщення сенсора MPU6050 на платі мікроконтролера було проведено з урахуванням оптимального розташування для мінімізації впливу зовнішніх факторів, таких як вібрації та температурні зміни, на точність вимірювань. Важливою частиною інтеграції є забезпечення достатньої ізоляції сенсора від джерел електромагнітних завад, що можуть спричиняти спотворення сигналів. Для цього використовувалися відповідні заземлення та фільтри, що дозволяють забезпечити стабільну роботу сенсора у різних умовах.

Одним із важливих аспектів апаратної частини є забезпечення достатньої кількості живлення для всіх компонентів системи. ESP8266 NodeMCU v3 потребує стабільного живлення 3.3V, тоді як Arduino Uno R4 Wi-Fi працює на 5V. Для цього використовувалися відповідні блоки живлення, що дозволяють забезпечити необхідні напруги та уникнути перевантаження компонентів. Крім того, було впроваджено систему моніторингу напруги, яка дозволяє виявляти будь-які збої у живленні та оперативно реагувати на них, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Також для забезпечення захисту системи від потенційних електричних перешкод було впроваджено фільтри та стабілізатори напруги. Це допомагає зменшити вплив зовнішніх електромагнітних полів та забезпечити чистий сигнал для сенсора MPU6050, що покращує точність та надійність вимірювань. Використання додаткових конденсаторів та фільтрувальних елементів дозволяє мінімізувати шум та забезпечити стабільну роботу сенсора навіть у складних умовах експлуатації.

Інтеграція апаратних компонентів була проведена з урахуванням їхніх технічних характеристик та вимог до системи. Для ESP8266 NodeMCU v3 було створено компактну плату, на якій розміщені всі необхідні компоненти, включаючи сенсор MPU6050, забезпечуючи зручність монтажу та обслуговування системи. Arduino Uno R4 Wi-Fi було інтегровано з сенсором MPU6050 через відповідні з'єднувачі, що дозволяє легко підключати додаткові сенсори при необхідності розширення системи.

Під час тестування апаратної частини було проведено ряд експериментів для оцінки точності та стабільності вимірювань. Було встановлено, що сенсор MPU6050 забезпечує високу точність вимірювань, навіть при високих швидкостях руху. Однак, у випадках сильних вібрацій або змін температури, точність вимірювань може трохи знижуватися. Для покращення точності було впроваджено програмні фільтри, які

дозволяють усувати шум та аномалії в даних.

Крім того, було проведено тести на стабільність з'єднання між мікроконтролером та сервером. Під час тривалих експериментів виявлено, що система здатна підтримувати стабільне з'єднання без переривань, забезпечуючи безперебійну передачу даних. Це було досягнуто завдяки оптимізації тексту програми та використанню протоколів передачі даних.

Також було проаналізовано споживання енергії системою під час роботи. ESP8266 NodeMCU v3 показав низьке енергоспоживання в режимі очікування, що є перевагою для проєктів, де важлива автономність системи. Arduino Uno R4 Wi-Fi, хоча і має вищу споживчу потужність, все одно демонструє ефективність завдяки оптимізації тексту програми та використанню енергоефективних компонентів.

Була розроблена архітектура прототипу цифрового двійника, що відображає основні елементи системи, такі як сенсори MPU6050, мікроконтролери ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi, а також серверну інфраструктуру для збору та обробки даних. Графічне представлення дозволяє візуально уявити потік даних від сенсорів до мікроконтролерів, а далі до центрального сервера через бездротове з'єднання Wi-Fi. Також архітектура демонструє, як дані з сенсорів зберігаються у базі даних MySQL та доступні для подальшої візуалізації та аналізу через веб-інтерфейс або мобільний застосунок.

Архітектура прототипу цифрового двійника робототехнічного пристрою для відтворення руху у просторі наведена на рисунку 4.

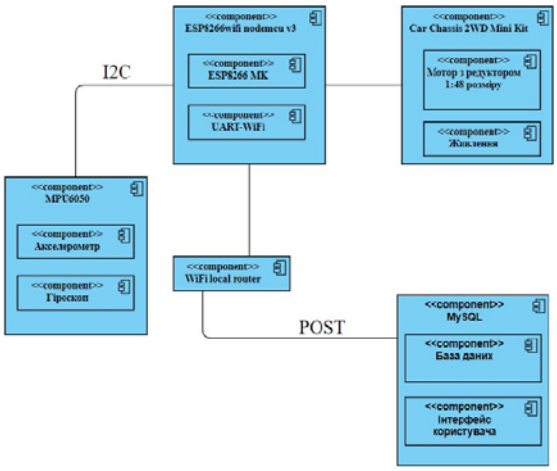

Рисунок 4. Архітектура прототипу цифрового двійника

Дана архітектура демонструє взаємодію між сенсорами, мікроконтролерами та сервером. Сенсори, такі як MPU6050, підключаються до мікроконтролера через інтерфейси I2C або GPIO, після чого дані передаються на центральний сервер через Wi-Fi. На сервері дані обробляються, зберігаються у базі даних та доступні для візуалізації через веб-інтерфейс або мобільний застосунок. Архітектура забезпечує гнучкість та масштабованість системи, дозволяючи легко додавати нові сенсори або змінювати конфігурацію мікроконтролерів відповідно до вимог проєкту.

Розробка програмної частини. Реалізація програмної частини є невід'ємною складовою частиною розробки цифрового двійника, оскільки вона забезпечує функціональність системи, дозволяючи збирати, обробляти та передавати дані з сенсорів до серверу для подальшого аналізу та візуалізації. В даному дослідженні програмна частина охоплює розробку прошивки для мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi, а також створення серверного програмного забезпечення за допомогою PHP-скриптів та бази даних MySQL.

Прошивка для мікроконтролерів була розроблена з використанням середовища розробки Arduino IDE, яке є популярним інструментом серед розробників завдяки своїй простоті та широкій підтримці різних апаратних платформ. Основними бібліотеками, що використовувалися у проекті, були Wire.h для роботи з інтерфейсом I2C [10], MPU6050.h для взаємодії з сенсором руху [11], ESP8266WiFi.h [12] для підключення до бездротових мереж та ESP8266HTTPClient.h [13] для здійснення HTTP-запитів. Використання цих бібліотек спрощує процес програмування, забезпечуючи необхідні функції для взаємодії з апаратними компонентами та мережевими протоколами.

Процес розробки прошивки починається з ініціалізації серійного зв'язку, що дозволяє відлагоджувати систему шляхом виведення інформації на серійний монітор. Це є важливим етапом для перевірки правильності роботи системи на ранніх стадіях розробки. Після ініціалізації серійного зв'язку відбувається ініціалізація інтерфейсу I2C, через який підключено сенсор MPU6050. Це дозволяє мікроконтролеру взаємодіяти з сенсором для зчитування даних про прискорення та кутові швидкості. Наступним етапом є підключення до Wi-Fi мережі за допомогою бібліотеки ESP8266WiFi.h. Цей процес включає в себе пошук доступних мереж, підключення до обраної мережі та перевірку статусу з'єднання, що гарантує стабільну передачу даних на сервер.

Після успішного підключення до мережі Wi-Fi, мікроконтролер ініціалізує сенсор MPU6050 та перевіряє його з'єднання за допомогою методу testConnection(). Якщо сенсор підключено успішно,

система переходить до циклу збирання та передачі даних. У циклі loop() мікроконтролер виконує зчитування даних з акселерометра та гіроскопа за допомогою методу getMotion6(), який повертає значення прискорень по осях x, y, z та кутових швидкостей по осях gx, gy, gz. Отримані дані використовуються для обчислення кутів нахилу roll та pitch за допомогою тригонометричних функцій atan2(). Обчислені кути виражаються в градусах, що дозволяє їх легко інтерпретувати та використовувати для візуалізації стану об'єкта.

Формули для обчислення кутів нахилу виглядають наступним чином:

$$roll = \text{atan2}(ay, az) \times \frac{180}{\pi}$$

$$pitch = \text{atan2}(-ax, \sqrt{ay^2 + az^2}) \times \frac{180}{\pi}$$

Ці кути є критично важливими для відображення орієнтації об'єкта у цифровому двійнику, оскільки вони визначають положення об'єкта у просторі. Тригонометричні функції дозволяють точно розрахувати кути нахилу на основі виміряних прискорень, що забезпечує високу точність та достовірність даних.

Після обчислення кутів, дані готуються до передачі на сервер через HTTP POST-запит. Для цього використовується бібліотека ESP8266HTTPClient.h, яка спрощує створення та відправку HTTP-запитів. Дані формуються у вигляді рядка з параметрами, що включають значення roll, pitch, ax, ay, az, gx, gy, gz. Цей рядок передається на сервер за допомогою методу http.POST(), який відправляє дані на вказаний URL PHP-скрипта. Код, що відповідає за передачу даних, виглядає наступним чином:

```
// Відправка даних на сервер
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
  HTTPClient http;
  http.begin(client, serverName);  // Використання нового API

  http.addHeader("Content-Type", "application/x-www-form-urlencoded");

  String httpRequestData = "roll=" + String(roll)
                + "&pitch=" + String(pitch)
                + "&ax=" + String(ax)
                + "&ay=" + String(ay)
                + "&az=" + String(az)
                + "&gx=" + String(gx)
                + "&gy=" + String(gy)
                + "&gz=" + String(gz);

  int httpResponseCode = http.POST(httpRequestData);

  if (httpResponseCode > 0) {
    String response = http.getString();
    Serial.println(httpResponseCode);
    Serial.println(response);
  } else {
    Serial.print("Error on sending POST: ");
    Serial.println(httpResponseCode);
  }

  http.end();
} else {
  Serial.println("WiFi Disconnected");
}
```

Наведений текст програми забезпечує повний цикл збору та передачі даних від сенсора до серверу. Мікроконтролер ESP8266 NodeMCU v3 зчитує дані з MPU6050, обчислює кути нахилу roll та pitch, а потім передає ці дані на сервер через HTTP POST-запит. PHP-скрипт на сервері приймає ці дані, перевіряє їхню повноту та вставляє у базу даних MySQL для подальшого аналізу та візуалізації.

Для забезпечення стабільності та надійності передачі даних було впроваджено механізм перевірки статусу з'єднання з Wi-Fi мережею перед здійсненням передачі даних. Якщо з'єднання встановлено успішно, дані відправляються на сервер. У випадку відсутності з'єднання система виводить повідомлення про роз'єднання, що дозволяє користувачу оперативно реагувати на проблему. Додатково було реалізовано механізм повторної передачі даних у випадку помилки під час відправки. Якщо HTTP POST-запит не вдалося виконати успішно, система повторює спробу відправки після певної затримки, що мінімізує втрати даних через тимчасові проблеми з мережею або сервером.

Важливою частиною програмного забезпечення є налаштування затримки між відправками даних. У даному проєкті затримка встановлена на 5 секунд, що дозволяє забезпечити баланс між частотою збору даних та навантаженням на сервер. Це також дозволяє зменшити споживання енергії, що є важливим аспектом для систем, що працюють на батареях або інших обмежених джерелах живлення. Затримка реалізована

за допомогою функції delay(5000), яка затримує виконання циклу на 5000 мілісекунд.

Даний підхід дозволяє системі працювати у реальному часі, забезпечуючи актуальність отриманих даних для подальшого аналізу та візуалізації, не перевантажуючи при цьому сервер великою кількістю запитів.

Розробка серверного програмного забезпечення. На серверній стороні було розроблено PHP-скрипт, який відповідає за прийом даних через HTTP [14] POST-запити та їх збереження у базі даних MySQL. Цей скрипт забезпечує зберігання великих обсягів даних та їхній подальший аналіз. Скрипт починається з встановлення з'єднання з базою даних за допомогою параметрів сервера, користувача, пароля та назви бази даних. Використання об'єктно-орієнтованого підходу з класом mysqli дозволяє забезпечити безпечне з'єднання з базою даних [15].

```
<?php
$servername = "localhost";
$username = "root";
$password = "";
$dbname = "sensor_data";

// Створення з'єднання
$conn = new mysqli($servername, $username, $password, $dbname);

// Перевірка з'єднання
if ($conn->connect_error) {
  die("Connection failed: " . $conn->connect_error);
}
?>
```

Після встановлення з'єднання скрипт отримує дані з HTTP POST-запиту за допомогою суперглобального масиву $_POST. Кожен параметр (roll, pitch, ax, ay, az, gx, gy, gz) перевіряється на наявність та коректність перед вставкою у базу даних. Це дозволяє уникнути вставки неповних або некоректних даних, що може негативно вплинути на якість аналізу та візуалізації.

```
// Отримання даних з HTTP-запиту
$roll = $_POST['roll'] ?? null;
$pitch = $_POST['pitch'] ?? null;
$ax = $_POST['ax'] ?? null;
$ay = $_POST['ay'] ?? null;
$az = $_POST['az'] ?? null;
$gx = $_POST['gx'] ?? null;
$gy = $_POST['gy'] ?? null;
$gz = $_POST['gz'] ?? null;

// Перевірка наявності всіх необхідних параметрів
if ($roll !== null && $pitch !== null && $ax !== null && $ay !== null && $az !== null && $gx !== null && $gy !== null && $gz !== null) {
  // Підготовка SQL-запиту з використанням підготовлених виразів
  $stmt = $conn->prepare("INSERT INTO mpu6050_data (roll, pitch, ax, ay, az, gx, gy, gz) VALUES (?, ?, ?, ?, ?, ?, ?, ?)");
  $stmt->bind_param("dddddddd", $roll, $pitch, $ax, $ay, $az, $gx, $gy, $gz);

  // Виконання запиту
  if ($stmt->execute()) {
    echo "New record created successfully";
  } else {
    echo "Error: " . $stmt->error;
  }

  // Закриття виразу
  $stmt->close();
} else {
  echo "Missing data";
}

// Закриття з'єднання
$conn->close();
?>
```

Використання підготовлених виразів (prepared statements) дозволяє захистити систему від SQL-ін'єкцій, підвищуючи безпеку даних. Виконання цього запиту забезпечує збереження отриманих даних у базі даних MySQL. У випадку успішної вставки скрипт повертає повідомлення про успіх, а у разі помилки – відповідне повідомлення про помилку, що дозволяє користувачу швидко виявити та усунути проблему.

Для забезпечення надійності та ефективності роботи серверного програмного забезпечення було впроваджено механізми логування помилок та обробки винятків. Це дозволяє відстежувати проблеми, що виникають під час роботи системи, та вчасно їх усу-

вати, підвищуючи загальну стабільність та надійність системи цифрового двійника.

Інтеграція системи та тестування. Інтеграція апаратних та програмних компонентів передбачає підключення сенсора MPU6050 до мікроконтролера ESP8266 або Arduino Uno R4 Wi-Fi через інтерфейс I2C, налаштування Wi-Fi з'єднання та налаштування серверного програмного забезпечення для прийому та зберігання даних. Після інтеграції системи було проведено серію тестувань для оцінки її функціональності та надійності.

Тестування включало перевірку збирання даних сенсора, їх коректну передачу на сервер, а також успішне збереження у базі даних MySQL. Під час тестування було встановлено, що система здатна стабільно збирати та передавати дані з сенсора MPU6050 з частотою 5 секунд, що дозволяє забезпечити актуальність отриманих даних для подальшого аналізу та візуалізації. Дані були успішно збережені у базі даних MySQL та були доступні для обробки та візуалізації через середовище Unity.

Для перевірки точності системи було проведено порівняльний аналіз отриманих даних з реальними фізичними характеристиками об'єкта. Використання тригонометричних функцій для обчислення кутів нахилу roll та pitch дозволило забезпечити високу точність вимірювань, що підтверджується відповідністю отриманих кутів реальним параметрам руху об'єкта. Це є важливим для створення цифрового двійника, який може точно відтворювати фізичні характеристики об'єкта в цифровому середовищі.

Візуалізація. Компонент візуалізації системи цифрового двійника є важливим для перетворення складних наборів даних у візуальне представлення [16]. Чітке візуальне представлення даних сенсорів дозволяє користувачам краще розуміти стан та поведінку моніторингового об'єкта в реальному часі. Одним з ключових інструментів для досягнення цієї мети є інтеграція середовища 3D-моделювання Unity, яке забезпечує створення інтерактивних та реалістичних візуальних представлень об'єктів.

Unity обирається для візуалізації рухів цифрового двійника завдяки своїй універсальності, простоті використання та потужним можливостям реального часу рендерингу. Це середовище дозволяє створювати занурюючі 3D-досвіди, які відображають орієнтацію та рухи об'єкта на основі даних, зібраних з сенсора MPU6050 та переданих з мікроконтролера ESP8266. Наприклад, при моніторингу роботизованої руки Unity може відображати її позицію та кути нахилу, надаючи чіткий огляд поточного стану віртуального двійника.

Інтеграція даних у реальному часі в Unity здійснюється через комунікаційні протоколи, такі як WebSocket або HTTP-запити, що дозволяють 3D-моделі отримувати оновлення з ESP8266. Це забезпечує анімацію моделі відповідно до змін в орієнтації та русі об'єкта, надаючи користувачам інтуїтивне розуміння його поведінки. Наприклад, коли об'єкт змінює положення, відповідні зміни автоматично відображаються на 3D-моделі в Unity, що дозволяє миттєво спостерігати за динамікою руху.

Окрім простих оновлень позиції, Unity підтримує передові техніки візуалізації, які значно покращують користувацький досвід. Наприклад, можна додати візуальні індикатори для показу критичних станів, таких як перевищення певних порогових значень roll або pitch. Реалізація змін кольору або появи попереджувальних знаків на 3D-моделі дозволяє користувачам швидко ідентифікувати небезпечні умови роботи об'єкта, підвищуючи ефективність моніторингу та прийняття рішень.

Інтерактивність в Unity дозволяє користувачам взаємодіяти з 3D-моделлю, переглядати її з різних кутів і отримувати додаткову інформацію через підказки. Це покращує залучення користувачів і дає можливість детальніше аналізувати дані, вивчаючи поведінку об'єкта.

Дизайн інтерфейсу користувача в Unity є суттєвим для ефективної візуалізації. Інтерфейс повинен бути інтуїтивно зрозумілим, організованим та естетично привабливим, щоб користувачі могли легко орієнтуватися в представлених даних. Використання кольорових схем, які відображають різні стани системи, допомагає швидко ідентифікувати ключові інформаційні точки. Наприклад, зелений може вказувати на нормальну роботу, жовтий – на обережність, а червоний – на критичні сповіщення.

Використання Unity для візуалізації в системі цифрового двійника покращує представлення даних, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень. Цей підхід підвищує зручність використання, даючи користувачам глибше розуміння стану об'єкта, що є важливим для оптимізації процесів та забезпечення безпеки систем.

V. ВИСНОВОК

У даній роботі було розроблено прототип цифрового двійника робототехнічного пристрою, який дозволяє відтворювати рух об'єкта в реальному часі з високою точністю.

Основним завданням було вибір мікроконтролерів ESP8266 NodeMCU v3 та Arduino Uno R4 Wi-Fi з сенсором MPU6050 для точного збору даних про при-

скорення та кутові швидкості. Розробка програмного частини включала створення прошивки для збору та передачі даних на сервер через Wi-Fi, а також серверного програмного забезпечення на базі PHP та MySQL для зберігання та управління даними.

Проведені тестування підтвердили високу точність збору даних сенсором MPU6050 та стабільність передачі інформації на сервер. Візуалізація в Unity продемонструвала можливості створення детальних та інтерактивних моделей, що значно покращує процес аналізу даних.

Розроблений прототип цифрового двійника може бути застосований у різних галузях, від робототехніки до промислового моніторингу та демонструє можливості інтеграції сучасних апаратних та програмних технологій для створення адаптивних систем моніторингу.

В подальшому планується розширення функціональних можливостей системи шляхом інтеграції додаткових сенсорів та оптимізації програмного забезпечення для зменшення затримок у передачі даних та впровадження машинного навчання для покращення аналізу даних та виявлення аномалій у реальному часі, що дозволить створювати більш адаптивні та самонавчаючі цифрові двійники, які зможуть автоматично реагувати на зміни умов експлуатації об'єкта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Khoshafian, S., & Rostetter, C. (2015). Digital prescriptive maintenance, Internet of Things, process of everything. BPM Everywhere, 1-20.

[2] Short, M., & Twiddle, J. (2019). An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment. Sensors (Switzerland), 19.

[3] Priyanka, E. B., Thangavel, S., Gao, X.-Z., & Sivakumar, N. S. (2021). Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. Journal of Industrial Information Integration, Article 100272. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100272

[4] Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. Sensors, 20, 5103. https://doi.org/10.3390/s20185103

[5] Paziraei, M., & Motamedi, A. (2024, August). A survey of visualization techniques for digital twins. In Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), Montreal, Canada.

[6] Dihan, M. S., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M. R., Islam, M. M., Badal, F. R., Ali, M. F., Ahamed, M. H., Abhi, S. H., Sarker, S. K., & Hasan, M. M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. Heliyon, 10, e26503. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503

[7] Getting Started With ESP8266(LiLon NodeMCU V3) Complete Guide for IoT Startup With Example(as Server)Electronic resource]. – https://www.instructables.com/Getting-Started-With-ESP8266LiLon-NodeMCU-V3Flashi/

[8] Arduino Uno R4 Wi-Fi [Electronic resource]. – Access mode: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf

[9] Mpu6050 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu-6050%20datasheet&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIxZ_TiOvxhgMVJFKRBR2WiQLREAAYAiAAEgJUjvD_BwE

[10] Wire [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/blob/master/libraries/Wire/src/Wire.h

[11] MPU6050 by Electronic Cats - Library for Arduino [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/ElectronicCats/mpu6050

[12] ESP8266WiFi [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266WiFi/src/ESP8266WiFi.h

[13] ESP8266HTTPClient [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266HTTPClient/src/ESP8266HTTPClient.h

[14] Малохвій, Е. Е. Дослідження протоколів передачі даних в умовах інтернету речей / Е. Е. Малохвій, Г. І. Молчанов, Ю. В. Паржин // Системи управління, навігації та зв'язку, 2022. – №1– С. 66-74. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.066

[15] MySQL Improved Extension [Electronic resource]. – Access mode: https://www.php.net/manual/uk/book.mysqli.php

[16] 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

Стаття надійшла до редакції 15.10.2024

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN PROTOTYPE OF A ROBOTIC DEVICE FOR MOTION REPRODUCTION IN SPAC

BILKA D.O. Master's Student of the Department of Information Technology of Electronic Devices, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: naulkx@gmail.com, ORCID: 0009-0007-9717-5171;

SHAPTALA S.V. PhD Student, Assistant of the Department of Information Technology of Electronic Devices, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: stas.shaptala@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2617-5904;

MYRONOVA N.O. Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology of Electronic Devices, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: natali.myronova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7484-559X;

Purpose. *To develop a prototype of a digital twin for a robotic device capable of reproducing an object's motion in real time with high accuracy.*

Methodology. *To achieve the objective, the following methods were employed: integration of ESP8266 NodeMCU v3 and Arduino Uno R4 Wi-Fi microcontrollers with an MPU6050 sensor, firmware development using the C++ programming language in the Arduino IDE environment, creation of server-side software using PHP scripts and a MySQL database, and the development of an interactive data visualization system in Unity. Additionally, methods for data filtering and calibration were applied to ensure accuracy.*

Findings. *A digital twin prototype was developed, which accurately reproduces the movements of a physical object based on data from MPU6050 sensors. The system ensures reliable data collection and transmission from the microcontroller to the server without significant losses or distortions. The data is successfully stored in the MySQL database and is available for further analysis and visualization via interactive 3D models in Unity. Implemented mechanisms for data integrity verification and connection stability provide high reliability of the system over extended periods.*

Originality. *A novel approach to developing a digital twin has been proposed, integrating ESP8266 and Arduino Uno R4 Wi-Fi microcontrollers with an MPU6050 sensor for data collection and processing, employing real-time filtering and calibration algorithms to enhance data accuracy.*

Practical value. *The developed prototype of the digital twin for a robotic device expands the possibilities for studying and researching digital twin technologies in robotics.*

Keywords: digital twin; robotic device; real-time data monitoring; data filtering and calibration methods; data visualization; Internet of Things.

REFERENCES

[1] Khoshafian, S., & Rostetter, C. (2015). Digital prescriptive maintenance, Internet of Things, process of everything. BPM Everywhere, 1-20.

[2] Short, M., & Twiddle, J. (2019). An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment. Sensors (Switzerland), 19.

[3] Priyanka, E. B., Thangavel, S., Gao, X.-Z., & Sivakumar, N. S. (2021). Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. Journal of Industrial Information Integration, Article 100272. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100272

[4] Tekinerdogan, B., & Verdouw, C. (2020). Systems architecture design pattern catalog for developing digital twins. Sensors, 20, 5103. https://doi.org/10.3390/s20185103

[5] Paziraei, M., & Motamedi, A. (2024, August). A survey of visualization techniques for digital twins. In Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), Montreal, Canada.

[6] Dihan, M. S., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M. R., Islam, M. M., Badal, F. R., Ali, M. F., Ahamed, M. H., Abhi, S. H., Sarker, S. K., & Hasan, M. M. (2024). Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. Heliyon, 10, e26503. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503

[7] Getting Started With ESP8266(LiLon NodeMCU V3) Complete Guide for IoT Startup With Example(as Server)Electronic resource]. – https://www.instructables.com/Getting-Started-With-ESP8266LiLon-NodeMCU-V3Flashi/

[8] Arduino Uno R4 Wi-Fi [Electronic resource]. – Access mode: https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf

[9] MPU 6050 [Electronic resource]. – Access mode: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Mpu-6050%20datasheet&gad_source=1&gclid=EAIaIQob

ChMIxZ_TiOvxhgMVJFKRBR2WiQLREAAYAiAAEgJUjvD_BwE

[10] Wire [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/arduino/ArduinoCore-avr/blob/master/libraries/Wire/src/Wire.h

[11] MPU6050 by Electronic Cats - Library for Arduino [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/ElectronicCats/mpu6050

[12] ESP8266WiFi [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266WiFi/src/ESP8266WiFi.h

[13] ESP8266HTTPClient [Electronic resource]. – Access mode: https://github.com/esp8266/Arduino/blob/master/libraries/ESP8266HTTPClient/src/ESP8266HTTPClient.h

[14] Malokhviĭ E. E., Molchanov H. I., Parzhyn Yu. V. (2022). Doslidzhennia protokoly peredachi danykh v umovakh internetu rechei. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. No. 1, 66-74. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.066 (in Ukrainian).

[15] MySQL Improved Extension [Electronic resource]. – Access mode: https://www.php.net/manual/uk/book.mysqli.php

[16] Shaptala S.V., Myronova N. O. (2023). Vprovadzhennia tekhnolohii tsyfrovykh dviiḥnykiv dlia robototekhniky. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system.* No. 53, .45-51. https://dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2023.53.45-51