

ХОМ'ЯК ВІТАЛІЙНаціональний університет «Львівська політехніка»
e-mail: vitalii.khomiak.mitpa.2023@lpnu.ua**МІШАКІН МАКСИМ**Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: maksym.mishakin.mitpa.2023@lpnu.ua**ДУМИЧ СТЕПАН**Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: stepan.s.dumych@lpnu.ua**АНДРУЩАК ВОЛОДИМИР**Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: volodymyr.s.andrushchak@lpnu.ua**МАКСИМЮК ТАРАС**Національний університет «Львівська політехніка»
e-mail: taras.a.maksymiuk@lpnu.ua

ПРОГРАМНО-АПАРАТНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ІОТ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

У статті представлено розробку інтерактивної IoT-системи з використанням технології цифрових двійників, інтегрованої на платформі Home Assistant із застосуванням 3D-візуалізації в Unreal Engine. Основна увага зосереджена на створенні реалістичних цифрових копій фізичних об'єктів та їх синхронізації в режимі реального часу за допомогою IoT-сенсорів, протоколу MQTT та механізмів граничних обчислень. Реалізація цифрових двійників включає етапи 3D-сканування простору, оптимізацію моделей, інтеграцію даних сенсорів та налаштування інтерактивних сценаріїв управління IoT-пристроями. Особливий акцент зроблено на перспективі використання системи для візуального моніторингу, автоматизації процесів та інтеграції у метавесвіт. Отримані результати демонструють ефективність запропонованого підходу для управління IoT системами та підвищення рівня автоматизації, що відкриває нові перспективи для впровадження цифрових двійників у масштабних IoT-системах та інтелектуальних середовищах.

Ключові слова: цифрові двійники, IoT, програмно-апаратна платформа, блокчейн, MQTT.

KHOMIAK VITALII, MISHAKIN MAKSYM, DUMYCH STEPAN,
ANDRUSHCHAK VOLODYMYR, MAKSYMUK TARAS
Lviv Polytechnic National University

SOFTWARE AND HARDWARE PLATFORM FOR DEPLOYMENT OF THE DIGITAL TWINS IOT SYSTEMS USING BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

The rapid advancement of technology has positioned Digital Twin (DT) and Internet of Things (IoT) technologies as pivotal components in the transformation of various industries. These innovations facilitate the creation of precise virtual models of physical objects, enabling real-time interaction, optimization, and predictive analysis. Their application spans multiple domains, including industrial processes, smart cities, energy management, agriculture, healthcare, and education. This paper introduces a hardware-software platform designed for implementing Digital Twins to automate, monitor, and optimize system performance. The platform integrates IoT devices with advanced mathematical models and leverages the Home Assistant framework for seamless connectivity with diverse communication protocols (e.g., Zigbee, WiFi, MQTT). The proposed system combines real-time sensor data with dynamic modeling to create virtual representations of physical assets, enhancing control, predictive maintenance, and resource efficiency. Advanced visualization is achieved through Unreal Engine, offering interactive 3D environments synchronized with IoT data for intuitive system management. Security and transparency are augmented using blockchain technology and Non-Fungible Tokens (NFTs). Each Digital Twin is uniquely identified and secured via tokenization, enabling authentication, data integrity, and controlled access. Smart contracts facilitate seamless integration with blockchain networks like Ethereum, ensuring secure and transparent transactions. The incorporation of edge computing further reduces latency and enhances data processing efficiency, crucial for real-time operations. This research also explores the platform's potential for integration with AR/VR devices, enabling immersive interaction and scenario simulation. Applications include real-time control of smart homes, training environments, and remote monitoring. The system's scalability addresses the increasing complexity and volume of IoT networks, with an emphasis on optimizing computational and energy resources. Future directions include enhancing scalability for large-scale deployments, minimizing blockchain transaction costs, and improving network throughput. These advancements aim to adapt the platform for broader applications in smart environments and infrastructure projects. By bridging the physical and digital realms, the proposed platform offers a robust solution for intelligent automation, real-time monitoring, and efficient resource management, setting the stage for the next generation of interconnected systems.

Keywords: digital twins, IoT, hardware-software platform, blockchain, MQTT.

Вступ

У сучасних умовах стрімкого технологічного прогресу технології цифрових двійників (Digital Twins) та Інтернету речей (IoT) стали важливим елементом трансформації багатьох галузей. Ці технології дозволяють створювати точні віртуальні моделі фізичних об'єктів і забезпечують можливість інтерактивної взаємодії з ними в реальному часі, що значно сприяє оптимізації процесів, підвищенню надійності та точності систем, а також прогнозуванню їхньої роботи [1]. Використання IoT і цифрових двійників дедалі ширше застосовується у таких сферах, як промисловість, інфраструктура розумних міст, енергетика, сільське господарство, медицина та освіта. В умовах зростання складності систем і процесів, а також глобальних викликів, важливість ефективного управління та автоматизації стає критичною. Технології цифрових двійників

дозволяють суттєво знижувати витрати на обслуговування, підвищувати продуктивність, мінімізувати ризики поломки обладнання та забезпечувати стабільну й безперебійну роботу. У цьому контексті актуальним є впровадження інтерактивних IoT-систем, які можуть адаптуватися до змін та підтримувати прийняття обґрунтованих рішень на основі аналізу реальних даних. Цифрові двійники, як віртуальні копії фізичних об'єктів, мають потенціал значно розширити можливості IoT, забезпечуючи ефективну візуалізацію, аналіз і прийняття рішень на основі реальних даних у режимі реального часу [2]. Впровадження цифрових двійників дозволяє ефективніше керувати процесами, оптимізувати ресурси та підвищувати продуктивність систем. Завдяки інтеграції з IoT, цифрові двійники створюють адаптивні системи, що постійно оновлюються даними з сенсорів та використовують алгоритми штучного інтелекту для аналізу, що дозволяє не тільки швидко реагувати на проблеми, але й запобігати їм, мінімізуючи ризики, знижуючи витрати ресурсів і підвищуючи продуктивність через превентивне обслуговування й оптимізацію процесів у реальному часі. У промисловості IoT інтегрується з цифровими двійниками для моніторингу процесів, виявлення аномалій та запобігання поломкам обладнання. Наприклад, цифрові двійники використовуються для моделювання поведінки виробничих ліній, що дозволяє здійснювати прогнозування можливих проблем, аналізувати ефективність обладнання та впроваджувати превентивне обслуговування для уникнення непередбачених простоїв. У даній статті пропонується програмно-апаратна платформа, яка дозволяє створювати віртуальні репрезентації фізичних об'єктів чи систем для автоматизації, моніторингу та оптимізації їхньої роботи.

Аналіз досліджень та публікацій

Технологія цифрових двійників (ЦД) у поєднанні з Інтернетом речей (IoT) активно досліджується в науковій спільноті завдяки її потенціалу в автоматизації, моніторингу та оптимізації роботи систем. Зокрема, у роботі [1] здійснено всеосяжний аналіз технічних характеристик, сценаріїв застосування та архітектурних моделей цифрових двійників у контексті IoT. Автори акцентують увагу на інтеграції IoT і ЦД для підвищення ефективності та надійності систем, що дозволяє розв'язувати широкий спектр інженерних задач. Автори у статті [2] запропонували динамічну ієрархічну структуру для IoT-систем, яка підтримує цифрові двійники. Ця структура сприяє покращенню взаємодії між фізичними об'єктами та їхніми цифровими копіями, забезпечуючи більш точний моніторинг та управління системами в реальному часі. Дослідження [3] зосереджене на розробці семантичної моделі цифрового двійника для IoT, яка спрямована на підвищення інтероперабельності гетерогенних IoT-систем. Запропонована модель використовує контейнерні технології для симуляції пристроїв на рівні периферії. У роботі [4] розглядається можливість застосування блокчейн-технологій для забезпечення власності та безпеки цифрових двійників домашніх пристроїв, підключених до IoT. Такий підхід надає користувачам більший контроль над їхніми даними, підвищуючи конфіденційність і захищеність систем. Огляд основ цифрових двійників та їх потенціалу для IoT-додатків подано в [5]. Автори класифікують ЦД за типами, досліджують сучасні розробки та перспективи використання у реальних системах, наголошуючи на їх здатності забезпечувати високу гнучкість і ефективність. Дослідження [6] розглядає роль ЦД у контексті інтелектуальної підключеності, зокрема у поєднанні з технологіями штучного інтелекту (AI) та IoT. Автори обговорюють перспективи та виклики інтеграції ЦД з іншими передовими технологіями, підкреслюючи їхній внесок у розвиток інноваційних рішень. Стаття [7] є фундаментальним оглядом сучасного стану розвитку цифрових двійників. У ній висвітлюються концептуальні основи, досягнення, ключові проблеми та перспективи досліджень у цій галузі. Для промислових IoT-систем окремий акцент зроблено у [8], де представлено огляд цифрових двійників у контексті промислового Інтернету речей (IIoT). Автори аналізують архітектури, моделі та реальні сценарії застосування у виробничих процесах. Значення ЦД для оцінювання та тестування IoT-пристроїв, включаючи кібербезпеку, детально розглянуто у [9]. Автори пропонують методологію моделювання цифрових двійників для включення кібер-випадків використання в експериментах. Нарешті, робота [10] представляє концепцію бездротового живлення для масової IoT-мережі, підтримуваної цифровими двійниками. Запропонована схема демонструє можливість ефективного керування енергоспоживанням у великих IoT-мережах. Окрім того, інтеграція блокчейн-технології з цифровими двійниками привертає значну увагу дослідників, оскільки така комбінація забезпечує підвищений рівень безпеки, прозорості та цілісності даних у різних галузях. Зокрема, стаття [11] аналізує, як блокчейн може підвищити безпеку виробничих процесів за допомогою цифрових двійників, забезпечуючи відстежуваність, відповідність, автентичність, якість і безпеку.

Математична модель цифрового двійника для IoT застосувань

У контексті запропонованої IoT-системи, побудованої на платформі Home Assistant із використанням сенсорів і протоколів зв'язку, математична модель повинна відображати основні аспекти її функціонування, включаючи збір даних, динаміку системи, візуалізацію та інтерактивність, а також контроль і забезпечення кібербезпеки. Математична модель починається з визначення змінних стану, які характеризують фізичні параметри об'єктів, що підлягають моніторингу. Змінні стану визначаються як вектор $x(t)$, що містить параметри, вимірювані сенсорами в реальному часі:

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T, \quad (1)$$

де $x_i(t)$ – значення i -го параметра в момент часу t . До цих параметрів можуть входити температура, рівень вологості, електрична потужність або інші характеристики, залежно від типу фізичних об'єктів.

Вхідні дані від сенсорів визначаються як вектор $u(t)$:

$$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)]^T, \quad (2)$$

де $u_i(t)$ – дані окремих сенсорів, наприклад температура, вологість, тиск, освітлення, тощо.

Зміна стану системи у часі визначається динамічними рівняннями, які моделюють взаємозв'язок між змінними стану, вхідними даними та зовнішніми впливами. Основне рівняння стану має вигляд:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) + w(t), \quad (3)$$

де $f(x(t), u(t), t)$ – векторна функція, що описує динаміку фізичних процесів; $w(t)$ – вектор шуму, який виникає через зовнішні фактори чи похибки моделювання.

Для прикладу, у випадку автоматичного контролю температури в приміщенні рівняння може бути записане як:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -k(x(t) - u(t)) + q, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт теплового обміну, $u(t)$ – температура навколишнього середовища, а q – внутрішнє джерело тепла.

Для точного функціонування системи необхідно враховувати рівняння вимірювання, яке відображає відображення змінних стану через сенсори. Це рівняння записується як:

$$y(t) = h(x(t), u(t), t) + v(t), \quad (5)$$

де $h(x(t), u(t), t)$ – функція, що визначає, як змінні стану та вхідні дані впливають на вихідні дані (вимірювання);

$v(t)$ – шум вимірювання, який моделює похибки сенсорів. Як правило, шум припускається гауссівським із середнім значенням 0.

Інтеграція платформи Home Assistant забезпечує можливість автоматизації та управління IoT-системою. Контрольні дії визначаються як вектор $u_c(t)$, що залежить від стану системи:

$$u_c(t) = Kx(t) + Ly(t), \quad (6)$$

де K – матриця зворотного зв'язку, що враховує поточний стан системи; L – матриця, яка використовує інформацію від сенсорів для корекції дій.

Це дозволяє, наприклад, автоматично вмикати обігрівач або освітлення залежно від показників сенсорів.

Для підвищення інтерактивності цифровий двійник інтегрується з Unreal Engine, який забезпечує 3D-візуалізацію фізичних об'єктів. Зміна стану у системі відображається в реальному часі через функцію візуалізації:

$$v_{3D}(t) = g(x(t), u(t)), \quad (7)$$

де $g(\cdot)$ – функція, яка перетворює змінні стану та вхідні дані у параметри, що керують візуальними елементами (розташування, стан об'єкта, текстури тощо).

Крім того, модель оптимізує споживання ресурсів, наприклад, енергії, шляхом мінімізації функції витрат:

$$J = \int_0^T L(x(t), u(t)) dt, \quad (8)$$

де $L(x(t), u(t))$ – функція витрат, яка враховує енергоспоживання, ефективність роботи та інші важливі параметри

Для синхронізації фізичних об'єктів, IoT-пристроїв та користувачів з цифровими двійниками у метавсесвіті вводиться часовий лаг Δt_s , що моделює затримку обробки даних між реальним світом і метавсесвітом через використання граничних обчислень. Динаміка стану у метавсесвіті описується як:

$$\dot{x}(t) = f(\dot{x}(t - \Delta t_s), u(t - \Delta t_s), t), \quad (9)$$

де $x(t)$ – стан цифрового двійника у метавсесвіті; $u(t)$ – вхідні дані від IoT-пристроїв, сенсорів та дій користувачів; Δt_s – затримка синхронізації, обумовлена обчислювальними затратами на передачу та обробку даних у граничних обчисленнях. Граничні обчислення в свою чергу описуються наступною функцією:

$$E(t) = g_{edge}(u(t), x(t), t), \quad (10)$$

де $E(t)$ – результати обробки даних у граничних вузлах; $g_{edge}(\cdot)$ – функція, що описує локальну обробку даних сенсорів і пристроїв, включаючи фільтрацію, агрегацію та попередню аналітику.

Таким чином, оброблені дані передаються до метавсесвіту:

$$u(t) = E(t), \quad (11)$$

Для безпечного функціонування системи запроваджуються механізми кібербезпеки, включаючи шифрування даних, автентифікацію та контроль доступу. Для цього кожному цифровому двійнику присвоюється унікальний NFT (Non-Fungible Token) [12]. Ця токенизація представлена математично як:

$$NFT_i = H(x_i(t), u_i(t), t), \quad (12)$$

де NFT_i – унікальний токен i -го об'єкта чи користувача; $H(\cdot)$ – хеш-функція, яка створює унікальний криптографічний хеш, пов'язаний із цифровим двійником у метавсесвіті. NFT використовується для ідентифікації, передачі права власності та доступу до цифрових двійників. Для забезпечення прозорості та безпеки транзакцій усі операції з NFT, синхронізація даних та дії у метавсесвіті записуються у блокчейн. Транзакції у блокчейні формалізуються як:

$$T_j = B(NFT_i, A_j, t), \quad (13)$$

де T_j – транзакція, що включає операцію над NFT_i ; A_j – дія користувача чи IoT-пристрою (наприклад, зміна стану, передача прав доступу); $B(\cdot)$ – функція створення транзакції з автоматичною перевіркою за допомогою

механізму консенсусу (Proof-of-Stake, Proof-of-Work, тощо).

Вищенаведена математична модель інтерактивної IoT-системи забезпечує гнучке, надійне й ефективне управління фізичними об'єктами та процесами на основі цифрових двійників. Описані рівняння відображають динаміку фізичних об'єктів та інтерактивність системи. Механізм блокчейн ідентифікації з використанням NFT забезпечує додатковий рівень захисту системи від несанкціонованих маніпуляцій із цифровими двійниками.

Практична реалізація розробленої програмно-апаратної платформи

В якості основної IoT платформи використано Home Assistant, яка підходить під вимоги системи завдяки відкритому коду, підтримці численних протоколів зв'язку (Zigbee, Z-Wave, WiFi, Bluetooth, MQTT, Thread) та можливості інтеграції пристроїв від різних виробників. Загальна архітектура розроблено програмно-апаратної платформи представлена на рисунку 1.

Відкритість платформи дозволяє створювати власні модулі для цифрового двійника, адаптувати систему до індивідуальних потреб та розширювати функціональність. Широка бібліотека доповнень і активна спільнота забезпечують зручне налаштування, регулярні оновлення та усунення вразливостей. Home Assistant підтримує локальне зберігання даних, що мінімізує залежність від хмарних сервісів, знижує ризик втрати доступу при відсутності інтернету та підвищує рівень безпеки й конфіденційності. Система може бути розгорнута на різних пристроях таких як Raspberry Pi, персональних комп'ютерах, міні-ПК, віддалених серверах чи у віртуальному середовищі. Для даної системи обрано Raspberry Pi, яка забезпечує оптимальне співвідношення функціональності, економічності та енергоефективності, що робить його найкращим вибором для розгортання цифрових двійників. Така конфігурація дозволяє знизити витрати на енергію, підвищити автономність та адаптувати систему до різних умов використання.

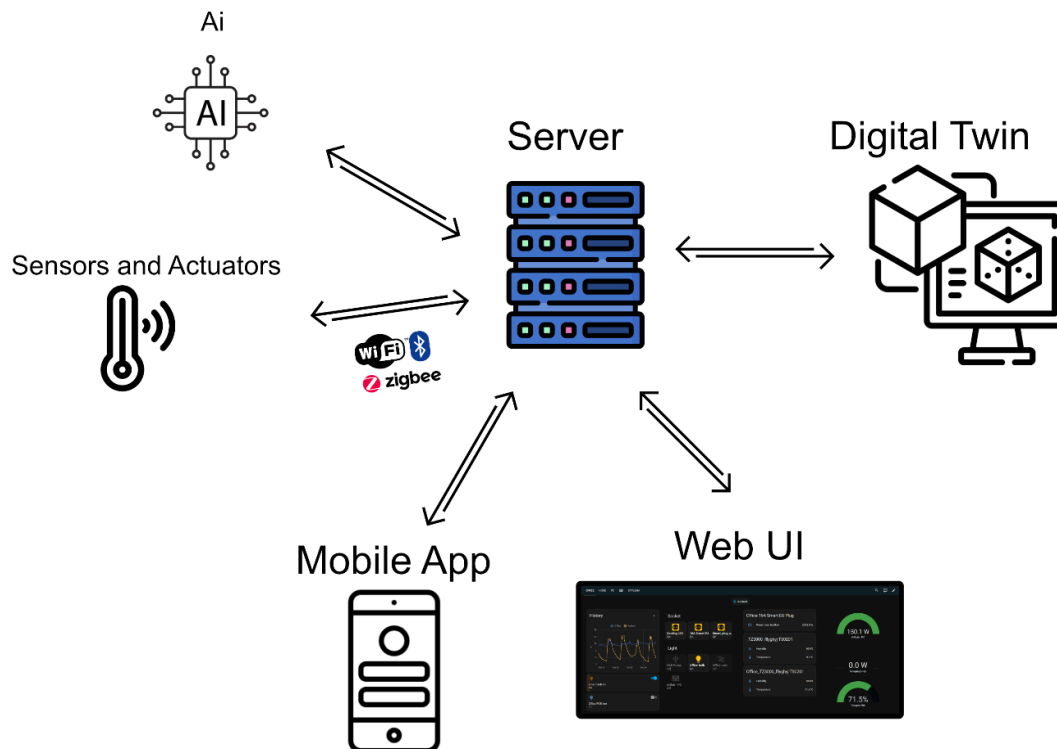


Рис. 1. Загальна архітектура програмно-апаратної платформи для розгортання цифрових двійників

Створення візуальної моделі цифрового двійника в IoT-системі є багатоступеневим процесом, що забезпечує інтерактивну взаємодію між фізичними пристроями та їх віртуальними копіями. На першому етапі тривимірні моделі простору створюються за допомогою лазерного сканування або фотограмметрії. Цей процес дозволяє з високою точністю фіксувати геометрію приміщення та об'єктів у ньому, створюючи хмару точок, яка є основою для тривимірного моделювання (рис. 2). Дані зі сканування обробляються у програмному забезпеченні, наприклад, Blender, де очищаються артефакти, оптимізується полігональна сітка та наноситься текстурювання. Завершена модель експортується у форматі, сумісному з Unreal Engine, що забезпечує візуалізацію та інтерактивну взаємодію у віртуальному середовищі.

В Unreal Engine імпортовані моделі інтегруються у віртуальну сцену відповідно до реальних координат об'єктів. Проводиться налаштування текстур, матеріалів, освітлення та фізичних властивостей для створення максимально реалістичного середовища. Після завершення збірки сцени починається інтеграція цифрового двійника з фізичними IoT-пристроями. Використовується протокол MQTT, який забезпечує швидку і надійну передачу даних між пристроями та цифровим двійником. Реальні дані від сенсорів та

виконавчих механізмів передаються до віртуальної сцени, а команди, подані у цифровому двійнику, можуть керувати фізичними пристроями, як показано на рисунку 3.

MQTT використовує модель публікації та підписки, яка дозволяє організувати ефективний обмін даними між видавцями (сенсорами) та підписниками (виконавчими пристроями або віртуальними компонентами). Теми у MQTT мають ієрархічну структуру, що дозволяє налаштовувати передачу даних для окремих зон чи пристроїв. Наприклад, зміни у фізичному середовищі, такі як увімкнення світла, миттєво відображаються у віртуальній сцені, а дії у цифровому двійнику, наприклад, регулювання температури, автоматично передаються реальним пристроям.



Рис. 2. 3D-сканування реального об'єкту та створення 3D-моделі цифрового двійника

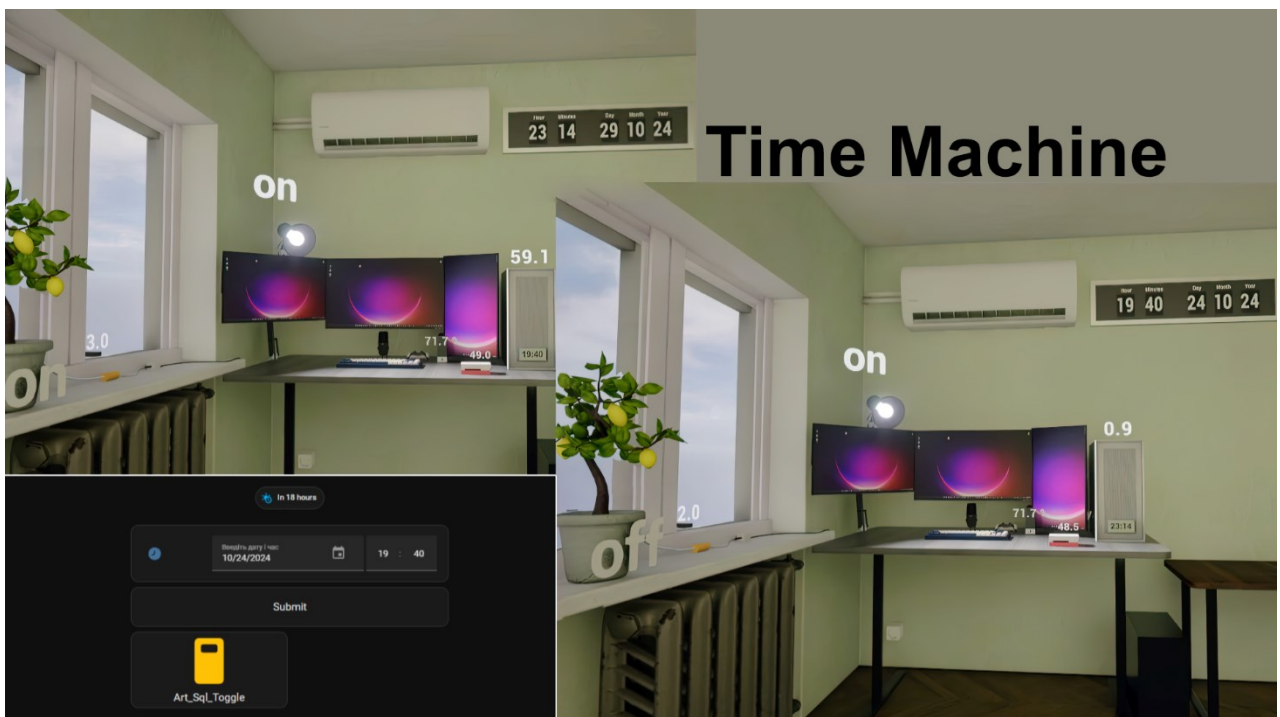


Рис. 3. Синхронізація стану цифрового двійника з реальними даними моніторингу фізичного середовища

Ця взаємодія забезпечує інтерактивний контроль та моніторинг у режимі реального часу, дозволяючи досягти високого рівня автоматизації та зручності управління IoT-системами. Цифровий двійник не лише відображає стан фізичного середовища, але й дозволяє моделювати сценарії, оптимізувати роботу пристроїв

та забезпечувати ефективне управління уніфікованою системою. Окрім того, розроблена система може інтегруватися з існуючими блокчейн-мережами для використання NFT, що забезпечить унікальну ідентифікацію цифрових двійників та підвищить безпеку транзакцій. Використовуючи такі платформи, як Ethereum, Binance Smart Chain або Solana, система створює невзаємозамінні токени для кожного цифрового двійника, які містять унікальну інформацію про об'єкт та його характеристики. Це дозволяє відстежувати історію володіння, забезпечує прозорість та контроль доступу до цифрових активів, а також інтегрує цифрові двійники в екосистему блокчейну.

Інтеграція здійснюється через смарт-контракти, які автоматизують процеси створення, передачі та управління NFT. Взаємодія з блокчейном реалізується за допомогою спеціалізованих API або SDK, що дозволяє системі обмінюватися даними з блокчейн-мережею на програмному рівні. Такий підхід не тільки підвищує безпеку та прозорість системи, але й розширює її функціональність, відкриваючи можливості для створення нових сервісів та поглиблення інтерактивності з користувачами у цифровому середовищі.

Запропонована система має значний потенціал для інтеграції з AR/VR пристроями, що відкриває нові можливості для візуалізації та взаємодії з цифровими двійниками. Використання AR/VR гарнітур дозволяє створити повноцінне інтерактивне середовище, де користувачі можуть не лише спостерігати за станом IoT-пристроїв у режимі реального часу, але й управляти ними через віртуальний інтерфейс. Наприклад, за допомогою VR гарнітури можна моделювати сценарії функціонування "розумного будинку", змінювати налаштування освітлення, температури або інших параметрів, спираючись на 3D-візуалізацію цифрових двійників, створену в Unreal Engine. Інтеграція таких пристроїв дозволяє підвищити точність управління, покращити зручність для користувачів і забезпечити інтуїтивну взаємодію з системою. Крім того, завдяки високій мобільності AR/VR гарнітур система може бути використана для навчання, симуляцій або віддаленого моніторингу, що робить її універсальним рішенням для різних сфер застосування.

Висновки

Запропонована програмно-апаратна платформа створення цифрових двійників IoT забезпечує точну синхронізацію фізичних пристроїв із їх віртуальними копіями, дозволяючи відображати стан об'єктів у реальному часі. Використання технологій 3D-візуалізації у середовищі Unreal Engine створює інтерактивне та реалістичне представлення фізичних об'єктів, що сприяє глибшому розумінню та зручності управління. Інтеграція блокчейн та NFT додає цифровим двійникам унікальну ідентифікацію та підвищує рівень безпеки і прозорості. Ця система об'єднує фізичний та цифровий світи, забезпечуючи ефективний моніторинг, автоматизацію та управління у тривимірному віртуальному середовищі. Перспективи подальшого розвитку системи цифрових двійників IoT з інтеграцією блокчейну та NFT зосереджені на підвищенні її масштабованості та продуктивності. З огляду на зростання кількості IoT-пристроїв, ключовим напрямом досліджень є оптимізація обробки великого обсягу даних у реальному часі без зниження швидкодії. Масштабованість системи у контексті блокчейну також потребує глибшого аналізу, зокрема для зменшення витрат на транзакції, підвищення пропускної здатності мережі та забезпечення сумісності з новими технологіями, такими як рішення другого рівня. Дослідження цих аспектів дозволить адаптувати систему до складніших сценаріїв використання, сприяти її інтеграції у масштабні інфраструктурні проекти та забезпечити її відповідність вимогам майбутніх розумних середовищ.

Література

1. Minerva R., Lee G. M., Crespi N. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models // Proceedings of the IEEE. – 2020. – Vol. 108, No. 10. – P. 1785–1824. – DOI: 10.1109/JPROC.2020.2998530.
2. Han Y., Sun Z., Lv Y., Shi W., Xu N., An J., Wang J., Zhao C. A Dynamic Hierarchical Framework for IoT-Assisted Digital Twin Synchronization in the Metaverse // IEEE Internet of Things Journal. – 2023. – Vol. 10, No. 1. – P. 268–284. – DOI: 10.1109/IJOT.2022.3201082.
3. Muralidharan S., Yoo B., Ko H. Designing a Semantic Digital Twin Model for IoT // 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). – Las Vegas, USA, 2020. – P. 1–2. – DOI: 10.1109/ICCE46568.2020.9043088.
4. Altun C., Tavli B., Yanikomeroğlu H. Liberalization of Digital Twins of IoT-Enabled Home Appliances via Blockchains and Absolute Ownership Rights // IEEE Communications Magazine. – 2019. – Vol. 57, No. 12. – P. 65–71. – DOI: 10.1109/MCOM.001.1900072.
5. Mudiyansele M. P. D., Sellahewa H. Digital Twins as a Framework for IoT Applications: A Review // 2023 7th SLAAI International Conference on Artificial Intelligence (SLAAI-ICAI). – Kuliypitiya, Sri Lanka, 2023. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/SLAAI-ICAI59257.2023.10365018.
6. Yarali A. Digital Twin Technology // В кн.: Intelligent Connectivity: AI, IoT, and 5G. – IEEE, 2022. – С. 191–209. – DOI: 10.1002/9781119685265.ch10.
7. Wu J., Yang Y., Cheng X., Zuo H., Cheng Z. The Development of Digital Twin Technology Review // 2020 Chinese Automation Congress (CAC). – Shanghai, China, 2020. – P. 4901–4906. – DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9327756.
8. Xu H., Wu J., Pan Q., Guan X., Guizani M. A Survey on Digital Twin for Industrial Internet of Things:

Applications, Technologies and Tools // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2023. – Vol. 25, No. 4. – P. 2569–2598. – DOI: 10.1109/COMST.2023.3297395.

9. Mittal S., Tolk A., Pyles A., Van Balen N. V., Bergollo K. Digital Twin Modeling, Co-Simulation and Cyber Use-Case Inclusion Methodology for IoT Systems // 2019 Winter Simulation Conference (WSC). – National Harbor, USA, 2019. – P. 2653–2664. – DOI: 10.1109/WSC40007.2019.9004656.

10. Taneja A., Rani S. Energy Efficient Digital Twin Enabled Massive IoT Network With Use Case in Consumer Health // IEEE Transactions on Consumer Electronics. – 2024. – Vol. 70, No. 1. – P. 2099–2106. – DOI: 10.1109/TCE.2024.3351154.

11. Yaqoob I., Salah K., Uddin M., Jayaraman R., Omar M., Imran M. Blockchain for Digital Twins: Recent Advances and Future Research Challenges // IEEE Network. – 2020. – Vol. 34, No. 5. – P. 290–298. – DOI: 10.1109/MNET.001.1900661.

12. Hasan H. R., Madine M., Musamih A., Jayaraman R., Salah K., Yaqoob I., Omar M. Non-fungible tokens (NFTs) for digital twins in the industrial metaverse: Overview, use cases, and open challenges // Computers & Industrial Engineering. – 2024. – Vol. 193. – Article 110315. – ISSN 0360-8352. – DOI: 10.1016/j.cie.2024.110315.