

К.Ю. Островська, Є.В. Островський, В.В. Старик

ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ НА ОСНОВІ РЕСУРСІВ ХМАРНОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ

Анотація. В результаті роботи було розроблено технологію створення цифрових двійників, а також створено прототип цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи Microsoft Azure. Також було розроблено клієнтську програму для роботи з цифровим двійником. У ході розробки було вирішено такі завдання: проведено огляд наукової літератури та існуючих рішень Інтернету речей для створення цифрових двійників; вивчено технології, що надаються хмарними обчислювальними платформами для створення цифрових двійників; спроектовано та розроблено прототип цифрового двійника на основі хмарних обчислювальних ресурсів обчислювальної платформи Microsoft Azure; здійснено тестування розробленого прототипу.

Ключові слова: microsoft azure, тестування, прототип, цифровий двійник, хмарна обчислювальна платформа, арі, скбд microsoft sql server, sql-скрипт, yaml-файл, с#, http rest клієнт.

Концепцію Інтернету речей (IoT) сформульовано досить давно, проте активне наповнення концепції технологічним змістом та впровадження практичних рішень для її реалізації відбувається саме в останні роки. Дана концепція є обчислювальною мережею фізичних предметів, оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або із зовнішнім середовищем [1]. Загальний світовий обсяг капіталовкладень у IoT у 2018 році становив 646 мільярдів доларів США. Прогноз щодо капіталовкладень у ці технології на 2022 рік – 745 мільярдів доларів США, на 2024 – понад 1 трильйон доларів [2].

Розвиток розподіленої мережної інфраструктури в автоматизованих системах управління технологічним процесом призвело до появи Промислового Інтернету речей (Industrial Internet of Things – IIoT) – концепції взаємозв'язку датчиків, приладів та інших пристроїв, об'єднаних у мережу з промисловими програмами комп'ютерів, включаючи, крім іншого, управління виробництвом та енергоспоживанням. Такий зв'язок дозволяє збирати дані пристроїв та аналізувати їх, що потенційно сприяє підвищенню продуктивності праці та ефективності виробництва, а також іншим економічних переваг [3]. Однією з переваг впровадження цього підходу є можливість створення цифрового двійника (Digital Twin) системи, що розробляється.

Цифровий двійник – це ієрархічна система математичних моделей, обчислювальних методів та програмного забезпечення, що забезпечує синхронізацію між станом реально існуючого процесу або системи та супутньою віртуальною копією [4, 5].

Завдяки розвитку хмарних технологій, з'явилася можливість створити інфраструктуру зберігання даних, здатну підтримувати Інтернет речей. Публічні хмарні платформи надають

безліч рішень для цифрового перетворення бізнесу. Гнучкість та автоматизованість отриманого середовища досягається за рахунок використання прикладних програмних інтерфейсів (API). Це дозволяє різним пристроям та системам взаємодіяти між собою, навіть якщо вони працюють на основі різних стандартів та протоколів [6].

Застосування хмарних технологій може спростити обробку надвеликих масивів даних, що генеруються пристроями Інтернету речей. Цей факт переконує необхідність вивчення інструментів хмарних платформ для розробки додатків, що обробляють дані з пристроїв IoT. Одними з можливих рішень у цій галузі є хмарні платформи Microsoft Azure [7] та Amazon Web Services [8].

Ключовою перевагою даних платформ є широкий набір інструментів, зокрема для створення рішень Інтернету речей та цифрових двійників.

Метою роботи є розробка технології створення цифрових двійників, а також реалізація та тестування прототипу цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи.

Як джерело даних було прийнято рішення використати проект Low Carbon Project [9], що забезпечує функціонування системи смс-повідомлення клієнтів про поточну динамічну тарифну вартість електроенергії. У рамках реалізації проекту будинки-учасники були розбиті на дві тарифні групи. Перша група користувалася стандартними тарифами споживання електроенергії. Споживачам другої групи відправлялися сигнали про високу ціну енергоспоживання зниження навантаження на локальні розподільні мережі протягом періодів високої завантаженості. Вибраний набір даних є показниками енергоспоживання для вибірки з 5567 лондонських будинків, оснащених датчиками споживання енергії. Читання даних проводилося з півгодинними інтервалами. Набір даних містить споживання енергії, у кВт/год (за півгодини), унікальний ідентифікатор домогосподарства, дату та час, а також тарифну групу. Можна виділити кілька завдань, що утворюються під час аналізу цих даних:

- сегментація денного споживання енергії;
- розбивка кривого електричного навантаження;
- прогнозування споживання електроенергії будинками;
- дослідження відмінностей наслідків використання електричної та акумуляторної систем опалення;
- прогнозування споживання електроенергії у масштабі міста.

Для розробки цифрового двійника було використано частину вищеописаного набору даних [10], що є файлом формату CSV, схема якого описана в таблиці 1. Таблиця містить наступні поля: LCLid – унікальний ідентифікатор квартири; stdorToU – тарифний план квартири; DateTime – час чергового збору даних з IoT-пристрою; KWH/hh - показання IoT-пристрою, що відображають кількість спожитих кіловат електроенергії за 30 хвилин; Acomn – поточна категорія квартири за шкалою Acomn та Acomn_grouped – статус поточного енергоспоживання за шкалою Acomn.

Схема вихідного набору даних

LCLid	stdor ToU	DateTime	KWH/h h	Acorn	Acorn_group d
MAC000002	Std	2023-10-12 00:30:00.0000000	0.143	ACORN -A	Affluent
MAC000006	ToU	2023-10-28 16:30:00.0000000	0.013	ACORN -Q	Adversity
MAC000027	Std	2023-08-13 15:00:00.0000000	0.41	ACORN -H	Comfortable
MAC000032	Std	2023-09-11 12:00:00.0000000	0.112	ACORN -J	Comfortable

На підставі аналізу існуючих технологій створення цифрових двійників на базі хмарних обчислювальних систем було зроблено висновок, що обидві розглянуті системи знаходяться в попередній стадії, тому вибір системи, що використовується, заснований на обсязі наданих можливостей, кількості супутніх хмарних інструментів і рішень, наявності обмежень використання. При порівнянні даних найкращими результатами володіє Azure Digital Twins від Microsoft.

На основі аналізу Azure Digital Twins було визначено що функції первинної обробки телеметрії будуть написані мовою програмування JavaScript. Доставка повідомлень, що містять показання пристроїв, та клієнтська програма реалізовані з використанням програмної платформи .Net Framework.

Система, що проектувалась, у найзагальнішому вигляді складається з бази даних, що зберігає загальну статистику енергоспоживання, служби Інтернету речей Digital Twins хмарної платформи Microsoft Azure, що працює за принципом Platform as a Service (PaaS), обробника телеметрії пристроїв – програми, що відповідає за збір, відправку та обробку телеметрії, а також клієнтського Web-додатка для керування цифровим двійником, що здійснює HTTP REST запити до API створеного екземпляра Digital Twins. Діаграма потоків даних проєктованої системи представлена на рисунку 1.



Рисунок 1 - Діаграма потоків даних проєктованого цифрового двійника

Додаток, що реалізує відправлення та обробку телеметрії, виконує обробку даних, отриманих із генератора, а також їх передачу на сервер. Воно складається з декількох компонентів: модуль створення просторового інтелектуального графа, функція обробки телеметрії, що виконує логіку користувача для даних, які надходять з пристроїв та обробника даних із сервера для визначення статусу приміщення з метою перевірки перевищення рекомендованих показників енергоспоживання для подальшого відправлення повідомлень користувачам. Клієнтська програма складається з модуля реєстрації та аутентифікації, а також генератора HTTP REST запитів до API Digital Twins. Генератор телеметрії включає базу даних «Загальне споживання енергії». Діаграму компонентів всієї системи можна побачити на рисунку 2.

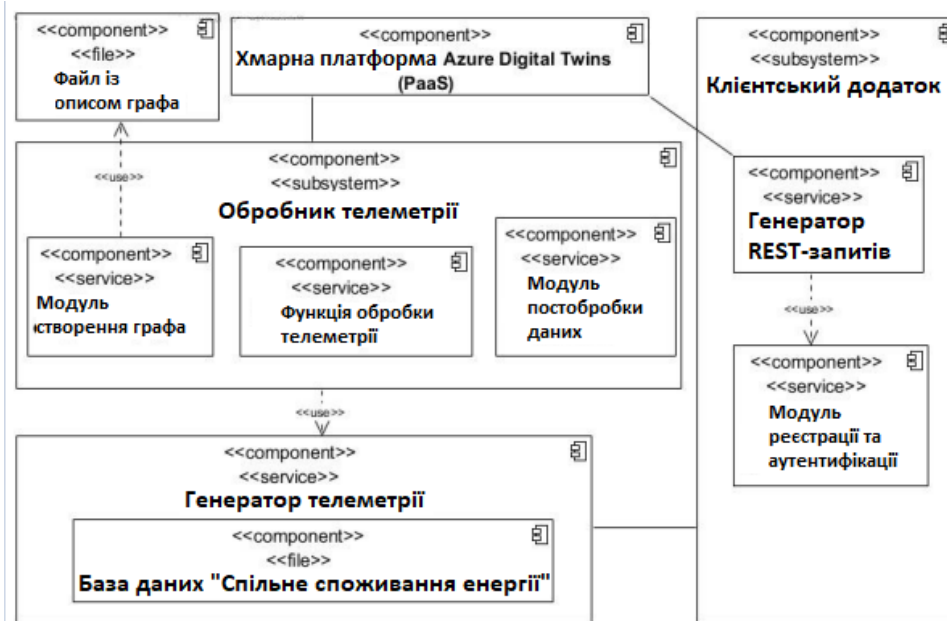


Рисунок 2 – Діаграма компонентів цифрового двійника

Як показники сенсорів використовувались дані проекту Low Carbon Project, що є файлом формату CSV, що містить 1 мільйон рядків. В результаті імпортування CSV-файлу та створення додаткових таблиць було отримано SQL-файл з усією базою.

На рисунку 3 представлена діаграма діяльності, яка покроково відображає виконання взаємодії з API Digital Twins для отримання інформації про поточне енергоспоживання.

На першому кроці користувач здійснює вхід в систему за допомогою модуля реєстрації та аутентифікації, попередньо отримавши токен авторизації за допомогою налаштованого для роботи з екземпляром Digital Twins клієнта Postman API. На цьому кроці модуль реєстрації та аутентифікації звертається до таблиці Registration для перевірки правильності даних, введених користувачем. Після цього користувач за допомогою графічного інтерфейсу клієнтської програми ініціює генерацію REST-запиту до API Azure Digital Twins, використовуючи відповідний елемент управління.

Генератор REST-запитів звертається до таблиці Spaces для отримання ідентифікатора приміщення, де потрібно визначити поточне значення енергоспоживання. Далі відбувається виконання згенерованого запиту. Після цього API Digital Twins повертає клієнтському до-

датку результат виконання запиту у вигляді JSON відповіді, з якого витягується потрібна інформація шляхом десеріалізації та виводиться користувачеві.

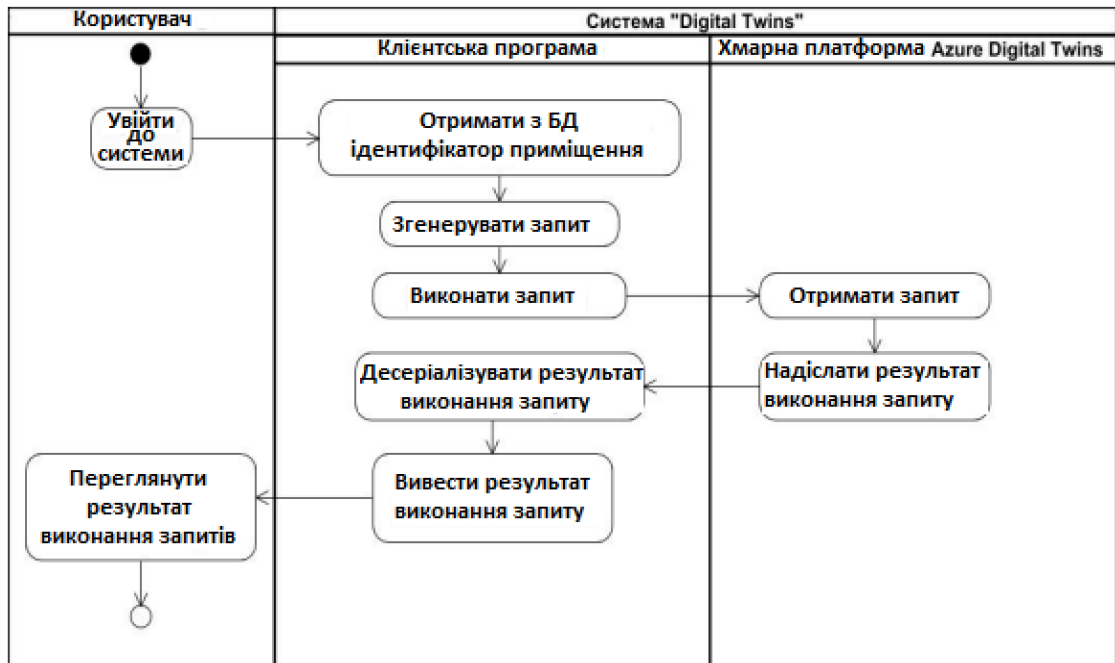


Рисунок 3 - Діаграма діяльності системи надання користувачу інформації про поточне енергоспоживання

Підготовка просторового інтелектуального графа здійснюється за допомогою файлу конфігурації формату YAML, що містить елементну структуру графа згідно з обраною онтологією.

Для системи, що розробляється, була обрана стандартна онтологія VASnet, що містить всі основні типи даних, необхідні в системі.

Фрагмент YAML-файлу конфігурації ієрархії графа представлений у лістингу 1.

Лістинг 1. Фрагмент YAML-файлу конфігурації ієрархії графа

```

- name: Quickstart Building
  type: Venue
  resources:
  - type: IoTHub
  spaces:
  - name: Floor 3
    type: Floor
    spaces:
    
```

```
- name: Focus Room 30
  type: Room
  subType: FocusRoom
  devices:
  - name: Raspberry Pi 3 30
    hardwareId: 123456789030
    sensors:
    - dataType: Light
      hardwareId: MAC000030
  matchers:
  - name: Matcher Light
    dataTypeValue: Light
  userdefinedfunctions:
  - name: Motion Processor
    matcherNames:
    - Matcher Light
    script: actions/userDefinedFunctions/availability.js
  roleassignments:
  - roleId: 98e44ad7-28d4-4007-853b-b9968ad132d1 # System Role:
    SpaceAdministrator
    objectName: Motion Processor
    objectIdType: UserDefinedFunctionId
```

Структура YAML-файлу включає декілька наступних обов'язкових розділів:

– Resources – даний вузол створює ресурс Центру Інтернету для взаємодії з пристроями. Центр Інтернету речей у кореновому вузлі графа може взаємодіяти з усіма пристроями та датчиками у графі.

– Spaces – в об'єктній моделі Digital Twins цей вузол представляє фізичні розташування. Кожен простір має тип (Type) та ім'я (Name).

– Devices – це розділ, що представляє пристрої, що керують рядом датчиків.

– Sensors – даний розділ описує використовувані датчики.

– Matchers – це розділ, що описує співставники – набори конкретних умов, які потрібно відстежувати у даних пристроїв чи датчиках. Порівняльник відстежуватиме датчик типу dataTypeValue.

Для підготовки співставника, який відстежуватиме один із цих датчиків, його значення dataTypeValue повинно відповідати dataType цього датчика.

– UserDefinedFunctions – це вузол, що описує функції первинної обробки телеметрії. Вони виконують логіку користувача для даних, що надходять з просторів і пристроїв, коли виконуються умови, зазначені співставниками.

Відповідно до розробленої схеми, була реалізована база даних для зберігання даних лічильників, а також інформації про користувача.

На рисунку 4 продемонстровано журналування повідомлень, що надсилаються до центру Інтернету речей. Кожен запис журналу містить ідентифікатор сенсора та його поточні показання, дату надсилання повідомлення, а також унікальний ідентифікатор запиту до Інтернет-центру речей.

Згідно з функціональними вимогами, система повинна сповіщати користувачів про неефективне енергоспоживання при виконанні заздалегідь визначених умов. З аналізу використовуваного набору даних було прийнято рішення встановити граничне значення ефективності енергоспоживання лише на рівні 2 кВт/ч. При перевищенні даного значення поточними показниками енергоспоживання відбувається реєстрація події про неефективність енерго-

споживання у поточному приміщенні з подальшим надсиланням до Центру подій Azure. У попередньо налаштованому Центрі подій Azure відбувається обробка подій, яка полягає у надсиланні email-повідомлень власникам приміщень та адміністратору системи за допомогою вбудованого Gmail клієнта. Приклад таких повідомлень представлено на рисунку 5.



```
Windows PowerShell
07.06.2024 15:01:42> Sending message: {"SensorValue": "0.457 "} Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000008', 'CreationTimeUtc': '2024-06-07T10:01:42.9895768Z', 'x-ms-client-request-id': '8450806e-4223-4c2f-ad84-23fd4f1f4af2', }
07.06.2024 15:01:43> Sending message: {"SensorValue": "0.186 "} Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000009', 'CreationTimeUtc': '2024-06-07T10:01:43.0970884Z', 'x-ms-client-request-id': 'e1dac66f-e934-4baa-9232-16c72e8e3184', }
07.06.2024 15:01:43> Sending message: {"SensorValue": "0.28 "} Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000010', 'CreationTimeUtc': '2024-06-07T10:01:43.3215366Z', 'x-ms-client-request-id': '701432af-6ed3-4141-a350-e452ce052567', }
07.06.2024 15:01:43> Sending message: {"SensorValue": "0.5 "} Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000011', 'CreationTimeUtc': '2024-06-07T10:01:43.4253032Z', 'x-ms-client-request-id': '9e0852c1-8c98-46fd-a9a0-5107cbea29ad', }
```

Рисунок 4 - Журнулювання відправлених до центру Інтернету речей повідомлень

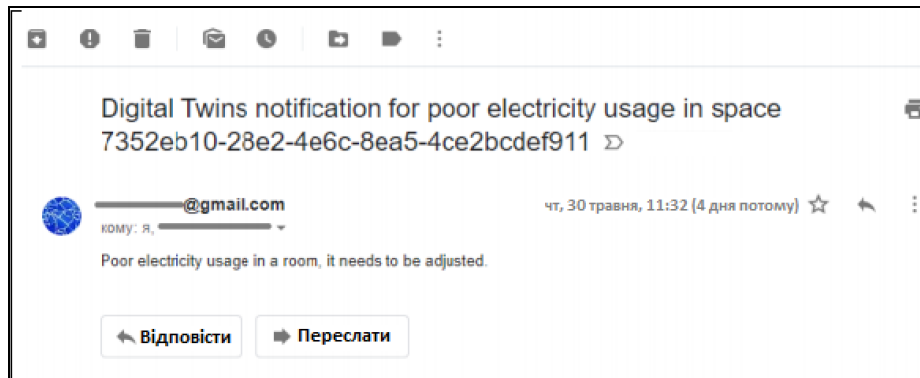


Рисунок 5 - Приклад оповіщення користувача

Тестування системи було проведено в декілька етапів: тестування працездатності системи на основі модульного тесту, що перевіряє статуси відповідей до здійснюваних до просторового графа API-запитів, порівняльне тестування з метою визначення правильності обробки телеметрії датчиків, а також тестування API управління системою, тобто правильності результатів виконання API-запитів, що виконуються системою.

Для перевірки працездатності системи було написано модульний тест, що перевіряє правильність роботи компонента, що відповідає за створення просторового інтелектуального графа на основі YAML-файлу, що містить ієрархічну структуру фізичної, що моделюється системи. Тест перевіряє статуси відповідей сервера до систем API-запитів, що здійснюються, а також обробку виняткових ситуацій.

Для перевірки правильності наданих системою поточних та добових показників було проведено порівняння наборів даних, отриманих безпосередньо з таблиці, що містить усі показання датчиків та даних, наданих користувачеві системи на запит, тобто отримані після обробки системою. Також було обчислено середні значення енергоспоживання за добу, та здійснено їх порівняння з даними добового споживання, наданими системою для відповідних

приміщень. Результат порівняльного тестування з метою визначення правильності обробки телеметрії датчиків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результат порівняння даних

Тестовий випадок	Вхідні данні	Очікуваний результат	Отриманий результат	Тест пройдений?
Отримати поточне значення сенсора «МАС000003»	-	0,452	0,452	Так
Отримати показник середнього енергоспоживання у приміщенні «МАС000012» за добу		0,335	0,335	Так

Для перевірки правильності результатів виконання API-запитів був використаний REST клієнт Postman API [11], попередньо налаштований для роботи з програмою Azure Active Directory, що надає неявний потік дозволів OAuth 2.0. POST клієнт використовувався для виконання HTTP-запитів, що містять токени до API управління екземпляра Digital Twins, а також для складання складових запитів POST в API керування. Результат тестування API керування за допомогою Postman API наведено у додатку.

Висновки. В результаті було розроблено технологію створення цифрових двійників, а також створено прототип цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи Microsoft Azure.

Також було розроблено клієнтську програму для роботи з цифровим двійником. Спроектвано та розроблено прототип цифрового двійника на основі хмарних обчислювальних ресурсів обчислювальної платформи Microsoft Azure. Проведено тестування розробленого прототипу.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Internet of Things. Gartner IT glossary. Gartner (5 May 2012). [Електронний ресурс] URL: <https://www.gartner.com/it-glossary/internet-ofthings/> (дата звернення: 04.02.2024).
2. IDC Forecasts Worldwide Spending on the Internet of Things in 2024 . [Електронний ресурс] URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=puaS44596319/> (дата звернення: 04.02.2024).
3. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. Індустріальний internet things (ІІоТ): An analysis framework. // Computers in Industry, October 2018. – Vol. 101. - P. 1-12.
4. Micro-Workflows: Kafka і Kepler спрямована на підтримку Digital Twins of Industrial Processes. Radchenko G., Alaasam A., Tchernykh A. // IEEE/ACM Int. Conf. Util. Cloud Comput. - UCC '18, pp. 83-88, December 2018.
5. Підсумки Digital Twins Cloud Platform: Microservices та Computational Workflows до Uale a Smart Factory. Бородулін К., Радченко Г., Шестаков А., Соколінській Л., Тчерних А., Продан Р. // Прос. The 10th Int. Conf. Util. Cloud Comput. - UCC '17, pp. 209-210, December 2017.
6. Грінгард С. Інтернет речей: Майбутнє вже тут. - М.: Альпіна Паблішер, 2016. - 188 с.
7. Microsoft Azure Portal. [Електронний ресурс] URL: <https://portal.azure.com/> (дата звернення: 10.02.2024).

8. Amazon Web Services Management Console. [Електронний ресурс] URL: <https://aws.amazon.com/console/> (дата звернення: 10.02.2024).
9. SmartMeter Energy Consumption Data in London Households. [Електронний ресурс] URL: <https://data.london.gov.uk/dataset/smartmeter-energy-use-data-in-london-households/> (дата звернення: 27.03.2024).
10. Low Carbon London webpage. [Електронний ресурс] URL: [http://innovation.ukpowernetworks.co.uk/innovation/en/Projects/tier-2-projects/Low-Carbon-London-\(LCL\)/](http://innovation.ukpowernetworks.co.uk/innovation/en/Projects/tier-2-projects/Low-Carbon-London-(LCL)/) (дата звернення: 16.04.2024).
11. Postman API Requests. [Електронний ресурс] URL: https://learning.getpostman.com/docs/postman/sending_api_requests/requests/ (дата звернення: 07.04.2024).

Received 24.05.2024.
Accepted 27.05.2024.

Technology of creating digital double based on cloud computing platform resources

As a result of the work, the technology for creating digital doubles was developed, as well as a digital double prototype was created based on the resources of the Microsoft Azure cloud computing platform. A client program for working with a digital double was also developed. In the course of development, the following tasks were solved: – a review of scientific literature and existing Internet of Things solutions for creating digital duplicates was conducted; – technologies provided by cloud computing platforms for creating digital duplicates were studied; - designed and developed a digital double prototype based on the cloud computing resources of the Microsoft Azure computing platform; - testing of the developed prototype was carried out.

Keywords: microsoft azure, testing, prototype, digital double, cloud computing platform, api, microsoft sql server database, sql-script, yaml-file, c#, http rest client.

Островська Катерина Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ ПБТ УДУНТ.

Островський Євген Вікторович - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ ПБТ УДУНТ.

Старика Віталія Віталійовича - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ ПБТ УДУНТ.

Ostrovska Kateryna - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Institute of Scientific Research and Technology of the University of Ukrainian State of Ukraine.

Ostrovsky Yevhen - master of the Department of Information Technologies and Systems of the Institute of Information Technology and Technical University of Ukraine.

Staryk Vitaly - Master of the Department of Information Technologies and Systems of the Institute of Scientific Research and Technology of UDUNT.