

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СТАНЬКО АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 004.73(085.2)(031.2)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕРЕЖЕВА ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНА ПЛАТФОРМА
СУПРОВОДУ ОБ'ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»**

122 – Комп'ютерні науки

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ /А. А. Станько/

Науковий керівник Дуда Олексій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент

Тернопіль – 2023

АНОТАЦІЯ

Станько А.А. Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2023.

Зміст анотації. Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі – підвищення ступеня повноти подання інформації щодо процесів, що протікають в міських кіберфізичних системах шляхом розроблення моделей, методів та інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень під час створення цифрових послуг і сервісів..

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок роботи з науковими напрямками та науково-дослідними концепціями, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про практичне використання, апробацію результатів та їх висвітлення у публікаціях.

У першому розділі подано характеристику множини базових інформаційних та комунікаційних технологій, що використовуються для практичних реалізацій інноваційних проєктів «розумних міст». Проаналізовано ключові напрямки розвитку «розумних міст». На основі проведеного аналізу особливостей використання кіберфізичних систем «розумних міст» сформовано їх класифікацію, подану в графічній формі. Виокремлено причини ускладнення процесів створення унікальних інформаційно-технологічних структур для керування кіберфізичними системами «розумних міст». Сформовано функціональну модель «розумних міст». Проаналізовано особливості комунікаційних мереж та протоколів кіберфізичних систем «розумних міст». Досліджено інформаційні системи та моделі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель».

У другому розділі вперше сформовано модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» з використанням кіберфізичного, мережевого та хмарного рівнів, які дають можливість інтегрувати парадигми периферійних, туманних та хмарних обчислень. Практична реалізація запропонованої моделі інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів має позитивний вплив на процеси забезпечення розширюваності, сумісності, самоузгодженості та відтворюваності інноваційних цифрових послуг та сервісів на базі міських кіберфізичних систем. На основі запропонованої моделі інформаційно-технологічної архітектури розроблено структуру інформаційно-технологічного набору для формування послуг та застосунків. Це дало змогу розробити метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та сервісів на базі кіберфізичних систем «розумних міст» та забезпечило узгодження процесів проектування, розроблення та розгортання «розумних» послуг та застосунків. Розроблено структуру кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень. На основі проведеного аналізу моделей надання послуг засобами туманних обчислень розроблено структурну модель DaaS для мережевого рівня інформаційно-технологічної платформи супроводу кіберфізичних об'єктів «розумних міст», що дало змогу сформувати NDN-мережу.

У третьому розділі отримала подальший розвиток модель формування сховищ даних на основі озер даних, що дало змогу організувати ефективні процедури зберігання інформації щодо об'єктів кіберфізичних міських систем в умовах збільшення обсягів та швидкоплинності наборів та колекцій даних і зростання вимог до продуктивності процесів їх зберігання. Розроблено формалізований опис озер даних для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», що дало можливість забезпечити перебіг процесів отримання нових знань, завдяки застосуванню процедур видобування даних та метаданих об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

Сформовано модель управління метаданими об'єктів кіберфізичних систем на основі озер даних та гіперкубів, що дало змогу розробити інформаційну технологію багатовимірного аналізу метаданих, що характеризують перебіг процесів кіберфізичних систем «розумних міст». Проведено класифікацію та параметризацію множини категорій та атрибутів для опису процесів у міських кіберфізичних системах, що дало змогу виконати аналіз та побудову прототипів гіперкубів метаданих «розумної» послуги. Розроблено концептуальну структуру озер даних, що розширює уявлення про перебіг процесів проектування, створення і запровадження цифрових послуг та дало змогу сформулювати основу для їх подальшої уніфікації.

У четвертому розділі На основі оригінального методу було розроблено інформаційно-технологічний набір для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища, що дало змогу провести практичне моделювання відповідних інформаційно-технологічних комплексів.

На основі моделі інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» сформовано туманний кластер. На основі моделі обчислювальної архітектури мережевої платформи «розумного міста» та моделі управління метаданими об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» здійснено розгортання хмарної інфраструктури, що дало змогу виконати практичну апробацію інформаційної технології багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст». Впроцесі макетування прототипів цифрових послуг сформовано дві цілісні інформаційні системи супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища.

Ключові слова: машинне навчання, програмне забезпечення, інформаційні технології, моделювання, комп'ютерне моделювання, інтеграція даних, топологія мереж, інформаційна система, аналіз, алгоритм, метод, програмний засіб, кіберфізичні системи.

SUMMARY

Stanko A.A. Network information and technological platform for supporting objects of cyber-physical systems of "smart cities." - Qualification scientific work on the rights of a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 122 "Computer Science." - Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj, Ternopil, 2023.

Content of the abstract. The dissertation is devoted to solving a scientific and practical problem - increasing the degree of information completeness on the processes taking place in urban cyber-physical systems by developing models, methods and information technologies to support decision-making in the creation of digital services and services.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, indicates the connection of the work with scientific areas and research concepts, formulates the purpose and study objectives, defines the object, subject and study methods, shows the scientific novelty and practical significance of the results obtained, provides information on the practical use, testing results and their coverage in publications.

The first section describes the set of basic information and communication technologies used for the practical implementation of innovative smart city projects. The key areas of smart city development are analysed. Based on the analysis of the peculiarities of using cyber-physical systems of smart cities, their classification is formed, presented in graphical form. The reasons for the complication of the processes of creating unique information and technological structures for managing the cyber-physical systems of "smart cities" are highlighted. A functional model of "smart cities" is formed. The features of communication networks and protocols of cyber-physical systems of smart cities are analysed. The information systems and models for supporting the processes of monitoring and regulating the quality of the air environment of "smart buildings" are investigated.

In the second section, a model of the information and technological architecture of the network platform for supporting the objects of cyber-physical systems of "smart

cities" is first formed using the cyber-physical, network and cloud levels, which make it possible to integrate the paradigms of peripheral, fog and cloud computing. The practical implementation of the proposed model of information technology architecture of the network platform for object support has a positive impact on the processes of ensuring the extensibility, compatibility, self-consistency and reproducibility of innovative digital services and services based on urban cyber-physical systems. Based on the proposed model of information technology architecture, the structure of the information technology set for the formation of services and applications is developed. This made it possible to develop a method for the formation of information technology suites for digital services and services based on cyber-physical systems of smart cities and ensured the coordination of the processes of designing, developing and deploying smart services and applications. The structure of cyber-physical systems for monitoring and regulating the air environment of smart buildings and premises was developed. Based on the analysis of fog computing service delivery models, a DaaS structural model was developed for the network level of the information technology platform for supporting cyber-physical objects of smart cities, which made it possible to form an NDN network.

In the third section, the model of data warehousing based on data lakes was further developed, which made it possible to organise effective procedures for storing information on objects of cyber-physical urban systems in the context of increasing volumes and rapidity of data sets and collections and increasing requirements for the productivity of their storage processes. A formalised description of data lakes was developed to support the objects of cyber-physical systems of smart cities, which made it possible to ensure the process of obtaining new knowledge through the use of data extraction procedures and metadata of objects of cyber-physical systems of smart cities.

A model for managing metadata of objects of cyber-physical systems based on data lakes and hypercubes has been formed, which made it possible to develop an information technology for multidimensional analysis of metadata characterising the processes of cyber-physical systems of "smart cities". The classification and

parameterisation of a set of categories and attributes to describe processes in urban cyber-physical systems was carried out, which allowed the analysis and construction of prototypes of smart service metadata hypercubes. A conceptual structure of data lakes was developed, which expands the understanding of the processes of designing, creating and implementing digital services and allowed us to form the basis for their further unification.

In the fourth section, based on the original method, an information technology kit for digital services for monitoring and regulating air quality indicators was developed, which made it possible to conduct practical modelling of the relevant information technology complexes.

A fog cluster is formed on the basis of the model of information technology architecture of the network platform for supporting the objects of cyber-physical systems of "smart cities". Based on the model of the computing architecture of the smart city network platform and the model of metadata management of objects of cyber-physical systems of smart cities, the cloud infrastructure was deployed, which made it possible to perform practical testing of the information technology for multidimensional analysis of metadata for the maintenance of objects of cyber-physical systems of smart cities. In the process of prototyping digital services, two integral information systems were formed to support the processes of monitoring and regulating air quality indicators.

Keywords: machine learning, software, information technology, modelling, computer modeling, data integration, network topology, information system, analysis, algorithm, method, software tool, cyber-physical systems.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. О. Дуда, А. Станько, "Архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст»," Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», №4(323), ст. 123-130, 2023, **ISSN 2307-5732, DOI 10.31891/2307-5732.**
2. A. Stanko, "Information technology platform for monitoring infectious diseases," Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 110, no. 2, pp. 98–110, 2023, **ISSN: 2522-4433, DOI: 10.33108/visnyk_tntu2023.02.**
3. A. Stanko, O. Palka, L. Matiichuk, N. Martsenko, and O. Matsiuk, "Smart City: A Review of Model Architecture and Technology," 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2021) Lviv, 2021, vol. 2, pp. 309-314, **ISSN 2766-3639, doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648606.**
4. О. Палка, А. Станько, Г. Шимчук, О. Герасимчук, "Запобігання поширення коронавірусної інфекції у «розумних містах»," "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк, 2021, № 42, ст. 79-88, **eISSN 2524-0560, ISSN 2524-0552.**
5. O. Duda, L. Dzhyzhzhora, O. Matsiuk, A. Stanko, N. Kunanets, V. Pasichnyk, and O. Kunanets, "Mobile Information System for Monitoring the Spread of Viruses in Smart Cities," Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks," Issue 8, Lviv Polytechnic National University, pp. 65-70, **ISSN: 2524-065X, DOI:10.23939/sisn2020.08.065.**

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. О. М. Дуда та А. А. Станько, "Організація процесів спостереження даних засобами IoT-пристроїв у «розумних містах»," Міжнародна наукова

- конференція "Інтелектуальний ресурс сьогодення: наукові задачі, розвиток та запитання," м. Дніпро, Україна, 6 жовтня 2023 р., Міжнародний центр наукових досліджень, Вінниця, Україна, 2023, ст. 76-78, ISBN: 978-617-8126-82-7, DOI: 10.36074/mcnd-06.10.2023.
7. О. М. Дуда, А. Г. Микитишин та А. А. Станько, "Кіберфізичні системи та інформаційно-технологічні платформи «розумних міст»," III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів "Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2023," Одеса, Україна, 28-29 вересня 2023 р., ст. 179-180.
 8. А. Станько, О. В. Тотосько, і Р. Олег Васильович Ніколайчук, "Особливості технології комунікації по видимому світлі," III Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів "Філософські виміри техніки" (PDT-2022), 2022.
 9. А. Станько, "Аналіз концепції всеосяжного інтернету–ІоЕ," X науково-технічна конференція "Інформаційні моделі, системи та технології" Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 2022.
 10. А. Станько, А. Микитишин и О. Голотенко, "Комунікаційні технології в енергосистемах," XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій", 2022.
 11. О. Головка, А. Станько, "Телемедицина в епоху COVID-19," VIII науково-технічна конференція "Інформаційні моделі, системи та технології " ТНТУ, ст. 92-93, 2020.
 12. А. Станько, "Телекомунікаційні технології в проектах розумних міст," Міжнародна науково-технічна конференція "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій " до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 181-183., 2020.
 13. А. Станько, А. Микитишин, В. Левицький, "Концепція архітектури «Розумного міста» як кіберфізичної системи," Міжнародна науково-технічної

конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій" до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 184-186., 2020.

14. А. Станько, О. Мацюк, "Розумне місто як комплексна система інтеграції послуг та функціонування міської інфраструктури," у Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій " 2 ТНТУ, ст. 92-93., 2019.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. O. Duda, A. Mykytyshyn, M. Mytnyk, and A. Stanko, "The network platform cyber-physical systems application for smart buildings air pollution indicators monitoring," *Časopis Manažérska Informatika*, Univerzita Komenského v Bratislave, Slovakia, vol. 1, no. 1, 2023, **ISSN 2729-8310**.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ | 14 |
| ВСТУП..... | 15 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА КОМУНІКАЦІЙНИХ | |
| ТЕХНОЛОГІЙ СУПРОВОДУ ОБ’ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ | |
| «РОЗУМНИХ МІСТ»..... | 20 |
| 1.1 «Розумне місто», інформаційні та комунікаційні технології | 20 |
| 1.2 Аналіз напрямків розвитку «розумних міст» | 22 |
| 1.3 Кіберфізичні системи та інформаційно-технологічні платформи | |
| «розумних міст» | 26 |
| 1.4 Комунікаційні мережі «розумних міст» | 33 |
| 1.5 Мережеві протоколи кіберфізичних систем «розумних міст» | 38 |
| 1.6 Інформаційні системи та моделі супроводу процесів спостереження | |
| та регулювання показників якості повітряного середовища | |
| «розумних будівель»..... | 42 |
| 1.7 Висновки до розділу 1 | 49 |
| РОЗДІЛ 2. КОМПОНЕНТИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ | |
| ПЛАТФОРМИ СУПРОВОДУ ОБ’ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ | |
| «РОЗУМНИХ МІСТ»..... | 51 |
| 2.1 Моделі обчислювальної архітектури мережевої платформи | |
| супроводу об’єктів кіберфізичних систем «розумних міст»..... | 51 |
| 2.2 Розроблення моделі інформаційно-технологічної архітектури | |
| мережевої платформи супроводу об’єктів кіберфізичних систем | |
| «розумних міст» | 54 |
| 2.3 Розроблення методу формування інформаційно-технологічних | |
| наборів для цифрових послуг та застосунків..... | 58 |
| 2.3.1 Кіберфізичний рівень інформаційно-технологічної платформи | |
| супроводу об’єктів «розумних міст» | 61 |
| 2.3.2 Мережевий рівень інформаційно технологічної платформи | |
| супроводу об’єктів кіберфізичних систем «розумних міст»..... | 62 |

| | | |
|---|---|-----|
| 2.3.3 | Хмарний рівень платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» | 64 |
| 2.4 | Проектування структури IoT-пристроїв кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень | 65 |
| 2.5 | Практична реалізація процесу спостереження показників якості повітря «розумних будівель»..... | 66 |
| 2.6 | Аналіз моделей надання послуг засобами туманних обчислень | 72 |
| 2.7 | Мережевий супровід процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» | 75 |
| 2.8 | Висновки до розділу 2 | 83 |
| РОЗДІЛ 3. КОНЦЕПТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБІВ ЗБЕРІГАННЯ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»..... | | |
| 3.1 | Системи зберігання та управління великими обсягами даних «розумних міст» | 85 |
| 3.2 | Моделі «архітектури озер даних» для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»..... | 87 |
| 3.3 | Моделі управління метаданими озер даних «розумних міст» | 96 |
| 3.4 | Розроблення моделі управління метаданими об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» | 101 |
| 3.5 | Інформаційна технологія багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»..... | 105 |
| 3.6 | Висновки до розділу 3 | 116 |
| РОЗДІЛ 4. МАКЕТУВАННЯ ПРОТОТИПІВ ЦИФРОВИХ ПОСЛУГ НА БАЗІ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ СУПРОВОДУ ОБ'ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»..... | | |
| 4.1 | Функціональне призначення цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища | 117 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 Інформаційно-технологічний набір для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища | 119 |
| 4.2.1 Кіберфізичний рівень інформаційно-технологічного набору | 120 |
| 4.2.2 Мережевий рівень інформаційно-технологічного набору..... | 123 |
| 4.2.3 Хмарний рівень інформаційно-технологічного набору | 129 |
| 4.2.4 Рівень послуг інформаційно-технологічного набору..... | 133 |
| 4.3 Інтерфейси прототипів цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища | 139 |
| 4.4 Впровадження результатів дослідження | 144 |
| 4.5 Висновок до розділу 4 | 145 |
| ВИСНОВКИ..... | 146 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 148 |
| ДОДАТКИ | |
| Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи | 166 |
| Додаток Б. Акти впровадження | 169 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БД – База даних.

Гб – Гігабайт, кратна одиниця вимірювання кількості інформації, що дорівнює 1 073 741 824 стандартним байтам або 1024 мегабайтам.

ІКТ – Інформаційні та комунікаційні технології.

ІС – Інформаційна система.

ІТ – Інформаційна технологія.

ПК – Персональний комп'ютер.

ОС – Операційна система.

AWS (англ. Amazon Web Services) – Платформа хмарних обчислень, яку пропонує та поширює компанія Amazon.com.

Cloud computing – Хмарні обчислення.

CPS (англ. Cyber-Physical System) – Кіберфізичні системи.

Data Lakes – Озера даних.

EDGE computing – Периферійні обчислення.

Fog computing – Туманні обчислення.

IoT (англ. Internet of Thing) – Інтернет речей.

KNN (англ. K-Nearest Nighbors) – Метод k-найближчих сусідів.

PtP (англ. Point-to-Point) – У мережевих комунікаціях з'єднання «точка-точка» відноситься до комунікаційного з'єднання між двома кінцевими точками або вузлами зв'язку.

SDK (англ. Software Development Kit) – набір засобів розробки, утиліт і документації, який дає програмістам змогу створювати прикладні програми за визначеною технологією або для певної платформи.

ВСТУП

Актуальність теми. Впродовж останнього періоду часу інформаційні та комунікаційні технології активно впроваджуються в процеси створення систем інфраструктурного супроводу «розумних міст». Системи такого класу та масштабів дозволяють будь-якому міському об'єкту збирати, поширювати та використовувати інформацію. На етапі формування інформаційних потоків активно використовуються кіберфізичні системи, що є основою критично важливої міської інфраструктури. Однак широкомасштабне запровадження кіберфізичних систем породжує ряд нових невирішених задач та продукує потребу розробки уніфікованих моделей, обчислювальних архітектур та інформаційно-технологічних платформ.

Значні вагомі результати наукових розвідок за профілем, який пов'язаний з тематикою цього дослідження належать колективам науковців з Інституту прикладних наук Фраунгофера (м. Мюнхен, Німеччина), Манчестерського університету (Велика Британія), Університету Месіни (Італія), Шаньдунського університету (м. Цзінань, Китай), Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (м. Київ, Україна), Національного університету «Львівська політехніка» (Україна), Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, Україна).

Аналіз опублікованих на даний момент часу результатів наукових досліджень засвідчив, що мережеві інформаційно-технологічні платформи супроводу кіберфізичних систем «розумних міст» на даний час відіграють ключову роль у процесах створення високоефективних та надійних середовищ сучасних міст. Цифрові платформи такого класу є основою для формування, інтеграції та координації масштабного набору «розумних» послуг та розлогої міської інфраструктури.

Проте процеси широкомасштабного впровадження кіберфізичних систем в інфраструктуру громад, міст та регіонів стикаються з множиною не вирішених на даний момент часу задач, зокрема, відсутність єдиного підходу до створення

інформаційно-технологічної архітектури призводить до несумісності між різними міськими системами та ускладнює процеси їх інтеграції, обслуговування та адміністрування. Потреба безпечного та ефективного обміну інформацією між різними компонентами міських систем породжує необхідність формування стеку мережевих архітектур та протоколів. Зберігання та обробка великих за обсягом наборів та колекцій даних, що надходять у різних форматах і з різних джерел продукує завдання їх оперативного зберігання, узгодження, високопродуктивного та безпечного опрацювання.

Актуальність роботи полягає у вирішенні важливого *наукового завдання* розроблення інформаційних та комунікаційних архітектур, моделей та методів спостереження, комунікації, зберігання та опрацювання даних кіберфізичних систем в єдиному інформаційно-аналітичному середовищі мережевої інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» для супроводу процесів широкомасштабного розгортання та запровадження інноваційних цифрових послуг та застосунків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження пов'язане з виконанням науково-дослідної теми «Моделі і методи захисту інформаційних процесів у корпоративних системах та освітніх середовищах», № держреєстрації 0121U114176.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ступеня повноти подання інформації щодо процесів, що протікають в міських кіберфізичних системах шляхом розроблення моделей, методів та інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень під час створення цифрових послуг і сервісів. Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Провести аналіз особливостей існуючих інформаційних та комунікаційних технологій, що використовуються для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

2. Розробити модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

3. Розробити метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та застосунків в «розумних містах».

4. Розробити інформаційну технологію багатовимірного аналізу метаданих для формування озер сховищ даних розумних міст;

5. Розробити прототипи цифрових послуг для спостереження та керування параметрами повітряного міського середовища.

Об'єктом дослідження є процеси спостереження та регулювання міського середовища та формування цифрових сервісів для надання інформаційних послуг.

Предметом дослідження є архітектури, моделі, методи та засоби створення розподілених мережевих інформаційно-технологічних платформ для спостереження та керування об'єктами кіберфізичних систем в швидкозмінних умовах «розумних міст».

Методи дослідження. Для розв'язання сформульованих задач застосовано: методи синтезу та аналізу, методи багатовимірного аналізу даних та метаданих, теоретичні засади побудови озер сховищ даних, методи веб-програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено метод формування інформаційно-технологічних наборів, який, на відміну від існуючих, враховує різнотипову природу міських комунікаційних мереж та може використовуватись для формування множини цифрових послуг.

2. Вперше розроблено інформаційну технологію багатовимірного аналізу метаданих в міських озерах сховищ даних, на основі методології побудови гіперкубів метаданих з використанням сформованої множини категорій та атрибутів, що використовуються для опису процесів спостереження та керування параметрами міського повітряного середовища.

3. Отримала подальший розвиток функціональна модель «розумних міст», яка, на відміну від існуючих, враховує особливості розширеного набору

кіберфізичних систем для спостереження та регулювання показників якості міського повітряного середовища.

4. Отримала подальший розвиток модель обчислювальної архітектури міської мережевої платформи на основі хмарних, туманних і периферійних обчислень, яка може використовуватись з метою наближення процесів опрацювання даних до точок їх відбору.

5. Отримала подальший розвиток модель надання послуг DaaS, що сформована на базі мережевої NDN-архітектури та на відміну від існуючих, дає змогу споживачам отримувати доступ до даних як до послуги засобами мережі IoT-пристроїв.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає у тому, що теоретичні результати дисертаційного дослідження забезпечили формування практичної стратегії організації мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», що дало змогу здійснити макетування прототипів «розумних» послуг для системи вентиляції та кондиціонування «TNTU Smart Campus» без обмежень у специфіці поставлених задач масштабування, безпеки, енергоефективності та ін.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею, в якій автором особисто розроблено нові наукові ідеї та результати, що дали змогу вирішити наукове завдання проєктування та формування мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст». Робота містить теоретичні і прикладні положення та висновки, сформульовані дисертантом особисто. З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, у дисертаційній роботі використані результати особистих досліджень здобувача. Ідеї, положення чи гіпотези інших авторів, які присутні в дисертації, мають відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей та результатів здобувача.

Апробація результатів дисертації. Наукові та практичні результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях, зокрема на:

1. Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальний ресурс сьогодення: наукові задачі, розвиток та запитання», Дніпро, 2023.
2. III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації – 2023», Одеса, 2023.
3. III Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів "Філософські виміри техніки" (PDT-2022), Тернопіль, 2022
4. X науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології», Тернопіль, 2022.
5. XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2022.
6. VIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології», 2020.
7. Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій. 2020.
8. VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 2019

Публікації. У 15 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них отримано вагомий науковий доробок аспіранта у вигляді опублікованих 5 статей у наукових фахових виданнях України; 1 статті у науковому періодичному виданні іншої держави та 6 тезах доповідей конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 173 сторінках та складається з анотації, змісту, переліку скорочень, вступу, чотирьох основних розділів, в яких міститься 53 рисунки та 2 таблиць, списку використаних джерел з 159 найменувань, а також 2 додатків. За структурою, мовою та стилем викладення дисертація відповідає вимогам МОН України. Робота написана грамотною українською мовою з використанням сучасної наукової термінології, а стиль викладення матеріалу є послідовним та логічним.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СУПРОВОДУ ОБ'ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»

1.1 «Розумне місто», інформаційні та комунікаційні технології

Сучасні великі міста є високотехнологічними інноваційними соціо-економічними осередками, які генерують процеси міграції населення та інтенсифікують ресурсні потреби. Сучасні міста – це складні системи, яким притаманні взаємопов'язані різномірні та різнотипові сутності, з якими щодня взаємодіють мешканці міст та їхні гості. При цьому відбувається безперервне спостереження стану міських систем та процесів за допомогою велетенської кількості датчиків та приладів з інтегрованих в розлогих мережевих інформаційно-технологічних платформах. Загалом будь який міський об'єкт може виконувати функції збирача, поширювача та споживача інформації. Наприклад, щодо енергоспоживання [1], постачання ресурсів, виробничих процесів, мобільності жителів та гостей міста, характеристик життєвого чи навколишнього середовища тощо.

«Розумне місто (англ. Smart city) – це місто, яке використовує інформаційні та комунікаційні технології для покращення якості життя своїх жителів і функціонування міських систем» [2]. «Розумне місто» є функціональним, структурним та інноваційним прообразом міст майбутнього. На даний час муніципалітети, установи та організації впроваджують модель «розумного міста» [3] для покращення показників якості життя (QoL) громадян та підвищення ефективності використання міських ресурсів. Реалізація проєктів класу «розумне місто» зазвичай використовує обширну множину ІКТ для вдосконалення процесів функціонування сучасних міст, забезпечення їх сталого розвитку, розширення переліку та підвищення якості муніципальних послуг. Водночас щораз активніше впроваджуються та використовуються інформаційні

технології, спрямовані на підвищення рівня охорони здоров'я, освіти та якості життя містян.

«Розумні» міські послуги надаються за допомогою обширної множини передових інформаційних та комунікаційних технологій, зокрема, кіберфізичних систем та Інтернету речей (IoT), бездротових сенсорних мереж (англ. Wireless Sensor Network, WSN) та периферійних обчислень (англ. EDGE computing), туманних обчислень (англ. Fog computing) та 5G, хмарних обчислень (англ. Cloud computing) та озер даних (англ. Data Lakes) тощо. Використання «розумних» послуг та застосунків допомагає зменшити витрати ресурсів та, як наслідок, фінансові витрати. Водночас підвищується продуктивність і ефективність процесів надання послуг та міського урядування в обширному переліку галузей, зокрема, транспорт, охорона здоров'я, енергетика, освіти тощо.

Сформовані на основі IoT-давачів та IoT-пристроїв кіберфізичні системи є базовою інформаційною технологією «розумних міст» [4], яка дає змогу інтегрувати «розумні» речі в фізичні об'єкти міського середовища. Завдяки цьому можна формувати інноваційні «розумні» міські послуги та застосунки для підтримки будь-яких процесів діяльності в будь-який час та з будь-якої міської локації. «Розумні» речі контролюються застосунками, які оперативно супроводжують процеси прийняття рішень [5] та підвищують ефективність міського функціонування та управління. Водночас «розумні» пристрої та речі оперативно інформують про свій стан в режимі реального часу, наприклад, про стан фільтрів «розумної» системи кондиціонування чи рекуперації, різномісцеві несправності для прогнозованого технічного обслуговування тощо. Бездротові сенсорні мережі забезпечують оперативне спостереження міської інфраструктури та систем постачання ресурсів в режимі реального часу [6]. Бездротові сенсорні пристрої на основі Інтернету речей допомагають отримувати інформацію про фізичне середовище «розумних будівель», наприклад, склад та температуру повітря.

У кіберфізичних системах об'єднуються мережеві та фізичні процеси з обчислювальними парадигмами хмарних, туманних та периферійних обчислень

для спостереження та контролю фізичного середовища «розумного міста» [7]. Вони ефективно використовуються для формування та забезпечення стійкого та надійного практичного зв'язку між віртуальним цифровим та фізичним світом.

Послуги та застосунки «розумних міст» активно використовують парадигму хмарних обчислень. Це забезпечує доступну та масштабовану інформаційно-технологічну платформу для зберігання даних IoT-пристроїв та кіберфізичних систем, аналітичного опрацювання та супроводу процесів підтримки прийняття рішень [8]. Комплексна інтеграція зазначеного переліку ІКТ зменшену затримку, збільшує мобільність, покращує обізнаність, підвищує ефективність та оперативність реагування в режимі реального часу для «розумних» міських послуг та застосунків [9]. Тому комплексне проектування мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем є актуальним напрямком сучасних досліджень. Адже на даний час «розумні міста» мають експоненційно зростаючу множину інтегрованих у фізичне середовище давачів, зокрема, спостереження показників забруднення повітря «розумних будівель». При цьому процеси великомасштабного аналітичного опрацювання накопичених наборів та колекцій даних вимагають складної інформаційно-технологічної та обчислювальної інфраструктури [10]. З метою покращення «розумних» міських послуг, потрібно сформувати комплексні підходи щодо спостереження, передавання, зберігання та різномірного аналітичного опрацювання для оптимальних оперативних і довгострокових рішень.

1.2 Аналіз напрямків розвитку «розумних міст»

Досі не існує універсального визначення «розумного міста». У різних локаціях та регіонах громадяни та урядові установи по-різному трактують значення цього терміну. Країни формують власні переліки вимог до міст завдяки різному ступеню готовності до впровадження реформ. Внаслідок стрімкого зростання процесів міграції населення до міських агломерацій урядові установи

стикаються з широким переліком складнощів [11]. Завдяки інформаційно-технологічному прогресу практично всі галузі людської діяльності піддаються цифровій трансформації та практично в кожній сфері використовується термін «розумний». Відповідно зростає роль цифровізації для покращення інфраструктурної підтримки процесів надання інституційних, соціальних та фізичних послуг.

Дослідники [12] розглядають цифрову трансформацію як перспективне вирішення множини поточних та перспективних міських задач, оскільки вона спрямована на «розумне» урядування, «розумні» інформаційні та комунікаційні технології, «розумне» міське середовище, «розумні будівлі», «розумне» постачання ресурсів тощо. Автори [13] вважають ІКТ основою будь-якої «розумної» міської ініціативи. Активно впроваджуються системи підтримки інфраструктури «розумного міста», зокрема, сенсорні мережі, IoT, бездротові пристрої та давачі, муніципальні центри аналітичного опрацювання даних тощо. Вони є критично важливими інфраструктурними елементами при формуванні ключових послуг «розумних міст» – прототипу комфортного середовища проживання громадян. Інноваційні проекти «розумних міст» є новою сферою можливостей для обширного кола зацікавлених сторін, муніципалітетів, інфраструктурних компаній та забудовників. Проекти «розумних міст» залучатимуть значні інвестиції та обширний перелік ІКТ для формування довготривалих, надійних та безпечних рішень, забезпечення стабільного розвитку та кращих зручностей для міських жителів та громадян.

Відповідно до [7] «розумне місто» потрібно розглядати як складну екосистему послуг та інфраструктур, формуючи при цьому цілісне уявлення, що поєднує різнотипові та різнорідні послуги, ІКТ для забезпечення глобального вирішення міських проблем. Зазвичай концепт «розумного міста» містить підсистеми, оснащені «розумними» ІКТ, зокрема, «розумний» транспорт, «розумну» енергетику, «розумну» освіту, «розумну» охорону здоров'я, «розумне» управління та урядування, «розумні» довілля та утилізацію відходів

тощо. Традиційно [14] «розумне місто» формується на основі набору ключових напрямків діяльності (див. рис. 1.1).

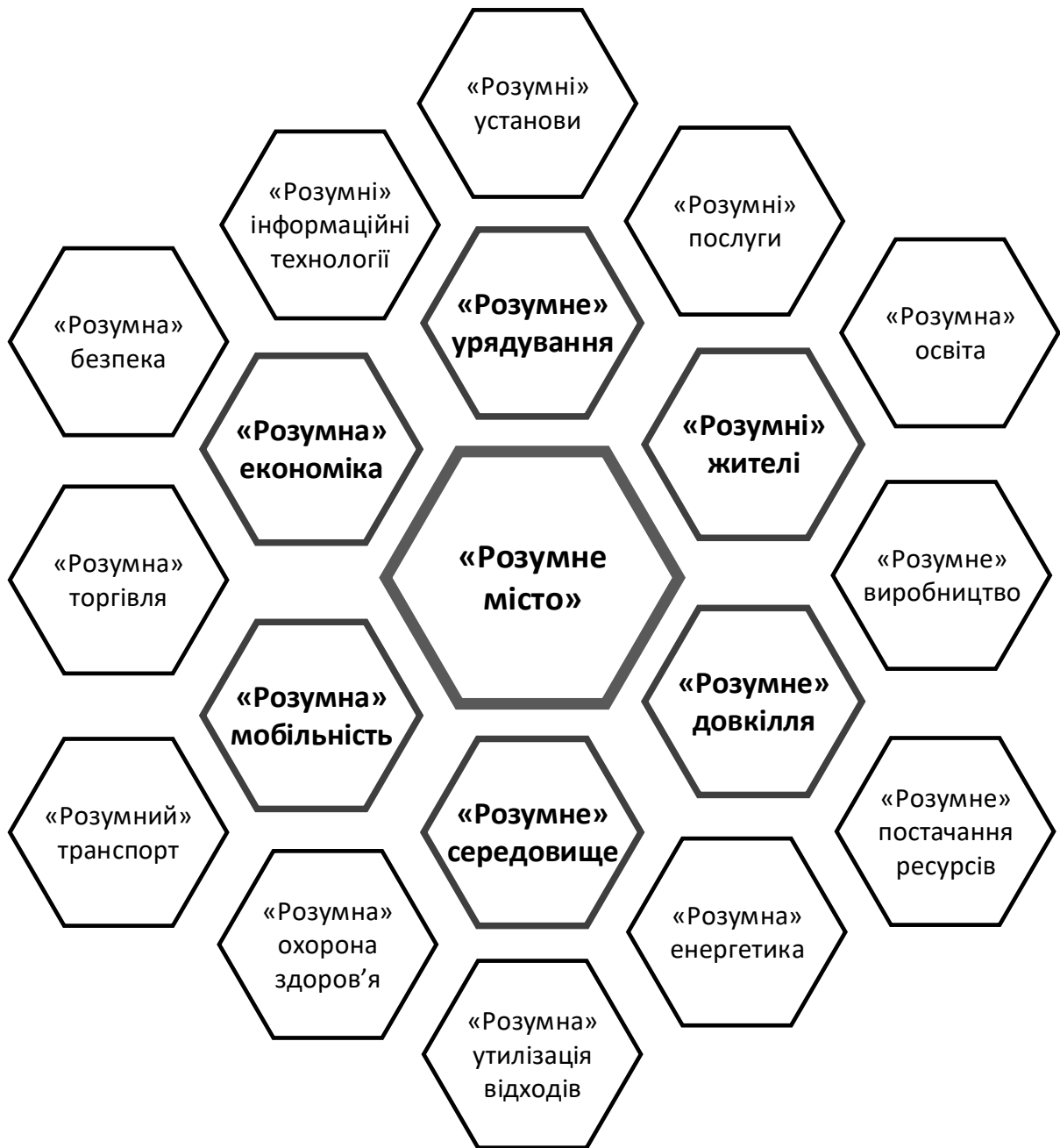


Рис. 1.1. Ключові напрямки діяльності «розумного міста»

«Розумне» урядування передбачає використання муніципальними та державними установами та службами інноваційних цифрових платформ та онлайн-послуг на основі ІКТ [15]. Для забезпечення прозорості процесів, ефективного відстеження та високого рівня безпеки всі міські політики та проекти впроваджуються, супроводжуються та підтримуються за допомогою

ІКТ. «Розумне» урядування забезпечує гнучкість динамічного оновлення муніципальної політики та оперативність формування нормативних актів на основі даних, отриманих та опрацьованих у режимі реального часу з дотриманням моделі «громадяни на першому місці» та активнішого залучення громадян [16].

«Розумні» жителі активно, безпечно і конфіденційно приймають участь у процесах розвитку нації на різних ініціативних рівнях. При цьому не повинно бути жодних упереджень чи нерівності. Кіберфізичні системи можна використовувати для формування «розумних» спільнот, а зібрані таким способом дані можуть використовуватись для глибшого розуміння реальних потреб міських жителів [17].

«Розумне» довкілля – це середовище з вбудованими датчиками, які безперервно збирають та передають дані для забезпечення кращого розуміння змін параметрів навколишнього середовища в режимі реального часу, зокрема, температуру, тиск, вологість, наявність домішок в повітрі, воді та ґрунті тощо. «Розумне» середовище є невід’ємною частиною будь-якого «розумного міста». При цьому використовуються ІКТ для автоматизації заходів оперативного коригування різних викидів при перевищенні порогових меж будь-якого параметра. Оперативне спостереження навколишнього середовища відбувається за допомогою спеціалізованих кіберфізичних систем [18].

Концепція «розумного» життєвого середовища базується на створенні умов для підтримання здоров’я громадян, екологічного та якісного середовища. На даний час кіберфізичні системи активно використовуються при розробці автоматизованих «розумних» житлових приміщень. «Розумні будівлі» та приміщення можуть масштабуватися за потреби для розміщення більшої кількості жителів. Вони функціонують та адаптуються за допомогою алгоритмів, що працюють на основі штучного інтелекту та машинного навчання [19].

«Розумна» мобільність спрямована на автоматизацію процесів управління міськими транспортними потоками за допомогою вбудованих у транспортну інфраструктуру датчиків та виконавчих кіберфізичних пристроїв. Концепція

«розумної» мобільності забезпечує ефективне керування дорожнім рухом та оперативне інформування про затори, забезпечуючи оперативний, безпечний та безперешкодний проїзд транспортних засобів екстрених служб. Оптимальні маршрути формуються та оперативно передаються «розумній» інфраструктурі для підвищення ефективності управління, забезпечення мобільності обширної спільноти міських жителів та підвищення екологічності транспорту [20].

«Розумна» економіка стимулює інновації та технологічний розвиток на основі наукових досліджень для досягнення економічних переваг, добробуту та формування «розумного» міського середовища. Це забезпечує рівні економічні можливості для всіх зацікавлених сторін, зокрема, міських мешканців, урядових установ, постачальників послуг тощо [21].

Крім розглянутих, є значний перелік актуальних для «розумних міст» напрямків розвитку, зокрема, «розумна» енергетика, «розумне» виробництво, «розумне» постачання ресурсів, «розумна» охорона здоров'я [22], «розумний» транспорт тощо.

1.3 Кіберфізичні системи та інформаційно-технологічні платформи «розумних міст»

Невпинно відбувається поширення кіберфізичних систем у виробничих та наукових колах. Кіберфізичні системи (англ. Cyber-Physical System, CPS) – це складні, гетерогенні, розподілені системи, завдяки яким відбувається взаємодія між кібернетичними компонентами, наприклад, давачами, виконавчими механізмами, центрами керування, і фізичними процесами, наприклад, контроль параметрів житлових приміщень, керування транспортним трафіком, виявлення надзвичайних ситуацій чи пожеж тощо. У статті [23] кіберфізичну систему означено як *«інформаційну систему, в якій інтегровано обчислювальні та комунікаційні засоби і фізичні процеси для оперативного спостереження та контролю фізичного середовища»*. В перспективі ці системи стануть основою критично важливої міської інфраструктури, дало змогу розширити перелік

інноваційних «розумних» муніципальних послуг, покращать якість міського середовища та життя.

Автори [24] подають означення: *«Інформаційно-технологічна платформа – це сукупність елементів технологічної бази, на якій можуть взаємодіяти застосунки, дотримуючись прийнятих правил та стандартів, даючи змогу здійснювати процеси обміну інформацією між зацікавленими сторонами в сформованій навколо цієї платформи системі»*. На даний час сформовано ряд типів інформаційно-технологічних платформ, які класифікують за різними критеріями. Один із найпопулярніших в наукових та виробничих колах критеріїв – це спосіб взаємодії між користувачами та платформою. Відповідно до цього критерію платформи поділяють на індивідуальні та мережеві. Індивідуальні платформи призначені для одного користувача. До цього типу платформ належать інструменти управління проєктами, CRM та ERP системи. Мережеві інформаційно-технологічні платформи є одними з найпоширеніших на даний час типів платформ. Вони відіграють важливу роль при формуванні сучасних проєктів «розумних міст» та у сучасному суспільстві загалом. Згідно [25], *«Мережева інформаційно-технологічна платформа – це платформа, яка дає змогу користувачам взаємодіяти один з одним через мережу»*. Оскільки мережеві платформи є типом інформаційно-технологічних платформ, а в цій дисертації інформаційно-технологічна платформа сформована на основі мережевої взаємодії, то далі по тексту терміни «мережева інформаційно-технологічна платформа» та «інформаційно-технологічна платформа» вважатимемо синонімами.

Поширення кіберфізичних систем пов'язане з появою Інтернету речей (англ. Internet of Things, IoT) – обширної множини пристроїв з обмеженими обчислювальними можливостями, які передають інформацію та надають послуги завдяки Інтернету та стеку протоколів TCP/IP. Водночас кіберфізичні системи – це мережі фізичних обчислювальних пристроїв, що взаємодіють між собою. Активний розвиток кіберфізичних систем охопив різноманітні домени і спричинив створення програмно-алгоритмічних застосунків у різних

господарських галузях. На даний час сформовано велику множину різнотипових кіберфізичних систем «розумних міст» (див. рис. 1.2).



Рис. 1.2. Кіберфізичні системи «розумних міст»

У «розумних містах» кіберфізичні системи використовуються для реалізації процесів збору та обміну даними в режимі реального часу. Це передбачає складну інтеграцію обширної множини різнотипових пристроїв, зокрема, давачів, приводів, мікроконтролерів, засобів мобільного зв'язку, серверного обладнання, мережевої та хмарної інфраструктури.

В «розумних містах» кіберфізичні системи використовуються для:

- створення інтерактивного та адаптивного «розумного» міського середовища;
- розширення переліку та покращення якості муніципальних послуг;
- підвищення ефективності процесів прийняття рішень;

- формування «розумної» міської інфраструктури;
- покращення характеристик процесів керування цифровими, кібернетичними та фізичними ресурсами;
- комплексного вирішення складних міських задач та проблем;
- управління транспортом;
- підвищення енергоефективності;
- покращення здоров'я населення;
- зменшення забруднення навколишнього середовища;
- впровадження інноваційних тактильних застосунків для покращення якості життя міських жителів;
- оптимізації процесів впровадження та використання інноваційних засобів зв'язку, зокрема, 5G тощо.

Кіберфізичні системи передають дані до центральних систем для опрацювання, співставлення та прийняття рішень щодо активації виконавчих механізмів чи інформування громадян, муніципальних установ та організацій. Вони зазвичай працюють поруч із багатьма іншими кіберфізичними системами, наприклад, «розумними» системами вентиляції та кондиціонування, «розумними» транспортними засобами, «розумними» виробничими лініями, «розумними будівлями», «розумною» інфраструктурою тощо. Це ускладнює або навіть унеможлиблює створення та широкомасштабне впровадження унікальних інформаційно-технологічних структур для керування кіберфізичними системами через ряд причин [26], зокрема:

- Не сформований стек мережевих протоколів. Реалізовані у різний час кіберфізичні системи, використовують різні стеки інформаційних та комунікаційних технологій.
- Відсутність уніфікованих підходів до формування розлогої інформаційно-технологічної архітектури.
- Експоненційне зростання обсягів даних та відсутність загальноприйнятих підходів до формування засобів їх зберігання та аналітичного опрацювання.

– Обладнання та фізичні середовища належать певній групі приватних, муніципальних чи державних власників, які можуть вільно робити власний вибір відповідно до різних факторів, зокрема, фінансових, законодавчих, бюрократичних обмежень тощо.

– Несумісність з раніше розгорнутими інформаційними технологіями.

– Підвищені вимоги до безпекових характеристик та засобів.

За потреби, на основі кіберфізичних систем можна оперативнo сформува ти та розгорнути нові муніципальні послуги, налаштувати процедури та алгоритми оцінювання стану міських систем, задіяти програмно-алгоритмічні засоби підтримки процесів прийняття рішень [27]. Об'єднання кіберфізичних систем – це новий напрямок сучасних наукових досліджень, який дає змогу керувати, координувати та організовувати інтегровані кіберфізичні системи, давачі, виконавчі механізми та ресурси для створення високоякісних «розумних» міських послуг [7]. В процесі об'єднання залучені домени повинні узгодити рівні доступу та обслуговування, що використовуються для співпраці. В [28] проаналізовано інноваційні підходи до формування обчислювальної архітектури міських кіберфізичних систем, які дають змогу на різних рівнях абстракції узгодити інтеграцію процесів відбору та передавання даних, розгортання обчислювальної інфраструктури, супроводження процесів керування та підтримки прийняття рішень. Однак більшість публікацій зосереджені лише на одному окремому аспекті функціонування кіберфізичних систем і лише деякі дослідження спрямовані на формування уніфікованої архітектури для конкретного класу «розумних» міських систем. Активний розвиток нових ІКТ спричиняє виникнення обширного переліку нових задач, формує потребу розроблення уніфікованих інформаційно-технологічних моделей та архітектур супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

Комплекс кіберфізичних систем (див. рис. 1.3) є новим етапом розвитку «розумних міст», який можна розширити до більших чи менших територіальних та галузевих формацій. Для прикладу, він може представляти «розумну

громаду», «розумне місто», «розумний соціополіс», «розумний регіон» або «розумну країну» тощо.

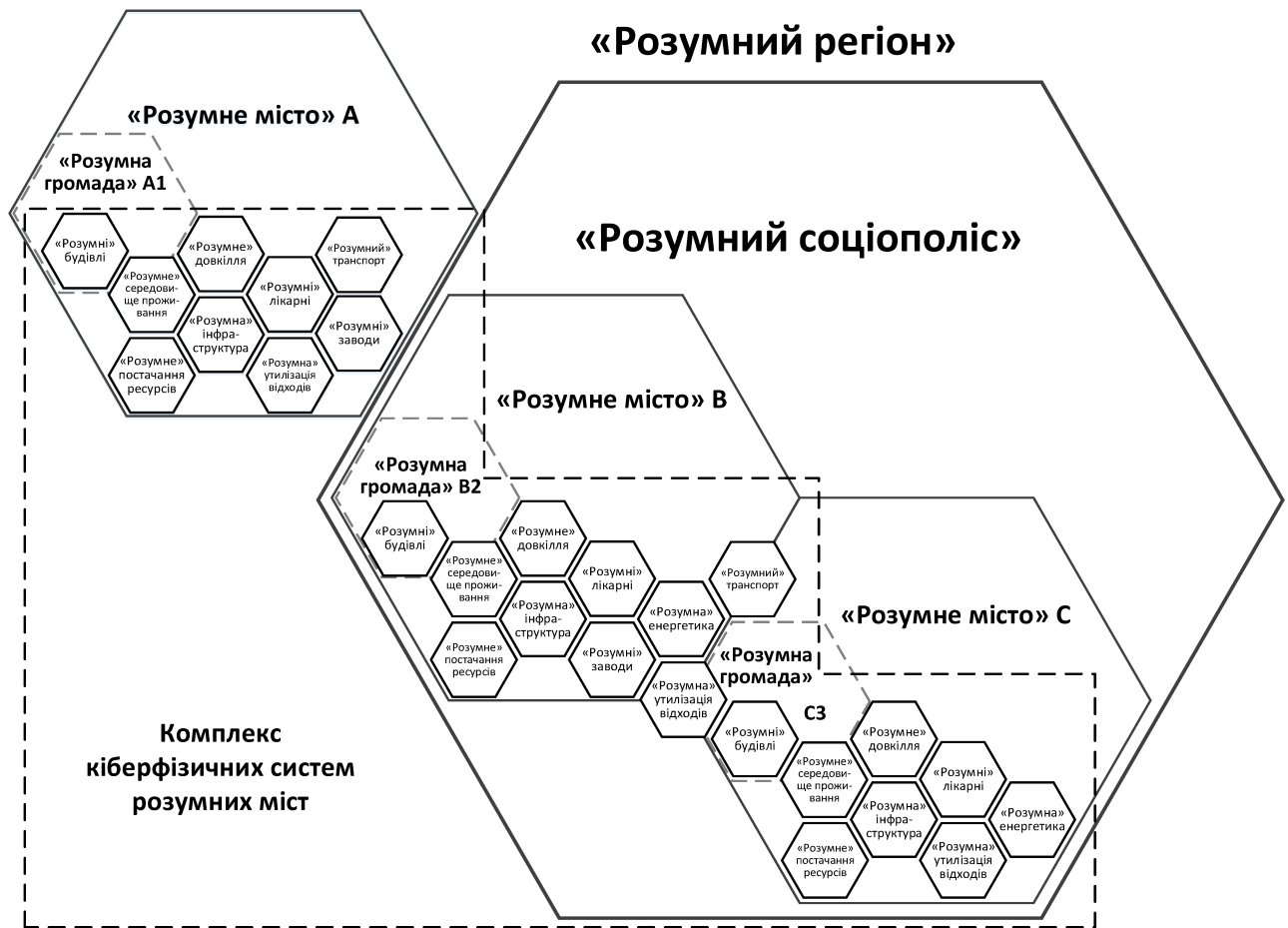


Рис. 1.3. Комплекс кіберфізичних систем «розумних міст»

Складні кіберфізичні системи «розумних міст» формуються з множини менших систем, що належать до різних адміністративних чи територіальних доменів, наприклад, різним приватним власникам або конгломерації приватних і державних власників на основі федеративного кооперативного підходу [29]. Федеративна взаємодія між кіберфізичними системами забезпечує ряд переваг, зокрема:

- дає змогу розширити та збільшити набори даних для узагальнення та аналітичного опрацювання;
- забезпечує спільне використання обчислювальних ресурсів між кіберфізичними системами;

– створює обчислювальну інфраструктуру з використанням периферійних, туманних та хмарних обчислень без збільшення фінансових витрат для власників кіберфізичних систем.

На основі опублікованої в [30] сформуємо функціональну модель «розумного міста» з використанням кіберфізичних систем (див. рис. 1.4).

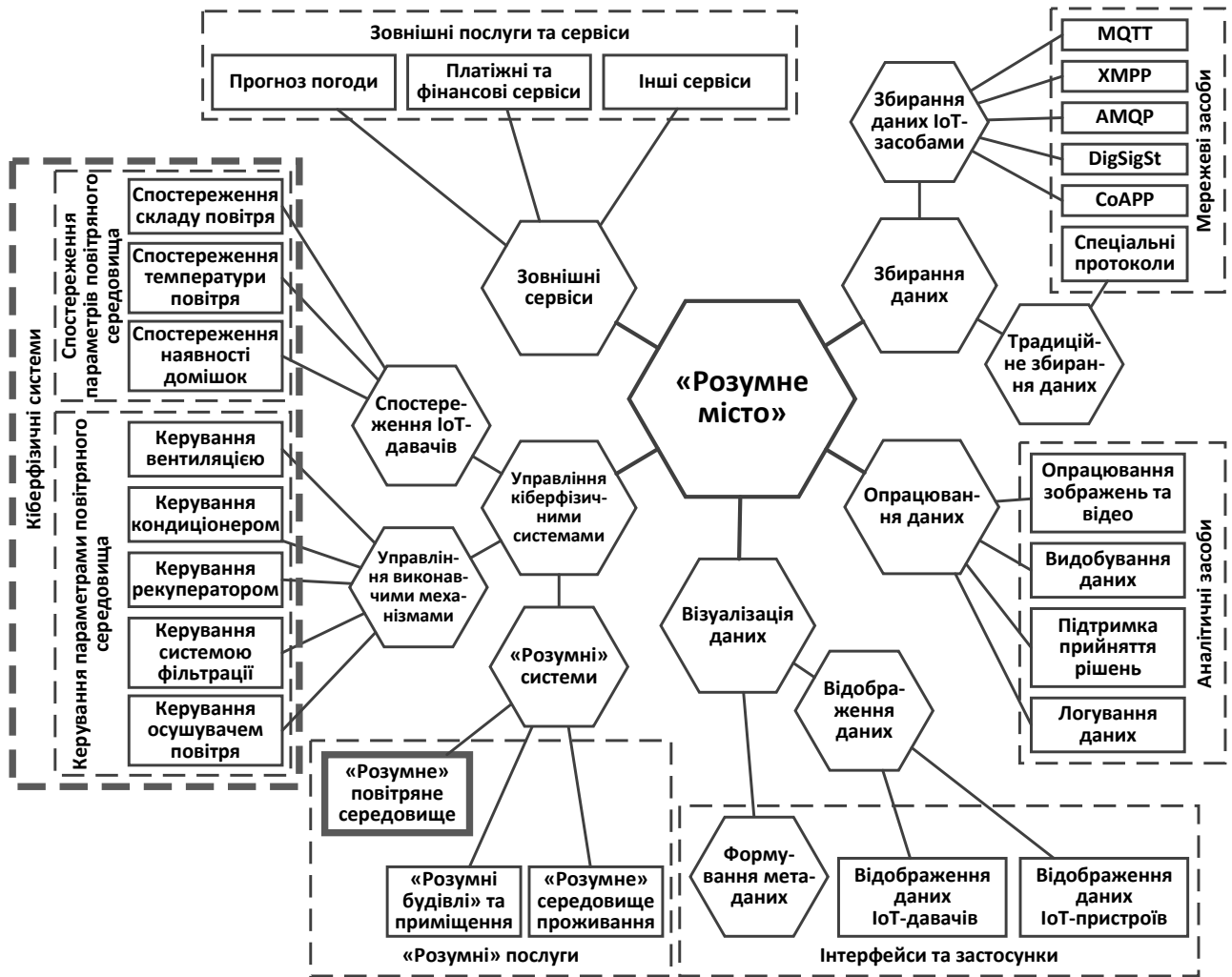


Рис. 1.4. Функціональна модель «розумного міста» з використанням кіберфізичних систем

Переваги співпраці між кіберфізичними системами «розумних міст» формують інноваційні можливості реалізації мережових інформаційно-технологічних платформ і застосунків, які покращують умови проживання громадян. Це сформувало потребу у проектуванні інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів у складних кіберфізичних системах «розумних міст» на основі множини сучасних ІКТ.

1.4 Комунікаційні мережі «розумних міст»

«Розумне місто», що формується засобами кіберфізичних систем, містить обширний спектр різноманітних об'єктів, які з'єднані за допомогою різнотипових мереж та систем зв'язку. При цьому за допомогою потужної мережевої інфраструктури здійснюються ідентифікація, авторизація, відстеження локації та передавання даних інтегрованих в міське середовище IoT-пристроїв. Комунікаційним мережам «розумних міст» притаманні [4]:

1. Аномальні схеми трафіку. Процедури каскадування та синхронізації IoT-пристроїв кіберфізичних систем «розумних міст» спричиняють масштабні сплески трафіку та формують корельовані його моделі, що відрізняються від традиційних соціальних моделей трафіку, на яких базуються переважна більшість існуючих на даний час мережевих схем і технологій.

2. Велика щільність. Комунікаційні мережі «розумного міста» мають дуже велику щільність, оскільки тисячі IoT-пристроїв нерівномірно розподілені по територіях «розумних громад», «розумних міст» та «розумних соціополісів».

3. Неорганізована топологія мережі. На відміну популярних у виробничих та дослідницьких колах технологій бездротового зв'язку, мережі «розумного міста» часто сформовані на базі топології комірчастої мережі. Коли IoT-пристрої кіберфізичних систем «розумного міста» взаємодіють через ненадійні бездротові канали, відбуваються значні втрати пакетів, спричинені їх особливостями та властивостями.

4. Неоднорідність. Комунікаційні мережі «розумного міста» використовують різні технології, які мають обширний спектр унікальних порогових та компромісних характеристик енергоспоживання, затримок, пропускної здатності та діапазонів зв'язку. Задіяні при цьому різні комунікаційні технології повинні співіснувати на одній інформаційно-технологічній платформі.

5. Специфічні вимоги щодо безпеки та конфіденційності формуються тому, що комунікаційні мережі «розумних міст» є надзвичайно вразливими до

обширного спектру ризиків з боку великого кола зловмисників. Більшість спеціалізованих «розумних» давачів, виконавчих механізмів та IoT-пристроїв розробляються без урахування заходів безпеки. Кіберфізичні системи «розумних міст» можуть бути дуже вразливими через легкий доступ зловмисників до передових технологій та потенційні загрози безпеці та конфіденційності жителів та гостей міст.

6. Співіснування різнорідних технологій. Комунікаційні технології, що використовуються в «розумних містах», розподілені в одному радіоефірі. Водночас, незалежні радіоінфраструктури поєднуються за допомогою різних бездротових каналів. При цьому потрібно ефективно підвищувати завадостійкість.

Автори [31] подають характеристики мережевої інфраструктури кіберфізичних систем «розумного міста», зокрема:

1. Безпека та конфіденційність. В умовах війни в Україні, безпека – це критично важлива особливість кіберфізичних систем «розумних міст», їхньої інформаційної та комунікаційної інфраструктури, стандартів та протоколів. Безпечні процеси відбору, передавання, зберігання та опрацювання даних є вирішальними для ефективного формування «розумних» послуг та задоволення потреб містян. Вони необхідні для захисту кіберфізичних систем від крадіжок і зловмисних дій, кібератак міської мережевої інфраструктури та забезпечення конфіденційності користувачів. IoT-пристрої потребують захищеної інформаційно-технологічної інфраструктури та опрацювання даних в режимі реального часу [32]. В залежності від характеристик «розумних» застосунків чи «розумних» послуг приймаються специфічні заходи безпеки та конфіденційності.

2. Гнучкість і універсальність: У кіберфізичних системах інтегрується великий ряд різнорідних та різнотипових IoT-пристроїв, що використовуються в «розумних містах», «розумних» доменах, «розумних будівлях» та системах з різними функціями. В залежності від особливостей різнорідних IoT-пристроїв відрізняються їх час роботи, інструкції, особливості виконуваних завдань тощо.

Для сучасного «розумного міста» з використанням кіберфізичних систем комунікаційна інфраструктура повинна бути гнучкою і універсальною, щоб обробляти великі за обсягом набори та колекції даних [33].

3. Доступність і забезпечення: Доступність мереж «розумного міста» в режимі реального часу та їх оперативна доступність залежить від використаних в кіберфізичних системах комунікаційних технологій. Низька затримка, висока швидкість передачі даних, низький рівень перешкод і висока пропускну здатність – це характеристики якісних комунікаційних технологій, стандартів і протоколів, які підвищують доступність і можливості інформаційного забезпечення об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» [33].

4. Затримка. Для швидкісного зв'язку та високоефективної передачі даних між елементами кіберфізичних систем «розумного міста» критично важливо враховувати вимоги до затримки, що варіюються в залежності від умов функціонування «розумних» міських послуг та застосунків. Зокрема, в критичних і надзвичайних ситуаціях потрібна менша затримка та швидша передача даних.

5. Масштабованість і розміри. Масштабованість – це домінуюча здатність комунікаційних систем, завдяки якій вони можуть ефективно обробляти зростаючу кількість вузлів кіберфізичних систем, обладнання та IoT-пристроїв [34]. Мережева інфраструктура «розумних міст» повинна мати можливість реєструвати та авторизувати нові IoT-пристрої, ідентифікувати та автоматично обробляти тримані від них дані, а також ефективно виконувати мережеві функції при поломці або видалені IoT-пристрою.

6. Надійність і узгодженість. Безперервність периферійних, туманних та хмарних обчислень в процесі обробки даних кіберфізичних систем «розумного міста» вимагає надійного та стабільного зв'язку. Це важлива функція міських застосунків в галузі «розумної» охорони здоров'я, «розумного» транспорту, «розумних» екстрених служб та надзвичайних ситуацій тощо.

7. Пропускна здатність каналів зв'язку важлива для обробки великих обсягів даних, що генеруються об'єктами, IoT-пристроями та вузлами

кіберфізичних систем «розумного міста». Вона повинна бути достатньою, щоб забезпечити протікання процесів периферійних, туманних та хмарних обчислень за допомогою надійного, безпечного та швидкого зв'язку.

8. Швидкість потоків даних повинна забезпечувати ефективне функціонування кіберфізичних систем «розумних міст». Висока швидкість передачі даних – одна з ключових характеристик протоколів зв'язку, що використовуються в IoT-мережах кіберфізичних систем. Вона забезпечує надійний зв'язок для «розумних» послуг та застосунків «розумного міста».

На даний час поширений широкий спектр дротових і бездротових мережевих протоколів, що використовуються у сформованих на основі IoT-пристроїв кіберфізичних системах «розумних міст». Вони використовуються для різних класів міських мереж та «розумних» застосунків (див. рис. 1.5).

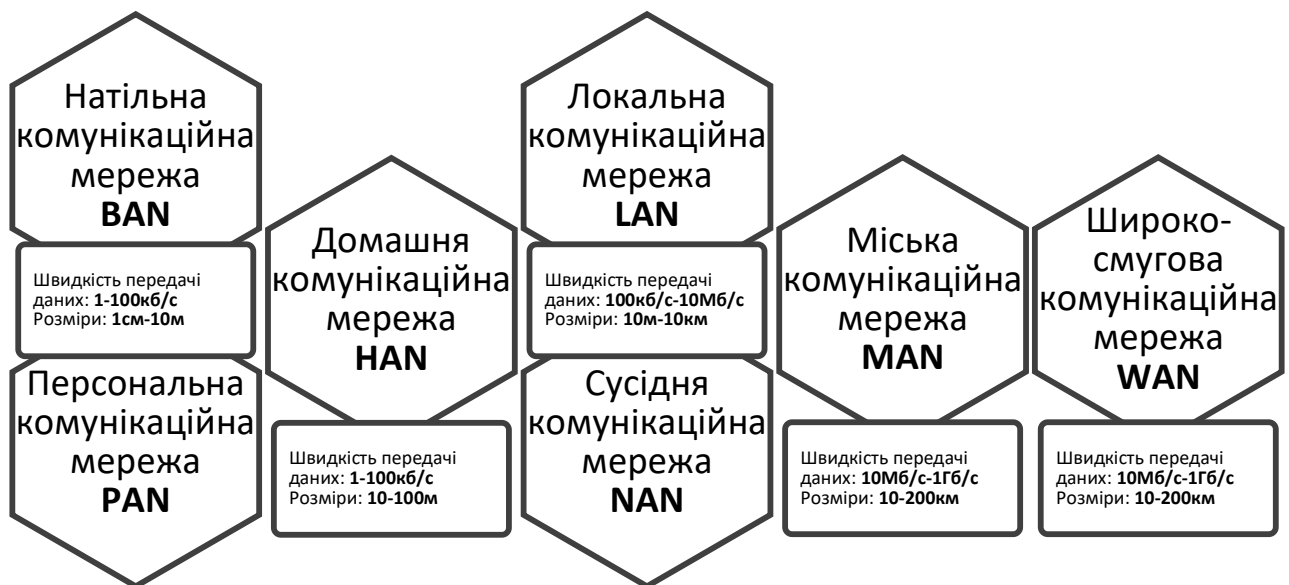


Рис. 1.5. Класифікація та характеристики комунікаційних мереж кіберфізичних систем «розумних міст» (сформовано на основі [35])

Натільні комунікаційні мережі (англ. Body Area Network, BAN) ще називають бездротовими BAN, медичними BAN або натільними сенсорними мережами в залежності від особливостей їх застосування і використаних технологій зв'язку. BAN використовують кіберфізичні системи для інтеграції натільних RFID-міток, давачів та IoT-пристроїв. BAN з'єднуються з

«розумними» службами та міськими системами спостереження та керування за допомогою комунікаційних технологій NFC, Bluetooth/BLE тощо. BAN тісно пов'язані з персональними комунікаційними мережами (англ. Personal Area Network, PAN), які використовують портативні пристрої, смартфони, планшети та персональні комп'ютери для підключення людського тіла до інформаційно-технологічних платформ та «розумних» систем за допомогою ZigBee, WiFi, Z-wave тощо [35].

Домашня комунікаційна мережа (англ. Home Area Network, HAN) складається з RFID-давачів, приводів та виконавчих механізмів кіберфізичних систем, відеокамер, сканерів і т.д., підключених до «розумних» приладів, зокрема, вентиляторів, кондиціонерів, обігрівачів повітря, «розумних» лічильників спожитих послуг тощо. HAN на основі інтегрованих у кіберфізичних системах IoT-пристроїв пов'язані з мережами вищих рівнів та Інтернет. Для формування та підключення HAN до хмарної інфраструктури використовуються протоколи зв'язку малого радіусу дії, зокрема, ZigBee, Z-Wave, WiFi, MQTT, HTTP, XMPP, CoAP тощо [36].

Загальновідома локальна комунікаційна мережа (англ. Local Area Network, LAN) – це, здебільшого, мережа малого або середнього радіусу дії на невеликій території. LAN використовують комунікаційні технології подібні глобальних мереж та є користувацькою частиною різних IoT-взаємодій у кіберфізичних системах «розумних міст».

Сусідня територіальна мережа (англ. Neighborhood Area Network, NAN) формується для «розумних будівель» та приміщень, мережевих станцій, «розумних» кампусів, міських установ та організацій. Для підключення об'єктів кіберфізичних систем до Інтернету використовуються комунікаційні протоколи середнього радіусу дії. Для «розумного» зв'язку NAN використовують лінії електропередач (англ. Power-Line Communication, PLC), цифрові абонентські лінії (англ. Digital Subscriber Line, DSL), LoRaWAN, Sigfox, мобільний зв'язок LTE та 5G, Nue1, WiFi тощо [37].

Міська комунікаційна мережа (англ. Metropolitan Area Network, MAN) – це тип мереж, що функціонують на території великого «розумного» міста-мегаполіса. MAN з'явилися відносно недавно. Для них характерні досить великі відстані між вузлами та якісні комунікаційні лінії з високими швидкостями передавання даних [38]. При побудові MAN не використовуються вже існуючі комунікаційні лінії, а прокладаються наново. MAN займають проміжне положення між LAN та WAN та об'єднують їх між собою.

«Розумні міста» з'єднані через глобальні мережі (англ. Wide Area Network, WAN) – це мережі великого радіусу дії, які використовуються для з'єднання кіберфізичних систем, об'єктів, пристроїв на великій відстані та з високою швидкістю передачі даних, низькою затримкою, високим рівнем безпеки та ефективністю [39].

1.5 Мережеві протоколи кіберфізичних систем «розумних міст»

На даний час сформовано широкий перелік мережевих протоколів для кіберфізичних систем «розумних міст». Їх можна класифікувати за рядом критеріїв, зокрема:

- Мережевим рівнем ієрархії (див. рис. 1.6, сіра колонка). Протоколи нижчого рівня ($Proto_{Low}^{Net}$), зокрема, протоколи фізичного рівня, відповідають за передачу даних між IoT-пристроями кіберфізичних систем «розумних міст». А протоколи вищого рівня ($Proto_{High}^{Net}$), зокрема, протоколи управління, відповідають за управління IoT-пристроями та кіберфізичними системами загалом.

- Типом мережі, де вони використовуються (див. рис. 1.6, біла колонка), адже протоколи передачі даних кіберфізичних систем в LAN «розумних міст» відрізняються від протоколів передачі даних у WAN.

- Застосуванням. Мережеві протоколи кіберфізичних систем можуть бути спеціально розроблені для потреб окремих «розумних» міських застосунків та

послуг, наприклад, «розумна» вентиляція, «розумне» кондиціонування, «розумні будівлі», «розумне» середовище проживання тощо.

Найпоширеніші мережеві протоколи LAN-рівня кіберфізичних систем «розумних міст»: Ethernet, LoRa, Zigbee та Wi-Fi тощо. Зазначені протоколи використовуються для передавання даних та зв'язку у стаціонарних вузлах кластерів кіберфізичних систем «розумних міст».

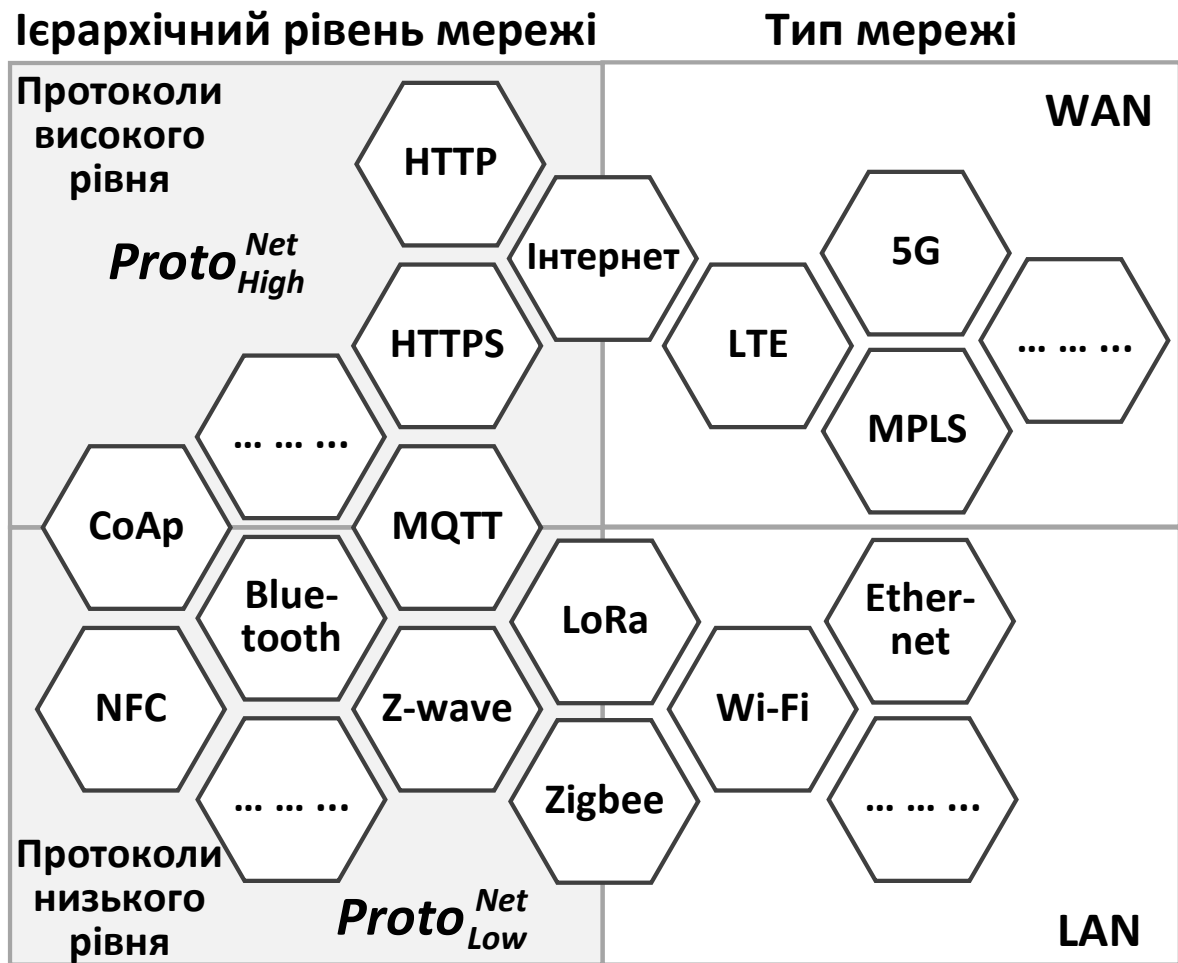


Рис. 1.6. Класифікація мережевих протоколів кіберфізичних систем «розумних міст»

При цьому кластери можуть бути відокремлені один від одного, водночас зберігаючи зв'язок з мережами «розумного міста». Помірна кількість вузлів кожного кластера спрощує процеси їх обслуговування.

На WAN-рівні активно використовуються Інтернет, LTE, 5G, MPLS тощо. Крім підтримки великих мереж, зазначені технології дають змогу сенсорним

вузлам та кластерам кіберфізичних систем «розумних міст» реалізовувати високошвидкісні процеси обміну даними з хмарною інфраструктурою. Це в свою чергу підвищує ефективність спостереження та керування фізичних процесів «розумних міст» у режимі реального часу [40].

LTE та 5G – це технології мобільного зв'язку, які використовуються для високошвидкісної передачі даних. LTE відноситься до четвертого покоління технології мобільного зв'язку (4G). Ці технології здатні забезпечити високу швидкість процесів передачі даних у критичних до затримки кіберфізичних системах «розумних міст». Завдяки масштабованості LTE та 5G можуть одночасно підтримувати велику кількість пристроїв. Адже кіберфізичні системи «розумних міст», зазвичай використовують обширні множини IoT-давачів та виконавчих пристроїв, що обмінюються даними. LTE та 5G забезпечують високу надійність зв'язку – це важливо при формуванні кіберфізичних застосунків для управління критичною інфраструктурою «розумних міст».

Технологія Multi-Protocol Label Switching (MPLS) дає змогу забезпечити ефективну комутацію даних кіберфізичних систем з використанням міток (labels). Це полегшує процеси керування мережами «розумних міст», підвищує їх продуктивність та надійність. MPLS дає змогу надавати різним видам мережевого трафіку пріоритети відповідно до потреб кіберфізичних систем «розумного міста». При цьому встановлюються мітки пакетів відповідно до рівня обслуговування. Це корисно для підвищення якості обслуговування (англ. Quality of Service, QoS) цифрових служб і сервісів, та інформаційних систем «розумних міст» загалом. Інжиніринг трафіку MPLS дає змогу оптимізувати маршрутизацію трафіку кіберфізичних систем в мережах «розумного міста» [41]. При цьому підвищується ефективність використання мережевих каналів та інформаційних ресурсів «розумного міста», мінімізуються затримки процесів передачі даних. Відокремлення різнотипового трафіку засобами MPLS підвищує безпеку критичних інфраструктур і даних «розумних міст» та «розумних» міських сервісів.

Кіберфізичні системи «розумних міст» використовують потужну множину мережевих протоколів низького рівня ($Proto_{Low}^{Net}$), зокрема, Bluetooth, CoAp, LoRa, MQTT, NFC, ZigBee, Z-wave, характеристики яких подано на рис. 1.7.

Сформовані на основі мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем застосунки «розумного міста» відображають користувачькі інтерфейси за допомогою портативних пристроїв, або смартфонів. При цьому вони отримують опрацьовану інформацію, або надсилають команди для виконання різноманітних дій.

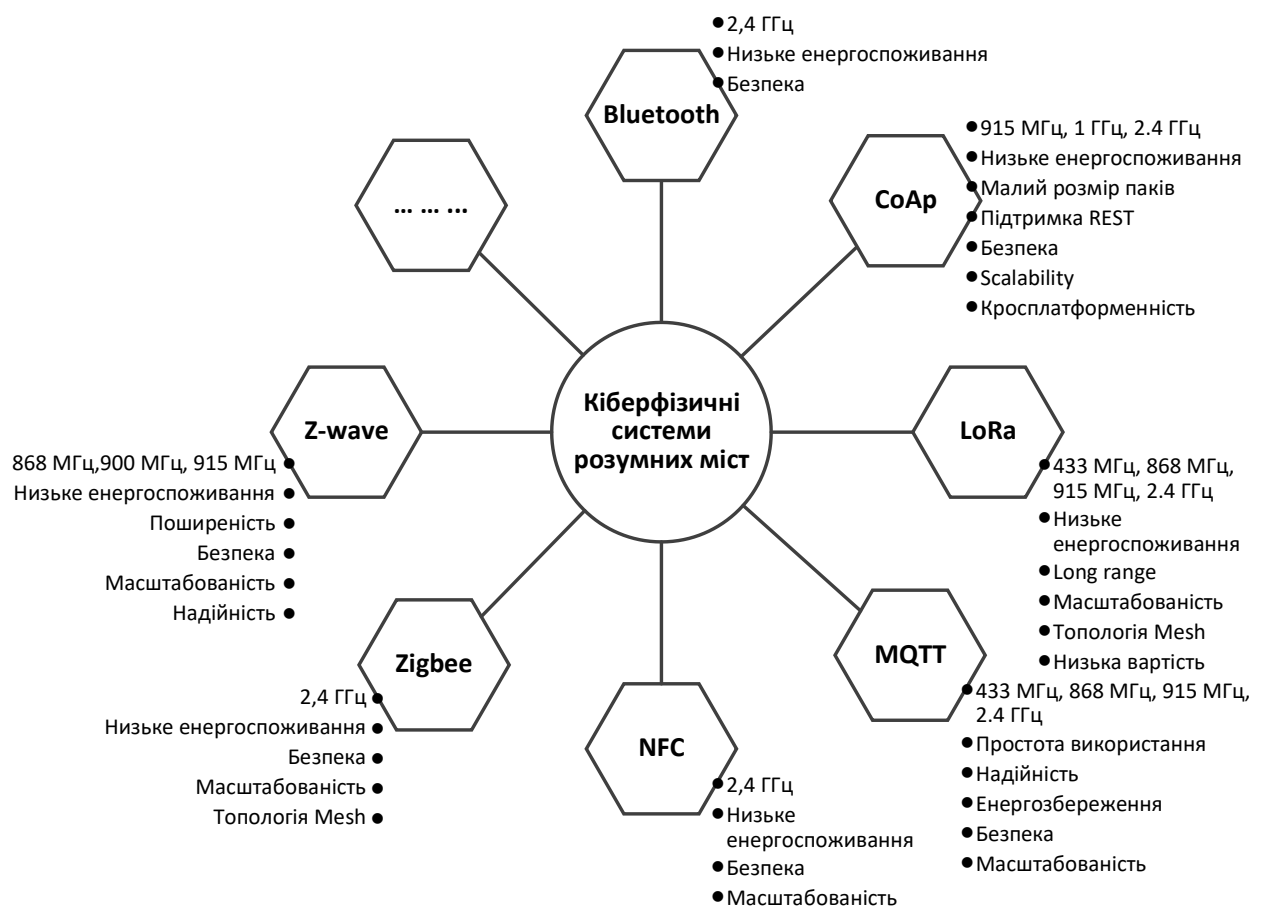


Рис. 1.7. Низькорівневі мережеві протоколи ($Proto_{Low}^{Net}$) кіберфізичних систем «розумних міст»

Відповідно до отриманих інструкцій активуються інтегровані у фізичне середовище виконавчі механізми (актуатори) IoT-пристроїв. При цьому використовуються AMQP, CoAp, MQTT, RESTFUL Extensible Messaging або XMPP Services, які детальніше описані в [42].

1.6 Інформаційні системи та моделі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель»

«Розумні міста» характеризуються високими рівнями впровадження давачів у фізичні середовища, процесів обміну даними, периферійних, туманних, хмарних обчислень та автоматизації процесів надання «розумних» послуг. Існують «розумні будівлі» та приміщення в яких інтегровано системи «розумної» вентиляції, що обслуговуються «розумними» вентиляторами. Однак концепція «розумних» систем спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень ще не набула широкого розповсюдження. Ймовірною причиною є сформований у наукових та виробничих колах стереотип: *«системи вентиляції та кондиціонування і пов'язане з ними повітряне технічне обладнання є відносно простими і недорогими, а тому, можливо, не заслуговують на складне, «розумне» поводження – на відміну від інших типів повітряних машин, зокрема, наприклад, компресорів, газових турбін та вітрогенераторів»* [43]. Однак поширеність та широкий спектр щоденно використовуваних вентиляторів та кондиціонерів має значний вплив на процеси формування повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень, «розумних громад», «розумних міст» та «розумних соціополісів». Тому системи спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень пропонують нові, практично і економічно значущі області застосування кіберфізичних систем.

Автори [44] розглядають перелік конкурентних переваг «розумних» систем спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища будівель та приміщень у порівнянні з традиційними промисловими «повітряними» інформаційними та комунікаційними технологіями, зокрема, в рамках організації ієрархічних рівнів об'єктів, обладнання та систем:

– Економія використовуваної аеродинамічної продуктивності, енергоефективна робота систем «розумної» вентиляції та, зниження експлуатаційних витрат.

– Безперервне спостереження стану та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень, що призводить до економії фінансових витрат пов'язаних з несправностями, зокрема на заміну і ремонт обладнання. Як наслідок підвищення експлуатаційної надійності.

– Використання системи спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень дає змогу здійснювати цілеспрямоване та швидке технічне обслуговування за запитом. Наприклад, поточне або оперативне очищення фільтрів у системах вентиляції та кондиціонування, чистку, профілактику, ремонт, тощо. Адже поточне, короткочасне очищення, мінімізує втрати, пов'язані з перервами в роботі.

– Комплексне управління енергоспоживанням «розумних будівель» та приміщень для адаптації до наявних ресурсів, зокрема, відновлюваних джерел електричної енергії.

– Удосконалене управління процесами формування повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень для підвищення QoS містян.

– Адаптація до стану навколишнього середовища, здоров'я жителів та гостей міста та безпеки, наприклад, малошумні вентиляція та кондиціонування повітря без протягів.

«Розумні» системи спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища використовуються для:

– Житлових будинків та приміщень з метою контролю та оптимізації систем вентиляції, кондиціонування та обігріву повітря. Це полегшує перебування мешканців, забезпечує комфортне середовище проживання і підвищує ефективність енергоспоживання.

– Офісних приміщень для оптимізації енергоспоживання та забезпечення комфортних умов праці.

- Освітніх закладів для формування здорового та комфортного навчального середовища для студентів та учнів.
- Лікарень та медичних закладів з метою забезпечення оптимальних умов перебування для пацієнтів та медичного персоналу.
- Індустріальних та виробничих приміщень для контролю параметрів забруднення виробничого середовища, забезпечуючи оптимальні умови виконання технологічних процесів, роботи та безпеки.
- Спеціалізованих приміщень для конкретних потреб, зокрема, виробничих цехів, операційних приміщень, культурних споруд тощо.

На даний час широко доступний доволі обширний перелік різнотипових програмно-алгоритмічних застосунків для «розумних будівель» та житлових приміщень, зокрема, йдеться про застосунки, що підтримують функції опалення та охолодження, управління електроспоживанням, освітлення, управління водо- та газопостачання та ін. Інформаційно-технологічний концепт «Розумна будівля» об'єднує «розумні» системи приміщення або будинку у цілісну комунікаційну мережу та підтримує широкий функціонал з метою підвищення експлуатаційної ефективності, зручності використання (QoS) [31], безпеки та охорони та ін. Архітектура інформаційно-технологічної платформи «розумної будівлі» забезпечує реалізацію процесів керування декількома проблемно-орієнтованими доменами в режимі реального часу. Мова йде про «розумне» регулювання температури, «розумну» вентиляцію та рекуперацію, «розумне» очищення та іонізацію повітря, «розумне» кондиціонування та обігрівання, «розумний» контроль вологості і т.п. Перелічені проблемно-орієнтовані домени можна об'єднати в інформаційній системі супроводу процесів спостереження та регулювання якості повітряного середовища «розумних будівель». Окрім зазначених domenів у «розумних будівлях» інтегрується обширний набір різнотипових «розумних» послуг, сервісів та застосунків.

Системи супроводу процесів регулювання якості повітряного середовища «розумних будівель» функціонують на основі процесів спостереження та регулювання показників якості повітря в приміщеннях засобами IoT-давачів та

застосовують виконавчі механізми для їх регулювання. Системи спостереження за повітряним середовищем у приміщеннях описані зокрема в [45] забезпечують оперативне спостереження за наявністю забруднюючих газів, температури та відносної вологості. Автори [46] зосередилися на аналізі та дослідженні теплового комфорту «розумних приміщень». В роботі розглядається два підходи.

– Об’єктивна оцінка – це процес спостереження, оцінювання та реєстрації стану параметрів внутрішнього середовища «розумних будівель» за допомогою спеціалізованих IoT-давачів та IoT-пристроїв відповідно до стандартизованих рекомендацій.

– Суб’єктивна оцінка – це процес спостереження, оцінювання та реєстрації зручності, переваг, відчуттів та сприйняття внутрішнього середовища «розумних будівель».

«Розумні» сенсорні пристрої та системи керування фізичними середовищами, створені засобами кіберфізичних систем, дають змогу спостерігати, контролювати, управляти або змінювати критично важливі параметри фізичного середовища «розумних будівель». Їхні функціональні можливості безпосередньо залежать від рівня інтеграції та характеристик IoT-пристроїв та IoT-давачів. Розвиток інформаційних та комунікаційних технологій, гетерогенних мереж та кіберфізичних систем забезпечує перспективи щодо створення «розумних» інноваційних систем вентиляції, рекуперації та кондиціонування, які можуть забезпечувати необхідні якісні характеристики повітря в приміщеннях та покращувати енергоощадні характеристики «розумних будівель».

Водночас сучасні системи спостереження показників якості повітря «розумних будівель» природньо інтегруються з міськими системами спостереження навколишнього середовища загальноміської екосистеми. Одна з ключових базових функцій систем такого класу – контроль внутрішнього клімату, який зазвичай виконується системами вентиляції, рекуперації, зволоження, кондиціонування та обігрівання повітря [47].

Однією з ключових задач «розумних» систем супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища будівель є оцінка стану навколишнього середовища в приміщенні. Ці системи призначені для підтримки безпечного, здорового та комфортного середовища в приміщенні. У традиційних системах автоматичного керування повітряне середовище в приміщенні представлене декількома типовими параметрами, зокрема, температура P^{temp} , відносна вологість P^{hdmt} та концентрація вуглекислого газу P^{CO2} [48]. Процеси керування відбуваються на основі порівняння вимірених параметрів з попередньо встановленими пороговими значеннями, які здебільшого визначаються відповідно до моделей та стандартів Американського товариства інженерів з опалювальної, холодильної та кондиціонерної техніки (англ. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, ASHRAE) [49]. Однак, використання попередньо заданих значень і єдиних режимів роботи систем спостереження показників якості повітряного середовища будівель не забезпечує оперативних процесів регулювання, оптимального комфорту містян або прийнятних показників енергоефективності.

В дослідженнях [50], [51] розроблені моделі оцінювання показників якості повітряного середовища для заміни процесів простого регулювання за фіксованими уставками. Рен [52] застосував для онлайн контролю показників якості повітря низьковимірну лінійну модель вентиляції та штучну нейронну мережу для оперативного реагування на зміни показників забруднення повітря в приміщенні. Науковці [53] присвятили свої роботи формуванню стратегії вентиляції з регулюванням за потребою для динамічного контролю концентрації забруднюючих речовин у приміщенні та оперативної оцінки якості повітря. Денг [54] дослідив зв'язок між концентрацією забруднюючих повітряне середовище речовин та температурою у приміщенні. Опубліковані Фаном [55] результати моделювання енергоспоживання системи вентиляції та кондиціонування показали, що запропонований групою авторів метод може забезпечити комфортне середовище для мешканців при меншому споживанні енергії. У статті

[52] зазначено, що керування на основі моделей оцінки забезпечує сприятливі екологічні показники повітряного середовища при менших фінансових витратах порівняно з традиційними системами керування.

Цао [56], за допомогою комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів у повномасштабній вентиляційній камері, дослідив вплив оперативного регулювання показників якості повітряного середовища в приміщенні на енергоспоживання. Опубліковані результати засвідчили, що підвищення температури на 1°C призведе до збільшення концентрації вуглекислого газу на 1,2% та збільшення енергоспоживання на 8,3%. Крім того, існує безпосередня кореляція між суб'єктивними людськими відчуттями в режимі реального часу та об'єктивними вимірами показників якості повітряного середовища в приміщенні. Ху [57] проаналізував взаємозв'язок між вимірними параметрами показників якості повітряного середовища в приміщенні та використанням кореляційних моделей. Результати показали, що оперативне спостереження та керування показниками якості повітряного середовища приміщень на основі задоволеності потреб споживачів дає змогу забезпечити стабільніше теплове середовище.

В [58] Хуанг проаналізував суб'єктивні оцінки параметрів внутрішнього середовища проведені серед мешканців «розумних будівель». Зокрема, досліджено кореляцію між суб'єктивною оцінкою кожного параметра та комплексною задоволеністю внутрішнім середовищем, часткою кожного параметра та ваговими коефіцієнтами, розрахованими на основі суми значень всіх вибірок. Базову структуру моделі оцінки сформовано на основі множинної лінійної регресії. Дослідники провели польові вимірювання показників якості повітряного середовища «розумних приміщень» та анкетування їхніх мешканців. Уподобання мешканців були виражені за допомогою вагових коефіцієнтів для кожного параметра W_i , зокрема, D^{temp} – температура, D^{vlct} – швидкість повітряного потоку в приміщенні, D^{hdmt} – відносна вологість, D^{CO2} – концентрація вуглекислого газу та D^{PM25} – концентрація твердих часток діаметром менше 2,5 мікрметра. На спочатку зазначені параметри повітряного

середовища «розумних будівель» вважалися незалежними та були об'єднані в єдиний індекс за допомогою регресійного аналізу:

$$I^{QoAE} = W_1 D_n^{temp} + W_2 D_n^{vlct} + W_3 D_n^{hdmt} + W_2 D_n^{CO2} + W_2 D_n^{PM25} \quad (1.1)$$

При інтеграції в рівняння регресії [59] безрозмірні параметри дають змогу уникнути складнощів, спричинених різними одиницями виміру різних параметрів повітряного середовища «розумних будівель»:

$$\Delta_n = \frac{\Delta - \Delta_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}}, \quad (1.2)$$

де Δ – параметр внутрішнього середовища;

Δ_n – безрозмірний параметр внутрішнього середовища;

Δ_{min} та Δ_{max} – відповідні мінімальні та максимальні значення фактичних даних спостереження повітряного середовища «розумних будівель».

Гіпотетична модель [58] була раціонально перевірена та уточнена з отриманих під час польових досліджень даних на основі кореляційного аналізу Пірсона (див. рис. 1.8), та регресійного аналізу.

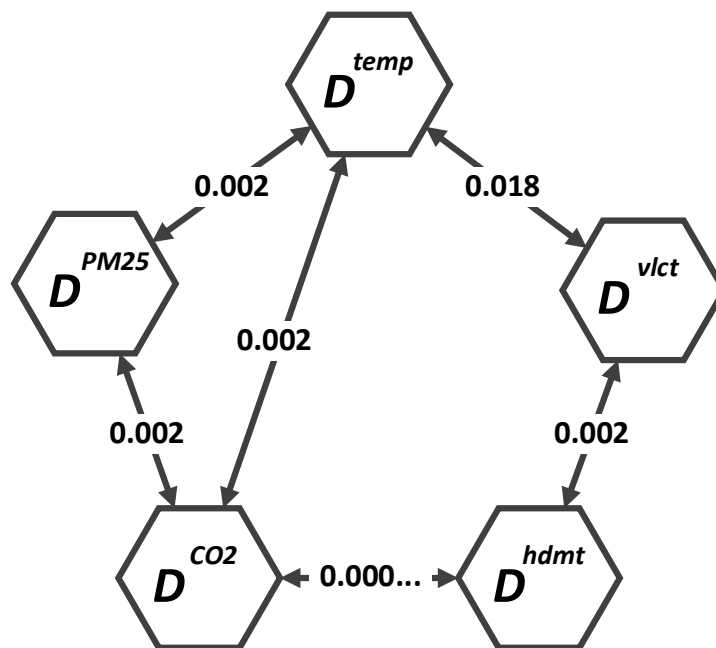


Рис. 1.8. Графік кореляції показників якості повітряного середовища «розумних будівель» (сформовано на основі [58])

Комплексна модель оцінки якості внутрішнього середовища «розумних будівель» [58] подана у вигляді рівняння:

$$I^{QoAE} = 0,12D_n^{temp} + 0,11D_n^{vlct} + 0,12D_n^{hdmt} + 0,49D_n^{CO2} + 0,19D_n^{PM25} \quad (1.3)$$

Враховуючи, що значення I^{QoAE} – це відображення реальних умов та вподобань містян, воно може бути впроваджене систем спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель». Слід зазначити що вагові коефіцієнти були отримані з даних опитування і неминуче обмежені емпіричною моделлю. При зміні кількості вибірки, статі або віку опитаних громадян вагові коефіцієнти можуть відрізнитися від даних цієї моделі. Тому для оновлення вагових коефіцієнтів моделі для різнотипових застосунків слід використовувати алгоритми оперативного коригування вагових коефіцієнтів або самонавчання.

1.7 Висновки до розділу 1

1. Подана характеристика множини базових інформаційних та комунікаційних технологій, що використовуються для практичних реалізацій, та проведений аналіз ключових напрямків розвитку «розумних міст» дали можливість сформулювати їхні характеристичні описи та підкреслили значимість і суттєвий потенціал цифрової трансформації для вирішення множини сьогочасних та перспективних міських задач.

2. Проведений аналіз особливостей використання кіберфізичних систем «розумних міст» та сформована їхня класифікація, подана в графічній формі, дали змогу виокремити причини ускладнення процесів створення унікальних інформаційно-технологічних структур для керування кіберфізичними системами та розробити функціональну модель «розумних міст».

3. Проведений огляд переваг комплексної федералізації міських кіберфізичних систем та аналіз поширених підходів до формування інформаційно-технологічних архітектур при їх розгортанні в міському

середовищі дали змогу зробити висновок, що на даний час практично відсутня загальноприйнята модель супроводу процесів, що протікають у міських кіберфізичних системах. Така модель повинна була б поєднувати основні етапи інформаційно-технологічного та комунікаційного супроводу процесів у міських кіберфізичних системах з урахуванням підходів до розподілу обчислювального навантаження та формування цифрових послуг.

4. Проведений аналіз особливості комунікаційних мереж та протоколів кіберфізичних систем «розумних міст» показав, що нинішнє забезпечення комунікаційними засобами супроводу цифрових процесів здебільшого фрагментарне та неповне з чітко вираженими нерівномірностями. Така ситуація характерна для України та більшості розвинутих країн світу.

Отже, актуальною науковою задачею є розроблення мережевої платформи супроводу об'єктів складних кіберфізичних систем «розумних міст» та формування її компонентів і засобів на основі множини сучасних ІКТ відповідно до потреб окремих міських жителів, міських спільнот та громади загалом у відповідності до специфіки впровадження, функціонування та масштабування цифрових послуг та сервісів.

РОЗДІЛ 2. КОМПОНЕНТИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ СУПРОВОДУ ОБ'ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»

2.1 Моделі обчислювальної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Експоненційне зростання кількості та складності «розумних» застосунків, у кіберфізичних системах суттєво утруднює процеси їх моделювання, проектування, розроблення та впровадження. Тому видається доцільним окреслити окремий методологічний підхід до формування моделей архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст». Це в свою чергу дає змогу конкретизувати процеси формування елементів міських систем такого класу та уніфікувати підходи до проектування та реалізації «розумних» міських сервісів та застосунків [60]. На основі поданого в [61] обширного огляду наукових публікацій сформовано (див. рис. 2.1) перелік моделей архітектури кіберфізичних систем «розумних міст».



Рис. 2.1. Моделі архітектури кіберфізичних систем «розумних міст» та «розумних» доменів (сформовано на основі [61])

Аналізуючи діаграму можемо зробити висновок про те, що моделі мережеских інформаційно-технологічних платформ «розумних міст» формуються на основі хмарних (CP^{Cloud}), туманних (CP^{Fog}) та периферійних (CP^{EDGE}) обчислень (див рис. 2.2), а всеохоплюючою в даному випадку є багат шарова модель архітектури.

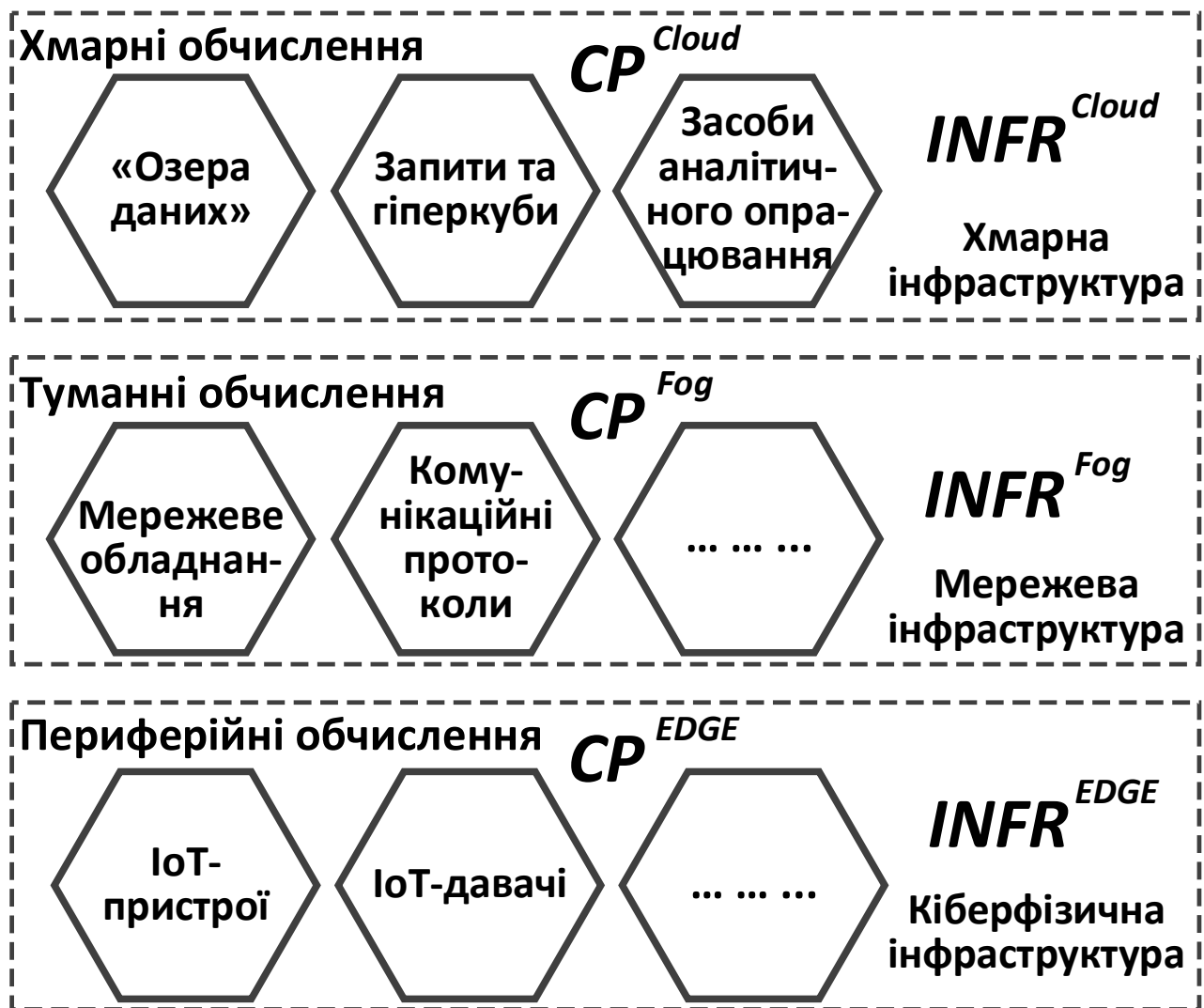


Рис. 2.2. Модель обчислювальної архітектури мережевої платформи «розумного міста»

З метою наближення процесів опрацювання даних до точок (місць) їх відбору використовуються три базові обчислювальні парадигми – хмарних (CP^{Cloud}), туманних (CP^{Fog}) та (CP^{EDGE}) периферійних обчислень. CP^{EDGE} реалізуються безпосередньо засобами «розумних» IoT-пристроїв, а CP^{Fog}

виконуються на серверах та пристроях локальних мереж [62], що суттєво розширює можливості та сфери застосування CP^{Cloud} та інфраструктур.

Термін «хмарні обчислення» відноситься до категорії ІКТ, які забезпечують доступ до даних з будь-якого місця і в будь-який час [63]. Це модель формування програмного забезпечення, інформаційно-технологічних платформ, обчислювальних інфраструктур та апаратного забезпечення, що виноситься за межі міських приміщень. Натомість для надання міським установам, організаціям або громадянам використовуються на вимогу та при потребі інформаційно-технологічні ресурси постачальників хмарних послуг. Для реалізації концепту CP^{Cloud} здебільшого використовується мережевий протокол TCP/IP, зокрема для з'єднання серверів з численними розподіленими по міських територіях IoT-пристроями та вузлами [64]. Він використовується для керування процесами розгортання та функціонування хмарних ресурсів, прискорюючи передавання даних. Проте при цьому зростають вимоги щодо їх конфіденційності та безпеки.

CP^{Fog} були запропоновані як альтернатива CP^{Cloud} для зменшення навантаження під час аналітичного опрацювання наборів та колекцій даних. Цей інформаційно-технологічний концепт ефективно використовується в «розумних містах» для різнотипових цифрових застосунків на основі кіберфізичних систем та IoT-пристроїв. CP^{Fog} можна розглядати як мережеве розширення концепту CP^{Cloud} , яке може обробляти та аналізувати дані ближче до точок та вузлів, що їх створюють. Інтеграція хмарних сервісів з мережевою інфраструктурою ($INFR^{Net}$) дає змогу CP^{Fog} виконувати аналітичні, обчислювальні, комунікаційні та накопичувальні операції поблизу периферійних IoT-пристроїв та вузлів у кіберфізичних системах «розумних міст». Ця обчислювальна парадигма зменшує затримку та підвищує пропускну здатність мережі. Проте при цьому зростають вимоги до конфіденційності та безпеки опрацьовуваних даних [65].

CP^{EDGE} покликані зменшити недоліки CP^{Cloud} . Термін «периферійні обчислення» застосовується до обладнання, яке розширює і доповнює CP^{Cloud} та

CP^{EDGE} , переносячи процеси опрацювання даних якомога ближче до IoT-пристроїв [66]. Процеси аналітичного опрацювання виконуються локальними засобами, а не надсилається до хмарних сервісів чи сховищ даних «розумного міста». Як наслідок, такий тип обчислень підвищує ефективність використання комунікаційних мереж та їх пропускну здатність. Водночас зменшується час відгуку, перевантаження мережі та енергоспоживання. Кіберфізичні системи, що здійснюють CP^{EDGE} повинні враховувати можливість компрометації периферійного пристрою і витоку даних, що там зберігаються. Конфіденційність застосунків периферійних обчислень у кіберфізичних системах «розумних міст» підвищують різні типи шифрування [67].

2.2 Розроблення моделі інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Процес проєктування традиційно вважається найважливішим етапом при розгортанні кіберфізичних систем «розумних міст» завдяки безпосередньому впливу на їх продуктивність. На даний час не існує загальноприйнятого підходу формування різнотипових цифрових застосунків на основі кіберфізичних систем. У [7] було проаналізовано обширний набір моделей інформаційно-технологічних архітектур, зокрема:

- хмарна модель архітектури;
- модель архітектури на основі сервіс-орієнтованих систем (англ. Service-Oriented Architecture, SOA);
- багаторівнева модель архітектури;
- децентралізована ієрархічна модель архітектури;
- гібридні моделі архітектури тощо.

Зазначені моделі інформаційно-технологічної архітектури здебільшого залежать:

- від системних вимог, наприклад, функціонування в режимі реального часу, стійкість, надійність, безпека, тощо;
- від особливостей галузі застосування, наприклад, «розумні будівлі», «розумне» середовище проживання, «розумне» докілья, «розумне» постачання ресурсів, «розумне» виробництво, тощо.

Багаторівневі та сервіс-орієнтовані моделі інформаційно-технологічної архітектури практично найпоширеніші у всіх класах кіберфізичних систем «розумних міст». Здебільшого вони зосереджені на аналітичному опрацюванні великих за обсягами даних і хмарних обчисленнях завдяки швидкому зростанню множини застосованих для кіберфізичних систем методів аналізу даних. Водночас, моделювання інформаційно-технологічної архітектури ускладнюється за рахунок неоднорідності даних та безпекових аспектів, спричинених внутрішньою неоднорідністю кіберфізичних систем «розумних міст», їх одночасністю та чутливістю до синхронізації.

На основі [61] можемо зробити висновок, що переважна більшість моделей інформаційно-технологічної архітектури кіберфізичних систем «розумних міст» зосереджена лише на одному окремому їх аспекті і лише деякі спрямовані на формування уніфікованої моделі архітектури для конкретного класу систем. Доцільно зазначити, що практично всі дослідження зосереджені на моделюванні кібернетичної частини інформаційно-технологічної архітектури [68], тому доцільно змоделювати узагальнену інформаційно-технологічну архітектуру мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

Сформуємо модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів (*ITM*) [69] як множину обчислювальних рівнів (*CP*), що реалізуються інфраструктурними засобами *INFR*, використовують Mesh-мережу (NET^{Mesh}) для передавання даних та озера даних (*DL*) для їх зберігання:

$$ITM = \langle CP, INFR, NET^{Mesh}, DL \rangle \quad (2.1)$$

ITM сформовано з трьох інфраструктурних рівнів (див. рис. 2.3): кіберфізичного ($INFR^{CPS}$), мережевого ($INFR^{Net}$) та хмарного ($INFR^{Cloud}$).

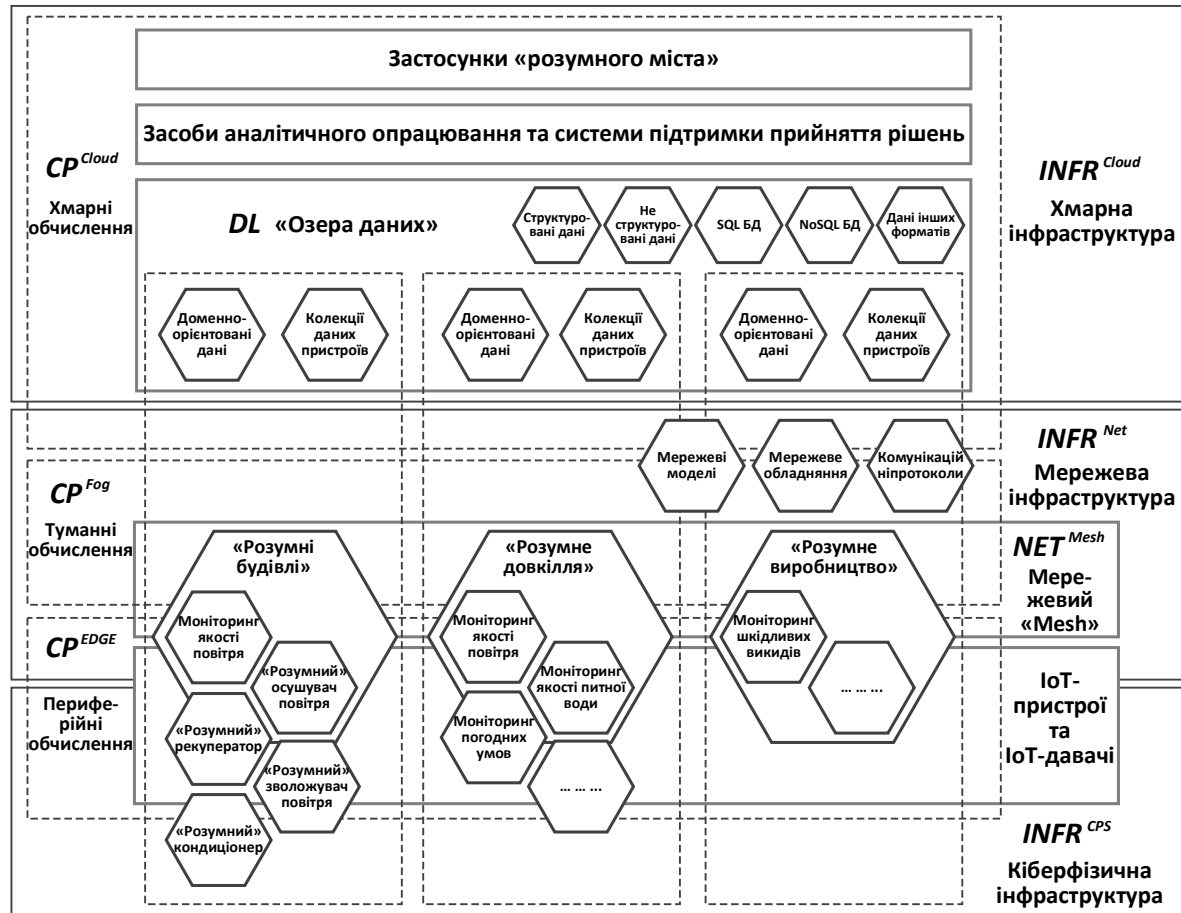


Рис. 2.3. Модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

У лівій частині діаграми виокремлено обчислювальні рівні *CP*: периферійний (CP^{EDGE}), туманний (CP^{Fog}) та хмарний (CP^{Cloud}). В основі запропонованої *ITM* знаходиться рівень кіберфізичної інфраструктури ($INFR^{CPS}$), де розташовані IoT-пристрої та IoT-давачі, що забезпечують взаємодію з фізичними компонентами та процесами.

Всі кіберфізичні системи «розумного міста» потребують формування надійної мережевої інфраструктури ($INFR^{Net}$) для ефективного обміну повідомленнями між їх елементами систем. Для цього потрібно використовувати множину різноманітних мережевих та комунікаційних технологій, оскільки вони застосовуються для різних масштабів. Наприклад, послуги «розумних будинків»

реалізуються на основі мережевих протоколів Zigbee, Wireless M-Bus або Bluetooth. Водночас, сервіси «розумного докiлля» здебільшого реалізуються з використанням мережевого протоколу WiMAX, а для «розумного виробництва» використовуються мережеві протоколи Modbus, PROFINET, OPC UA, EtherCAT, CAN, HART тощо.

Цифрові послуги «розумного міста» можуть використовувати різні мережеві та комунікаційні моделі та рішення [70]. Для формування *ITM* використано *NET^{Mesh}*. Для IoT-пристроїв та IoT-давачів з обмеженими можливостями, цей топологічний варіант побудови комп'ютерних мереж матиме ряд обмежень, проте він дає змогу налаштувати мережеві засоби для контролю туманних та периферійних обчислень, диференціюючи поведінку окремих кіберфізичних пристроїв відповідно до їх обчислювальних спроможностей.

Отримані за допомогою IoT-пристроїв та IoT-давачів дані надсилаються на хмарний рівень (*INFR^{Cloud}*) та зберігаються у відкритих *DL*, де вони проходять процеси формування метаданих (*MTD*) та аналітичного опрацювання (*AP*) для потреб рекомендаційних систем та застосунків «розумного міста».

Реалізація *ITM* є фундаментальним кроком до перетворення сучасних міст на «розумні міста майбутнього». Завдяки розширюваності, сумісності, самоузгодженості та відтворюваності, запропонована *ITM* дає змогу зменшити обсяги робіт щодо створення та керування кіберфізичними системами та підвищити ефективність процесів керування фізичними аспектами міського життя, наприклад, спостереження та регулювання параметрів «розумних будівель» та приміщень, спостереження погоди, контроль «розумної» інфраструктури.

На даний час кіберфізичні системи «розумних міст» є оптимальною інформаційно-технологічною інфраструктурою, для якої можна ефективно застосовувати принципи хмарного континууму [71] з використанням хмарних, туманних та периферійних обчислювальних засобів.

2.3 Розроблення методу формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та застосунків

Автори подають означення [72] «Інформаційно-технологічний набір – це сукупність інструментів, методів, технологій та процесів, які використовуються для створення, зберігання, обробки та поширення інформації». На основі запропонованої в попередньому параграфі моделі інформаційно-технологічної архітектури нами було запропоновано подану на рис. 2.4 структуру інформаційно-технологічного набору для формування цифрових послуг та застосунків на базі кіберфізичних систем «розумних міст».

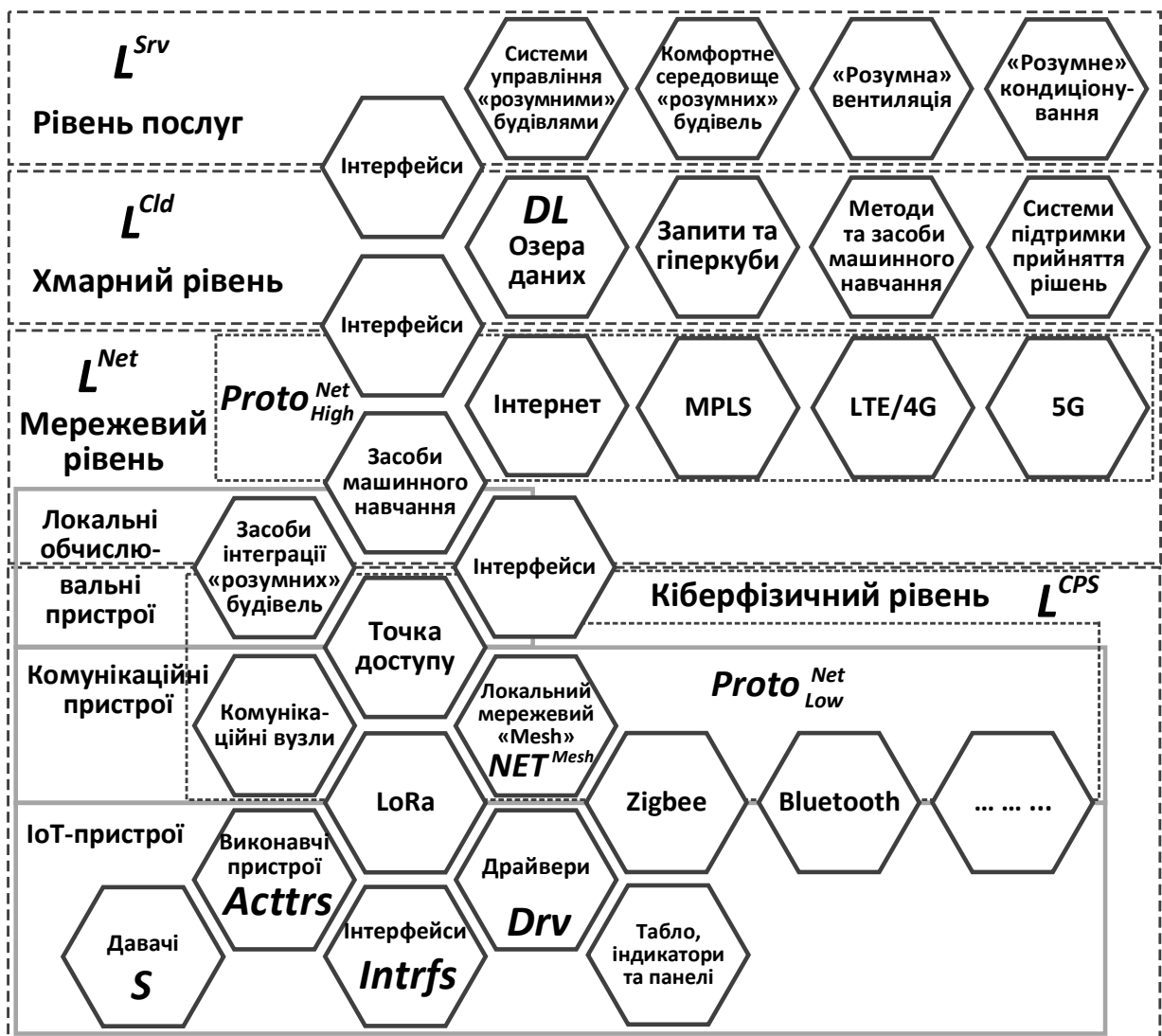


Рис. 2.4. Структура інформаційно-технологічного набору для формування цифрових послуг та застосунків на базі кіберфізичних систем «розумних міст»

Відповідно до поданої в попередньому параграфі моделі інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», інформаційно-технологічний набір містить чотири рівні: кіберфізичний (L^{CPS}), мережевий (L^{Net}), хмарний (L^{Cld}) та сервісний (L^{Srv}). Метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та застосунків на базі кіберфізичних систем «розумних міст» подамо у виді послідовних етапів:

Eman 1. Створення множини давачів (S), за допомогою яких відбувається відбір даних IoT-пристроями на L^{CPS} , що дозволяє реалізувати процес первинного інформаційно-ресурсного наповнення функціональної архітектури ІС «розумного міста».

Eman 2. Розробка множини актуаторів ($Acttrs$), що використовуються для безпосереднього впливу на фізичне середовище. Для взаємодії з інтегрованими у фізичне середовище пристроями, наприклад, рекуператорами, кондиціонерами, зволожувачами повітря, використовуються спеціальні драйвери (Drv) та інтерфейси ($Intrfs$).

Eman 3. Формування множини низькорівневих мережевих протоколів ($Proto_{Low}^{Net}$). Для передавання відібраних даних зазвичай використовуються мережеві технології, зокрема, LoRa, Bluetooth, Zigbee, RFID, тощо.

Eman 4. Створення локального NET^{Mesh} , за допомогою якого передаються дані давачів (S) та обробляються комунікаційними вузлами, які зв'язуються з локальними пристроями опрацювання даних на основі $Proto_{Low}^{Net}$. NET^{Mesh} дозволяє створити засоби інтеграції «розумних будівель», що відповідають за збір інформації для формування «розумних» цифрових послуг. При цьому локальні пристрої опрацювання даних використовують CP^{EDGE} , оскільки це переносить частину обчислювального навантаження на периферійні вузли замість їх концентрації в централізованих хмарних засобах.

Eman 5. Формування множини мережевих протоколів вищого рівня $Proto_{High}^{Net}$, що забезпечують підтримку різноманітних технологій доступу до

мережі на рівні L^{Net} . Засоби інтеграції «розумних будівель», визначають комунікаційні технології, використовують відповідні точки доступу та інтерфейси для отримання та передавання даних. Завдяки $Proto_{High}^{Net}$ на цьому рівні використовуються засоби машинного навчання для CP^{Fog} , що дає змогу перенести частину обчислювального навантаження на мережеві вузли та обладнання, в свою чергу розвантажуючи централізовані хмарні засоби.

Етап 6. Розгортання хмарної інфраструктури. На L^{Cld} забезпечується виконання функцій:

- зберігання інформації в DL ;
- формування запитів на пошук, фільтрацію та вибірку даних;
- формування гіперкубів даних (HC);
- використання методів та засобів машинного навчання для аналітичного опрацювання даних;
- реалізація систем підтримки прийняття рішень.

В контексті формування множини цифрових сервісів у «розумних містах» кожен з них може бути інтегрований у різних застосунках. Значна частина «розумних» міських застосунків для коректного функціонування потребує $INFR^{Cloud}$. Проте частина сервісів може бути реалізована з використанням обчислювальних та комунікаційних засобів нижчих рівнів. Зокрема це притаманно реалізації систем «розумної» вентиляції чи «розумного» кондиціонування повітря.

Етап 7. Розробка та впровадження множини цифрових послуг. L^{Srv} містить множину найрізноманітніших «розумних» послуг, зокрема, системи керування «розумними будівлями», формування комфортних екологічних середовищ «розумних будівель», системи «розумної» вентиляції та «розумного» кондиціонування, тощо. Класифікація таких послуг може відбуватись в залежності від широкого переліку критеріїв та параметрів. У кожному класі надаваних послуг можуть розроблятись та втілюватись різнотипові застосунки зорієнтовані на вирішення одиничних окремих, або системних комплексних задач.

Розглянемо особливості формування кіберфізичного (L^{CPS}), мережевого (L^{Net}) та хмарного (L^{Cld}) рівнів інформаційно-технологічного набору для формування цифрових послуг та застосунків на базі кіберфізичних систем «розумних міст».

2.3.1 Кіберфізичний рівень інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів «розумних міст»

На L^{CPS} фізичні пристрої та системи взаємодіють із системами управління та опрацювання даних. Реалізується процес взаємодії фізичного та цифрового світів. ІТ Інтернету речей (ІоТ) відіграє визначальну роль у процесах формування кіберфізичних систем. ІоТ-пристрої забезпечують зв'язок між фізичними елементами та цифровими системами – що і є фундаментальною основою всіх кіберфізичних систем. В кіберфізичних системах ІоТ-пристрої використовуються для:

- спостереження стану фізичних пристроїв та систем;
- контролю фізичних процесів та систем;
- аналізу та прогнозування поведінки об'єктів фізичного світу.

Поширені на даний час ІоТ-пристрої (див. рис. 2.5) можуть бути оснащені блоком мікроконтролера (MCU), блоком мікропроцесора (MPU) або програмованою користувачем вентиляційною матрицею (FPGA) [73].

Вони забезпечують отримання даних з давачів (S) температури (S^{Temp}), вологості (S^{Hdmt}), тиску (S^{Prss}), диму (S^{Smk}), газу (S^{Gas}), вогню (S^{Fire}), води (S^{Wtr}), руху (S^{Mwmt}) тощо.

За допомогою *Acttrs* ІоТ-пристрої можуть керувати двигунами (наприклад, вентиляція), приводами (наприклад, сервоприводи відкриття каналів повітрепроводів), реле (наприклад для ввімкнення однорежимного зволожувача повітря) тощо. За допомогою *Drv* та *Intrfs* ІоТ пристрої можуть взаємодіяти з обладнанням, яке містить власні мікроконтролери, наприклад це може бути у випадках використання кондиціонерів, рекуператорів та ін.

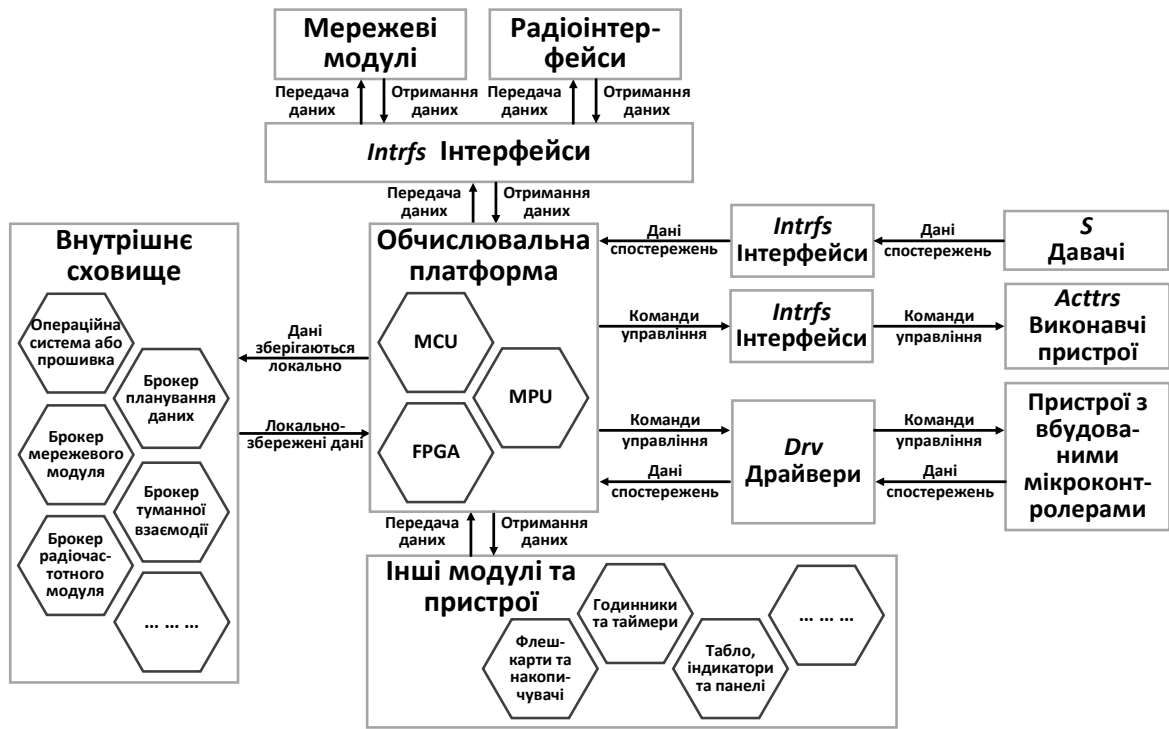


Рис. 2.5. Узагальнена структура IoT-пристроїв що використовуються у кіберфізичних системах «розумного міста»

IoT-пристроїв у кіберфізичних системах «розумного міста» можуть виконувати програми попереднього опрацювання фізичних сигналів, продукування нових даних та генерування подій.

2.3.2 Мережевий рівень інформаційно технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Надавані послуги та використовувані програмно-алгоритмічні застосунки у «розумних містах» потребують ефективного комунікаційного супроводу. Для цього доцільно формувати надійну розлогу $INFR^{Net}$, яка забезпечувала б оперативний обмін повідомленнями між «розумними» міськими системами та їх компонентами [74]. Зазвичай кожна конкретна система «розумного міста» формується на базі складної $INFR^{Net}$, яка компонується з різнотипових мережевих елементів. При створенні, розгортанні та функціонуванні обширної множини різнотипових застосунків «розумного міста», для доступу до L^{Cld} , зазвичай продукується великий за обсягами різнорідний мережевий трафік. При

цьому широко використовуються загальні мережеві архітектури і засоби, зокрема, комутатори, маршрутизатори, різнотипові канали зв'язку тощо. Кіберфізичні системи «розумних міст» формуються з використанням IoT-пристроїв та підключаються до мережі Інтернет через IP-шлюзи з використанням широкого спектру мережевих технологій та протоколів. При цьому ключовими є серверні шлюзи, які збирають, опрацьовують, перевіряють достовірність та цілісність даних отриманих з локальних мережевих вузлів і передають їх з допомогою глобальних мереж до $INFR^{Cloud}$.

З метою зменшення обчислювального навантаження на централізовані хмарні засоби на рівні L^{Net} застосовуються CP^{Fog} . При цьому використовуються туманні застосунки на основі широкого спектру алгоритмів машинного навчання [75], у тому числі:

- Алгоритми класифікації – для визначення класу або категорії об'єкта в задачах виявлення аномалій або розпізнавання образів. Наприклад, класифікація даних з датчиків стану вентиляторів, кондиціонерів та рекуператорів для виявлення потенційних проблем з метою запобігання їх відмовам.

- Алгоритми регресії – для прогнозування значення змінних в задачах прогнозування показників, спостереження яких відбувається на рівні L^{CPS} . Наприклад, прогнозування температури в приміщеннях або прогнозування потреби технічного обслуговування обладнання для вентиляції, кондиціонування та рекуперації.

- Алгоритми кластеризації – для групування об'єктів на основі їхніх схожостей в задачах виявлення груп сутностей або виявлення аномалій. Наприклад, кластеризація даних з датчиків температури і вологості для визначення зон з різними умовами обігріву та кондиціонування для оптимізації роботи цих систем та забезпечення комфортного середовища «розумних» будівель та приміщень.

- Алгоритми агрегації – для об'єднання даних з різних джерел в задачах формування єдиної точки зору на дані або виявлення тенденцій в даних.

Наприклад об'єднання даних датчиків температури, вологості та CO₂ для формування єдиної точки зору на стан повітря в приміщенні.

L^{Net} платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» формується на базі ІТ та множини протоколів (NPR), що поєднують $INFR^{Cloud}$, мережеві шлюзи, IoT-пристрої, обладнання для відбору даних, виконання дій у фізичних середовищах, спостереження та регулювання тощо. На цьому рівні вирішується обширна множина мережевих завдань (NPT) для забезпечення процесів обміну даними між різними кіберфізичними пристроями, хмарними центрами управління, послугами, застосунками тощо [76]. У ширшому розумінні зазначена мережева інформаційно-технологічна архітектура складається з інтернет-провайдерів, телекомунікаційних компаній та систем зв'язку, які забезпечують підключення кіберфізичних пристроїв до хмарних центрів управління. L^{Net} – це міст між кіберфізичним рівнем, на якому відбувається сенсорика та взаємодія з фізичним середовищем, і $INFR^{Cloud}$ «розумного міста».

2.3.3 Хмарний рівень платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Зібрані кіберфізичними системами «розумного міста» цифрові дані передаються мережевими засобами на L^{Cld} , де вони зберігаються, опрацьовуються та використовуються в системах підтримки прийняття рішень, або відтворюються на L^{Srv} . Для зменшення обчислювального навантаження частина задач первинного опрацювання даних ІТ реалізовується засобами CP^{Fog} та CP^{EDGE} на L^{Net} та L^{CPS} відповідно.

Зібрані кіберфізичними системами «розумного міста» дані містять важливі відомості та наділені значним ресурсним потенціалом для формування інноваційних пропозицій щодо надання «розумних» послуг та сервісів. Однак, опрацювання згенерованих великих обсягів даних та видобування нових знань як методологічно так і технологічно є доволі складними завданнями [77] реалізація яких вимагає застосування нових стратегій та концепцій, що виходять

за рамки усталених відомих технологічних рішень щодо зберігання та аналітичного опрацювання даних. Для реалізації ефективних процесів опрацювання експоненційно зростаючих наборів та колекцій даних запропоновано використовувати нові технологічні концепти, зокрема *DL*. *DL* – це оригінальна концептуальна платформа управління даними, що призначена для широкомасштабного об'єднання зібраних з різних гетерогенних джерел даних різної структури в неопрацьованому виді [78]. Завдяки зазначеним оригінальним властивостям *DL* зручно реалізовувати технологічні процедури аналітичного опрацювання з метою видобування корисних знань і підвищення якості та цінності результуючих наборів та колекцій даних. Для збереження цінності даних і запобігання перетворення *DL* на так звані «болота даних» та, як наслідок, втрати їхньої функціональної придатності, необхідно структурувати процеси управління метаданими (*MTD*) у відповідних кіберфізичних системах «розумного міста».

2.4 Проєктування структури IoT-пристроїв кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень

На основі узагальненої структури IoT-пристроїв для кіберфізичних систем «розумного міста» (див. рис. 2.5) сформовано структуру кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень, яка подана на рис. 2.6.

Масив давачів (S) – це множина спеціалізованих мікродавачів, які дають змогу оперативно відслідковувати концентрацію складових газів у повітрі, зокрема $\text{CO}_2 - (S^{\text{CO}_2})$, $\text{CO} - (S^{\text{CO}})$, $\text{NO}_x - (S^{\text{NO}_x})$, $\text{SO}_x - (S^{\text{SO}_x})$, $\text{O}_3 - (S^{\text{O}_3})$, та спостерігати параметри якості повітряного середовища, зокрема, вологість – (S^{Hdmt}) , температура – (S^{Temp}) та наявність у мікрочастинок пилюки – $(S^{\text{PM}_{25}})$.

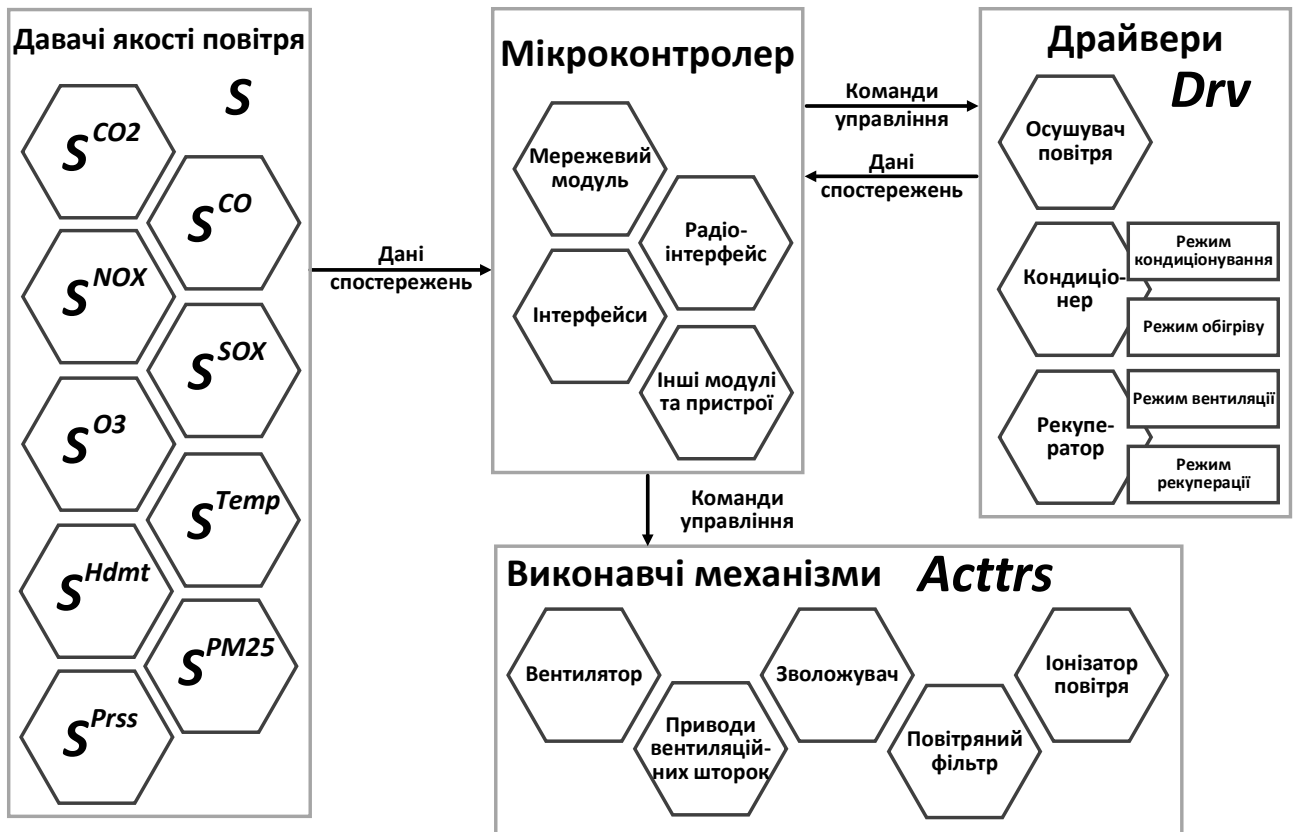


Рис. 2.6. Структура кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень

Ці давачі підключені до мікроконтролера, який фіксує значення показників якості повітря в приміщенні в режимі реального часу. За допомогою відповідних *Acttrs* можуть бути задіяні вентилятори, приводи шторок повітропроводів, зволожувачі повітря, повітряні фільтри та іонізатори. *Drv* використовуються для керування пристроями з інтегрованими власними мікроконтролерами, зокрема, дворегімовими кондиціонерами та рекуператорами, осушувачом повітря тощо.

2.5 Практична реалізація процесу спостереження показників якості повітря «розумних будівель»

Дані дослідження були започатковані в Тернопільському національному технічному університеті на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій у процесі виконання студентської наукової роботи Андрія Станька під

керівництвом доцента Миколи Митника [79] та продовжені в науково-дослідній лабораторії «Розумне місто Тернопіль» під керівництвом доцента Олександра Мацюка. На даний час науково-дослідні роботи здійснює Андрій Станько під керівництвом доцента Олексія Дуди в контексті розвитку запропонованої в науково-дослідній лабораторії «Кіберфізичних систем ТНТУ» концепції «TNTU Smart Campus» [78].

З використанням мікроконтролерів «Arduino Uno» та «Arduino Leonardo» було сформовано NET^{Mesh} для спостереження показників якості повітря серверних і навчальних приміщень Мережевої академії Cisco, що функціонують при Центрі інформаційних технологій ТНТУ, та серверного приміщення відділу Інтернет-технологій, що функціонує при Центрі електронного навчання ТНТУ. На основі узагальненої структури IoT-пристроїв для кіберфізичних систем «розумного міста» (див. рис. 2.5) і структури кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних» будівель та приміщень (див. рис. 2.6) проведено формування часткового NET^{Mesh} IoT-давачів, IoT-вузлів та IoT-шлюзів. Їх базові характеристики подано в табл. 2.1.

Табл. 2.1. Перелік характеристик множини елементів NET^{Mesh}

| Компоненти | Категорія елементів NET^{Mesh} | | | |
|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | IoT-давачі серверні приміщення | IoT-вузли «Тип А» | IoT-вузли «Тип Б» | IoT-шлюзи |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Мікроконтролер | Arduino Leonardo (ATmega32u4) | Arduino UNO R3 (CH340) | Arduino UNO R3 (CH340) | Arduino UNO R3 (CH340) |
| Модем | LoRa 433 МГц на чіпі SX1278 | LoRa 433 МГц на чіпі SX1278 | LoRa 433 МГц на чіпі SX1278 | LoRa 433 МГц на чіпі SX1278 |
| Давач | BME280 5В I2C | DHT11 | DHT22 | DHT22 |
| Інтерфейсний модуль | MAX485 UART-RS485 або немає | MAX485 UART-RS485 або немає | MAX485 UART-RS485 або немає | MAX485 UART-RS485 або немає |

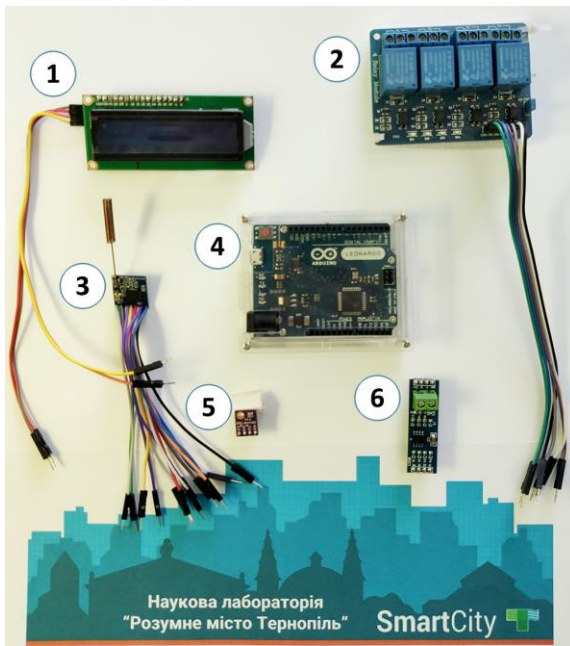
Продовження таблиці 2.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------|---|--|--|---|
| Виконавчі пристрої | 4-х каналний модуль реле 5В 10А або немає | Модуль реле 12В 10А, або 2-х каналний модуль реле 12В 10А, або немає | Модуль реле 12В 10А, або 2-х каналний модуль реле 12В 10А, або немає | немає |
| Додаткові компоненти | LCD дисплей 1602 I2C або немає | Модуль microSD карти та модуль реального часу DS1302 або немає | 7-сегментний світлодіодний індикатор 0.56", 4 розряди, загальний анод і/або перетворювач RS-485 на USB (CH340) або немає | <ul style="list-style-type: none"> • W5100 ethernet shield • Модуль microSD карти • Модуль реального часу DS1302 |

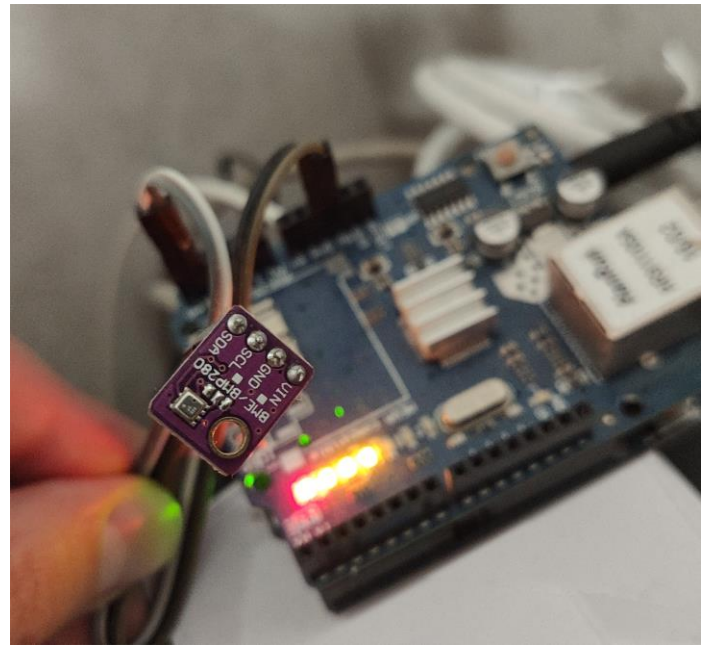
Для спостереження показників якості повітря серверних та навчальних приміщень Мережевої академії Cisco та серверного приміщення відділу Інтернет-технологій було використано IoT-давачі на базі Arduino Leonardo (ATmega32u4) з давачами «BME280 5В I2C». Деякі з цих IoT-давачів були обладнані LCD дисплеями «1602 I2C». Набір компонентів для такого IoT-давача подано на рис. 2.7(А). При цьому позначено:

1. LCD дисплей «1602 I2C».
2. Чотириканальний модуль реле «5В 10А».
3. Модем «LoRa 433 МГц» на чіпі «SX1278».
4. Мікроконтролер «Arduino Leonardo» на базі ATmega32u4.
5. Давач «BME280 5В I2C» з можливістю спостереження температури, вологості та тиску.

Для забезпечення можливості керування інтегрованими в фізичне середовище виконавчими механізмами використано 4-х каналний модуль реле «5В 10А», позначений (б). Функціонуючий пристрій зображено на рис. 2.7(Б).



(А)



(Б)

Рис. 2.7. IoT-давачі спостереження показників якості повітря приміщень «TNTU Smart Campus». (А) – набір компонентів IoT-давачів серверних приміщень. (Б) – пристрій, що функціонує з давачем «BME280».

Засобами модемів «LoRa» на базі мікросхеми «SX1278» відбувалося формування часткового NET^{Mesh} . Було обрано модеми «LoRa» з частотою передачі 433 МГц, оскільки вони забезпечують більшу дальність передачі сигналу та кращу здатність проникнення через перешкоди, зокрема, стіни серверних приміщень. Проте у високонавантажених зонах можуть виникнути додаткові складнощі через обмеження ширини смуги пропускання на цій частоті. У процесі формування NET^{Mesh} використовувались два типи IoT-вузлів: «Тип А» та «Тип Б» (див. рис.2.8).

Обидва типи вузлів реалізовано на базі Arduino UNO R3 (CH340). До окремих IoT-вузлів було підключено давачі «DHT22» або «DHT11» для спостереження за показниками якості повітря навчальних приміщень відповідно до концепції «TNTU Smart Campus». При потребі локального зберігання відібраних даних ці вузли («Тип А») обладнувалися модулем microSD-картки та модулем реального часу «DS1302».

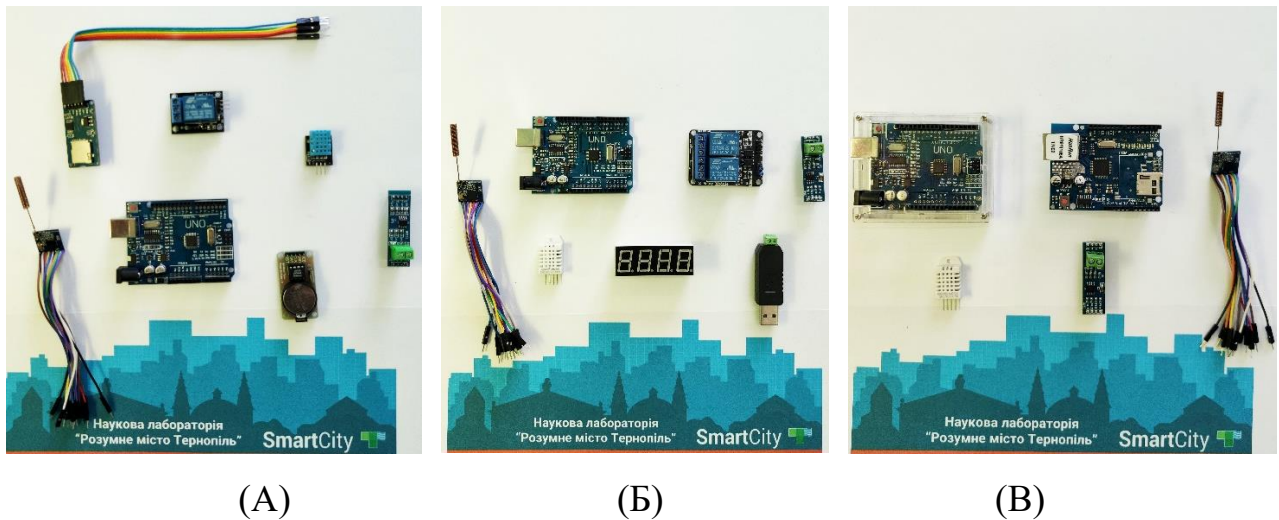


Рис. 2.8. Компоненти IoT-мережі спостереження показників якості повітря приміщень «TNTU Smart Campus». (А) – набір компонентів IoT-вузла «Тип А». (Б) – набір компонентів IoT-вузла «Тип Б». (В) – набір компонентів IoT-шлюзів

Деякі вузли «типу Б» обладнувались 7-сегментним світлодіодним індикатором щоб безпосередньо відобразити показники якості повітря в конкретному приміщенні де вони встановлені.

Для взаємодії сформованого часткового NET^{Mesh} спостереження показників якості повітря з вищими рівнями багатошарової архітектури мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» (див. рис. 2.3) задіяно IoT-шлюзи. Зображений на рис.2.8 (В) IoT-шлюз розроблено на базі Arduino UNO R3 (CH340) з платою розширення на базі Ethernet-контролера «Wiznet W5100».

Перед надсиланням даних до $INFR^{Net}$ та $INFR^{Cloud}$, IoT-шлюз може обробляти їх на місці, відповідно до парадигми CP^{EDGE} . При цьому дані зберігаються локально з використанням модуля microSD-картки. Для синхронізації процесів відбору та периферійного опрацювання даних IoT-шлюзи обладнано модулем реального часу «DS1302».

З IoT-шлюзів дані передаються на мережевий рівень та зберігаються в $DL\ INFR^{Cloud}$. На рис. 2.9 подано графіки спостереження показників якості повітря серверного приміщення відібрані IoT-пристроєм з давачем «BME280».

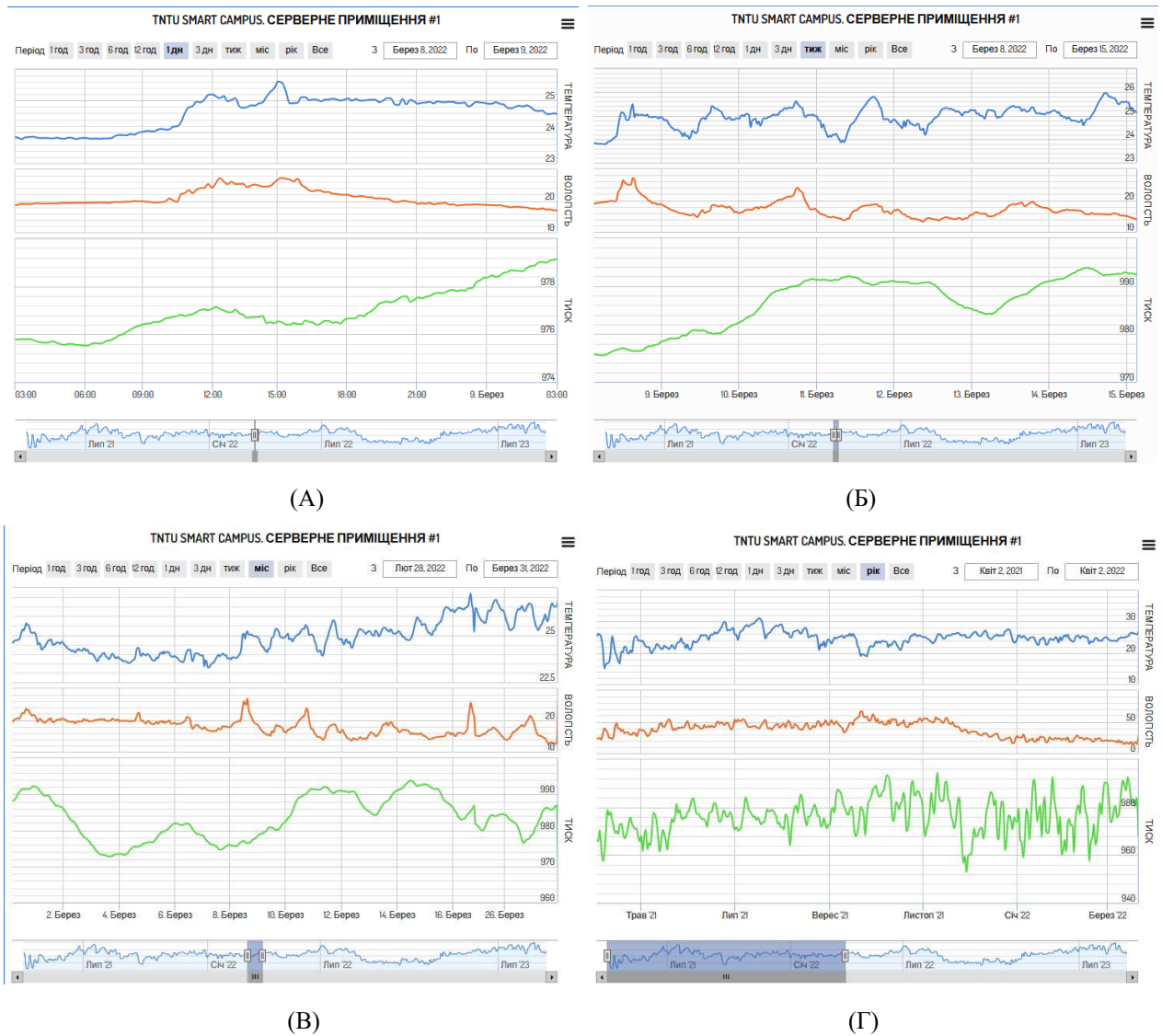


Рис. 2.9. Графіки спостереження показників якості повітря серверного приміщення відібрані IoT-пристроєм з давачем «VME280». Впродовж (А) – дня, (Б) – тижня, (В) – місяця, (Г) – року

З квітня 2021 року по даний час відбувається спостереження температури, вологості та тиску у серверних приміщеннях ТНТУ. Відповідні набори даних збережено в *DL* засобами *INFR^{cloud}*. *DL* забезпечують оперативне горизонтальне масштабування. Це дає змогу ефективно обробляти великі за обсягами набори та колекції даних, що отримані засобами кіберфізичних систем «розумних міст» в режимі реального часу. Водночас *DL* забезпечують високий рівень кооперації та співпраці між різними «розумними» доменами. Це дасть змогу комплексно використовувати та аналізувати зібрані дані для підвищення ефективності і якості «розумних» міських послуг.

2.6 Аналіз моделей надання послуг засобами туманних обчислень

CP^{Fog} в «розумних містах» інтегрують широкий спектр різнотипових ресурсів, зокрема обчислювальні засоби, IoT-пристрої для збирання даних, мережеві ресурси, системи зберігання даних, аналітичні засоби тощо. Національний інститут стандартів і технології (США) визначив три типи сервісних моделей, які можуть використовуватись для CP^{Fog} . Ці моделі схожі на моделі надання послуг на основі CP^{Cloud} [81].

У моделі надання інфраструктури як послуги (англ. Infrastructure as a Service, IaaS) обчислювальна інфраструктура надається споживачам туманних послуг для підтримки обчислювальних процесів. Це відбувається на базі інфраструктури туманних вузлів ($INFR^{FCN}$), що утворюють федеративний кластер. Здебільшого, постачальник послуг у режимі реального часу формує компоненти інфраструктури, зокрема, сервери, сховища даних, мережеве обладнання, забезпечуючи рівень віртуалізації або гіпервізора. Подібно до хмарних сервісів IaaS, послуги CP^{Fog} звільняють користувача від процесів управління та контролю ресурсів туманних вузлів. Водночас вони дають змогу користувачеві контролювати операційні системи, використовувані обсяги сховищ даних та процеси розгортання застосунків. Оскільки IaaS-застосунки часто вимагають використання різнотипових ресурсів, то можливості індивідуальних налаштувань та їх гнучкість мають ключове значення для користувачів. Розвиток технологій віртуалізації дає змогу запускати застосунки в ізольованих від базової обчислювальної інфраструктури віртуальних машинах. При цьому віртуальні машини забезпечують гнучкість задоволення індивідуальних обчислювальних потреб окремих користувачів.

Модель надання платформи як послуги (англ. Platform as a Service, PaaS) в CP^{Fog} схожа на модель надання PaaS в CP^{Cloud} . Вона дає змогу оперативно розгорнути створені або придбані застосунки на об'єднаних вузлах CP^{Fog} , що утворюють кластер. Це відбувається без зайвих фінансових витрат і складнощів, пов'язаних з придбанням і управлінням базовою $INFR^{FCN}$. До цієї $INFR$

належать обладнання для зберігання даних, $INFR^{Net}$, сервери, операційні системи. Постачальник послуг PaaS надає обширну множину засобів, зокрема мови та засоби програмування, бібліотеки та набори інформаційно-технологічних інструментів, що необхідні для повної підтримки життєвого циклу створення та використання застосунків і послуг [82]. Клієнт PaaS має повний контроль над розгорнутими застосунками та розлогі налаштування конфігурації хостингового середовища. Наприклад, PaaS від компанії «Hivcell» [83] – програмно-алгоритмічний комплекс PaaS для CP^{Fog} і CP^{EDGE} , що дає змогу користувачам оперативного встановлювати функціонально багаті розподілені фреймворки на кластер пристроїв «Hivcell». При цьому можна використовувати програмно-алгоритмічні засоби машинного навчання для CP^{EDGE} , зокрема, Kafka [84], Kubernetes [85] і Tensorflow [86]. Для навчання та тестування моделей кожен «Hivcell»-пристрій містить 256-ядерний графічний процесор (GPU) з архітектурою Compute Unified Device Architecture (CUDA).

Модель програмне забезпечення як послуга (SaaS) в CP^{Fog} подібна на SaaS в CP^{Cloud} . При цьому споживач послуги отримує доступ до пропонованих $INFR^{FCN}$ застосунків через тонкий клієнт або простий інтерфейс. Застосунки туманного провайдера працюють на групі $INFR^{FCN}$. Споживач послуг CP^{Fog} SaaS звільняється від управління і контролю базової $INFR^{FCN}$, тобто, мережевих ресурсів, серверів, операційних систем, сховищ даних та функції окремих застосунків.

«Розумні міста» використовують різні програмно-алгоритмічні засоби та інструменти в процесі діяльності та для виконання процедур аналітичного опрацювання даних. Модель надання послуг SaaS набуває актуальності для «розумних міст», оскільки надає програмні онлайн-сервіси та розлогі колекції різнотипових програмних засобів та інструментів, розгорнуті на рівні $INFR^{FCN}$. Одночасно з полегшенням віддаленого доступу до $INFR^{FCN}$ через LAN або Інтернет вона не вимагає локального встановлення спеціалізованого програмного забезпечення хмарних сервісів.

Підкреслюючи важливість аналітичного опрацювання даних у CP^{Fog} , автори [87] вважають, що дані як послуга (англ. Data as a Service, DaaS) – це четверта модель надання послуг в туманних середовищах (див. рис. 2.10).

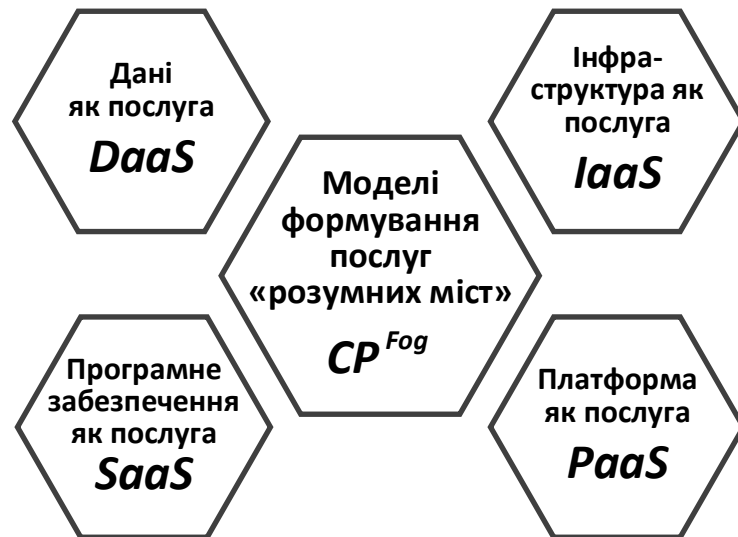


Рис. 2.10. Моделі формування послуг CP^{Fog} «розумних міст»

З появою SOA та поширенням $INFR^{Cloud}$ для управління даними і доступу до них, модель DaaS набуває популярності в наукових та виробничих колах. Для $INFR^{FCN}$ DaaS ґрунтується на тих самих концептах, що й моделі надання послуг IaaS, PaaS та SaaS. Водночас дані надаються на вимогу незалежно від їхнього місцезнаходження [88], а платформа, на якій вони зберігаються, не важлива для споживача. На рис. 2.11 показані компоненти ІС на основі DaaS, включаючи SOA як базову платформу, прийом і обробку даних, мікросервіси, додатки та інформаційні панелі візуалізації.



Рис. 2.11. Структура моделі DaaS для CP^{Fog} «розумних міст»

Зростає множина варіантів використання цієї моделі надання послуг засобами CP^{Fog} . Наприклад, автори [89] запропонували сервіси доставки даних у середовищі CP^{Fog} на основі DaaS, який дає змогу ефективно передавати інформацію між різнотиповими сховищами даних. Переваги DaaS для інформаційно-технологічних платформ «розумних міст»:

- Оперативність. Оскільки DaaS базується на SOA, то процеси доступу до критично важливих даних через $INFR^{Cloud}$ або $INFR^{FCN}$ характеризуються високою швидкістю, гнучкістю та простотою внесення змін.

- Висока якість даних. Надання «розумних» послуг DaaS відбувається на основі суворо-організованого процесу управління та обробки даних. Це гарантує споживачам доступ до високоякісних даних.

- Легкий доступ за допомогою практично будь-яких пристроїв будь-де та будь-коли.

- Уникнення прив'язки до окремого провайдера дає змогу швидко передавати дані з однієї інформаційно-технологічної платформи на іншу.

У «розумних містах» дані мають фундаментальне значення для подальшого аналізу та підтримки процесів прийняття рішень. Модель DaaS на основі $INFR^{FCN}$ забезпечує споживачам динамічний доступ до даних на вимогу та оперативно надає актуальні дані для подальшого використання застосунками «розумного міста». Подібно до інших туманних і хмарних моделей надання послуг, впровадження DaaS потребує досліджень процесів управління даними, забезпечення конфіденційності та безпеки, ефективної реалізації прав власності на дані.

2.7 Мережевий супровід процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus»

Проаналізована в попередньому параграфі модель надання послуг DaaS дає змогу користувачам отримувати доступ до даних як до послуги. NDN (англ. Named Data Networking) – це архітектура L^{Net} , яка забезпечує ефективний спосіб

обміну даними між мережевими пристроями. Таким чином, NDN є технологією, яка ефективно використовується для надання «розумних» послуг на основі моделі DaaS. Часткова мережа (англ. Partial Network) – це підмножина взаємопідключених елементів більшої мережі, в якій не всі компоненти або вузли мережі пов’язані між собою [90]. Вона корисна, коли не всі вузли або IoT-пристрої мають можливість підключатися один до одного безпосередньо та коли не всі IoT-вузли необхідні для забезпечення мережевої функціональності. Для супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» сформовано частковий NET^{Mesh} – це $INFR^{Net}$, в якій не всі пристрої одночасно підключені до множини інших пристроїв. Це забезпечує процеси передавання даних між пристроями в різних напрямках, покращуючи надійність та продуктивність мережі. Тому далі в тексті термін NET^{Mesh} у «TNTU Smart Campus» використовуватимемо для позначення часткового NET^{Mesh} . На даний час окремі дослідники [91] використовують NDN в NET^{Mesh} , оскільки вона дає змогу пристроям обмінюватися даними безпосередньо, без необхідності пошуку один одного.

NDN-мережу супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» розроблено у формі програмно-конфігурованої мережі (англ. Software-Defined Networking, SDN). Її програмно-алгоритмічні та мережеві засоби, спрямовані на гнучку та адаптивну роботу NDN в умовах нестабільної взаємодії IoT-пристроїв кіберфізичних систем «TNTU Smart Campus» по протоколу «LoRa». Основні функції NDN-мережі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus»:

- централізований моніторинг бездротового NET^{Mesh} ;
- динамічне прийняття рішень щодо вибору найкращого шляху та конфігурація NDN відповідно до обраних маршрутів.

Мережева IC складається з функціональних компонентів:

- SDN-контролер – центральний вузол управління мережею;

– мережеві вузли, які забезпечують зв'язок NDN через бездротовий *NET^{Mesh}*.

SDN-контролер є ключовим компонентом NDN-мережі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus», який забезпечує інтеграцію NDN з динамічними програмно-алгоритмічними засобами протоколу бездротової маршрутизації [92]. Для оперативного конфігурування NDN-шляхів здійснюється централізований моніторинг бездротових IoT-вузлів. При міжвузловій взаємодії (див. рис. 2.12) відбувається спостереження рівня отриманого сигналу (англ. Received Signal Strength Indication, RSSI), часу надходження сигналу, шуму та кількості помилок.

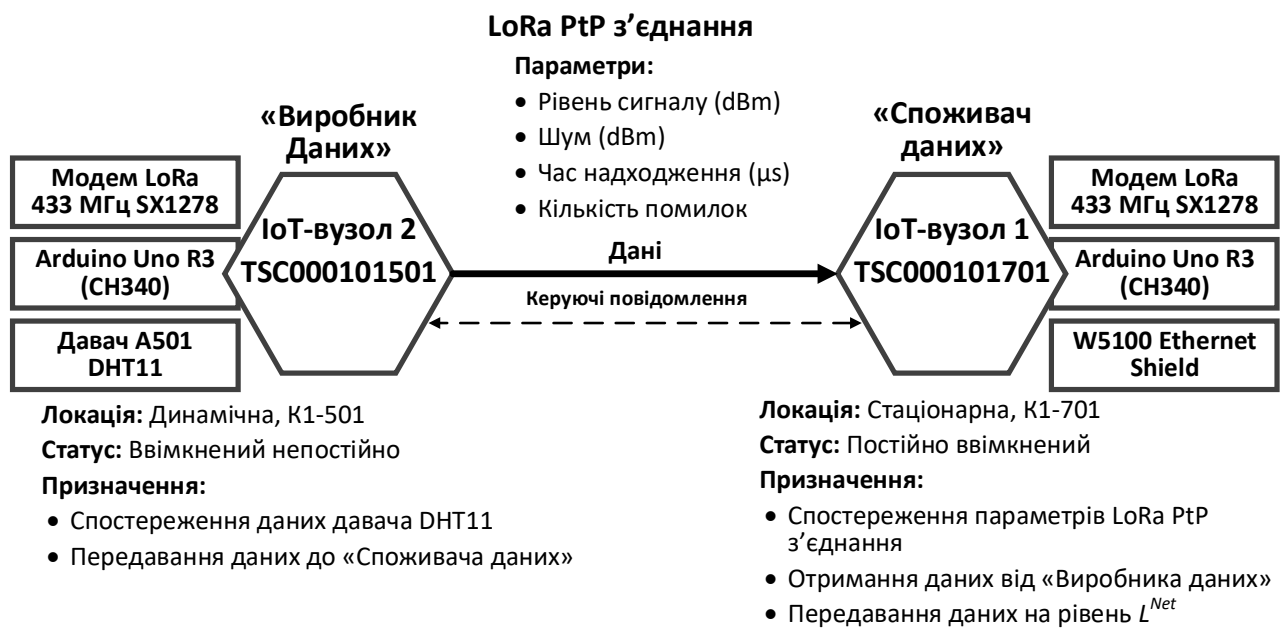


Рис. 2.12. Структура міжвузлової взаємодії

Вузли «Виробник даних» («IoT-вузол 2») та «Споживач даних» («IoT-вузол 1») розроблено на базі Arduino UNO R3 (CH340) та модемів «LoRa» з частотою передачі 433 МГц. «IoT-вузол 2» запрограмовано на передавання даних давача «DHT11». Архітектура мережі та порядок функціонування вузлів визначаються всередині коду Arduino UNO R3. Довжина пакету даних, що передавались від «IoT-вузла 2», становила 64 байти. Дані маршрутизуються від вузла-джерела до вузла-приймача на основі унікального ідентифікатора «ID»

вузла. «IoT-вузол 2» з ідентифікатором «ID=TSC000101501» збирав і об'єднував дані давача «DHT11», потім надсилав всі значення у вигляді пакетів даних до «IoT-вузла 1». Інтервал між зборами даних було задано 3 000 мс. «IoT-вузол 1» з ідентифікатором «ID=TSC000101701» було сконфігуровано як вузол-приймач. При цьому налаштовано політику прийому пакетів даних з обчисленням значення RSSI та обладнано додатковим модулем «W5100 ethernet shield», який налаштовано для передавання отриманих даних на рівень L^{Net} .

Для підвищення ефективності процесів передачі даних у «TNTU Smart Campus» реалізовано топологію комірчастої мережі NET^{Mesh} (див. рис. 2.13).

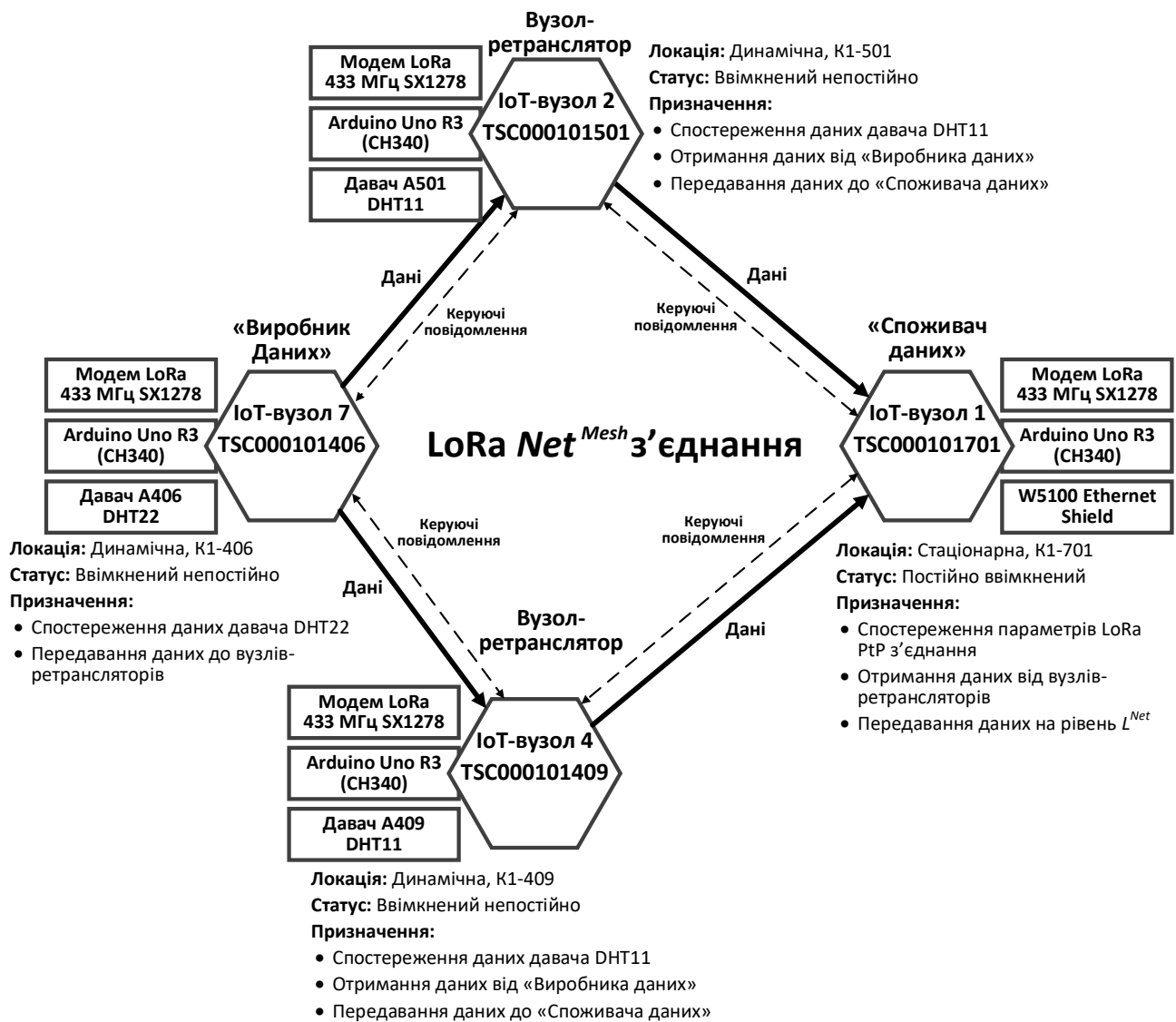


Рис. 2.13. Структура комірки NET^{Mesh}

У NET^{Mesh} мережі «LoRa» використовуються вузли «Виробник даних» («IoT-вузол 7») та «Споживач даних» («IoT-вузол 1»). «IoT-вузол 7» з ідентифікатором «ID»=«TSC000101406» збирав дані давача «DHT22» («Тип А», див. табл. 2.1). Зібрані дані вузол об'єднував та надсилав у вигляді пакетів даних до «IoT-вузла 1».

У NET^{Mesh} між «Виробником» та «Споживачем» даних використано додаткові вузли-ретранслятори, зокрема, розглянутий при міжвузловій взаємодії «IoT-вузол 2» з ідентифікатором «ID=TSC000101501» та додатковий «IoT-вузол 4» з ідентифікатором «ID=TSC000101409» («Тип Б», див. табл. 2.1).

Конфігурація, процес функціонування та ідентифікатор вузла «Споживач даних» були такими ж, як і для двовузлової мережі. Вузли-ретранслятори працюють як приймачі, отримують дані з «IoT-вузла 7» та пересилають їх до «IoT-вузла 1». До оригінального пакету даних додається ідентифікатор вузла-ретранслятора. Час інтервалу передавання даних для вузлів-ретрансляторів програмно задано 3000 мс. Для всіх вузлів комерційної мережі NET^{Mesh} у «TNTU Smart Campus» використано частоту 915 МГц.

Політика маршрутизації пакетів даних сформована на базі комерційної топології. «IoT-вузол 7» збирав дані давача «DHT22» і надсилав їх на вузли-ретранслятори («IoT-вузол 2» та «IoT-вузол 4») замість того, щоб надсилати їх безпосередньо до «IoT-вузла 1». Якщо обидва ретранслятори були ввімкнутими в межах досяжності, то найближчий ретранслятор отримував пакет першим. Ідентифікатор вузла-ретранслятора включено в пакет даних і відправлено до «IoT-вузла 1». Якщо обидва вузли ретранслятора отримують і передають пакети, то «IoT-вузол 1» їх отримає через різні інтервали часу. Завдяки тому, що пакет даних починається з ідентифікатора вузла-ретранслятора, визначається, звідки він надійшов швидше. Отримані повторно пакети даних від повільніших вузлів-ретрансляторів відхиляються та не передаються на рівень L^{Net} .

«Споживач даних» («IoT-вузол 1») виконує функції SDN-контролера (див. рис. 2.14).

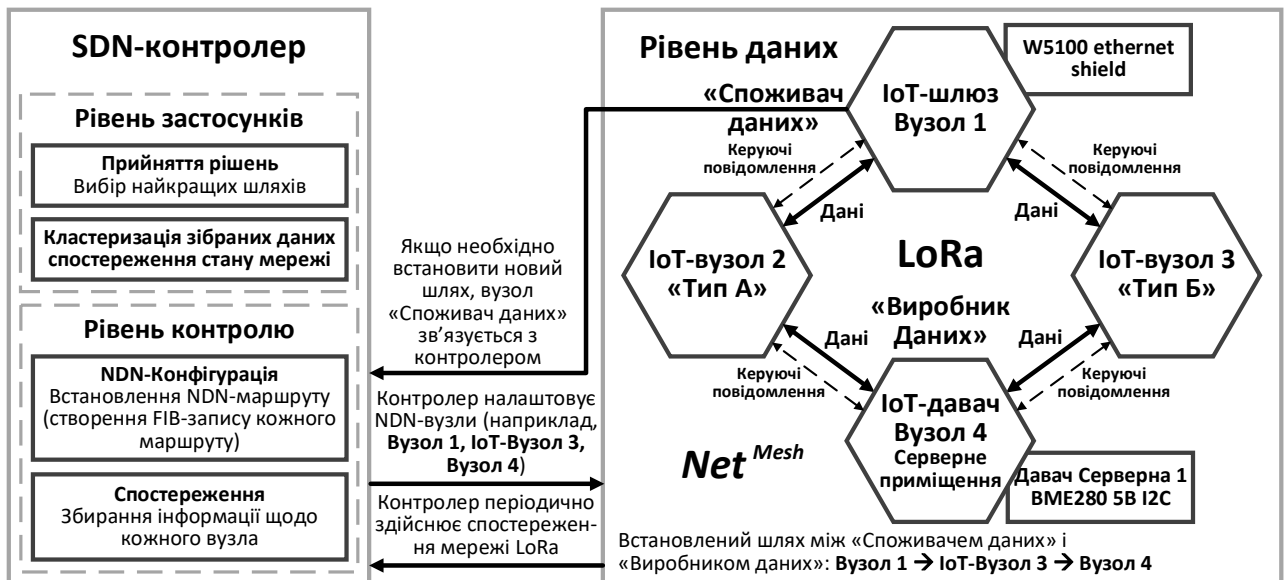


Рис. 2.14. Структура NDN-мережі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus»

Основні функції SDN-контролера NDN-мережі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища:

- збір інформації про стан мережі в режимі реального часу та оперативне виявлення мережевих змін;
- визначення найкращого маршруту для кожного запиту між NDN-споживачем та NDN-джерелом даних;
- прокладання NDN-маршрутів з визначенням меж NET^{Mesh} та формуванням таблиці маршрутизації (англ. Forwarding Information Base, FIB).

В процесі спостереження стану NET^{Mesh} здійснюється централізоване збирання даних від розподілених по території «TNTU Smart Campus» IoT-вузлів. При цьому відбувається виявлення сусідів кожного IoT-вузла та маршрутів, які проходять між ними. Витрати на маршрутизацію між каналами ґрунтуються на метриках якості протоколу маршрутизації для IoT-мереж «BATMAN» [93]. Контролер також знаходиться в NET^{Mesh} і взаємодіє з вузлами мережі через протокол LoRa. Він управляє запитами на дані щодо спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» за допомогою реактивної операції, виконуючи:

- оновлення інформації щодо «Споживача даних» для кожного нового пакету інтересів;
- визначення найкращого шляху бездротової маршрутизації між «Споживачем» та «Виробником» даних;
- формування обраного NDN-маршруту;
- ініціалізацію відправки конкретного пакету інтересів до «Споживача даних».

ІС зберігає метадані (*MTD*) щодо процесів функціонування NDN-мережі та процесів спостереження і регулювання показників якості повітряного середовища в «TNTU Smart Campus». Зокрема, SDN-контролер пов'язує префікс даних з відповідними *MTD* щодо використаних NDN-маршрутів та інформації щодо свіжості даних, щоб визначити, чи вони кешовані. Контролер знаходиться в бездротовій комірчастій IoT-мережі та зв'язується з IoT-вузлами. *INFR^{Net} NET^{Mesh}* складається з взаємопов'язаних бездротових вузлів «Типу А» та «Типу Б» (див. параграф 2.5), які взаємодіють через бездротові канали по протоколу LoRa. Функції NDN та *NET^{Mesh}* є незалежними та інтегровані з SDN-контролером. При цьому контролер відстежує роботу часткового *NET^{Mesh}* для налаштування NDN. У NDN-мережі споживачі надсилають у мережу пакет зацікавленості, щоб отримати відповідний пакет даних, який містить запитуваний вміст та *MTD*. Для забезпечення перебігу процесів регулювання показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus» до NDN-мережі програмно алгоритмічні комплекси-споживачі надсилають пакети зацікавленості, що відповідають ввімкненню, вимкненню чи зміні режимів роботи кондиціонерів, вентиляторів та рекуператорів повітря. Кожен IoT-вузол використовує три інформаційні компоненти: сховище вмісту, таблицю відкладених інтересів (англ. Pending Interest Table, PIT) та FIB. Для забезпечення ефективної роботи NDN-мережі супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus» запропоновано реактивну та проактивну тактику вибору шляхів між «Виробником» та «Споживачем» даних.

При реактивній тактиці вибору NDN-шляху відбувається його узгодження з збереженими даними про маршрутизацію NET^{Mesh} . При цьому кожен IoT-вузол вибирає найкращий маршрут для кожного пункту призначення з множини своїх сусідів, яка надсилається SDN-контролером під час динамічної конфігурації NET^{Mesh} . Наприклад (див. рис. 2.14), «Споживач даних» («IoT-шлюз, Вузол 1») має намір отримати дані з MTD -префіксом «Давач Серверна 1». Він надсилає до SDN-контролера запит з проханням повідомити його про конкретні дані. Якщо дані не кешовані в NET^{Mesh} , то SDN-контролер знаходить найкращий шлях до «Виробника даних» («IoT-давач, Вузол 4»). Наприклад, «Вузол 1 \rightarrow IoT-Вузол 3 \rightarrow Вузол 4» і встановлює NDN-маршрути. На наступному етапі, SDN-контролер ініціює «Споживача даних» для передачі пакета зацікавленості по сформованому шляху.

Проактивна тактика вибору NDN-шляхів базується на зібраній вузлами інформації. При цьому кожен IoT-вузол мережі періодично збирає інформацію про своїх сусідів, зокрема, щодо RSSI та часу затримки. Зібрані дані спостереження мережі LoRa передаються до SDN-контролера через керуючий канал. SDN-контролер виконує кластеризацію зібраних даних (див. рис. 2.14) та обирає найкращі шляхи, відповідно налаштовуючи NDN-мережу NET^{Mesh} . У порівнянні з реактивною тактикою, SDN-контролер перенаправляє всі запити даних на обраний шлях, поки не буде здійснено чергове оцінювання найкращий шляхів. Тому вважаємо цю тактику проактивною, адже вона базується на частковій кластеризації та вимірюванні відстані на основі подібності зібраних IoT-вузлами даних. На рис. 2.15 проілюстровано процес вибору NDN-шляху відповідно до результатів кластеризації.

Розглянемо чотири кластери IoT-вузлів, відсортовані від найкращого до найгіршого на основі середнього значення в межах кластера. Товщина та довжина штриха вказує на кластер, до якого належить кожне з'єднання, тобто найтоншими лініями позначено кластери з найгіршими характеристиками, а суцільними лініями позначено кластер з найкращими параметрами відповідно.

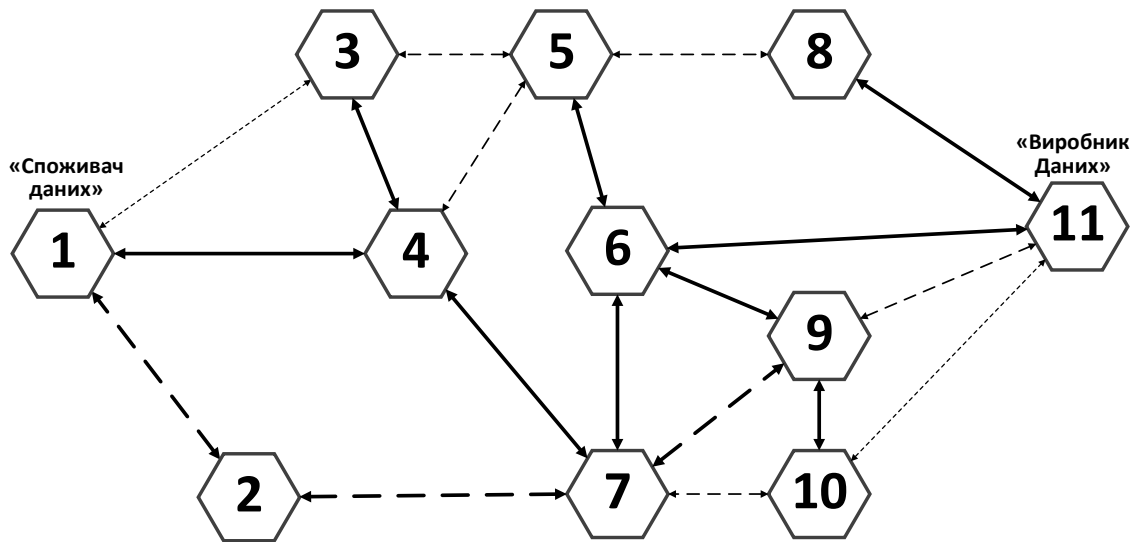


Рис. 2.15. Вибір NDN-шляху з використанням проактивної тактики

При цьому кожен шлях характеризується найгіршою ланкою, тобто найгірший шлях містить принаймні одну ланку, що належить до найгіршого кластера. Наприклад, на рис. 2.15 найкращий шлях пролягає через вершини 1-4-7-6-11, оскільки його ланки кластеризовані як найкращі, тобто позначені суцільними лініями. Процес кластеризації сформуємо на основі оцінки подібності між часовими рядами згідно алгоритму динамічного викривлення часу (англ. Dynamic Time Warping, DTW) [94]. Це дасть змогу покращити ефективність кластеризації, забезпечуючи надійнішу та менш чутливу до локальних зсувів часових рядів оцінку подібності завдяки нелінійній та незалежній від часу природі DTW, порівняно з типовими мірами, наприклад, евклідовою відстанню.

2.8 Висновки до розділу 2

1. Вперше сформовано модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» з використанням кіберфізичного, мережевого та хмарного рівнів, які дають можливість інтегрувати парадигми периферійних, туманних та хмарних обчислень. Це покращує розподіл обчислювального навантаження інформаційно-технологічної платформи між фінансово витратними хмарними

послугами, мережевим обладнанням та малопотужними і дешевими IoT-пристроями. Практична реалізація запропонованої моделі інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів має позитивний вплив на процеси забезпечення розширюваності, сумісності, самоузгодженості та відтворюваності інноваційних цифрових послуг та сервісів на базі міських кіберфізичних систем.

2. На основі запропонованої моделі інформаційно-технологічної архітектури розроблено структуру інформаційно-технологічного набору для формування послуг та застосунків. Це дало змогу розробити метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та сервісів на базі кіберфізичних систем «розумних міст» та забезпечило узгодження процесів проектування, розроблення та розгортання «розумних» послуг та застосунків.

3. Розроблено структуру кіберфізичних систем супроводу процесів спостереження та регулювання повітряного середовища «розумних будівель» та приміщень. Це дало можливість практично реалізувати процес спостереження показників якості повітря серверних і навчальних приміщень Мережевої академії Cisco, що функціонують при Центрі інформаційних технологій ТНТУ, та серверного приміщення відділу Інтернет-технологій, що функціонує при Центрі електронного навчання ТНТУ.

4. На основі проведеного аналізу моделей надання послуг засобами туманних обчислень розроблено структурну модель DaaS для мережевого рівня інформаційно-технологічної платформи супроводу кіберфізичних об'єктів «розумних міст», що дало змогу сформувати NDN-мережу та забезпечити мережевий супровід процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» з використанням Mesh-мережі IoT-пристроїв засобами протоколу LoRa 433 МГц.

РОЗДІЛ 3. КОНЦЕПТУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБІВ ЗБЕРІГАННЯ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ДАНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»

3.1 Системи зберігання та управління великими обсягами даних «розумних міст»

Впродовж декількох останніх років інформаційно-технологічний концепт «озера даних» (*DL*) набуває популярності серед фахівців багатого переліку наукових та промислових галузей. Зокрема, для академічних кіл в царині «розумних міст» *DL* є перспективним одночасним вирішенням обширного ряду задач управління даними. Подібно до сховищ даних (*DW*) [95], *DL* мають мету інтегрувати різноманітні та різнотипові дані з різних за своєю природою джерел в єдину, однорідну ІС управління даними. Це дає змогу власникам міських наборів та колекцій даних подолати обмеження, що виникають через розрізненість та ізольованість окремих спеціалізованих *DW* та уніфікувати підходи до формування процесів управління даними.

DW характеризуються фіксованими схемами процесів супроводу даних, наприклад, так званий підхід «схема на записі» (англ. Schema on Write, SoW), що використовується для завантаження даних у сховища. Процеси «Видобування – Перетворення – Завантаження» (англ. Extract-Transform-Load, ETL) необхідні для видобування необроблених наборів та колекцій даних з їхніх джерел і перетворення, наприклад, в процесі очищення або імплементації у попередньо визначену схему даних з метою подальшого завантаження у *DW* [96]. При використанні ETL-процесів виникає ряд відомих складнощів [97]. Основний недолік ETL – це втрата інформації в процесі трансформації даних для вписування у фіксовану схему *DW*. Щоб запобігти таким втратам інформації, що обмежує повторне використання наборів та колекцій даних для подальших розлогіших досліджень, Джеймс Діксон [98] запропонував концепт *DL*. На відміну від підходу, що використовується при формування *DW* зі схемою на

записі, у *DL* дані зберігаються в оригінальній формі, а схема даних впроваджується лише тоді, коли наступний процес здійснює процедури їх зчитування та опрацювання. Даний підхід називається «схема на зчитуванні» (англ. Schema on Read, SoR).

При появі *DL* була визнана потреба недорогих і високомасштабованих *DW* з можливістю їх інтеграції у високопродуктивні розпаралелені обчислення. Це призвело до формування тісного зв'язку між *DL* та Apache Hadoop [99]. У певний момент часу цей підхід був обґрунтовано оскаржений великими провайдерами хмарних послуг «Amazon» та «Microsoft» з їхніми власними інформаційно-технологічними *DL*-платформами «AWS Lake Formation» [100] та «Azure Data Lake» [101]. Серед обширного переліку інновацій ці програмні продукти впровадили розділення сховища та обчислень і запропонували споживачам модель оплати за фактом використання хмарних ресурсів.

Хоча *DL* реалізує семантику SoR, певні процедури моделювання обов'язкові для забезпечення належної якості, зрозумілості та інтеграції даних [102]. Зазвичай такі процедури моделювання даних призводять до формування концептуальної моделі, яка покликана сприяти частим змінам *DL* і тому не нав'язує фіксовану схему [99]. Необхідні *MTD* видобуваються з самих даних, наприклад, шляхом зчитування та опрацювання заголовків даних. *MTD* можуть бути додатково вилучені безпосередньо з джерела даних разом з вихідними необробленими наборами та колекціями даних. Водночас, дані у *DL* можуть постійно збагачуватися *MTD* протягом їхнього життєвого циклу, наприклад, в процесі виявлення кореляцій та відношень між різними наборами та колекціями даних [103] або в процесі перевірки інформації щодо походження даних.

На даний час опубліковано обширний перелік наукових та популярних праць про використання *DL* у різних господарських галузях [100] для управління великими за обсягом та швидкоплинними наборами, колекціями та потоками даних [104]. Водночас *DL* мають значний потенціал для впровадження у різних міських доменах. Це також уможливорює інноваційні підходи до аналітичного опрацювання однорідних та неоднорідних наборів та колекцій міських даних, на

відміну від розподілених та ізольованих *DW*. Ще одна важлива перевага *DL* – загальне управління даними можна впровадити на всеохоплюючому рівні, наприклад, для супроводу процесів спостереження та регулювання показників внутрішнього середовища «розумних будівель», щоб гарантувати наперед визначений рівень якості даних. При масштабуванні використання *DL* в рамках «TNTU Smart Campus», як центральної системи управління дослідницькими даними, розширюватиметься множина варіантів використання та кола користувачів, які мають різноманітні набори інтересів, вмій та навичок.

3.2 Моделі «архітектури озер даних» для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Термін модель «архітектури озера даних» (*DLA*) був визначений [105] для позначення комплексного підходу до формування *DL*, включно з поданими на рис. 3.1 компонентами.

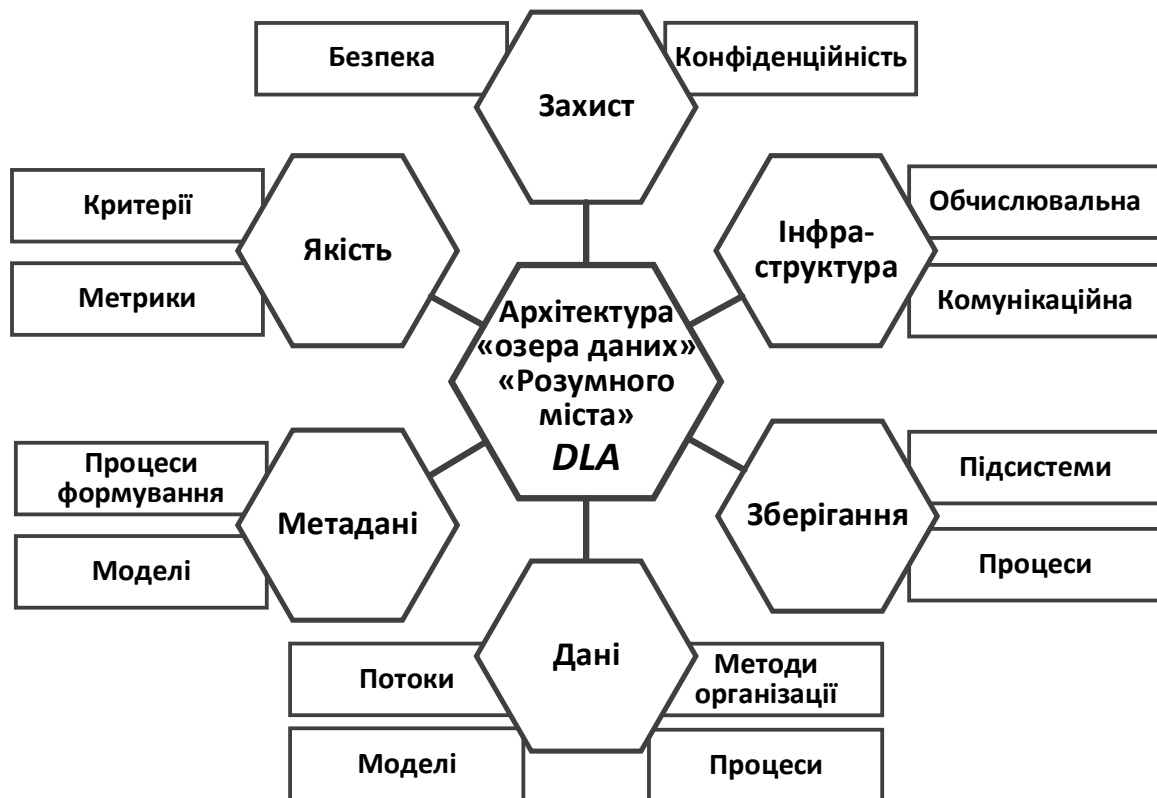


Рис. 3.1. Модель «архітектури озер даних» «розумних міст»

У структурі моделі *DLA* лише безпека, конфіденційність та якість даних є суто концептуальними. Решта аспектів містять концептуальний і фізичний виміри. Вони специфічні для кожної конкретної інформаційно-технологічної платформи. Як зазначають автори [106] в узагальненому виді, *DL*, як правило, має і фізичну і логічну організацію. У цій роботі ми використовуємо термін «архітектура озера даних» (*DLA*) лише в контексті концептуального проектування та організації *DL* на найвищих рівнях абстракції. Це забезпечує співставність проведених нами досліджень у порівнянні з опублікованою на даний час науковою та популярною у фахових колах літературою.

Модель *DL* «архітектура зон» (DLA^{ZN}). Концепція поділу *DL* на різнорідні та різнотипові зони виникає через необхідність автоматизованого запуску та виконання стандартизованих конвеєрів попереднього опрацювання даних. Та, як наслідок, потреби організувати попередньо оброблені дані та забезпечувати їхню доступність для наступних етапів обробки, наприклад, аналітичне онлайн-опрацювання (англ. Online Analytical Processing, OLAP) чи звітність.

Розподіл даних по різних *DL*-зонах здійснюється на основі поточного чи передбачуваного ступеня опрацювання або використання. Щоб полегшити повторення процесів або використання нових аналітичних методів формується *DL*-зона необроблених даних. На подальших етапах життєвого циклу дані збираються та зберігаються у спеціальних *DL*-зонах, що формуються відповідним чином [107].

Модель *DL* «лямбда-архітектура» (DLA^{Lambda}) була запропонована для розширення функціональних можливостей *DL* обробляти потоки даних у наближеному до реального часу режимі, замість повного поглинання «гарячих» даних та пакетного опрацювання з певною затримкою [108]. Проте зберігання всіх необроблених наборів та колекцій даних в їхньому звичайному форматі є ключовою концепцією *DL*. Для вирішення цього протиріччя, модель DLA^{Lambda} [109] реалізує два паралельні потоки опрацювання.

У високошвидкісному потоці дані опрацьовуються в режимі наближеному до реального часу. Пакутий потік завантажує дані в *DL* і виконує заздалегідь визначені операції опрацювання. У [110] описано використання моделі DLA^{Lambda} при формуванні *DL* для аналізу даних «розумних» комунікаційних мереж з використанням CP^{Cloud} Google як IaaS. Дані збираються на спеціальному рівні, реалізованому за допомогою Apache Flume. Потім дані надсилаються до ядра *DL* – кластера Hadoop, який зберігає дані засобами HDFS та обчислює довільні, наперед визначені функції за допомогою MapReduce. Швидкісний рівень обчислення та обробки даних реалізовано за допомогою Apache Spark [111].

Автори [112] порівняли реалізації моделі DLA^{Lambda} з використанням SaaS та акцентом на безсерверній доставці даних від трьох різних провайдерів публічних хмарних послуг:

- Google Cloud Platform.
- Microsoft Azure.
- Amazon Web Services (AWS) Cloud.

В AWS швидкісний рівень моделі DLA^{Lambda} оперативно приймає дані Kinesis-потоків та опрацьовує засобами Kinesis Analytics та AWS Lambda. Сервісний рівень створено на основі програмного забезпечення Athena, яке зчитує дані з S3-Result-Bucket та S3-Speed-Bucket. У DLA^{Lambda} Google Cloud дані надходять від «Pub/Sub» до реалізованих на основі Dataflow швидкісного та пакетного шарів. Рівень обслуговування використовує BigQuery. У Microsoft Azure дані отримуються та опрацьовуються засобами EventHub. Швидкісний шар сформовано засобами Stream Analytics. Він спрямовує дані безпосередньо до SaaS-рівня на основі Cosmos DB.

Описана в [113] модель *DL* архітектури «Lakehouse» DLA^{LKH} є наслідком узагальненого спостереження, що необроблені дані з *DL* використовуються як вхідні дані для ETL-процесу наповнення *DW*. Піонерами уніфікованого налаштування стали *DL* Delta [114], які забезпечують ACID-транзакції

(англ. Atomicity – атомарність, Consistency – узгодженість, Isolation – ізольованість та Durability – довговічність) в хмарному об’єктному сховищі таблиць. До яких можна отримати доступ з різних систем, зокрема, Spark, Hive, Presto [115]. Крім того DLA^{LKH} компонуєть прямий доступ до DW з традиційною семантикою БД, або відкритими файловими форматами на кшталт Apache Parquet [116] чи ORC. Це відбувається завдяки шару MTD над хмарним DW .

Цифрова об’єктно-орієнтована модель архітектури FAIR (DLA^{FAIR}) запропонована Нольте та Відером [117]. При цьому не проводиться зонування DL , а здійснюється пласке, уніфіковане та однорідне управління накопиченими наборами та колекціями даних з позиції користувача. Це уможлиблює сегрегацію даних з різними родоводами обробки. Модель DLA^{FAIR} дотримується чотирьох основних принципів:

- Легкість пошуку та ідентифікації даних (англ. Findability).
- Доступність даних для авторизованих користувачів (англ. Accessibility).
- Сумісність даних з іншими ІС, програмно-алгоритмічними засобами та інструментами (англ. Interoperability).
- Доступність даних для повторного використання та різних цілей (англ. Reuse).

Цифрові об’єкти моделі DLA^{FAIR} , що інкапсулюють відповідні дані, мають спеціалізований тип для розмежування між різними точками даних. Це призводить до набагато дрібнозернистішого поділу DL порівняно з моделлю DLA^{ZN} . Проте високосегреговане DL не спричиняє кореляційного збільшення складності системи але збільшує адміністративні зусилля, оскільки потрібно впроваджувати та супроводжувати тільки необхідну підмножину типів цифрових FAIR-об’єктів. Завдяки успадкуванню вони підтримують повторне використовуючи існуючих сутностей DLA^{FAIR} . Оскільки всі компоненти моделі DLA^{FAIR} є цифровими FAIR-об’єктами, то користувацький інтерфейс повністю однорідний і функціонує завдяки виклику попередньо визначених функцій.

Класифікація, функціональність та орієнтованість на «зрілість» слугують для вдосконалення класифікації моделей *DLA* та більш модульного порівняння існуючих програмно алгоритмічних рішень для *DL*. Це дає змогу ефективніше планувати життєвий цикл даних та допомагає узгодити індивідуальну функціональність архітектурних компонентів *DL*. У межах функціональної архітектурної класифікації (DLA^{FN}) *DL* аналізується відповідно до виконуваних над даними операцій під час їх проходження життєвого циклу. Підсумуємо узагальнені результати проведеного аналізу подавши якісне порівняння моделей *DLA* в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Порівняльна характеристика популярних моделей *DLA*

| <i>DLA</i> | Загальність | Масштабованість | Простота розгортання | Складність адміністрування |
|----------------|-------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| DLA^{ZN} | Висока | Висока | Низька | Низька |
| DLA^{Lambda} | Середня | Висока | Висока | Висока |
| DLA^{LKH} | Середня | Висока | Висока | Висока |
| DLA^{FAIR} | Висока | Висока | Висока | Середня |

Розглянемо проаналізовані моделі *DLA* в контексті їх загальної еволюції. У перші роки після виникнення *DL* у переважній більшості реалізовувалися на основі кластерів *Nadoop* та пов'язаного з ними стеку ІКТ [99]. На даний час відбувся активний розвиток *DL* в напрямку більш абстрактних систем. Перший рівень абстракції було запропоновано у функціональних моделях *DLA*, які можуть бути спроектовані на DLA^{ZN} завдяки прив'язуванню певного функціоналу по відповідній *DL*-зоні. Цей архітектурний концепт була значно розвинуто в моделі DLA^{FAIR} , де користувачі не взаємодіють безпосередньо з реальною системою, а лише ініціюють виконання наперед визначених функцій засобами REST API.

Концепція організації даних в *DL* на основі родоводу є фундаментальною частиною нових моделей *DLA*, в тому числі DLA^{FAIR} , *DLA* заснованій на зрілості та DLA^{Lambda} , оскільки вона надає користувачам лише обслуговуючий шар.

В *DL* зберігається тенденція відокремлення обчислювальних процесів від процесів зберігання даних. Проте, невинне збільшення обсягів та швидкоплинності наборів та колекцій даних спричиняє зростання вимог до продуктивності процесів зберігання даних. Це формує потребу розроблення нових підходів до процесів зберігання та опрацювання даних «розумних міст», наприклад розвиток *DL* у «Data LakeHouse» [118].

DL – це централізоване *DW*, яке може зберігати дані об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» в необробленому, незміненому і неформатованому вигляді. Реалізоване засобами *INFR^{cloud}*, *DL* може бути комплексним джерелом інформації для *L^{Clid}* і *L^{Srv}* та. *DL* для зберігання інформаційних сутностей об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» має наступні особливості:

1. Збирання та зберігання даних з різних джерел, інтегрованих в *INFR^{CPS}* «розумних міст». Зокрема, *DL* можуть збирати та зберігати дані з різних давачів якості повітряного середовища «розумних» будівель та приміщень.

2. Аналіз даних. *DL* дають змогу аналізувати дані для оперативного та своєчасного виявлення тенденцій, аномалій та інших важливих особливостей «розумних» міських доменів. Це може бути використано для покращення показників ефективності та підвищення продуктивності кіберфізичних систем «розумного міста».

3. Багатовимірне подання *MTD* для збережених в *DL* наборів та колекцій даних з метою інформаційно-технологічного супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних» будівель.

4. Автоматизація завдань. *DL* можуть бути використані для автоматизації завдань, таких як конфігурування кіберфізичних систем та мережевого обладнання «розумних міст», розгортання нових функцій, відстеження продуктивності, керування контролерами пристроїв регулювання показників якості повітряного середовища «розумних» будівель. Це може допомогти зменшити ручну працю та покращити точність.

Узагальнене подання *DL* для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» має наступні особливості:

– *Збір та інтеграція даних.* DL для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» включає в себе програмно-алгоритмічні та інформаційно-технологічні механізми для збору та інтеграції даних з різних джерел, зокрема, сенсорів для спостереження показників якості повітряного середовища, систем рекуперації та вентиляції, обігріву та кондиціонування повітря, та ін.

– *Складові дані.* У DL включаються дані про різномірні та різнотипові параметри об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», наприклад, показники якості повітря у приміщеннях «TNTU Smart Campus», такі як рівень CO₂, температура, вологість, концентрація пилюки чи шкідливих речовин і т.д.

– *Семантичне маркування.* Дані семантично маркуються відповідними *MTD*, що забезпечує зрозумілість наборів та колекцій і полегшує їх аналітичне опрацювання. Зокрема, кожен тип інтегрованих у фізичне середовище давачів має відповідний опис ключових характеристик та одиниць вимірювання, а кожен тип *Acttrs* має окремі описи ключових параметрів.

– *Масштабованість.* DL оперативно масштабуються для обробки великих за обсягом та швидкоплинних наборів даних, оскільки супровід об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», зокрема, вимірювання показників якості повітря у навчальних та спеціалізованих приміщеннях «TNTU Smart Campus», відбувається в режимі реального часу та містить велику кількість даних.

– *Зберігання.* Дані зберігаються в DL у неструктурованих форматах. За рахунок цього зберігається вся доступна інформація у первинній формі та забезпечується гнучкість процесів обробки даних.

– *Аналітика та візуалізація.* DL для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» підтримують інструменти аналізу та візуалізації даних, що дає змогу оперативно виявляти залежності та шаблони зміни інформаційних сутностей щодо об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» та сприяє прийняттю рішень щодо реагування на них.

– *Безпека та керування доступом.* Забезпечення безпеки даних та контролю доступу до них є важливою складовою, особливо при обробці даних

важливих для здоров'я та безпеки жителів та гостей міста, зокрема, студентів та викладачів у «TNTU Smart Campus» в умовах теперішньої війни.

– *Інтеграція з іншими системами.* *DL* можуть інтегруватись з іншими системами «розумних міст», такими як системи керування енергоефективністю, системи безпеки, та інші, для комплексного керування середовищем та оперативного реагування на події.

– *Реактивність та автоматизація.* *DL* підключені до систем кіберфізичних систем «розумних міст» і можуть автоматично запускати *Acttrs*, наприклад, системи вентиляції та кондиціонування, або інформувати служби про необхідність їх планового чи оперативного обслуговування або ремонту.

– *Довгострокове зберігання та архівація.* Дані про супровід об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» зберігаються впродовж тривалого періоду часу для комплексного аналізу динаміки процесів та виявлення довгострокових тенденцій.

Формалізований опис моделі *DLA* супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» подається у вигляді:

$$DL = \langle \begin{matrix} INFR, RIN, NET, REN, DNC, RNC, MTD, RMD, \\ EVNT, FCT, AP, SPDS \end{matrix} \rangle, \quad (3.1)$$

де *INFR* – множина інформаційно-технологічних інфраструктур що використовуються для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», $INFR = \langle INFR^{CPS}, INFR^{Net}, INFR^{Cloud}, INFR^{FCN} \rangle$;

RIN – множина відношень, їх схем і обмежень, які містять відомості щодо взаємодії між інфраструктурними рівнями інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»;

NET – множина комунікаційних мереж, що використовуються для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», $NET = \langle NET^{Architectures}, NET^{Protocols}, NET^{Mesh}, \dots \rangle$;

REN – множина відношень, їх схем і обмежень, які містять відомості щодо мережевої взаємодії процесів супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»;

DNC – множина інформаційних сутностей, які містять відомості із вхідних джерел даних, зокрема, інтегрованих у фізичне середовище «розумного міста» давачів *S*, виконавчих механізмів *Acttrs*, драйверів *Drv*, інтерфейсів *Intrfs*, зовнішніх сервісів спостереження метеорологічних даних, тощо;

RNC – схема множини відношень *DNC*;

MTD – в даному випадку множина метаданих *DL*;

RMD – схема множини відношень *MTD*;

EVNT – множина подій, що виникають у процесі супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»;

FCT – множина фактів що супроводжують об'єкти кіберфізичних систем «розумних міст»;

AP – множина програмно-аналітичних засобів аналітичного опрацювання *DL*;

SPDS – множина процедур супроводу процесів прийняття рішень.

Процес отримання нових знань щодо процесів супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» полягає у видобуванні даних та *MTD* з множини інформаційних сутностей *DNC* *DL* шляхом застосування *AP* на множинах подій *EVNT* та фактів *FCT* та *MTD* із врахуванням вимог, що безпосередньо формуються відповідно до потреб користувачів, інформаційних, фізичних та кібернетичних об'єктів.

Зв'язки між елементами множини *MTD* утворюють *НС*, вимірами яких є множини відношень *RIN*, *REN*, *RNC*, *RMD*, *EVNT* та *FCT* об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст». Врахування особливостей застосування програмно-алгоритмічних засобів аналітичного опрацювання *AP* на множині процедур супроводу процесів прийняття рішень *SPDS* в процесі проектування *DL* для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» відкриває можливості для детальнішого та точнішого подання та розкриття особливостей даних зібраних у відповідних *DL*.

3.3 Моделі управління метаданими озер даних «розумних міст»

Метадані (*MTD*) – це тип даних, який надає інформацію щодо інших інформаційних сутностей, зокрема таких як, дані, об’єкти, процеси або системи [119]. У нашому випадку процес управління *MTD* – це діяльність по управлінню відомостями про дані які містяться в інформаційно-технологічній платформі супроводу об’єктів кіберфізичних систем «розумних міст». Без таких відомостей дані щодо об’єктів та процесів що відбуваються у кіберфізичних системах «розумних міст» можуть бути непридатними для подальшого використання, зокрема, через брак довіри до них, або їх якості.

Для ефективного зберігання та опрацювання *MTD* щодо об’єктів кіберфізичних систем в *DL* «розумного міста» потрібно сформувавши модель *MTD*, яка зможе оперативно відображати *MTD* для будь-якого потенційного сценарію їх використання. При цьому повинні бути передбачені стандартні варіанти використання, наприклад, збір інформації про родовід даних, а також специфічні для «розумного міста» варіанти використання, наприклад, для послуг «розумної» вентиляції, «розумного» кондиціонування, керування екосистемами «розумних будівель», окремих «розумних» приміщень тощо. Модель *MTD* описує відношення між даними та елементами *MTD*, а також містить описи процесів формування *MTD*, наприклад, у вигляді формального або текстового опису, явної схеми тощо. Для створення моделі *MTD* та ефективного їх відображення необхідно визначитись, які *MTD* будуть зібрані. Їх загальна природа передбачає можливість відображати *MTD* будь-якого типу, зокрема:

- *MTD* множини різнотипових «розумних» міських послуг;
- тематичні *MTD* «розумного міста»;
- *MTD*, що описують властивості даних кіберфізичних систем та їхні відношення;
- *MTD*, що відносяться до конкретних даних;
- *MTD* щодо всього *DL* «розумного міста».

Відомі з наукових публікацій описи процесів управління *MTD* зосереджуються на ряді цілей, серед яких зокрема:

- відстеження родоводу даних [120];
- впровадження специфікацій процесів управління даними [121];
- супровід процесів опрацювання запитів та управління характеристиками якості даних [122].

На основі проведеного аналізу сформульовано висновок про те, що на даний час немає вичерпних відомостей щодо переліку *MTD*, які слід нагромаджувати в *DL* «розумних міст».

Належне управління *MTD* є ключовим для запобігання перетворенню *DL* на «болото даних» і, відповідно, найважливішим компонентом для забезпечення безперервної роботи та зручності використання [99]. Через загалом пласку ієрархію *DL* та вимогу зберігати будь-які дані оригінальному форматі завжди існує високий ризик втрати загальної сприйнятності та зрозумілості *DL*. Таке відбувається, якщо дані не можуть бути оперативно знайдені або при безвідновній втраті зв'язків з іншими наборами даних. Внаслідок цього в *DL* втрачається здатність до формування лаконічних запитів для точного відбору шуканих даних. На даний час, було запропоновано численну множину пристосованих для *DL* моделей та систем *MTD*:

$$MDM_{DL} = \left\{ MDM_{DL}^{DW}, MDM_{DL}^{GEMMS}, MDM_{DL}^{MDL}, MDM_{DL}^{GMDL}, MDM_{DL}^{CODAL}, MDM_{DL}^{NET}, MDM_{DL}^{CoreKG}, MDM_{DL}^{GOODS}, MDM_{DL}^{CONSTANS} \right\} \quad (3.2)$$

Ці моделі та системи сформовані для різних випадків використання та відрізняються функціональними наборами.

Модель даних (MDM_{DL}^{DW}) у *DW* було запропоновано Лінстедтом у 1990-х роках і опубліковано у 2000-х роках, щоб забезпечити гнучкішу еволюцію метаданих. Це забезпечило методологічне підґрунтя для безперервного розвитку схеми *MTD* у *DW*, порівняно зі схемами «зірка» або «сніжинка» [123]. Це ансамблеве моделювання використовує традиційно реляційні системи БД і поєднує третю нормальну форму зі схемою «зірка». Всі дані зберігаються в трьох

різних видах таблиць. При цьому використовуються концентратори інформаційних сутностей. Вони описують бізнес-концепції та подані у формі списків унікальних ключів, які можуть бути заповнені різними джерелами даних. Зв'язки DW описують відносини між концентраторами інформаційних сутностей. MTD містять всі атрибути, які описують властивості концентраторів інформаційних сутностей або зв'язків. Розвиток DW з часом передбачає створення додаткових таблиць-сателітів до нових зв'язків та концентраторів інформаційних сутностей. Завдяки цим характеристикам, модель MDM_{DL}^{DW} була застосована для DL . Автори [124] розширили визначення DW для перенесення на NoSQL БД. При цьому проаналізовано способи додавання нових джерел даних, визначення нових вузлів, посилань та MTD .

Модель GEMMS (MDM_{DL}^{GEMMS}) була запропонована в [125] як узагальнююча розширювана система управління MTD з особливим акцентом на управлінні науковими даними. Ключовий компонент моделі MDM_{DL}^{GEMMS} – це абстрактна сутність «Одиниця даних», що складається безпосередньо з необроблених даних та пов'язаних з ними MTD . Це забезпечує гнучкість моделі MDM_{DL}^{GEMMS} у процесах введення нових наборів і колекцій даних та користувацький інтерфейс, який абстрагує окремі інформаційні сутності. Елементи даних можуть бути семантично-анотовані MTD відповідно до сформованої онтології предметної області.

Авторами [103] розроблені графові моделі метаданих MDM_{DL}^{MDL} та MDM_{DL}^{GMDL} . У них підмножина даних називається «об'єктом даних» та подається у вигляді гіпервузла, який містить всі MTD , що описують «об'єкт даних». MTD представляють дані певним способом, наприклад, для текстових даних у вигляді хмари слів. Для кожного «об'єкта даних» потрібне принаймні одне, пов'язане за допомогою перетворення представлення, MTD . Водночас представлення MTD можуть трансформуватися у вигляді спрямованого ребра на гіперграфі, яке містить інформацію про трансформацію. Моделі MDM_{DL}^{MDL} та MDM_{DL}^{GMDL} потребують глобалізації MTD на основі онтологій або тезаурусів.

DL та модель MDM_{DL}^{CODAL} [103] були створені для текстових даних. Вона поєднує в собі графову модель, яка поєднує всі отримані набори даних із DW , який описує окремий набір MTD . Ключовим компонентом моделі MDM_{DL}^{CODAL} є поділений на три частини xml-маніфест. Він містить:

- атомарні MTD ;
- неатомарні MTD ;
- сховище фізичних реляційних MTD .

MTD першої категорії описуються парами ключ-значення. Неатомні MTD містять лише посилання на конкретну сутність у файловій системі [103]. Інформація, що моделює реляційні MTD , зберігається у спеціальній БД графів.

Мережева модель (MDM_{DL}^{NET}) розширює просту категоризацію [126] на три окремі типи MTD :

- бізнес- MTD ;
- операційні MTD ;
- технічні MTD .

Модель MDM_{DL}^{NET} була запропонована для покращення процесів інтеграції різномірних і неструктурованих даних з різних інформаційних джерел, що надходять до DL . При цьому використовується «об'єкти», що відповідають вузлам результуючого графа. Вони визначаються типологією джерел та використовуються [127] для генерування: структурних зв'язків, зв'язків подібності та зв'язків за лемою. Якщо дві вершини результуючого графа мають спільну лему в тезаурусі то виводиться лексична подібність.

Модель «CoreKG» MDM_{DL}^{CoreKG} [128] контекстуалізує метадані в DL каталозі за допомогою кураторської служби що використовує функції «Вилучення», «Збагачення», «Пов'язування» та «Анотації». Вилучені та збагачені ознаки пов'язуються з зовнішніми базами знань.

Модель «GOODS» (MDM_{DL}^{GOODS}) – це внутрішнє, унікальне, порівняно з всіма іншими, DL Google [129]. Інформація збирається по факту, а окремі команди дослідників та фахівців продовжують працювати зі своїми специфічними інструментами в межах створених ними DW . Модель MDM_{DL}^{GOODS}

видобуває *MTD* про кожен набір чи колекцію даних, аналізуючи відповідні операційні журнали та каталоги *DL*. Ключовою інформаційною сутністю цього *DL* є набір даних, який може додатково анотуватись розробниками чи користувачами. Потім набори даних поєднуються на основі графа знань. Оскільки все *DL* містить десятки мільярдів наборів даних, то неможливо ефективно виконати процедури пошуку попарної схожості. Натомість для окремих полів наборів та колекцій даних генеруються та порівнюються географічно-контексні хеш-значення.

Модель «Constance» $MDM_{DL}^{CONSTANCE}$ [130] – це сервіс *DL*, який видобуває явні та неявні *MTD* з поглинутих наборів та колекцій даних. Він дає змогу формувати семантичні анотації, забезпечуючи при цьому узгодження та збагачення *MTD* вищих ієрархічних рівнів для їх постійного вдосконалення. Це дає змогу користувачам працювати з наборами простих запитів на основі ключових слів. Після введення даних у необробленій формі в *DL* відбувається процес видобування якомога більшої множини *MTD*. На наступному етапі проводиться пошук кореляцій між різними наборами та колекціями даних впродовж усього життєвого циклу *DL*. Семантичне співставлення *MTD* відбувається на основі графової моделі та загальної онтології. Корисним для надто гетерогенних *DL* є процедури групування на основі схожості.

Не зважаючи на те, що розглянуті MDM_{DL} використовують різні підходи до процесів моделювання *MTD*, у них є спільні закономірності, зокрема, атомарна сутність, навколо якої розвивається процес моделювання. Для гармонізації різнотипових та різнорідних атомарних сутностей, в деяких моделях зазвичай використовуються онтології. Це підвищує вхідний бар'єр для дослідників предметної області та здебільшого призводить до необхідності об'єднання онтологій. Проаналізовані моделі завжди використовували методи моделювання відношень між атомарними сутностями або їхніми сукупностями.

Проведена в [120] оцінка відомих моделей *MTD*, що використовуються в контексті *DL* «розумних міст», підтверджує, що жодна з них не є комплексною та універсальною. Ряд моделей *MTD* розроблені виключно в контексті

конкретного варіанту їх використання [131]. Запропоновані на даний час моделі *MTD* ґрунтуються, або на категоризації, або певних наборах функцій управління.

В процесі проектування L^{Clad} мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» буде актуалізована задача формування узагальненої моделі *MTD DL* «розумних міст». Пропонована модель *MTD* повинна підтримувати процеси збирання *MTD* на різних рівнях деталізації. Водночас вона повинна забезпечувати всі рівні категоризації *MTD*. З цією метою, слід забезпечити збір *MTD* в контексті кожного конкретного елемента даних, або в контексті складніших формацій даних. Воночас повинна підтримуватись гнучка інтеграція *MTD* та їх відображення різними способами відповідно до контексту та призначення. При цьому доцільно підтримувати загальні характеристики *DL*, наприклад, такі як зонування та спостереження.

3.4 Розроблення моделі управління метаданими об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Для поглибленого розуміння ролі процесів моделювання *MTD* та їх актуальності, розглянемо управління *MTD* в контексті їх використання в кіберфізичних системах «розумного міста». В основі процесів управління *MTD* знаходяться самі *MTD*. Адже саме вони є джерелом інформації щодо інших сутностей, зокрема, інших даних, процесів, об'єктів або кіберфізичних систем. Наприклад, інформація про те, що IoT-пристрій на базі Arduino Leonardo з ідентифікатором «id : 7010000003» сформував набір даних $DS_{1630681222}^{7010000003}$, містить опис автора цього набору даних та є *MTD*. Оскільки *MTD* – це дані, які описують певні характеристики вмісту, то їх доцільно розглядати як окремий тип даних. На основі відомого визначення, що: «Процес управління метаданими – це управління даними для метаданих» [120] окреслимо варіанти управління даними щодо об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» залежно від їх типу (див. рис. 3.2).



Рис. 3.2. Відношення між процесами управління даними та управління *MTD*

Процеси керування *MTD* та даними традиційно розглядають як окремі процеси, оскільки між керуванням *MTD* та іншими категоріями процесів управління даними сформовані окремі відношення. При цьому базовий набір завдань управління даними щодо кіберфізичних систем «розумних міст» залишається однаковим для всіх типів даних, включно з *MTD*. Вони здебільшого базуються на структурі функцій управління даними DAMA [132]. Управління даними – це основа процесів управління *MTD*. Воно потребує планування, супроводу та забезпечення виконання процесів управління життєвим циклом даних. Це передбачає формування політик і стандартів роботи з даними.

Відповідно до публікацій DAMA, процеси моделювання даних та *MTD* – це частина етапу «Проектування» життєвого циклу [132]. Розроблена на цьому етапі модель *MTD* об'єктів кіберфізичних систем в *DL* «розумного міста», повинна визначати їх форму інтеграції, узагальнений перелік та структуру. Всі наступні етапи життєвого циклу даних базуватимуться на цій моделі *MTD* мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст». На всіх етапах життєвого циклу даних виконуватиметься множина базових завдань, зокрема:

- дотримання нормативних вимог щодо наборів даних та *MTD*;

- керування якістю даних;
- забезпечення конфіденційності даних та *MTD*;
- реалізація безпекових процедур та заходів.

Класифікація процесів управління даними та *MTD* мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» подана на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Процеси управління даними та метаданими мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Модель даних та *MTD* мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» сформуємо на основі *НС* (див. рис. 3.4). Згідно [133] цей тип подання ієрархічної структури даних буде

оптимальним для зберігання та аналізу великих за обсягом наборів та колекцій даних отриманих IoT-засобами кіберфізичних систем та збережених у відповідних *DL* «розумного міста».



Рис. 3.4. Модель даних та метаданих мережевої інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

За результатами аналітичного опрацювання *DL* «розумного міста» формуються осередки даних та *MTD*, які подають певний аспект функціонування

складної системи, якою є місто, його підсистем і ін. *НС* формуються на основі осередків даних, в яких подаються їх значення. Окремі осередки можуть бути пов'язані між собою за допомогою вимірів гіперкуба, які подають різні аспекти даних.

Наприклад, гіперкуб, який зберігає дані про IoT-пристрої кіберфізичних систем «розумного міста», може містити часові виміри та виміри з даними давачів та актуаторів. При цьому забезпечення знеособленості, конфіденційності та безпеки даних в кіберфізичних системах «розумного міста» потребує імплементації та дотримання певної системи прав доступу. Вони по суті є *MTD* тому, що описують хто і яке саме має право доступу та діє по відношенню до будь-яких даних чи *MTD*. При цьому за допомогою *MTD* контролюється якість даних та їх моделей, процесів відбору, формування, передавання, отримання даних тощо. Крім того, специфічні для різних доменів «розумного міста» *MTD*, можуть бути зібрані в рамках життєвого циклу даних, наприклад, гіперкуби «розумних» систем спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища або гіперкуби середовища екосистеми «розумних» будівель.

В контексті моделювання *MTD* відома обширна множина варіантів використання як даних так і *MTD*, включаючи різнотипові специфічні для конкретного міського домену варіанти використання, які вимагають специфічного документування на основі *MTD*. Пропонована модель *MTD* повинна бути достатньо загальною, щоб мати можливість відображати не тільки всі згадані вище варіанти використання а й варіанти використання, що можуть виникати в процесі супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

3.5 Інформаційна технологія багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»

Процеси аналізу *MTD* в *DL* – один з ключових компонентів обширного та багатоманітного стеку процесів супроводу об'єктів кіберфізичних систем

«розумних міст». Вони критично важливі для своєчасного, ефективного та організованого управління накопичуваних у *DL* великих за обсягами неструктурованих та напівструктурованих міських даних і запобіганню їх перетворенню на «болота даних». Функціональну класифікацію *MTD* в *DL* подамо у формі множини:

$$FCMDA = \langle DCT, ACS, DLM, MA, DIA, DRM, AP, ITD \rangle, \quad (3.3)$$

де *DCT* – опис та каталогізація даних. Метадані *DL* забезпечують формування каталогу даних, що містить інформацію про те, які дані зберігаються в *DL*, їхні джерела, формати, технічні характеристики тощо. Це пришвидшує процеси пошуку потрібних даних щодо об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» та покращує розуміння їхнього призначення.

ACS – контроль доступу та безпеки. Метадані містять інформацію про права доступу до даних в *DL*, безпекові правила та обмеження. Це сприяє забезпеченню цілісності даних та підвищує захист конфіденційності сформованих на основі кіберфізичних систем «розумних» послуг та застосунків.

DLM – управління життєвим циклом даних: Метадані можуть містити інформацію про час та терміни зберігання даних в *DL* «розумного міста», правила їх архівування та видалення. Це підвищує ефективність процесів управління життєвим циклом даних та зменшує фінансові витрати на зберігання інформації щодо «розумних» міських кіберфізичних систем.

MA – моніторинг та аудит. Метадані можуть зберігати інформацію про те, хто, що, коли та як взаємодіяв із збереженими в *DL* «розумного міста» даними. Це покращує функції моніторингу та аудиту *DL* для виявлення неавторизованих, зловмисних, неправильних або некоректних дій з даними.

DIA – інтеграція та аналіз даних. Метадані *DL* сприяють кращому розумінню структури та змісту даних щодо процесів, що відбуваються у кіберфізичних системах «розумних міст». Це полегшує їх інтеграцію з іншими міськими системами та аналітичними інструментами. Зменшує трудомісткість процесів пошуку та відбору необхідних для аналізу даних.

DRM – ефективне управління ресурсами. Метадані містять інформацію про обсяги *DW* та ресурси *DL*, які потрібні для зберігання та обробки даних. Це допомагає оптимізувати фінансові витрати на *INFR^{Cloud}* «розумного міста».

AP – автоматизація процесів. Метадані *DL* використовуються для автоматизації процесів їх обслуговування, зокрема, спостереження, планування обробки та резервного копіювання даних. Це спрощує управління *DL* та зменшує можливі помилки супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

ITD – підвищення рівня довіри до даних. Вірогідність даних зростає, коли метадані надають інформацію про джерела та процеси їх обробки. Це допомагає відсіювати неправильні або недостовірні дані щодо перебігу процесів у кіберфізичних системах «розумних міст».

Важливим етапом супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» є формування *DL* на базі ІТ багатовимірного аналізу метаданих. Використання цієї технології для інформаційно-технологічного супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» надає можливість оперативного та детального аналізу поточного стану міських фізичних, комунікаційних, інформаційних та обчислювальних ресурсів [134], а також виявлення тенденцій зміни їх станів шляхом зіставлення метаданих, що належать до різних часових періодів та різних за походженням інформаційних сутностей.

У *DL* системах «розумного міста» зазвичай використовуються процеси аналізу даних на основі узагальнення метаданих, що характеризують зібрані в ІоТ-мережах кіберфізичних систем дані та процеси в *DL*, *INFR^{CPS}*, *INFR^{Net}*, *INFR^{Cloud}*, або в інформаційно-технологічній платформі загалом. Вихідними наборами *MTD* для аналітичного опрацювання є характеристики об'єктів міських кіберфізичних систем та мереж, наприклад характеристики ІоТ-пристроїв, датчиків, виконавчих механізмів, мережевого обладнання, показники якості та характеристики повітряного середовища «розумних будівель» тощо.

В основі ІТ багатовимірного аналізу *MTD* знаходиться модель даних [135], основними базовими сутностями якої є: гіперкуб метаданих (*HCM*), вимір *MDim*, атрибут *AtM*, комірка *CeM*, значення *ReM(MDim, AtM)*. Приклад *HCM*

для кіберфізичних систем «TNTU Smart Campus» подано на рис. 3.5. *HCM* – це спеціалізована структура метаданих, яка використовується для організації та аналізу багатовимірних метаданих.

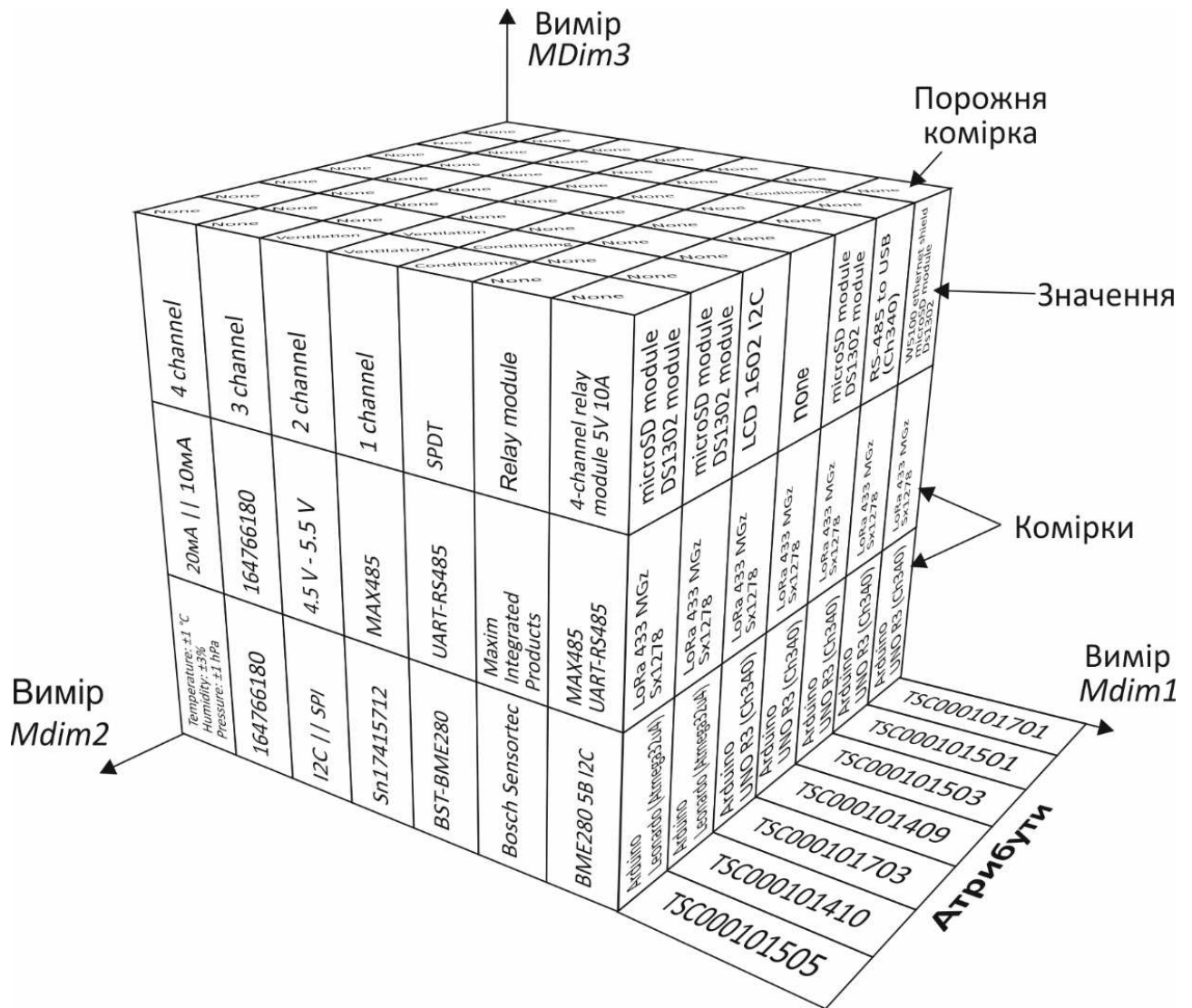


Рис. 3.5. Гіперкуб метаданих кіберфізичних систем «TNTU Smart Campus»

HCM організовані у вигляді багатовимірних структур, де кожен вимір представляє окремий аспект метаданих. Наприклад, можуть бути виміри: IoT-пристрій, давач, додаткові модулі тощо.

Для супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель» [136] важливими вимірами є, зокрема, показники якості повітряного середовища та засоби його регулювання. Для виміру показників якості повітряного середовища атрибутами є

температура, вологість повітря, концентрація домішок або твердих частинок. Для виміру засобів регулювання повітряного середовища атрибутами є перелік режимів їх функціонування: спосіб керування, режим, ввімкнення, вимкнення, тощо. *HCM* можуть підтримувати велику кількість вимірів. Це дає змогу різносторонньо аналізувати метадані та оперативно створювати складні моделі міських кіберфізичних систем та показників якості повітряного середовища «розумних будівель». *HCM* зазвичай містять попередньо обчислені агрегати та підсумкові дані для різних комбінацій *MDim*. Це дає змогу швидко отримувати агреговану інформацію без необхідності здійснення додаткових обчислень. Оскільки *HCM* містять попередньо обчислені агрегати, доступ до *MTD* в *DL* зазвичай відбувається швидко. Це робить *HCM* високоефективним (ідеальним) інструментом для аналізу *DL* в режимі реального часу.

Багатовимірний аналіз *MTD* кіберфізичних систем «розумних міст» передбачає дослідження та аналіз характеристик внутрішнього середовища «розумних будівель», включаючи формування множини атрибутів, що застосовуються для параметризації інформаційної моделі. Множина категорій та атрибутів метаданих *CSA*, що використовуються для опису процесів у кіберфізичних систем «розумного міста», класифікована наступним чином:

$$CSA = \langle CSA^{CPS}, CSA^{NET}, CSA^{CLD}, CSA^{SRV} \rangle \quad (3.4)$$

де CSA^{CPS} – категорії *HCM* на L^{CPS} кіберфізичному рівні узагальненої багатошарової архітектури інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» (див. рис. 2.4);

CSA^{NET} – категорії *HCM* на L^{Net} мережевому рівні;

CSA^{CLD} – категорії *HCM* на L^{ClD} хмарному рівні;

CSA^{SRV} – категорії *HCM* на L^{Srv} рівні послуг.

Підмножина категорій та атрибутів L^{CPS} -рівня:

$$CSA^{CPS} = \langle CSA_S^{CPS}, CSA_{IoT}^{CPS}, CSA_{NET}^{CPS}, CSA_{Acttrs}^{CPS} \rangle, \quad (3.5)$$

де $CSA_S^{CPS} = \{manufacturer, model, range, presision, set_ltst, \dots\}$ – атрибути *HCM* для інтегрованих у фізичне середовище «розумного міста» давачів та сенсорів.

$CSA_{IoT}^{CPS} = \{location, manufacturer, model, rev, intrfs, ltst, set_ltst, \dots\}$ – атрибути *HCM* для інтегрованих у фізичне середовище «розумного міста» IoT-пристроїв.

$CSA_{NET}^{CPS} = \{name, protocol, routing_model, \dots\}$ – атрибути *HCM* для інтегрованих у фізичне середовище мереж IoT-пристроїв.

$CSA_{Acttrs}^{CPS} = \{location, air_action\ type, acttr\ type, mode, ltst, \dots\}$ – атрибути *HCM* для інтегрованих у фізичне середовище «розумного міста» виконавчих пристроїв, зокрема, для кондиціонування чи вентиляції повітря.

У багатьох випадках атрибути *HCM* різних категорій, що використовуються для опису процесів в міських кіберфізичних системах та комунікаційних мережах є синонімами та мають однаковий зміст.

Відібрані з метою опису процесів у кіберфізичних системах, міських мережах та *DL* атрибути *MTD* використано для побудови багатовимірної інформаційної моделі міських кіберфізичних систем, яку подано у вигляді *HCM*:

$$SERV(MDim, AtM, D), \quad (3.6)$$

де *SERV* – міська послуга, що надається множиною кіберфізичних систем $CPS = \{CPS_1, CPS_2, \dots, CPS_i\}, i = \overline{1, k}$, наприклад, спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «розумних будівель», з використанням множини комунікаційних мереж $NET = \{NET_1, NET_2, \dots, NET_j\}, j = \overline{1, l}$;

$MDim = MDim_1 \cup MDim_2 \cup \dots \cup MDim_M$ – множина вимірів, характерних для *HCM* в цілому;

$AtM_{MDim_i} = \{AtM_{1_i}, AtM_{2_i}, \dots, AtM_{N_i}\}$ – множина атрибутів метаданих, характерних для виміру $MDim_i$;

$AtM = AtM_1 \cup AtM_2 \cup \dots \cup AtM_N$ – множина атрибутів, характерних для *HCM* в цілому;

$\overline{MDim} \rightarrow MDim$ – множина зафіксованих вимірів *HCM*;

$\overline{AtM} \rightarrow AtM$ – множина зафіксованих атрибутів *HCM*;

D – множина наборів даних щодо процесів супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» для яких формуються множини *MDim* та *AtM*.

Аналіз *HCM* для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» проводиться для конкретних значень фіксованого набору вимірів, а не одночасно за всіма залежними вимірами. При цьому певна частина вимірів залишаються незадіяними. За цими вимірами проводитиметься подальший аналіз, в процесі якого для *HCM* використовуватимуться операції зрізу, фіксації, агрегації та багатовимірного аналізу даних, зокрема, згортка, деталізація, об'єднання та ін. Наприклад, для спостереження накопичених в *DL* «TNTU Smart Campus» даних щодо стану та процесів регуляції повітряного середовища серверних приміщень слід виконати операцію зрізу із значеннями вимірів «Локація», «Кіберфізичний шар» («Давачі», «Регулятори»), «Мережевий шар» («Меш мережі»), «Часова мітка Linux». Проектуючи *HCM* з метою формування прототипу «розумної» послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища серверних приміщень у «TNTU Smart Campus» задаємо схеми ієрархій:

1. Вимір «Локація» – «Мітка Google Map – TNTU Smart Campus – Корпус – Поверх – Приміщення»;
2. Вимір «Кіберфізичний шар» – «Давачі» – «Якість повітря» – «Назва» – «Ідентифікатор»;
3. Вимір «Мережевий шар» – «Меш мережі» – «Назва» – «ID вузла»;
4. Вимір «Кіберфізичний шар» – «Регулятори» – «Якість повітря» – «Тип пристрою» – «Назва» – «Ідентифікатор».
5. Вимір «Часова мітка Linux» – «Рік – Місяць – День – Година – Хвилинка – Секунда».

На рис. 3.6(А) подано зріз *MTD* (фіксація виміру «Кіберфізичний шар» – «Давачі» – «Якість повітря» – «Назва») з переліком застосованих під час спостереження показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus» датчиків та *MTD* датча «BME280».



Рис. 3.6. Метадані датчиків якості повітря у «TNTU Smart Campus». (А) – Зріз *HSM* «Датчачі» – «Якість повітря» – «Назва» (Б) – Метадані датча «BME280»

А на рис. 3.7(А) зображено зріз *MTD* (фіксація виміру «Кіберфізичний шар» – «Регулятори» – «Якість повітря» – «Тип пристрою» – «Назва») з переліком задіяних для регулювання повітряного середовища «TNTU Smart Campus» пристроїв.

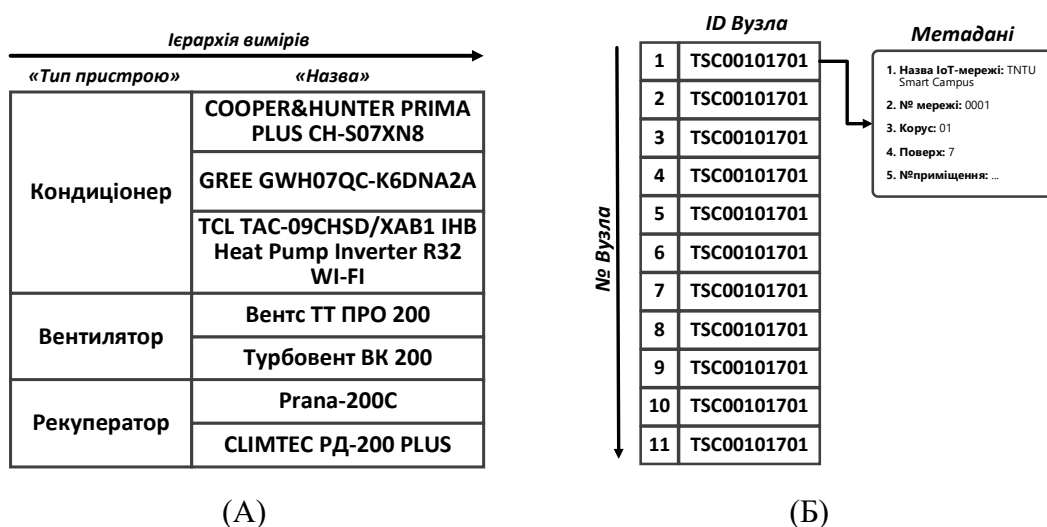


Рис. 3.7. Метадані регуляторів якості повітря та локацій «TNTU Smart Campus».

(А) – Ієрархія вимірів *HSM* регуляторів якості повітря. (Б) – Агрегація *HSM* вузлів *NET^{Mesh}*

Для міських кіберфізичних систем підготовка даних зібраних за допомогою інтегрованих у фізичне середовище датчиків відбувається з використанням IoT-пристроїв. На рис. 3.7(А) подано Ієрархія вимірів *HCM* регуляторів якості повітря. На рис. 3.7(Б) подано агрегацію *MTD* виміру «Локація» – «TNTU Smart Campus» – «Корпус 1» та, який використано в процесі організації *NET^{Mesh}* (див. Розділ 2, п. 2.7).

На етапах первинного опрацювання накопичених в *DL* даних обов'язково необхідно враховувати вимоги щодо швидкості та якості опрацювання. Для оперативного опрацювання накопичених в *DL* даних щодо спостереження та регулювання стану повітряного середовища «TNTU Smart Campus» спроектуємо розглянуті схеми ієрархій *HCM* та *MTD* на *DL* «TNTU Smart Campus» (див. рис. 3.8).

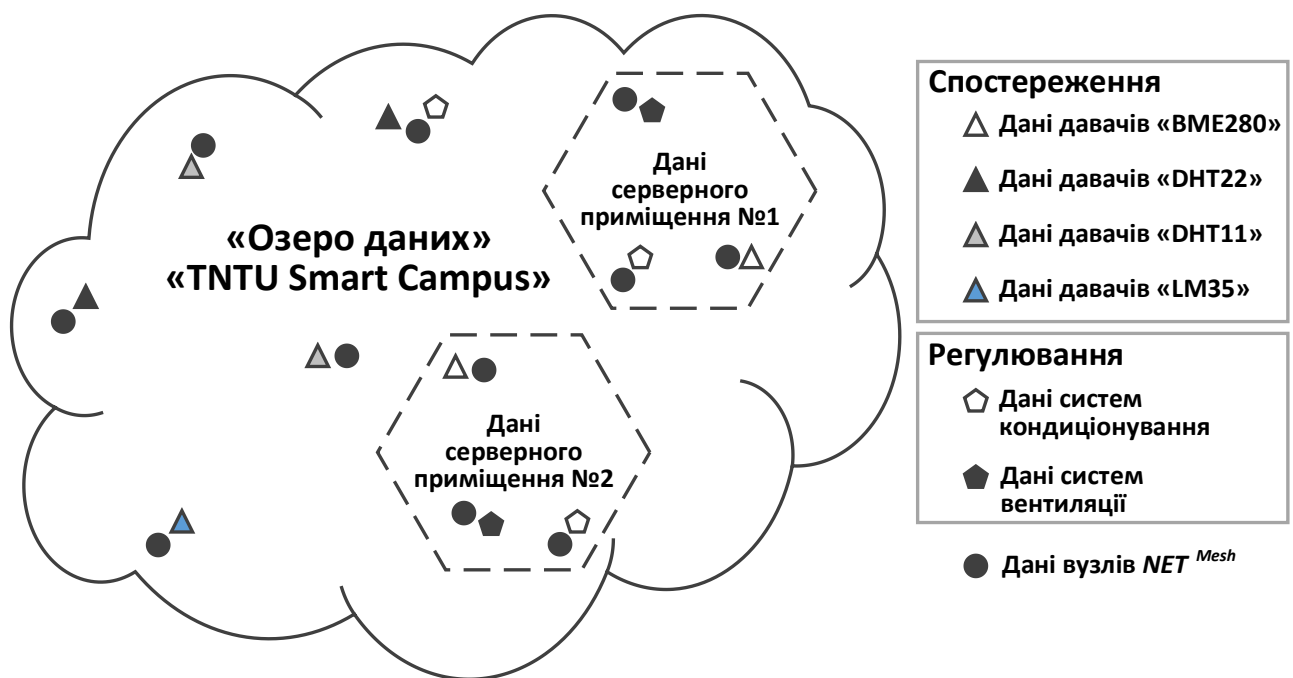


Рис. 3.8. Проекція схем ієрархій *HCM* та *MTD* на *DL* «TNTU Smart Campus»

Для прототипу «розумної» послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища серверних приміщень у «TNTU Smart Campus» частина операцій підготовки даних та *MTD* реалізовується в розподіленому а частина – в централізованому режимі. Зокрема, операції

підтримки та зберігання *MTD* реалізуються централізовано засобами *DL* «TNTU Smart Campus».

Концептуальна схема – це опис високого рівня інформаційних потреб, що лежать в основі *DL* [137]. Відповідно до підходу концептуального структурування [137], метадані та дані *DL* «TNTU Smart Campus», подаються за допомогою набору класів інформаційних сутностей (див. рис. 3.9). Зокрема, класи «Dataset», «DataLakeHouseDataset», «DataLakeDataset» – вихідні та цільові набори даних, «Data LakeHouse» та *DL* відповідно.

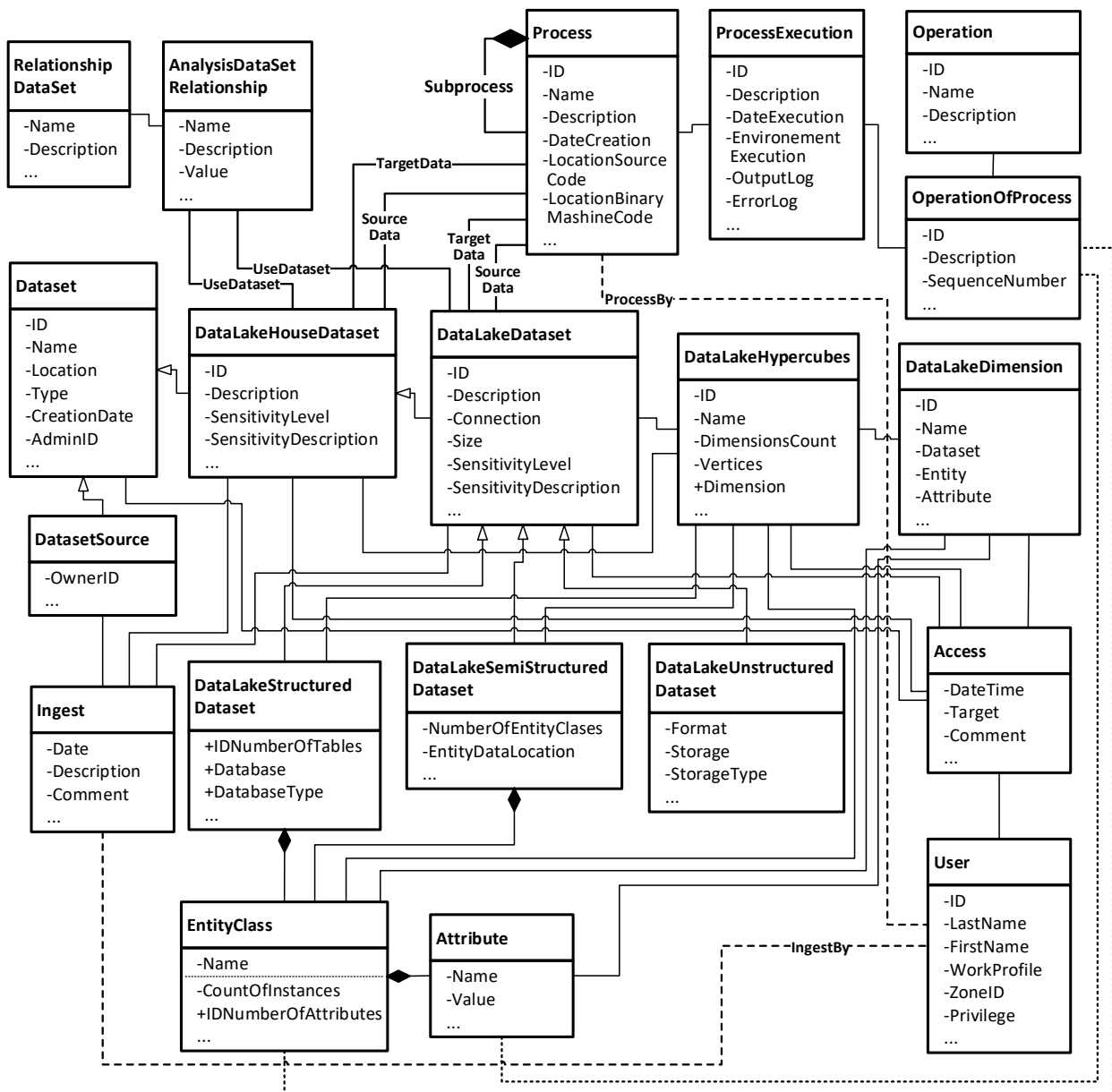


Рис. 3.9. Концептуальна структура озер даних «TNTU Smart Campus»

Класи «DataLakeStructuredDataset», «DataLakeSemiStructuredDataset», «DataLakeUnstructuredDataset» вміщують набори структурованих, слабоструктурованих та неструктурованих даних у *DL* «TNTU Smart Campus». Перші два включають класи «EntityClass» та атрибути «Attribute» структурованих інформаційних сутностей.

Для первинного інформаційного наповнення *DL* «TNTU Smart Campus» використано клас «Ingest», що містить інформацію щодо збору, форматування та завантаження даних, а для багатовимірного аналізу *MTD* кіберфізичних систем у *DL* «TNTU Smart Campus» використано класи «DataLakeHypercubes» та «DataLakeDimension» – гіперкуби та їх виміри.

Зміст процесу в *DL* «TNTU Smart Campus» описує операції обробки даних на високому рівні, а характеристики процесів включають, назву, опис та відомості про користувача, який їх ініціалізував. Ця інформація зберігається в чотирьох різних класах «DataLakeHouseDataset», «DatalakeDataset», «Process» та «User». При цьому кожен процес характеризується описом та датою створення. Клас «Process» містить технічну інформацію щодо локації вихідного та бінарного коду.

Деталі виконання процесів зберігаються в класі «ProcessExecution» та включають набір грубих операцій «OperationOfProcess», що формується на основі описів окремих операцій у класі «Operation».

Класи «AnalysisDataSetRelationship» та «RelationshipDataSet» використано для аналізу та зберігання інформації про відношення між інформаційними сутностями *DL*. Мета цих операцій полягає в тому, щоб допомогти користувачам *DL* «TNTU Smart Campus» розширити уявлення про перебіг процесів проектування, створення та запровадження цифрових послуг та сервісів.

Наприклад, при створенні цифрової послуги «розумного» регулювання повітряного середовища серверних приміщень потрібно сформувати набір даних «DataSetAirProp3», використовуючи джерела даних спостереження характеристик повітряного середовища «DataSetAirProp1» та «DataSetAirProp2». Замість того, щоб безпосередньо розробляти новий вихідний код, користувач *DL* «TNTU Smart Campus» може виконати перевірку, чи існують процеси, які

використовують «DataSetAirProp1» і «DataSetAirProp2» як джерела даних та, якщо такі процеси буде виявлено, позначити їх операціями «злиття» або «приєднання».

3.6 Висновки до розділу 3

В третьому розділі отримано важливі результати дисертаційного дослідження, зокрема:

1. Отримала подальший розвиток модель формування сховищ даних на основі озер даних, що дало змогу організувати ефективні процедури зберігання інформації щодо об'єктів кіберфізичних міських систем в умовах збільшення обсягів та швидкоплинності наборів та колекцій даних і зростання вимог до продуктивності процесів їх зберігання.

2. Розроблено формалізований опис озер даних для супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», що дало можливість забезпечити перебіг процесів отримання нових знань, завдяки застосуванню процедур видобування даних та метаданих об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

3. Сформовано модель управління метаданими об'єктів кіберфізичних систем на основі озер даних та гіперкубів, що дало змогу розробити інформаційну технологію багатовимірного аналізу метаданих, що характеризують перебіг процесів кіберфізичних систем «розумних міст».

4. Проведено класифікацію та параметризацію множини категорій та атрибутів для опису процесів у міських кіберфізичних системах, що дало змогу виконати аналіз та побудову прототипів гіперкубів метаданих «розумної» послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища приміщень «TNTU Smart Campus».

5. Розроблено концептуальну структуру озер даних «TNTU Smart Campus», що розширює уявлення про перебіг процесів проектування, створення і запровадження цифрових послуг та дало змогу сформувати основу для їх подальшої уніфікації.

РОЗДІЛ 4. МАКЕТУВАННЯ ПРОТОТИПІВ ЦИФРОВИХ ПОСЛУГ НА БАЗІ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ СУПРОВОДУ ОБ'ЄКТІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»

В четвертому розділі подано опис розроблених прототипів цифрових послуг для спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища, які реалізують ІТ багатовимірний аналіз *MTD* супроводу об'єктів кіберфізичних систем та є складовими компонентами у побудові ІС «TNTU Smart Campus». Подано їх структуру та алгоритми функціонування, розкрито ключові особливості інформаційно-технологічних реалізацій, розроблених на основі описаних у попередніх розділах моделей, методу та інформаційної технології. Зокрема, прототипи цифрових послуг розгорнуто на базі запропонованих у другому розділі дисертаційної роботи IoT-пристроїв, NDN-мережі, моделі надання послуг DaaS та *NET^{Mesh}*. Для інформаційного супроводу прототипів цифрових послуг використано запропоновану в третьому розділі концептуальну структуру озер даних, сформованих на основі *HSM* та ІТ багатовимірний аналіз *MTD* супроводу об'єктів кіберфізичних систем. У прототипі програмно-алгоритмічного комплексу цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» реалізовано функціональні можливості реагування на зміну станів із використанням поданої у першому розділі комплексної моделі оцінки якості внутрішнього середовища «розумних будівель» та надання рекомендацій для підвищення ефективності використання ресурсів та покращення QoS.

4.1 Функціональне призначення цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища

Запропоновані у попередніх розділах моделі, метод та ІТ стали основою двох прототипів ІС, розроблених на базі кіберфізичних систем для цифрових послуг супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості

повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» [138]. Ключова мета розроблення прототипів ІС – практичне відпрацювання процесів формування цифрових послуг з метою своєчасного якісного забезпечення комфортного повітряного середовища навчальних та серверних приміщень Мережевої академії Cisco, що функціонують при Центрі інформаційних технологій ТНТУ, та серверного приміщення відділу Інтернет-технологій, що функціонує при Центрі електронного навчання ТНТУ, ефективного використання ресурсів та забезпечення належного рівня відповідних сервісів. Зокрема мова йде про:

1. Надання вичерпних та якісних даних щодо переліку та характеристик показників якості повітря навчальних та серверних приміщень, які використовуються для опису процесів формування комфортного середовища у «TNTU Smart Campus» засобами кіберфізичних систем.

2. Надання вичерпних та якісних даних щодо множини давачів, які використовуються в процесах спостереження облікових величин, їх властивостей та характеристик.

3. Надання вичерпних та якісних даних щодо пристроїв, що використовуються для регулювання параметрів повітряного середовища «TNTU Smart Campus», зокрема, кондиціонерів, вентиляторів, рекуператорів і т.п.

4. Надання вичерпних та якісних даних щодо структури, типів та категорій IoT-пристроїв кіберфізичних систем, що використовуються для спостереження та регулювання параметрів повітряного середовища.

5. Надання вичерпних та якісних даних щодо підключення до IoT-пристроїв давачів та пристроїв-регуляторів інтегрованих в середовище «TNTU Smart Campus».

6. Облік показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus», формування статистичних і підсумкових даних.

7. Облік процесів регулювання параметрів повітряного середовища у «TNTU Smart Campus», формування статистичних і підсумкових даних.

8. Спостереження поточного стану показників якості повітряного середовища у «TNTU Smart Campus».

9. Вироблення та обґрунтування рекомендацій щодо оптимізації режимів регулювання параметрів повітряного середовища та надання відповідних послуг.

У прототипі програмно-алгоритмічного комплексу електронних» послуг спостереження та регулювання повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» реалізовано функціональні можливості реагування на зміну станів із використанням поданої у першому розділі комплексної моделі оцінки якості внутрішнього середовища «розумних будівель».

4.2 Інформаційно-технологічний набір для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища

З метою макетування прототипів цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus», згідно етапів поданого в параграфі 2.3 методу, розроблено поданий на рис. 4.1 інформаційно-технологічний набір.

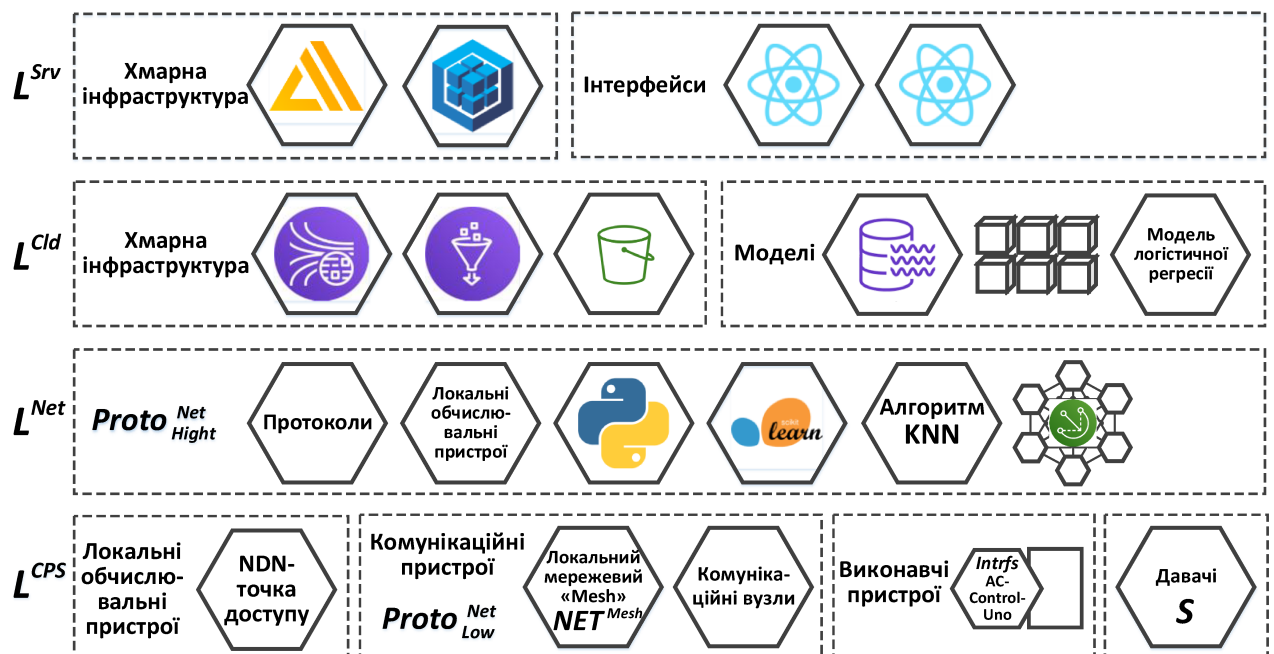


Рис. 4.1. Інформаційно-технологічний набір для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus»

4.2.1 Кіберфізичний рівень інформаційно-технологічного набору

На першому етапі методу формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» використано групу давачів (S), за допомогою яких відбувається відбір даних IoT-пристроями на L^{CPS} :

– «BME280» для вимірювання температури та вологості повітряного середовища серверних приміщень Мережевої академії Cisco та відділу Інтернет-технологій – цифровий давач температури в діапазоні від -40°C до 85°C з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$, вологості в діапазоні від 0 до 100% з точністю $\pm 3\%$, та атмосферного тиску в діапазоні від 300 до 1100 мілібарів з точністю ± 1 гПа.

– Для вимірювання температури та вологості повітряного середовища навчальних приміщень ТНТУ було використано давачі «DHT22» та «DHT11». «DHT22» – цифровий давач температури в діапазоні від -40°C до 80°C з точністю $\pm 2^{\circ}\text{C}$ та вологості в діапазоні від 0 до 100% з точністю $\pm 5\%$. «DHT11» – цифровий давач температури в діапазоні від -40°C до 50°C з точністю $\pm 2^{\circ}\text{C}$ та вологості в діапазоні від 0 до 100% з точністю $\pm 5\%$.

– «LM35» для вимірювання температури повітряного середовища в середині серверних шаф – аналоговий давач температури в діапазоні від -55°C до 150°C з відносно високою для пристроїв такого класу точністю $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

– «MQ-135» для вимірювання концентрації шкідливих газів, зокрема, чадний газ та метан, в повітряному середовищі навчальних приміщеннях ТНТУ в діапазоні концентрацій від 0 до 1000ppm з точністю $\pm 20\%$.

– «PM2.5» для вимірювання концентрації твердих частинок в повітряному середовищі серверних приміщень Мережевої академії Cisco та відділу Інтернет-технологій – це давач, що вимірює концентрацію дрібних твердих частинок або рідких крапель, розмір яких становить від 2.5 до 10 мкм. Діапазон вимірювань такого давача від 0 до 500 мкг/м^3 з точністю $\pm 20\%$.

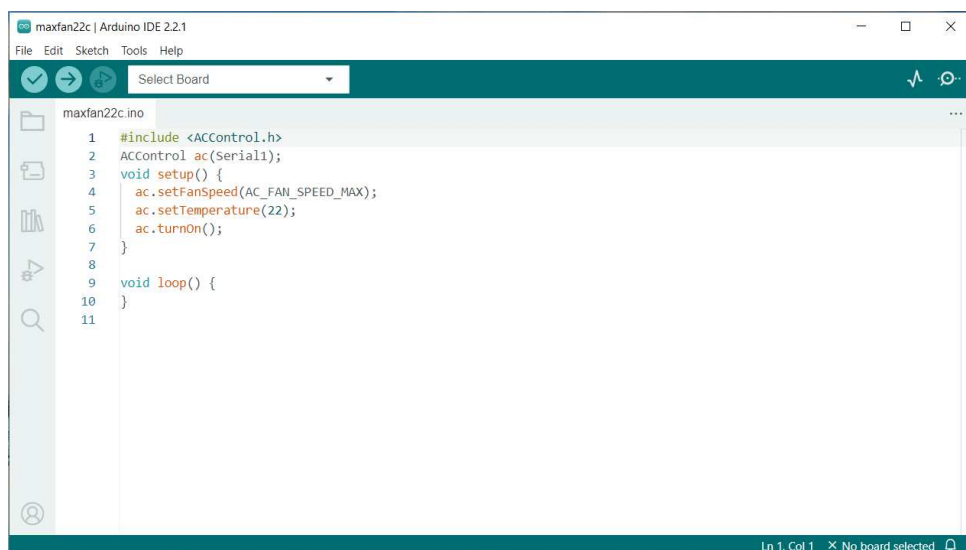
IoT-пристрої з підключеними давачами «BME280» та «PM2.5» були встановлені стаціонарно в серверних приміщеннях Мережевої академії Cisco та

відділу Інтернет-технологій. Обладнані датчиками «LM35» IoT-пристрої були стаціонарно вмонтовані в серверних шафах, а IoT-пристрої з підключеними датчиками «DHT11», «DHT22» та «MQ-135» періодично переносились між навчальними приміщеннями ТНТУ.

На другому етапі формування інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища у «TNTU Smart Campus» відбулася розробка множини актуаторів (*Acttrs*), що використовуються для безпосереднього впливу на фізичне середовище. Для регулювання параметрів повітряного середовища серверних приміщень використовувалась системи вентиляції та кондиціонування.

У серверних приміщеннях Мережевої академії Cisco та відділу Інтернет-технологій використовувались каналні вентилятори з відцентровим робочим колесом «Вентс ТТ ПРО 200» та «Турбовент ВК 200» відповідно. Для їх ввімкнення IoT-пристроями було задіяно *Acttrs* модуль реле «12В 10А».

Для кондиціонування серверних приміщень використовувались кондиціонери «COOPER&HUNTER PRIMA PLUS CH-S07XN8» та «GREE GWH07QC-K6DNA2A». Керування ними відбувалось через підключені до IoT-пристроїв інтерфейси «AC-Control-Uno» та «AC-Control-Leonardo». На рис. 4.2 подано програмний код для процедури ініціалізації роботи кондиціонера «COOPER&HUNTER PRIMA PLUS CH-S07XN8».



```
maxfan22c.ino
1  #include <ACControl.h>
2  ACControl ac(Serial1);
3  void setup() {
4    ac.setFanSpeed(AC_FAN_SPEED_MAX);
5    ac.setTemperature(22);
6    ac.turnOn();
7  }
8
9  void loop() {
10 }
11
```

Рис. 4.2. Програмний код для процедури ініціалізації роботи кондиціонера

В процесі макетування прототипів цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища «TNTU Smart Campus» розроблено множини з понад двадцяти IoT-пристроїв на базі мікроконтролерів «Arduino UNO R3 (CH340)» та «Arduino Leonardo (ATmega32u4)». Для розробки програмного забезпечення мікроконтролерів «Arduino» було використано умовно безкоштовну та відкриту платформу «Arduino IDE» [139].

На третьому етапі формування інформаційно-технологічного набору для передавання даних використано $Proto_{Low}^{Net}$ LoRa. Для цього всі задіяні до постановки експериментів IoT-пристрої [140] було обладнано радіо-модулями з частотою передавання даних 433 МГц на базі мікросхеми «SX1278». Завдяки їхній помірній ціні підвищується доступність для використання в масштабованих ІС з великою кількістю вузлів.

Структуру кіберфізичного рівня інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus» подано на рис. 4.3.

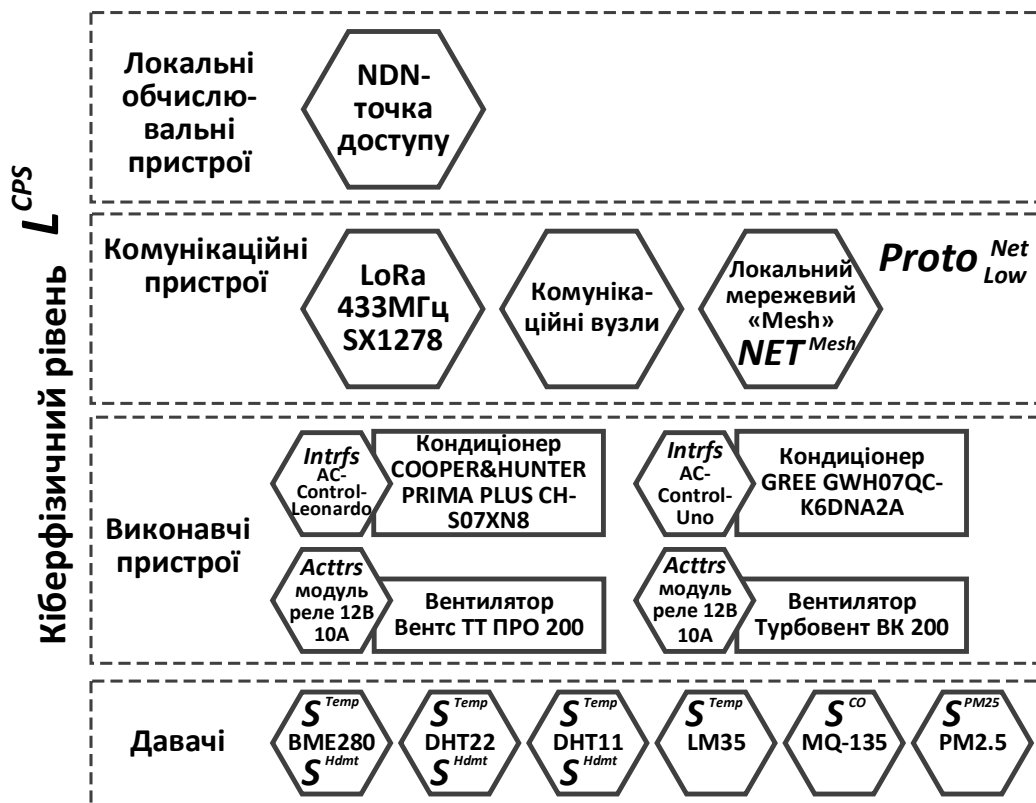


Рис. 4.3. Структура кіберфізичного рівня інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітря

Мережевий протокол LoRa 433МГц було обрано тому, що він забезпечує більшу дальність передачі сигналу та кращу здатність проникнення через перешкоди, спроектований для роботи в умовах низького енергоспоживання та характеризується широким покриттям одного вузла. Це дало змогу, при наявності великої кількості електромагнітних перешкод в серверних та навчальних приміщеннях, сформувати на четвертому етапі NET^{Mesh} малопотужних IoT-пристроїв. На базі якого було розгорнуто NDN-мережу

4.2.2 Мережевий рівень інформаційно-технологічного набору

На п'ятому етапі розроблення інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» на рівні L^{Net} було змодельовано функціонування туманного кластера (див. рис. 4.4).

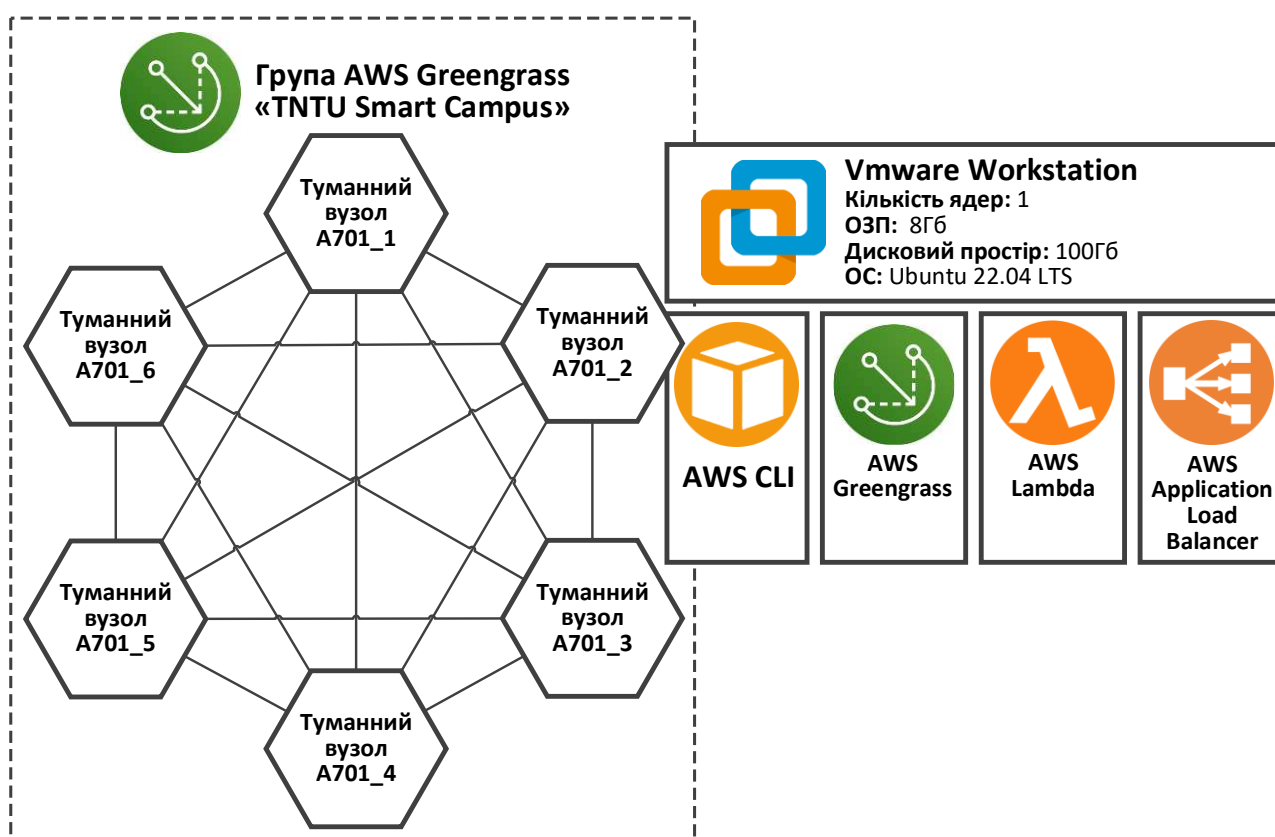


Рис. 4.4. Структурна туманного кластера для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища

Для формування туманного кластера використовувались шість ПК під управлінням 64-розрядної ОС Windows 10 з процесорами «Intel(R) Core(TM) i3-4160 CPU @ 3.60GHz», 16,0 ГБ оперативної пам'яті та 256Гб SSD. На кожен ПК було встановлено програмне забезпечення для створення та запуску віртуальних машин «Vmware Workstation» [141]. За допомогою якого на кожному окремому ПК було створено одну стандартну віртуальну машину під управлінням ОС «Ubuntu 22.04 LTS», що використовує одне процесорне ядро, 8 ГБ оперативної пам'яті та 100 Гб локального дискового простору.

На кожен віртуальну машину було встановлено інструмент командної стрічки «AWS CLI» [142], який дає змогу взаємодіяти з AWS-сервісами. При цьому було створено ключ-пароль для AWS CLI. Після підключення по SSH на всіх віртуальних машинах було встановлено і запущено пакети «AWS Greengrass» [143] та створено Greengrass-групу «TNTU Smart Campus». AWS Greengrass забезпечує високу масштабованість CP^{Fog} в будь-якому напрямку відповідно до обчислювальних потреб. При цьому можна оперативно додавати або видаляти обчислювальні пристрої з туманного кластера без потреби зміни його конфігурації чи програмного забезпечення. Потім для всіх віртуальних машин було створено екземпляри безсерверної обчислювальної платформи «AWS Lambda» [144] для забезпечення функціональних можливостей запуску коду у відповідь на події.

На наступному етапі в консолі AWS було створено AWS Application Load Balancer [145] та налаштовано для балансування навантаження всіх Lambda-екземплярів Greengrass-групи «TNTU Smart Campus». Завдяки підтримці функції шифрування, аутентифікації та авторизації AWS Greengrass забезпечує високий рівень безпеки та контроль туманного кластера, який може функціонувати в автономному режимі без підключення до Інтернету. Це підвищує стійкість туманного кластера під час неконтрольованих вимкнень електропостачання та комунікацій в умовах військового стану.

Структурну схему взаємодії в Greengrass-групі «TNTU Smart Campus» подано на рис. 4.5. Для цього використано мережеві протоколи MQTT та HTTP.

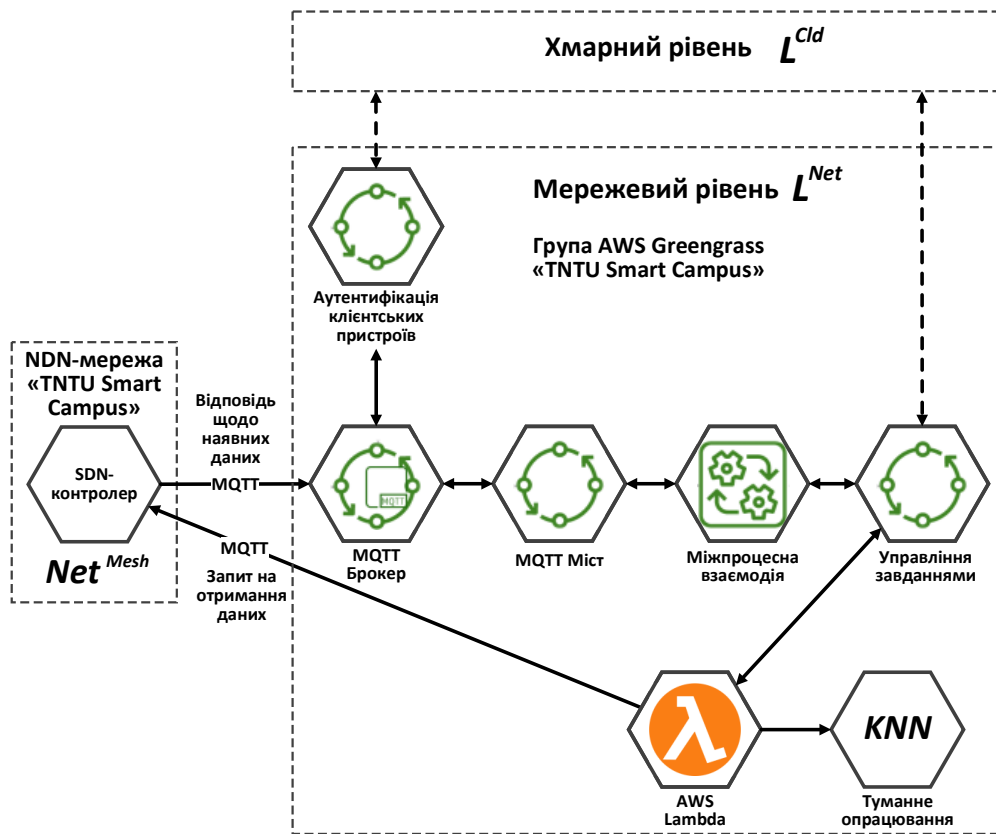


Рис. 4.5. Структурну схему взаємодії в Greengrass-групі «TNTU Smart Campus»

Завдяки налаштуванню та використанню AWS Lambda відбувається CP^{Fog} обробка даних спостереження показників якості повітря зібраних з використанням NDN-мережі «TNTU Smart Campus» без необхідності їх надсилання до L^{Cld} .

Функція аутентифікації в Greengrass-групі використовує сертифікати для аутентифікації клієнтських IoT-пристроїв та політики для їх авторизації. При цьому вона забезпечує захист туманної групи від несанкціонованих спроб доступу, дозволяючи його лише тим IoT-пристроєм, що мають валідні сертифікати і політики.

MQTT Брокер в Greengrass-групі – це програмне забезпечення, що надає туманним пристроям можливість обмінюватися даними з IoT-пристроєм за допомогою мережевого протоколу MQTT, який впродовж останнього періоду часу активно використовується для передачі повідомлень на L^{CPS} .

MQTT міст – це компонент, який дає туманним пристроям змогу обмінюватися даними з пристроями, що не використовують протокол MQTT. В

даному випадку MQTT міст використовується для перетворення повідомлень між протоколами MQTT та HTTP.

Міжпроцесна взаємодія – це механізм, який дає можливість обміну даними між компонентами, які працюють на туманних пристроях.

Управління завданнями – це функція, яка зберігає дані та керує процесами їх передавання між туманними пристроями в AWS-групі. Вона надає доступ до даних для Lambda-функцій при виконанні процедур CP^{Fog} .

Обчислювальні засоби CP^{Fog} використано для автоматизації процесів управління системами вентиляції та кондиціонування серверних приміщень у «TNTU Smart Campus» з метою покращення QoS. Для виявлення аномалій у даних спостереження показників якості повітря серверних приміщень, використано метод k-найближчих сусідів (KNN).

Серверні приміщення Мережевої академії Cisco, що функціонують при Центрі інформаційних технологій ТНТУ, та серверного приміщення відділу Інтернет-технологій, що функціонує при Центрі електронного навчання ТНТУ, використовуються для розміщення критично-важливого серверного обладнання. Тому, згідно стандарту ANSI/ASHRAE 90.4-2022 [146], який регламентує параметри повітряного середовища серверних приміщень, вони відносяться до «Класу А» та потребують найвищого рівня контролю параметрів повітряного середовища. В таких серверних приміщеннях повинні підтримуватись температура від 18 до 27°C, відносна вологість від 40 до 60%, чистота повітря 0.5 PM та рівень шуму не більше 40 дБА.

Для оцінювання показників якості повітряного середовища серверних приміщень використано метод KNN оскільки, за даними авторів [147], він забезпечує найвищу точність 77.52% та прийнятну кількість помилок класифікації – 22.48%, у порівнянні з методами опорних векторів (SVM) та «випадкового лісу». Під час описаної в параграфі 2.5 практичної реалізації процесу спостереження показників якості повітря в серверних приміщеннях ТНТУ зібрано великі за обсягами колекції даних, з яких було вибрано та сформовано набір даних для навчання моделі KNN. Він містив неперервні

послідовності показників якості повітря серверних приміщень впродовж двох тижнів, що відповідають вимогам до серверних приміщень «Класу А». Для програмної реалізації моделі на основі методу KNN та організації процесу її навчання було використано мову програмування «Python» з безкоштовною бібліотекою машинного навчання «Scikit-learn» [148]. Навчену KNN-модель було розгорнуто на віртуальних машинах у Greengrass-групі «TNTU Smart Campus» за допомогою налаштованої функції «AWS Lambda».

Використання моделі KNN для пошуку аномалій у нових даних про якість повітряного середовища відбувається на основі комплексної моделі оцінки якості внутрішнього середовища «розумних будівель» (див. формулу 1.3, параграф 1.6):

$$I^{QoAE} = 0.12D^{temp} + 0.11D^{vlct} + 0.12D^{hdmt} + 0.49D^{CO2} + 0.19D^{PM25}$$

Для цього використано поданий на рис. 4.6 алгоритм.

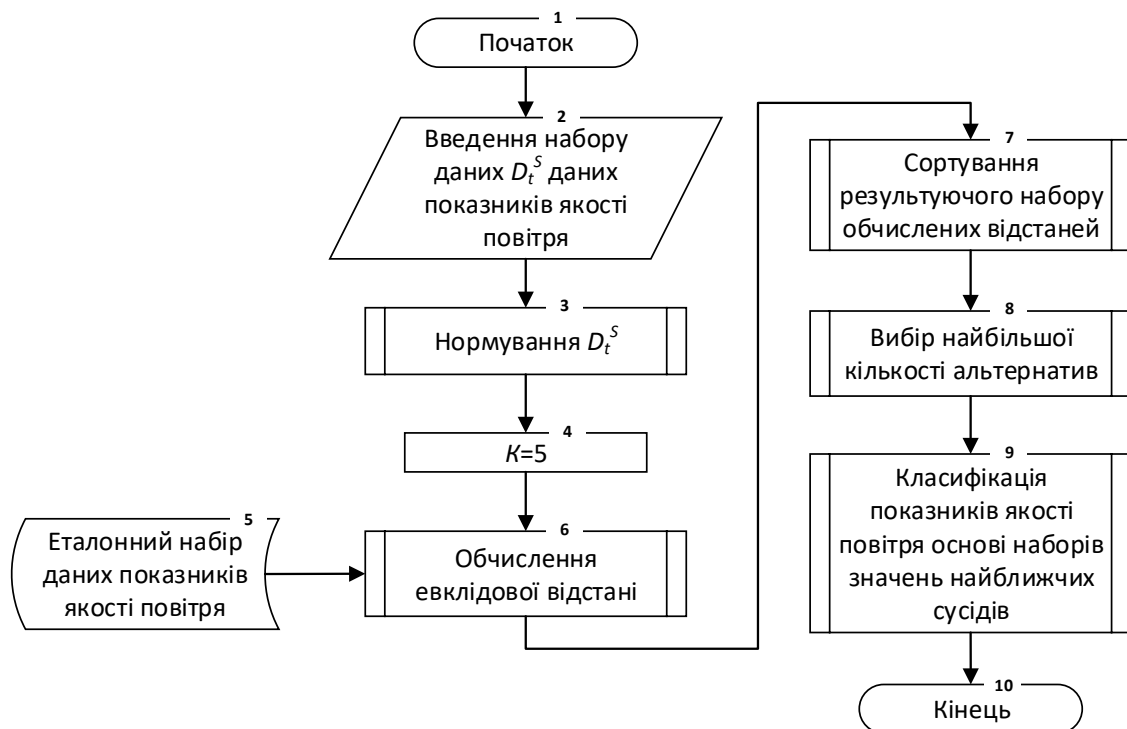


Рис. 4.6. Блок схема алгоритму використання моделі KNN для пошуку аномалій у нових даних щодо якості повітря

Після введення набору даних давачів D_t^S відбувається нормування по формулі 1.2. Наступним кроком задається параметр K для KNN, що визначає кількість найближчих сусідів, які будуть використовуватись для оцінювання поточних значень. На наступному етапі виконання алгоритму відбувається обчислення евклідових відстаней. Класифікація заданого прикладу визначається на основі класифікацій більшості його найближчих сусідів.

У випадку, коли в результаті виконання алгоритму на основі моделі KNN (див. рис. 4.7) виявлено, що показники якості повітряного середовища в серверному приміщенні перевищили допустимі межі, то ініціюється запит до NDN-мережі «TNTU Smart Campus» для ввімкнення відповідної системи кондиціонування повітря. При виявленні перевищення рівня CO_2 або CO відбувається запит до NDN-мережі для вмикання систем вентиляції повітря.

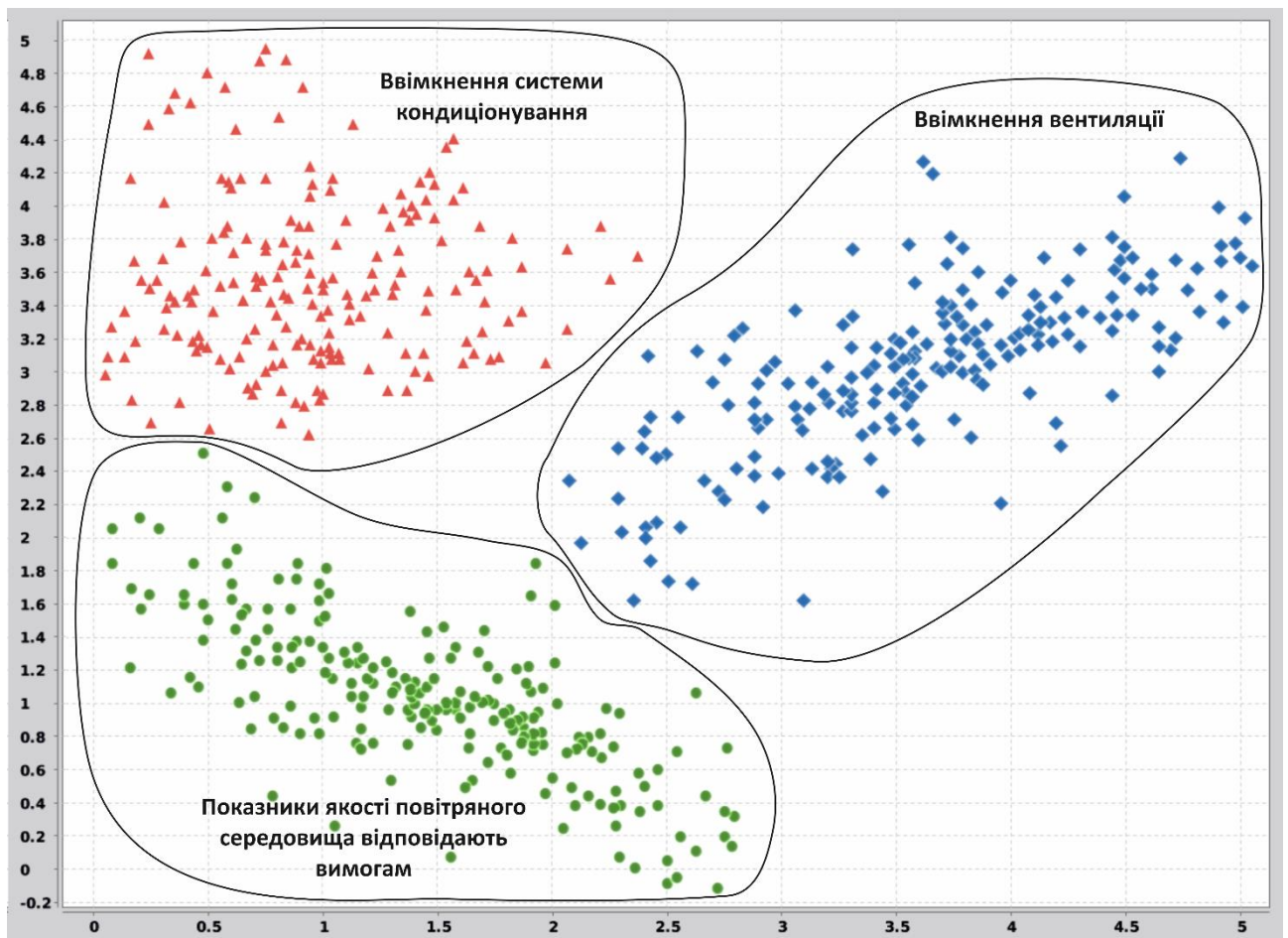


Рис. 4.7. Класифікація показників якості повітря серверних приміщень на основі моделі KNN

Структуру мережевого рівня інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» подано на рис. 4.8.

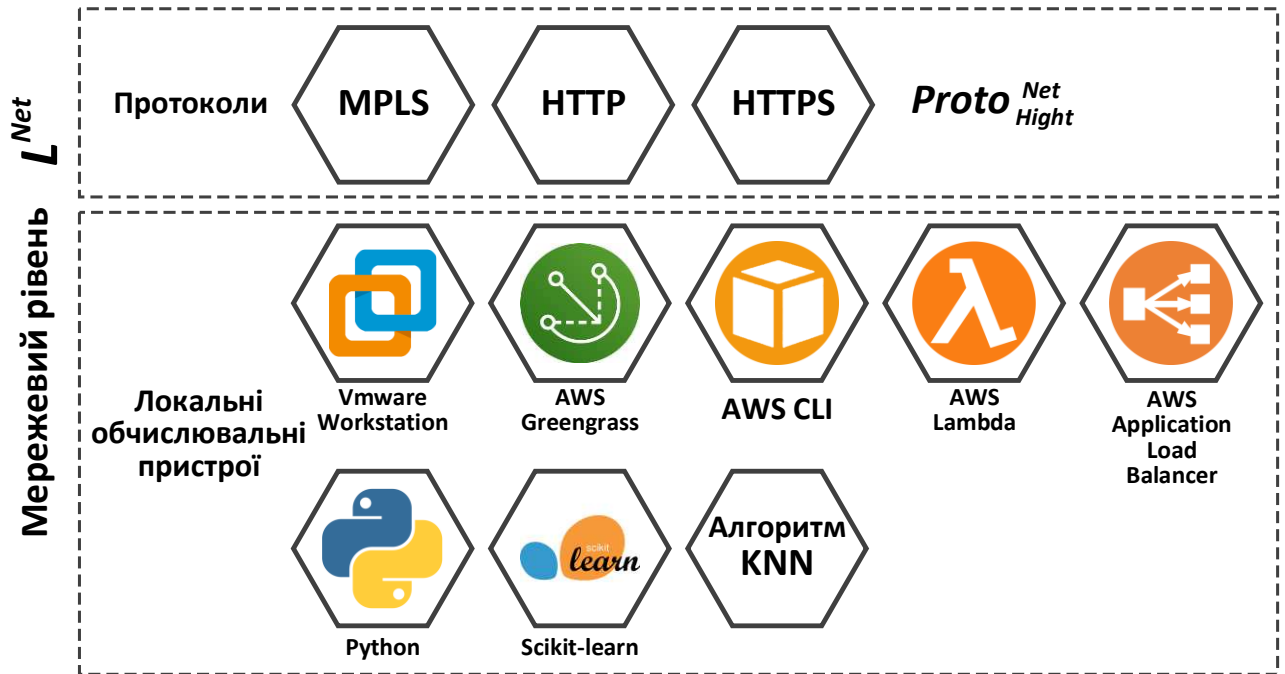


Рис. 4.8. Структура мережевого рівня інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітря

Запропонований підхід позитивно вплинув на ефективність процесів виявлення аномалій у даних спостереження показників якості повітря приміщень, які можуть вказувати на потенційну загрозу серверному обладнанню Мережевої академії Cisco, що функціонує при Центрі інформаційних технологій ТНТУ, та відділу Інтернет-технологій, що функціонує при Центрі електронного навчання ТНТУ.

4.2.3 Хмарний рівень інформаційно-технологічного набору

На шостому етапі формування інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» на рівні L^{Cld} здійснено розгортання хмарної інфраструктури (див. рис. 4.9). Для цього використано хмарну обчислювальну

платформу AWS, яка пропонує обширний перелік послуг, в тому числі хмарні обчислювальні засоби та ресурси, різнотипові хмарні системи зберігання даних, набори інструментів для мережевого доступу, аналітичні засоби на основі методів машинного навчання і т.п.

Для отримання даних від розгорнутого на базі Greengrass-групи «TNTU Smart Campus» туманного кластера в хмарній інфраструктурі було розгорнуто службу «AWS IoT Core» [149]. За допомогою якої створено та ініційовано групу шлюзу «TNTU Smart Campus» та одноіменну топологію, що відповідає Greengrass-сценарію використання. На наступному етапі до створеної топології додано облікові записи всіх IoT-пристроїв, описаної в параграфі 2.7, NDN-мережі. Потім було налаштовано параметри шлюзу «AWS IoT Core» та виконано процедуру перевірки створеної топології.

Для надійного та безпечного передавання великих за обсягом наборів та колекцій даних з множини IoT-пристроїв у сховища даних було використано керовану службу потокової передачі «Amazon Kinesis Data Firehose» [150]. Kinesis Data Firehose активно використовує множину потужних алгоритмів потокового опрацювання та оптимізації даних з метою забезпечення високих показників їх доступності та надійності. При цьому Kinesis Data Firehose дає змогу ефективно запровадити широкий спектр безпекових функцій, виконувати процедури шифрування даних, здійснювати аутентифікацію та авторизацію.

AWS пропонує широкий спектр послуг для побудови та керування *DL* і *НС*. З метою формування процесів зберігання інформації в *DL* було використано сховище даних у необробленому вигляді «AWS Simple Storage Service (S3)» [151]. Це об'ємне сховище різнотипових інформаційних об'єктів, яке забезпечує надійний, безпечний та фінансово ощадний спосіб зберігання наборів та колекцій даних будь-якого типу та розміру. Для цього AWS S3 використовує набір простих та надійних API, що полегшують перебіг процесів отримання та зберігання даних.

Щоб уникнути перетворення *DL* на «болото даних» та забезпечити ефективність процесів створення та управління *MTD* даних в процесі

формування інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» було використано платформу для обробки великих за обсягом наборів та колекцій даних «AWS Glue» [152]. Ця повністю керована хмарна платформа дає змогу автоматизувати великий перелік процесів обробки даних та *MTD* на всіх етапах життєвого циклу, мова йде про імпортування даних, що отримані з різних джерел, їх очищення, трансформацію та завантаження в сховища даних. AWS Glue використовує потужний набір машинних алгоритмів не тільки для оперативного та високопродуктивного виявлення та індексування структури даних, а також для автоматизації процедур створення, запуску та використання конвеєрів машинної обробки даних. AWS Glue (див. рис. 4.9) можна ефективно масштабувати в довільному напрямку відповідно до обчислювальних потреб. Це надає міським установам та організаціям можливість ефективно та фінансово ощадно використовувати хмарні ресурси AWS.

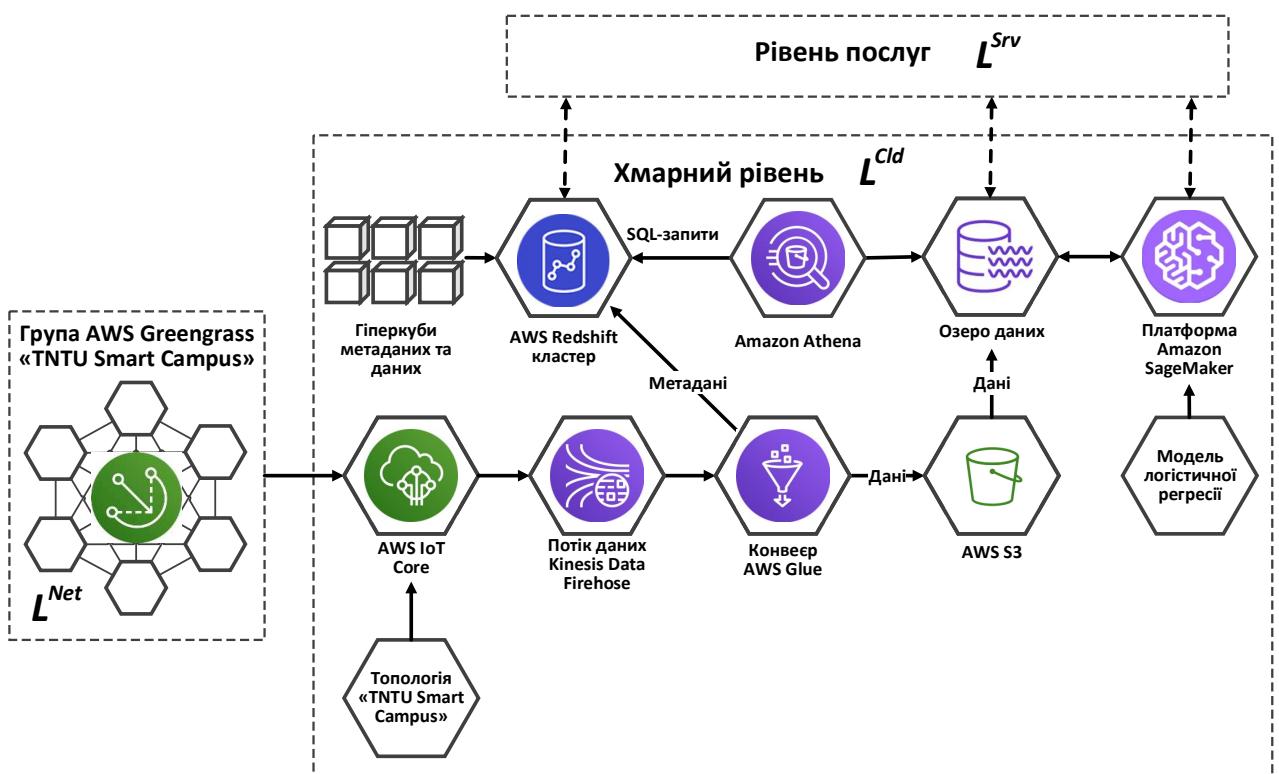


Рис. 4.9. Структурна схема взаємодії на хмарному рівні

З метою практичного впровадження розробленої та описаної в третьому розділі дисертаційної роботи інформаційної технології багатовимірного аналізу

MTD супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» було використано AWS Redshift [153]. Впроваджена у Redshift колончаста технологія дає змогу зберігати лише ті дані, які необхідні для вискоєфективного виконання запитів в процесі обробки великих за обсягом наборів даних, що дозволяє значно підвищити продуктивність процесів опрацювання запитів. На етапі розгортання було сформовано Redshift-кластер та створено таблиці гіперкубів для багатовимірної інформаційної моделі міських кіберфізичних систем (див. формулу 3.6, параграф 3.5), які використано для зберігання інформації щодо понад двадцяти вимірів та понад семидесяти атрибутів даних та *MTD* щодо спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» відповідно до поданої на рис. 3.9 концептуальної структури *DL*.

Структуру L^{Cld} інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus» подано на рис. 4.10.

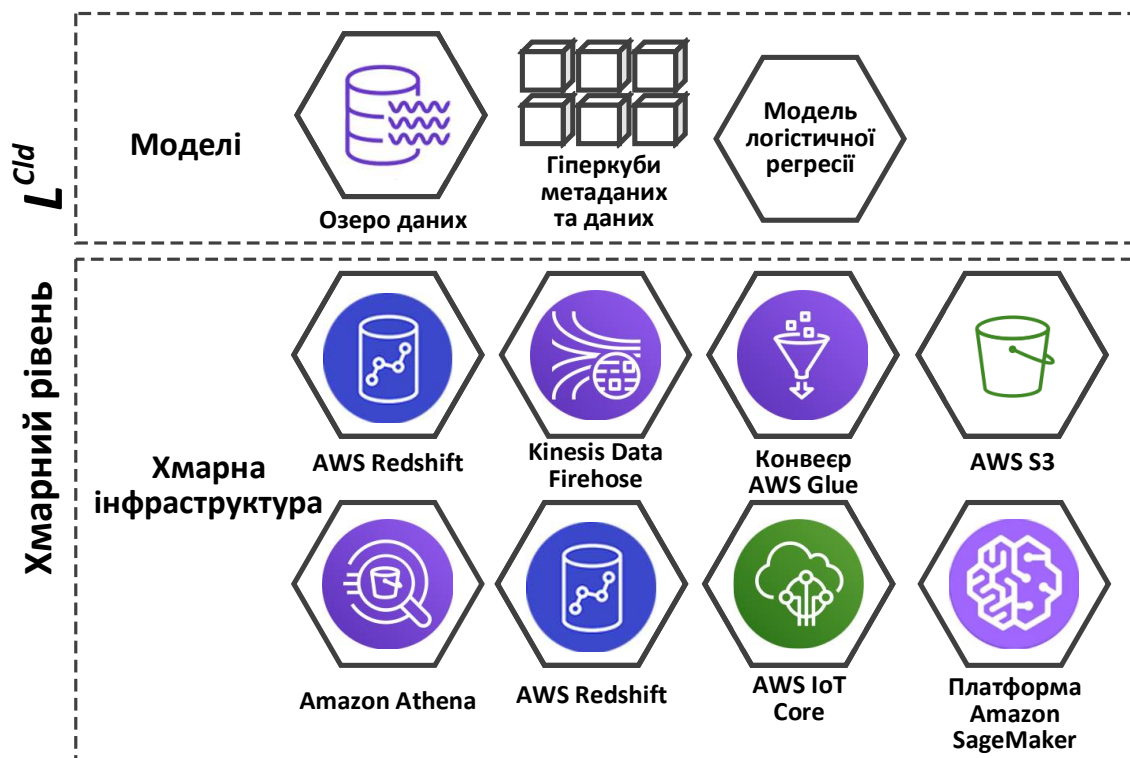


Рис. 4.10. Структура хмарного рівня інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітря

Розгортання Redshift в глобальній мережі хмарних центрів обробки даних забезпечує високі показники доступності, надійності, масштабування та зручності використання.

Процедури аналізу *MTD DL* «TNTU Smart Campus» в AWS Redshift здійснювались на основі запитів до гіперкубів, що виконувались засобами стандартного SQL-синтаксису. При цьому, для запитів даних в «AWS S3», було використано службу запитів до даних без сервера «Amazon Athena» [154].

Для створення, навчання та ефективного розгортання моделі машинного навчання для було використано Amazon SageMaker [155]. Ця програмно-алгоритмічна платформа дає змогу використовувати широкий спектр хмарних послуг та інструментів для автоматизації та масштабування процедур на основі машинного навчання без необхідності безпосереднього написання програмних кодів. SageMaker пропонує ряд способів розгортання моделей машинного навчання, зокрема, «Amazon SageMaker Serverless», «Amazon SageMaker Pipelines» та «Amazon SageMaker Autopilot».

Amazon SageMaker було використано для прогнозування періодів технічного обслуговування вентиляційного обладнання та систем кондиціонування в «TNTU Smart Campus» на основі алгоритму логістичної регресії. Для цього засобами «Amazon SageMaker Automatic Model Tuning» [156] було задіяно готову модель логістичної регресії, результати використання якої було впроваджено на рівні L^{Srv} при формуванні рекомендацій щодо обслуговування вентиляційного обладнання та систем кондиціонування.

4.2.4 Рівень послуг інформаційно-технологічного набору

На завершальному етапі формування інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» на рівні L^{Srv} було використано AWS SDK [157] для JavaScript з метою доступу до різноманітних хмарних послуг AWS. JavaScript-бібліотека «AWS SDK for JavaScript» – це офіційний інструментальний набір для

взаємодії з AWS, що дає розробникам можливості для створення веб-застосунків та мобільних застосунків з використанням хмарних AWS-послуг. На даний час засобами бібліотеки «AWS SDK for JavaScript» впроваджено широкий спектр різнотипових можливостей взаємодії з послугами AWS. В тому числі SDK дає розробникам змогу використовувати хмарні послуги «Amazon SageMaker» для створення, розгортання та використання моделей машинного навчання.

В процесі макетування цифрових послуг на базі інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» було створено два функціонально різних прототипи цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища «TNTU Smart Campus». На рисунку 4.11 подано діаграму прецедентів актора «Користувач» цифрової послуги першого прототипу, який призначено для спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища серверних приміщень.



Рис. 4.11. Діаграма прецедентів актора «Користувач» цифрової послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища приміщень в «TNTU Smart Campus»

Після аутентифікації актор «Користувач» цифрової послуги отримує доступ до головного меню в якому можна вибрати приміщення зі списку, або ознайомитись з інформацією про застосунок. Після вибору приміщення можна переглянути характеристики повітряного середовища на даний момент часу, список та характеристики встановлених в приміщенні датчиків, перевірити статус пристроїв-регуляторів параметрів повітряного середовища. Крім того можна ввімкнути чи вимкнути системи вентиляції та кондиціонування, переглянути сформовані ІС рекомендації щодо їх обслуговування або ввімкнути режим автоматичного регулювання. При такому сценарії використання цифрової послуги ввімкнення систем вентиляції та кондиціонування відбуватиметься на основі описаної в попередньому підпункті класифікації показників якості повітря серверних приміщень ТНТУ на основі моделі KNN.

Другий прототип цифрової послуги призначено для спостереження показників якості повітряного середовища навчальних приміщень в «TNTU Smart Campus», для яких на даний час немає можливості здійснювати регулювання. Діаграму прецедентів актора «Користувач» цього прототипу послуги подана на рисунку 4.12.



Рис. 4.12. Діаграма прецедентів актора «Користувач» цифрової послуги спостереження показників якості повітряного середовища приміщень «TNTU Smart Campus»

Оскільки у цій цифровій послuzі відсутні функціональні можливості регулювання повітряного середовища, то доступ до інтерфейсу відбувається без аутентифікації актора «Користувач» тільки з внутрішньої комунікаційної мережі «TNTU Smart Campus». Функціонально цей прототип цифрової послуги відрізняється від описаного вище відсутністю можливостей для регулювання параметрів повітряного середовища та наявністю можливості перегляду історичних даних давачів якості повітря.

В процесі розробки серверних частин мобільних та веб застосунків цифрових послуг на базі інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» було використано фреймворк «Nest.js» [158], що створений на базі Node.js. Для взаємодії з «AWS SDK» для JavaScript з метою використання послуги AWS було задіяно програмно-алгоритмічний пакет «@nestjs/aws». Для прототипів цифрових послуг розроблено два окремі серверні застосунки, які використовуються для опрацювання запитів від мобільних застосунків та веб-браузерів для доступу до даних у сховищі «AWS S3» та *HC*.

Призначений для серверного програмування програмно-алгоритмічний комплекс фреймворку «Nest.js» надає можливості асинхронного програмування для взаємодії з AWS SDK для JavaScript, оскільки обширний перелік методів AWS SDK для JavaScript потребують асинхронного виконання.

Прототип цифрової послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища приміщень в «TNTU Smart Campus» розроблено з мобільним інтерфейсом. Для цього було використано бібліотеку «React Native» [159], що дає змогу створювати мобільні застосунки, які відображаються та функціонують аналогічно до «нативних» застосунків.

Діаграму класів мобільного застосунку для цифрової послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища подано на рис. 4.13. Клас «App» – це батьківський компонент React Native, що керує всіма іншими компонентами мобільного інтерфейсу цифрової послуги. Він надає користувачам можливості навігацію між рештою екранів застосунку.

Екран «Dashboard» відображає детальну інформацію про показники якості повітряного середовища, мова йде про температуру, вологість, наявність домішок та мікрочастинок. Модуль «Control» містить елементи мобільного інтерфейсу для керування системами вентиляції та кондиціонування, включаючи в себе відповідні компоненти «Ventilation» та «AirConditioning».

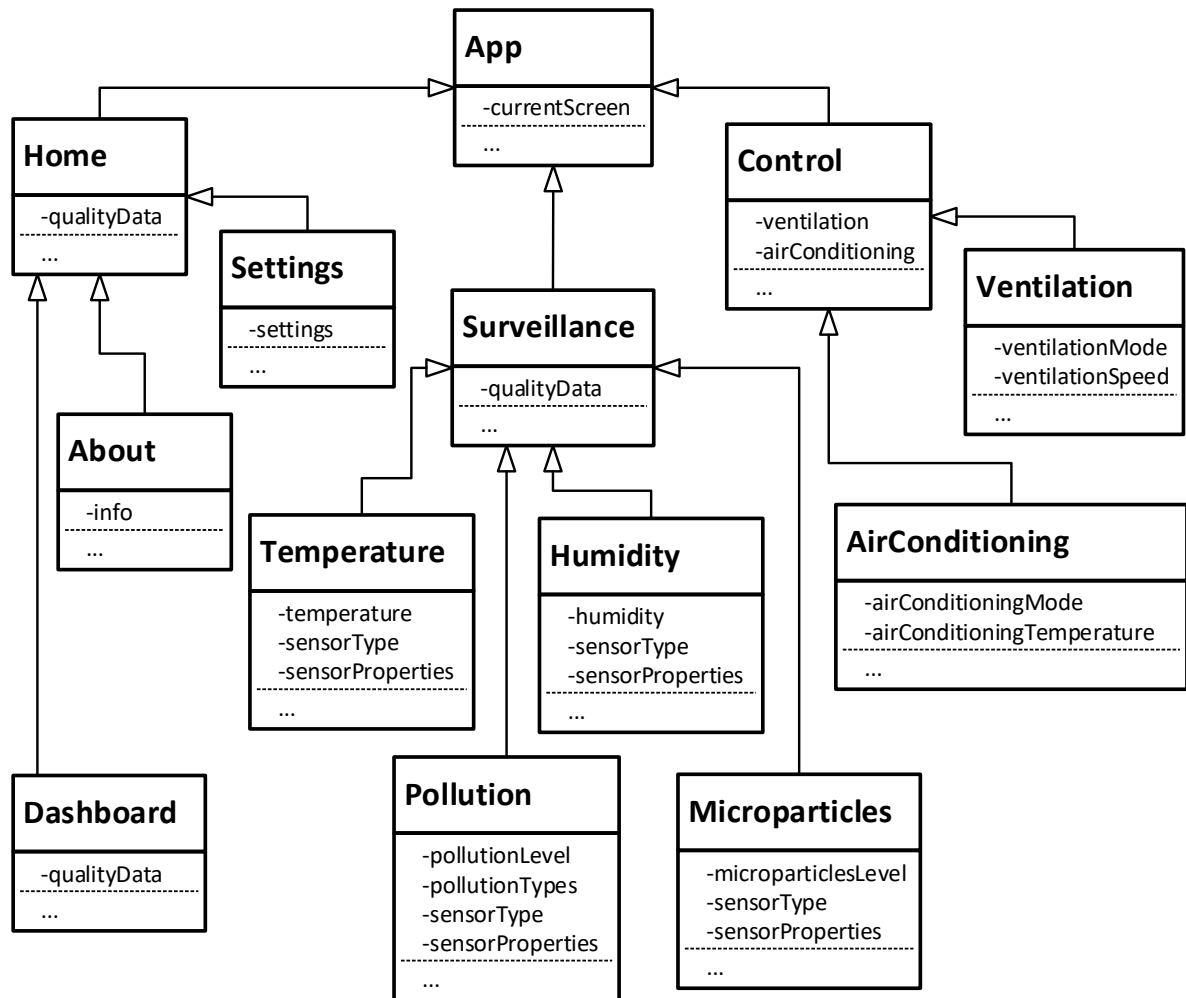


Рис. 4.13. Узагальнена діаграма класів інтерфейсу мобільного застосунку цифрової послуги спостереження та регулювання показників якості повітря

Прототип цифрової послуги спостереження показників якості повітряного середовища приміщень в «TNTU Smart Campus» було розроблено з веб-інтерфейсом. Для створення якого використано бібліотеку «React» завдяки її динамічності та масштабованості. Діаграму класів веб застосунку цієї цифрової послуги спостереження показників якості повітряного середовища зображено на рис. 4.14.

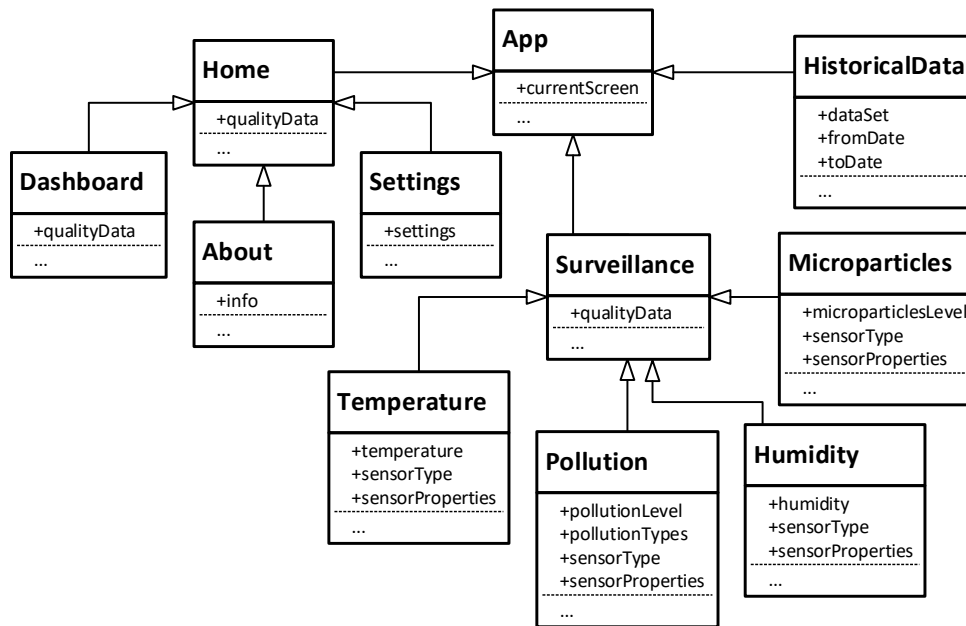


Рис. 4.14. Узагальнена діаграма класів веб-інтерфейсу цифрової послуги спостереження показників якості повітря

Діаграма не містить класів для керування засобами регуляції повітряного середовища, проте містить клас «HistoricalData» для відображення історичних колекцій даних.

Структуру L^{Srv} інформаційно-технологічного набору для цифрових послуг спостереження та регулювання повітряного середовища в «TNTU Smart Campus» подано на рис. 4.15.

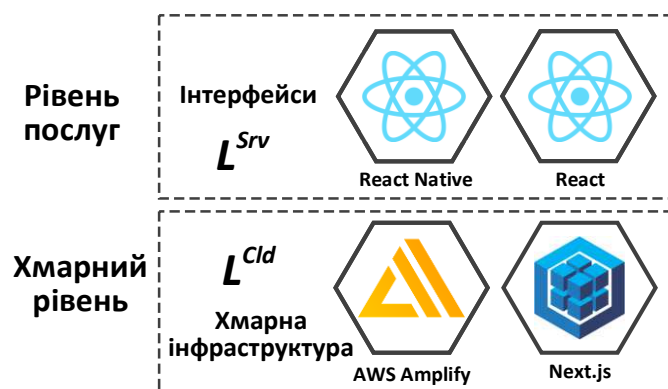


Рис. 4.15. Структура рівня послуг інформаційно-технологічного набору

Для розгортання Next.js було використано платформу «AWS Amplify», яка надає можливості швидкого створення, розгортання та управління веб-застосунками забезпечуючи при цьому ефективну взаємодію з Amazon S3.

4.3 Інтерфейси прототипів цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища

Головна сторінка мобільного застосунку для цифрової послуги спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища (див. рис 4.16) містить інформацію про зареєстрованого в ІС користувача та перелік приміщень.



Рис. 4.16. Стартовий екран мобільного застосунку цифрової послуги спостереження та регулювання повітряного середовища

У верхній частині інтерфейсу розміщено логотип «TNTU Smart Campus». Нижче відображається інформаційна полоса сірого кольору з системними повідомленнями. На даний час ІС може використовуватись для спостереження та регулювання повітряного середовища трьох приміщень, Їхні піктограми зображені в центральній частині інтерфейсу. Правіше вгорі знаходиться

піктограма головного меню мобільного застосунку, а під нею розміщена піктограма для доступу до екрану з інформацією про ІС. В нижній частині мобільного інтерфейсу відображено фото та інформацію про користувача.

При виборі приміщення буде відображено поточний стан повітряного середовища (див. рис. 4.17).



Рис. 4.17. Відображення інформації про поточний стан повітряного середовища в приміщенні

У верхній частині інтерфейсу мобільного застосунку відображається коротке інформаційне повідомлення щодо стану повітряного середовища в приміщенні. Нижче зліва подано назву приміщення та поточні значення показників температури та вологості. Якщо вони знаходяться в межах допустимих для приміщення значень, то відображаються блакитним кольором. Нижче та правіше зображені кнопки систем кондиціонування та вентиляції. Вони

інформують користувача про поточний статус кондиціонера та вентилятора. Якщо пристрої вимкнено, то обрамування кнопок та статус відображаються сірим кольором. При тактильному впливі на ці елементи інтерфейсу відбудеться примусове вмикання або вимикання відповідного пристрою в залежності від його поточного статусу. На рис. 4.17 відображено кнопки систем кондиціонування та вентиляції в автоматичному режимі роботи. При цьому на кнопках відображається повідомлення «Авто.» блакитного кольору.

Якщо характеристики повітряного середовища перевищують допустимі для приміщення значення, то їхні значення відображаються червоним кольором (див. рис. 4.18) а ІС вмикає відповідний пристрій. Класифікація показників якості повітря серверних приміщень відбувається на основі моделі KNN (див. параграф 4.2.2). Після ініціалізації роботи відповідного пристрою його кнопка відображається жовтим кольором.



Рис. 4.18. Відображення інформації про перевищення температури та вмикання кондиціонера

Якщо система кондиціонування (див. рис. 4.19) або вентиляції відмовила та потребує обслуговування, то кнопка відповідного пристрою відображається червоним кольором, а в інформаційній полосі буде подано відповідне повідомлення.



Рис. 4.19. Відображення повідомлення про відмову кондиціонера

Прогнозування періодів технічного обслуговування вентиляційного обладнання та систем кондиціонування в «TNTU Smart Campus» відбувається в хмарному середовищі «Amazon SageMaker» на основі алгоритму логістичної регресії. Якщо ІС виявить наближення потреби технічного обслуговування системи кондиціонування або вентиляції, то в інформаційній стрічці мобільного інтерфейсу буде відображено відповідне повідомлення червоного кольору (див. рис. 4.20).



Рис. 4.20. Відображення інформації про потребу обслуговування кондиціонера

При цьому пристрій буде мати можливість продовжувати роботу в штатному режимі а його кнопка в мобільному інтерфейсі буде функціонувати.

Веб-інтерфейс прототипу цифрової послуги спостереження показників якості повітряного середовища подано на рисунку 4.21.

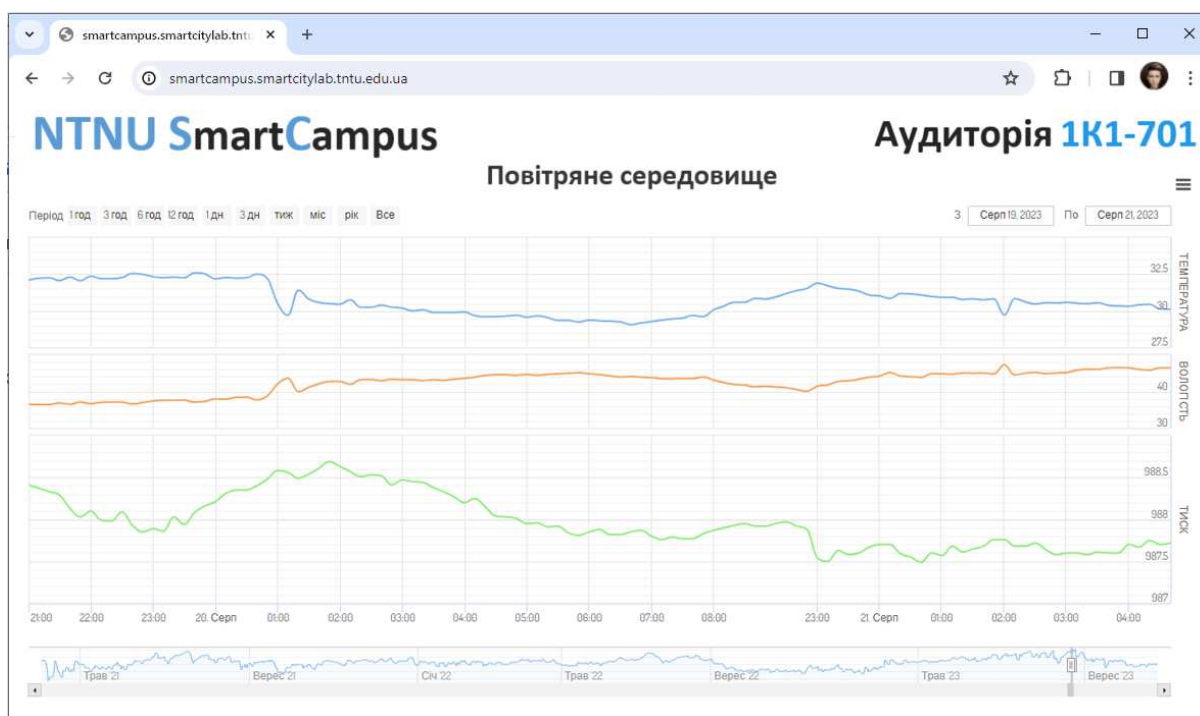


Рис. 4.21. Веб-інтерфейс прототипу цифрової послуги

4.4 Впровадження результатів дослідження

Процеси спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища відбувались на базі серверних і навчальних приміщень Мережевої академії Cisco, що функціонують при Центрі інформаційних технологій ТНТУ, та серверного приміщення відділу Інтернет-технологій, що функціонує при Центрі електронного навчання ТНТУ. Для цього було використано множину з понад двадцяти IoT-пристроїв на основі мікроконтролерів «Arduino UNO R3 (CH340)» та «Arduino Leonardo (ATmega32u4)», що дозволило сформувати частковий комірчастий *NET^{Mesh}* з використанням протоколу «LoRa» на частоті 433 МГц.

Для формування туманного кластера використовувались шість ПК в науково-дослідній лабораторії «Розумне місто Тернопіль».

Формування озера даних «TNTU Smart Campus» та апробація інформаційної технології багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» відбувались з використанням хмарних сервісів AWS, з використанням умовно безкоштовного тарифу, та сприяння науково-дослідної лабораторії кіберфізичних систем ТНТУ.

Класифікацію мережевих протоколів кіберфізичних систем «розумних міст», комплексну модель оцінки якості внутрішнього середовища «розумних будівель» та метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та застосунків було використано для супроводу процесів проектування, інтеграції та використання систем вентиляції та кондиціонування під час експлуатації «розумних будівель» та «розумних приміщень» фахівцями ТОВ «Сахара».

Результати дослідження впроваджені у навчальний процес кафедри комп'ютерних наук та кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Впровадження матеріалів досліджень підтверджено відповідними актами.

4.5 Висновок до розділу 4

В четвертому розділі отримано важливі результати дисертаційного дослідження, зокрема:

1. На основі запропонованого в параграфі 2.3 методу було розроблено інформаційно-технологічний набір для цифрових послуг спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища, що дало змогу провести практичне моделювання відповідних інформаційно-технологічних комплексів.

2. На основі запропонованої в другому розділі моделі інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» сформовано туманний кластер, що дало можливість провести практичне моделювання відповідних програмно-алгоритмічних комплексів, використання яких привело до зменшення обчислювального навантаження на хмарну інфраструктуру та позитивно вплинуло на стійкість та масштабованість прототипів цифрових послуг.

3. На основі запропонованої в параграфі 2.1 моделі обчислювальної архітектури мережевої платформи «розумного міста» та запропонованої в параграфі 3.4 моделі управління метаданими об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» здійснено розгортання хмарної інфраструктури, що дало змогу виконати практичну апробацію описаної запропонованої в параграфі 3.5 інформаційної технології багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

4. В процесі макетування прототипів цифрових послуг сформовано дві цілісні інформаційні системи супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища, що дало можливість виконати практичну апробацію проведених досліджень. Подано опис діаграм класів та інтерфейсів розроблених прототипів, використання яких дозволило підвищити ступінь повноти подання інформації щодо процесів формування цифрових послуг та сервісів на основі кіберфізичних систем «розумних міст».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання підвищення ступеня повноти подання інформації щодо процесів, які протікають в кіберфізичних системах «розумного» міста.

Основні наукові й практичні результати роботи полягають в наступному:

1. В результаті аналізу особливостей існуючих інформаційних та комунікаційних технологій, що використовуються для супроводу об'єктів кіберфізичних систем, запропоновано розширити функціональну модель «розумних міст», додавши до неї набір для спостереження та керування повітряним середовищем «розумних будівель». Це, в свою чергу, дозволило виокремити ключові обчислювальні підходи, інформаційні та комунікаційні технології супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

2. Розроблено модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст» на основі кіберфізичного, мережевого, хмарного та сервісного інфраструктурних рівнів, що застосовуються для підвищення ступеня інтеграції високопродуктивних та розподілених периферійних, туманних та хмарних обчислень.

3. Розроблено оригінальний метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг, який, на відміну від існуючих, враховує різнотипову природу об'єктів кіберфізичних систем. Метод використано для прототипування «розумних» послуг спостереження та керування міського повітряного середовища.

4. Розроблено інформаційну технологію багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем на основі методології побудови гіперкубів даних. Це дозволило провести класифікацію та параметризацію множини категорій та атрибутів метаданих, що використовуються для опису процесів спостереження та керування у кіберфізичних системах «розумного міста» і привело до формування багатовимірних моделей метаданих використаних при формуванні прототипів

озер даних. Зазначені озера даних, на відміну від існуючих, краще адаптовані до динамічних змін структури та станів кіберфізичних систем великого міста.

5. Розроблено прототипи цифрових послуг, які реалізують супровід процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища в міських умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] А. Станько, А. Микитишин и О. Голотенко, "Комунікаційні технології в енергосистемах," XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій", 2022.
- [2] [DS1][MLA] J. S. Gracias, G. S. Parnell, E. Specking, E. A. Pohl, and R. Buchanan, "Smart Cities—A Structured Literature Review," *Smart Cities*, vol. 6, no. 4, pp. 1719-1743, 2023.
- [3] F. Zhao, O. I. Fashola, T. I. Olarewaju, and I. Onwumere, "Smart city research: A holistic and state-of-the-art literature review," *Cities*, vol. 119, p. 103406, 2021.
- [4] D. Kanellopoulos, V. K. Sharma, T. Panagiotakopoulos, and A. Kameas, "Networking Architectures and Protocols for IoT Applications in Smart Cities: Recent Developments and Perspectives," *Electronics*, vol. 12, no. 11, pp. 2490, 2023.
- [5] О. Головка, А. Станько, "Телемедицина в епоху COVID-19," VIII науково-технічна конференція "Інформаційні моделі, системи та технології " ТНТУ, ст. 92-93, 2020.
- [6] A. Khalifeh, K. A. Darabkh, A. M. Khasawneh, I. Alqaisieh, M. Salameh, A. AlAbdala, & K. Rajendiran, "Wireless sensor networks for smart cities: Network design, implementation and performance evaluation," *Electronics*, vol. 10, no. 2, pp. 218, 2021.
- [7] A. Puliafito, G. Tricomi, A. Zafeiropoulos, and S. Papavassiliou, "Smart cities of the future as cyber physical systems: Challenges and enabling technologies," *Sensors*, vol. 21, no. 10, pp. 3349, 2021.
- [8] T. Alam, "Cloud-based IoT applications and their roles in smart cities," *Smart Cities*, vol. 4, no. 3, pp. 1196-1219, 2021.
- [9] T. A. N. Abdali, R. Hassan, A. H. M. Aman, and Q. N. Nguyen, "Fog computing advancement: Concept, architecture, applications, advantages, and open issues," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 75961-75980, 2021.

- [10] N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, S. Lazarova-Molnar, and I. Jawhar, "Applications of integrated iot-fog-cloud systems to smart cities: A survey," *Electronics*, vol. 10, no. 23, pp. 2918, 2021.
- [11] A. M. Mouazen and A. B. Hernández-Lara, "The role of sustainability in the relationship between migration and smart cities: a bibliometric review," *Digital Policy, Regulation and Governance*, vol. 23, no. 1, pp. 77-94, 2021.
- [12] F. Brunetti, D. T. Matt, A. Bonfanti, A. De Longhi, G. Pedrini, and G. Orzes, "Digital transformation challenges: strategies emerging from a multi-stakeholder approach," *The TQM Journal*, vol. 32, no. 4, pp. 697-724, 2020.
- [13] L. S. Vedantham, Y. Zhou, and J. Wu, "Information and communications technology (ICT) infrastructure supporting smart local energy systems: A review," *IET Energy Systems Integration*, vol. 4, no. 4, pp. 460-472, 2022.
- [14] U. Ammara, K. Rasheed, A. Mansoor, A. Al-Fuqaha, and J. Qadir, "Smart cities from the perspective of systems," *Systems*, vol. 10, no. 3, p. 77, 2022.
- [15] A. Stanko, "Information technology platform for monitoring infectious diseases," *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 110, no. 2, pp. 98–110, 2023, ISSN: 2522-4433, DOI: 10.33108/visnyk_tntu2023.02.
- [16] M. Razaghi and M. Finger, "Smart governance for smart cities," *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 4, pp. 680-689, 2018.
- [17] Q. Do, B. Martini, and K. K. R. Choo, "Cyber-physical systems information gathering: A smart home case study," *Computer Networks*, vol. 138, pp. 1-12, 2018.
- [18] B. Kalluri, C. Chronopoulos, and I. Kozine, "The concept of smartness in cyber-physical systems and connection to urban environment," *Annual Reviews in Control*, vol. 51, pp. 1-22, 2021.
- [19] G. Pinto, Z. Wang, A. Roy, T. Hong, and A. Capozzoli, "Transfer learning for smart buildings: A critical review of algorithms, applications, and future perspectives," *Advances in Applied Energy*, vol. 5, p. 100084, 2022.

- [20] M. Elshenawy, B. Abdulhai, and M. El-Dariby, "Towards a service-oriented cyber–physical systems of systems for smart city mobility applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 79, pp. 575-587, 2018.
- [21] Y. Qian, J. Liu, Z. Cheng, and J. Y. L. Forrest, "Does the smart city policy promote the green growth of the urban economy? Evidence from China," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 66709-66723, 2021.
- [22] О. Палка, А. Станько, Г. Шимчук, О. Герасимчук, "Запобігання поширення коронавірусної інфекції у «розумних містах»," "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк, 2021, № 42, ст. 79-88, eISSN 2524-0560, ISSN 2524-0552.
- [23] "Cyber Physical Systems Conceptual Map, Berkeley.". Доступно: <http://CyberPhysicalSystems.org>. Дата доступу: серпень, 2023.
- [24] R. Sun, S. Gregor, and B. Keating, "Information technology platforms: Conceptualisation and a review of emerging research in IS research," in *Australasian Conference on Information Systems (ACIS) 2015 Proceedings*, pp. 1-17, Association for Information Systems, 2015.
- [25] C. Puliafito, E. Mingozzi, F. Longo, A. Puliafito, and O. Rana, "Fog computing for the internet of things: A survey," *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*, vol. 19, no. 2, pp. 1-41, 2019.
- [26] M. O. Ahmad, M. A. Ahad, M. A. Alam, F. Siddiqui, and G. Casalino, "Cyber-physical systems and smart cities in India: Opportunities, issues, and challenges," *Sensors*, vol. 21, no. 22, pp. 7714, 2021.
- [27] A. K. Tyagi and N. Sreenath, "Cyber Physical Systems: Analyses, challenges and possible solutions," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 1, pp. 22-33, 2021.
- [28] S. Ouchani, "Ensuring the functional correctness of IoT through formal modeling and verification," in *Model and Data Engineering: 8th International Conference, MEDI 2018, Marrakesh, Morocco, October 24–26, 2018, Proceedings 8*, pp. 401-417, Springer International Publishing, 2018.

- [29] G. Tricomi, G. Merlino, F. Longo, D. Salvatore, and A. Puliafito, "Software-defined city infrastructure: A control plane for rewirable smart cities," in 2019 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), pp. 180-185, IEEE, June 2019.
- [30] B. Tekinerdogan, Ö. Köksal, and T. Çelik, "System Architecture Design of IoT-Based Smart Cities," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, pp. 4173, 2023.
- [31] I. Rafiq, A. Mahmood, S. Razzaq, S. H. M. Jafri, and I. Aziz, "IoT applications and challenges in smart cities and services," *The Journal of Engineering*, vol. 2023, no. 4, p. e12262, 2023.
- [32] C. Ma, "Smart city and cyber-security; technologies used, leading challenges and future recommendations," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7999-8012, 2021.
- [33] J. J. P. Abadia and K. Smarsly, "Trends and recommendations for IoT-based smart city applications," in *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 3-10, Springer Nature Switzerland, October 2022.
- [34] А. Станько, "Телекомунікаційні технології в проектах розумних міст," Міжнародна науково-технічна конференція "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій " до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 181-183., 2020.
- [35] T. Salman and R. Jain, "A survey of protocols and standards for internet of things," *arXiv preprint arXiv:1903.11549*, 2019.
- [36] S. Kaur and G. Kaur, "Internet of Things (IoT): Issues and Challenges Ahead," *Journal of Business Management*, vol. 1, no. 1, pp. 1-4, 2022.
- [37] N. Nurelmadina, M. K. Hasan, I. Memon, R. A. Saeed, K. A. Zainol Ariffin, E. S. Ali, M. A. Hassan, "A systematic review on cognitive radio in low power wide area network for industrial IoT applications," *Sustainability*, vol. 13, no. 1, pp. 338, 2021.
- [38] А. Станько, О. В. Тотосько, і Р. Олег Васильович Ніколайчук, "Особливості технології комунікації по видимому світлі," III Міжнародна науково-

практична конференція молодих учених та студентів "Філософські виміри техніки" (PDT-2022), 2022.

- [39] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols," in 2017 8th International conference on information technology (ICIT), pp. 685-690, IEEE, May 2017.
- [40] M. M. Rana and R. Bo, "IoT-based cyber-physical communication architecture: challenges and research directions," IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, vol. 5, no. 1, pp. 25-30, 2020.
- [41] A. Aijaz, Z. Dawy, N. Pappas, M. Simsek, S. Oteafy, and O. Holland, "Toward a tactile Internet reference architecture: Vision and progress of the IEEE P1918.1 standard," arXiv preprint arXiv:1807.11915, 2018.
- [42] H. Habibzadeh, B. H. Nussbaum, F. Anjomshoa, B. Kantarci, and T. Soyata, "A survey on cybersecurity, data privacy, and policy issues in cyber-physical system deployments in smart cities," Sustainable Cities and Society, vol. 50, p. 101660, 2019.
- [43] J. V. D. Tóth, "Smart ventilation serving for smart factories: challenges and perspectives", Outline of ETC15 workshop, 2023.
- [44] D. Tóth and J. Vad, "Industry 4.0 perspectives of axial and radial fans in smart industrial ventilation: conceptual case studies," in Proc. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'22), Budapest, Hungary, Paper No.: CMFF22-040, August 2022.
- [45] K. D. Purkayastha, C. Nath, and S. N. Pradhan, "Power aware air quality sensing system with efficient data storage capability," Journal of Air Pollution and Health, 2023.
- [46] S. Sony, S. Laventure, and A. Sadhu, "A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring," Structural Control and Health Monitoring, vol. 26, no. 3, p. e2321, 2019.
- [47] R. Carli, G. Cavone, S. Ben Othman, and M. Dotoli, "IoT based architecture for model predictive control of HVAC systems in smart buildings," Sensors, vol. 20, no. 3, p. 781, 2020.

- [48] H. Yan, Q. Liu, W. Zhao, C. Pang, M. Dong, H. Zhang, and L. Wang, "The coupled effect of temperature, humidity, and air movement on human thermal response in hot-humid and hot-arid climates in summer in China," *Building and Environment*, vol. 177, p. 106898, 2020.
- [49] "ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers". Доступно: <https://webstore.ansi.org>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [50] C. Ren and S. J. Cao, "Implementation and visualization of artificial intelligent ventilation control system using fast prediction models and limited monitoring data," *Sustainable Cities and Society*, vol. 52, p. 101860, 2020.
- [51] S. J. Cao and C. Ren, "Ventilation control strategy using low-dimensional linear ventilation models and artificial neural network," *Building and Environment*, vol. 144, pp. 316-333, 2018.
- [52] C. Ren and S. J. Cao, "Development and application of linear ventilation and temperature models for indoor environmental prediction and HVAC systems control," *Sustainable Cities and Society*, vol. 51, p. 101673, 2019.
- [53] Z. Feng, C. W. Yu, and S. J. Cao, "Fast prediction for indoor environment: models assessment," *Indoor and Built Environment*, vol. 28, no. 6, pp. 727-730, 2019.
- [54] Y. Deng, Z. Feng, J. Fang, and S. J. Cao, "Impact of ventilation rates on indoor thermal comfort and energy efficiency of ground-source heat pump system," *Sustainable Cities and Society*, vol. 37, pp. 154-163, 2018.
- [55] Y. Fan and K. Ito, "Integrated building energy computational fluid dynamics simulation for estimating the energy-saving effect of energy recovery ventilator with CO2 demand-controlled ventilation system in office space," *Indoor and Built Environment*, vol. 23, no. 6, pp. 785-803, 2014.
- [56] S. J. Cao and H. Y. Deng, "Investigation of temperature regulation effects on indoor thermal comfort, air quality, and energy savings toward green residential buildings," *Science and Technology for the Built Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 309-321, 2019.

- [57] Q. Xue, Z. Wang, J. Liu, and J. Dong, "Indoor PM_{2.5} concentrations during winter in a severe cold region of China: A comparison of passive and conventional residential buildings," *Building and Environment*, vol. 180, p. 106857, 2020.
- [58] M. Huang and Y. Liao, "Development of an indoor environment evaluation model for heating, ventilation and air-conditioning control system of office buildings in subtropical region considering indoor health and thermal comfort," *Indoor and Built Environment*, vol. 31, no. 3, pp. 807-819, 2022.
- [59] J. M. Paniagua, M. Rufo, A. Jiménez, and A. Antolín, "Dimensionless coefficients for assessing human exposure to radio-frequency electromagnetic fields indoors and outdoors in urban areas," *Environmental research*, vol. 183, p. 109188, 2020.
- [60] А. Станько, О. Мацюк, "Розумне місто як комплексна система інтеграції послуг та функціонування міської інфраструктури," у Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" 2 ТНТУ, ст. 92-93., 2019.
- [61] M. A. Aguida, S. Ouchani, and M. Benmalek, "A review on cyber-physical systems: models and architectures," in *2020 IEEE 29th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE)*, pp. 275-278, IEEE, September 2020.
- [62] M. Whaiduzzaman, A. Barros, M. Chanda, S. Barman, T. Sultana, M. S. Rahman, and C. Fidge, "A review of emerging technologies for IoT-based smart cities," *Sensors*, vol. 22, no. 23, p. 9271, 2022.
- [63] C. Stergiou, K. E. Psannis, B. G. Kim, and B. Gupta, "Secure integration of IoT and cloud computing," *Future Generation Computer Systems*, vol. 78, pp. 964-975, 2018.
- [64] M. E. E. Alahi, A. Sukkuea, F. W. Tina, A. Nag, W. Kurdthongmee, K. Suwannarat, and S. C. Mukhopadhyay, "Integration of IoT-Enabled Technologies and Artificial Intelligence (AI) for Smart City Scenario: Recent Advancements and Future Trends," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5206, 2023.

- [65] M. Mukherjee, L. Shu, and D. Wang, "Survey of fog computing: Fundamental, network applications, and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 1826-1857, 2018.
- [66] X. Wang, Y. Han, V. C. Leung, D. Niyato, X. Yan, and X. Chen, "Convergence of edge computing and deep learning: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 869-904, 2020
- [67] M. Whaiduzzaman, K. Oliullah, M. J. N. Mahi, and A. Barros, "AUASF: An anonymous users authentication scheme for fog-IoT environment," in *2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pp. 1-7, IEEE, July 2020.
- [68] А. Станько, А. Микитишин, В. Левицький, "Концепція архітектури «Розумного міста» як кіберфізичної системи," Міжнародна науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій" до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 184-186., 2020.
- [69] О. Дуда, А. Станько, "Архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст»," *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*, №4(323), ст. 123-130, 2023, ISSN 2307-5732, DOI 10.31891/2307-5732.
- [70] O. Duda, L. Dzhydzhora, O. Matsiuk, A. Stanko, N. Kunanets, V. Pasichnyk, and O. Kunanets, "Mobile Information System for Monitoring the Spread of Viruses in Smart Cities," *Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks"*, Issue 8, Lviv Polytechnic National University, pp. 65-70, ISSN: 2524-065X, DOI:10.23939/sisn2020.08.065.
- [71] L. Bittencourt et al., "The internet of things, fog and cloud continuum: Integration and challenges," *Internet of Things*, vol. 3, pp. 134-155, 2018.
- [72] J. Debbarma, Y. Choi, F. Yang, and H. Lee, "Exports as a new paradigm to connect business and information technology for sustainable development," *Journal of Innovation & Knowledge*, vol. 7, no. 4, p. 100233, 2022.

- [73] The Arduino.cc Documentation. Доступно: <https://docs.arduino.cc>. Дата доступу: травень, 2023.
- [74] A. Sajid, S. W. Shah, and T. Magsi, "Comprehensive Survey on Smart Cities Architectures and Protocols," *EAI Endorsed Transactions on Smart Cities*, vol. 6, no. 18. 2022.
- [75] [Нове F. E. Samann, A. M. Abdulazeez, and S. Askar, "Fog Computing Based on Machine Learning: A Review," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 15, no. 12, 2021.
- [76] A. Mishra, A. V. Jha, B. Appasani, A. K. Ray, D. K. Gupta, and A. N. Ghazali, "Emerging technologies and design aspects of next generation cyber physical system with a smart city application perspective," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 14, suppl 3, pp. 699-721, 2023.
- [77] T. J. Skluzacek, "Dredging a data lake: decentralized metadata extraction," in *Proceedings of the 20th International Middleware Conference Doctoral Symposium*, pp. 51-53, December 2019.
- [78] C. Giebler et al., "Data Lakes auf den Grund gegangen: Herausforderungen und Forschungslücken in der Industriepraxis," *Datenbank-Spektrum*, vol. 20, pp. 57-69, 2020.
- [79] A. A. Stanko, "Development and Investigation of an Automated System for Climate Control of Server Rooms at Ivan Pul'uj Ternopil National Technical University: Master's Thesis Abstract in the Field of Automation and Computer-Integrated Technologies," Master's thesis, Ternopil National Technical University, Ternopil, Ukraine, 2018, Доступно: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26405>. Дата доступу: червень, 2023.
- [80] O. Kramar, Y. Drohobyt'skiy, Y. Skorenkyu, O. Rokitskyi, N. Kunanets, V. Pasichnyk, and O. Matsiuk, "Augmented Reality-assisted Cyber-Physical Systems of Smart University Campus," in *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, vol. 2, pp. 309-313, IEEE, September 2020.

- [81] M. Iorga, L. Feldman, R. Barton, M. J. Martin, N. S. Goren, and C. Mahmoudi, "Fog computing conceptual model." Доступно: <https://www.nist.gov/publications/fog-computing-conceptual-model>. Дата доступу: серпень, 2023.
- [82] А. Станько, "Аналіз концепції всеосяжного інтернету–ІоЕ," X науково-технічна конференція "Інформаційні моделі, системи та технології" Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 2022.
- [83] Hivcell Is the Premiere Platform as a Service for Edge Computing. Доступно: <https://hivcell.com>. Дата доступу: серпень, 2023
- [84] Apache Kafka. Доступно: <https://kafka.apache.org>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [85] Kubernetes—Production-Grade Container Orchestration, Automated container Deployment, Scaling, and Management. Доступно: <https://kubernetes.io>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [86] M. Abadi, P. Barham, J. Chen, Z. Chen, A. Davis, J. Dean, and X. Zheng, "{TensorFlow}: a system for {Large-Scale} machine learning," in 12th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 16), pp. 265-283, 2016.
- [87] E. Badidi, Z. Mahrez, and E. Sabir, "Fog computing for smart cities' big data management and analytics: A review," Future Internet, vol. 12, no. 11, p. 190, 2020.
- [88] P. Mell and T. Grance, "The NIST Definition of Cloud Computing." Доступно: <http://faculty.winthrop.edu/domanm/csci411/Handouts/NIST.pdf>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [89] P. Plebani, M. Salnitri, and M. Vitali, "Fog computing and data as a service: A goal-based modeling approach to enable effective data movements," in Advanced Information Systems Engineering: 30th International Conference, CAiSE 2018, Tallinn, Estonia, June 11-15, 2018, Proceedings, vol. 30, pp. 203-219, Springer International Publishing, 2018.

- [90] S. Tong, Y. Liu, M. Cheriet, M. Kadoch, and B. Shen, "UCAA: User-centric user association and resource allocation in fog computing networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 10671-10685, 2020.
- [91] S. Kalafatidis, S. Skaperas, V. Demiroglou, L. Mamatas, and V. Tsaoussidis, "Logically-Centralized SDN-Based NDN Strategies for Wireless Mesh Smart-City Networks," *Future Internet*, vol. 15, no. 1, p. 19, 2022.
- [92] T. Theodorou, G. Violettas, P. Valsamas, S. Petridou, and L. Mamatas, "A multi-protocol software-defined networking solution for the Internet of Things," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 10, pp. 42-48, 2019.
- [93] S. Malik, G. Shabbir, and A. Akram, "BEIOX: The BATMAN enabled internet of x," *International Journal of Computer Applications*, vol. 180, no. 9, pp. 27-35, 2018.
- [94] Y. Liu, J. Tang, Z. Tang, and C. Sun, "Robust full-waveform inversion based on automatic differentiation and differentiable dynamic time warping," *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 549-564, 2023.
- [95] W. B. Li, G. L. Li, and Y. Yang, "Research of Fuzhou Historical Building Management Platform Based on Data Warehouse Technology," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 42, pp. 671-674, 2019.
- [96] S. Q. Abd Al-Rahman, E. H. Hasan, and A. M. Sagheer, "Design and implementation of the web (extract, transform, load) process in data warehouse application," *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, vol. 12, no. 2, pp. 765, 2023.
- [97] A. R. Munappy, J. Bosch, and H. H. Olsson, "Data pipeline management in practice: Challenges and opportunities," in *Product-Focused Software Process Improvement: 21st International Conference, PROFES 2020, Turin, Italy, November 25–27, 2020, Proceedings*, vol. 21, pp. 168-184, Springer International Publishing, 2020.

- [98] J. Dixon, "Pentaho, Hadoop, and Data Lakes." Доступно: <https://jamesdixon.wordpress.com/2010/10/14/pentaho-hadoop-and-data-lakes>. Дата доступа: сентябрь, 2023.
- [99] P. P. Khine and Z. S. Wang, "Data lake: a new ideology in the big data era," in ITM Web of Conferences, vol. 17, p. 03025, EDP Sciences, 2018
- [100] T. S. Hukkeri, V. Kanoria, and J. Shetty, "A study of enterprise data lake solutions," International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 7, 2020.
- [101] R. Stackowiak and R. Stackowiak, "Azure IoT solutions overview," in Azure Internet of Things Revealed: Architecture and Fundamentals, 2019, pp. 29-54.
- [102] R. Hai, C. Quix, and C. Zhou, "Query rewriting for heterogeneous data lakes," in Advances in Databases and Information Systems: 22nd European Conference, ADBIS 2018, Budapest, Hungary, September 2–5, 2018, Proceedings, pp. 35-49, 2018.
- [103] P. N. Sawadogo, E. Scholly, C. Favre, E. Ferey, S. Loudcher, and J. Darmont, "Metadata systems for data lakes: models and features," in New Trends in Databases and Information Systems: ADBIS 2019 Short Papers, Workshops BBIGAP, QAUCA, SemBDM, SIMPDA, M2P, MADEISD, and Doctoral Consortium, Bled, Slovenia, September 8–11, 2019, Proceedings, pp. 440-451, 2019.
- [104] S. M. Zahoor, "A Thorough Analysis of Big Data, Fast Data and Data Lake Concepts."
- [105] C. Giebler, C. Gröger, E. Hoos, R. Eichler, H. Schwarz, and B. Mitschang, "The data lake architecture framework: a foundation for building a comprehensive data lake architecture," in Conference for Database Systems for Business, Technology and Web (BTW), vol. 70469, 2021.
- [106] C. Madera and A. Laurent, "The next information architecture evolution: the data lake wave," in Proceedings of the 8th international conference on management of digital ecosystems, pp. 174-180, 2016.

- [107] F. Ravat and Y. Zhao, "Data lakes: Trends and perspectives," in Database and Expert Systems Applications: 30th International Conference, DEXA 2019, Linz, Austria, August 26–29, 2019, Proceedings, Part I, pp. 304-313, 2019.
- [108] C. Mathis, "Data lakes," *Datenbank-Spektrum*, vol. 17, no. 3, pp. 289-293, 2017.
- [109] M. Ethan, "Big Data Processing in the Cloud: Scalable and Real-time Data Analytics," 2023.
- [110] A. A. Munshi and Y. A. R. I. Mohamed, "Data lake lambda architecture for smart grids big data analytics," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 40463-40471, 2018.
- [111] M. Armbrust et al., "Spark SQL: Relational data processing in Spark," in Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, May 2015, pp. 1383-1394, 2015.
- [112] P. F. Pérez-Arteaga et al., "Cost comparison of lambda architecture implementations for transportation analytics using public cloud software as a service," in Special Session on Software Engineering for Service and Cloud Computing, pp. 855-862, 2018.
- [113] M. Armbrust, A. Ghodsi, R. Xin, and M. Zaharia, "Lakehouse: A new generation of open platforms that unify data warehousing and advanced analytics," in Proceedings of CIDR, vol. 8, January 2021.
- [114] A. Simitsis, S. Skiadopoulos, and P. Vassiliadis, "The History, Present, and Future of ETL Technology," 2023.
- [115] R. Sethi et al., "Presto: SQL on everything," in 2019 IEEE 35th International Conference on Data Engineering (ICDE), Macao, pp. 1802-1813, 2019.
- [116] D. Vohra and D. Vohra, "Apache Parquet," in Practical Hadoop Ecosystem: A Definitive Guide to Hadoop-Related Frameworks and Tools, pp. 325-335, 2016.
- [117] H. Nolte and P. Wieder, "Realizing data-centric scientific workflows with provenance-capturing on data lakes," *Data Intelligence*, vol. 4, no. 2, pp. 426-438, 2022.
- [118] J. Chakraborty, I. Jimenez, S. A. Rodriguez, A. Uta, J. LeFevre, and C. Maltzahn, "Skyhook: Towards an arrow-native storage system," in 2022 22nd

- IEEE International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid), pp. 81-88, 2022.
- [119] ISO/IEC 11179-1: Information technology — Metadata registries (MDR) — Part 1: Framework. Tech. rep., International Organization for Standardization, 2004.
- [120] R. Eichler, C. Giebler, C. Gröger, H. Schwarz, and B. Mitschang, "Modeling metadata in data lakes—a generic model," *Data & Knowledge Engineering*, vol. 136, p. 101931, 2021.
- [121] C. Gröger and E. Hoos, "Ganzheitliches metadatenmanagement im data lake: Anforderungen, IT-werkzeuge und herausforderungen in der praxis," *BTW 2019*.
- [122] R. Hai, C. Koutras, C. Quix, and M. Jarke, "Data Lakes: A Survey of Functions and Systems," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2023.
- [123] D. Lindstedt and K. Graziano, "Super charge your data warehouse: invaluable data modeling rules to implement your data vault," *CreateSpace*, 2011.
- [124] I. D. Nogueira, M. Romdhane, and J. Darmont, "Modeling data lake metadata with a data vault," in *Proceedings of the 22nd International Database Engineering & Applications Symposium*, pp. 253-261, 2018.
- [125] C. Quix, R. Hai, and I. Vatrov, "GEMMS: A Generic and Extensible Metadata Management System for Data Lakes," in *CAiSE forum*, vol. 129, 2016.
- [126] A. N. Patil and P. R. Devale, "A novel approach for understanding ideology behind managing data within data lake in era of big data," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2717, no. 1, 2023.
- [127] R. Navigli and S. P. Ponzetto, "BabelNet: The automatic construction, evaluation and application of a wide-coverage multilingual semantic network," *Artificial intelligence*, vol. 193, pp. 217-250, 2012.
- [128] A. Beheshti, B. Benatallah, R. Nouri, V. M. Chhieng, H. Xiong, and X. Zhao, "Coredb: a data lake service," in *Proceedings of the 2017 ACM on Conference on Information and Knowledge Management*, pp. 2451-2454, 2017.

- [129] A. Halevy, F. Korn, N. F. Noy, C. Olston, N. Polyzotis, S. Roy, and S. E. Whang, "Goods: Organizing google's datasets," in Proceedings of the 2016 International Conference on Management of Data, pp. 795-806, 2016.
- [130] R. Hai, S. Geisler, and C. Quix, "Constance: An intelligent data lake system," in Proceedings of the 2016 international conference on management of data, pp. 2097-2100, 2016.
- [131] E. Fouché, A. Mazankiewicz, F. Kalinke, and K. Böhm, "A framework for dependency estimation in heterogeneous data streams," Distributed and Parallel Databases, vol. 39, pp. 415-444, 2021.
- [132] DAMA International, "DAMA-DMBOK: data management body of knowledge," Technics Publications, LLC, 2017.
- [133] Y. Liu, C. Yang, L. Jiang, S. Xie, and Y. Zhang, "Intelligent edge computing for IoT-based energy management in smart cities," IEEE network, vol. 33, no. 2, pp. 111-117, 2019.
- [134] A. Stanko, O. Palka, L. Matiichuk, N. Martsenko, and O. Masiuk, "Smart City: A Review of Model Architecture and Technology," 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2021) Lviv, 2021, vol. 2, pp. 309-314, ISSN 2766-3639, doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648606.
- [135] B. A. Eckstein and R. Arlen, "IEEE PROJECT 4001—STANDARDS FOR CHARACTERIZATION AND CALIBRATION OF HYPERSPECTRAL IMAGING DEVICES," The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 44, pp. 43-47, 2021.
- [136] О. М. Дуда, А. Г. Микитишин та А. А. Станько, "Кіберфізичні системи та інформаційно-технологічні платформи «розумних міст»," III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів "Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2023," Одеса, Україна, ст. 179-180, 28-29 вересня 2023 р.
- [137] P. Wieder and H. Nolte, "Toward data lakes as central building blocks for data management and analysis," Frontiers in Big Data, vol. 5, p. 945720, 2022.

- [138] O. Duda, A. Mykytyshyn, M. Mytnyk, and A. Stanko, "The network platform cyber-physical systems application for smart buildings air pollution indicators monitoring," *Časopis Manažérska Informatika*, Univerzita Komenského v Bratislave, Slovakia, vol. 1, no. 1, 2023, ISSN 2729-8310.
- [139] Arduino.cc, "Downloads. Arduino IDE 2.2.1," Доступно: <https://www.arduino.cc/en/software>. Дата доступу: серпень, 2023.
- [140] O. M. Дуда та А. А. Станько, "Організація процесів спостереження даних засобами IoT-пристроїв у «розумних містах»," Міжнародна наукова конференція "Інтелектуальний ресурс сьогодення: наукові задачі, розвиток та запитання," м. Дніпро, Україна, 6 жовтня 2023 р., Міжнародний центр наукових досліджень, Вінниця, Україна, 2023, ст. 76-78, ISBN: 978-617-8126-82-7, DOI: 10.36074/mcnd-06.10.2023.
- [141] Download VMware Workstation Pro. Доступно: <https://www.vmware.com/products/workstation-pro/workstation-pro-evaluation.html>. Дата доступу: серпень, 2023.
- [142] E. Juvonen, "AWS Cost Management and Trend Analysis," 2023.
- [143] T. Lehtikoinen, "AWS Greengrass in Building IoT Applications," 2023.
- [144] M. A. Arifin, R. Satra, L. Syafie, and A. M. Nidhom, "Optimizing AWS lambda code execution time in Amazon Web Services," *Bulletin of Social Informatics Theory and Application*, vol. 7, no. 1, pp. 14-23, 2023.
- [145] J. Dantas, H. Khazaei, and M. Litoiu, "Green LAC: Resource-Aware Dynamic Load Balancer for Serverless Edge Computing Platforms," in *Proceedings of the 32nd Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*, 2022.
- [146] ASHRAE, "Titles, Purposes, and Scopes, February 2023," ANSI/ASHRAE Standard 90.4-2022. Доступно: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/titles-purposes-and-scopes>. Дата доступу: серпень, 2023.

- [147] S. Karthikeyan, M. Leeban Moses, and T. Perarasi, "Machine learning based Air Pollution Monitoring and predicting cause for pollution," in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1125, no. 1, IOP Publishing, 2022.
- [148] scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 1.3.1. Доступно: <https://scikit-learn.org/stable>. Дата доступа: сепень, 2023.
- [149] S. Chakraborty and P. S. Aithal, "Let Us Create Multiple IoT Device Controller Using AWS, ESP32 And C," International Journal of Applied Engineering and Management Letters (IJAEML), vol. 7, no. 2, pp. 27-34, 2023.
- [150] M. Pyts and I. Dronyuk, "Theoretical Background for Creating Real World Data Lake Architecture," Computer Systems and Information Technologies, 2023.
- [151] V. Hwasser, "A Machine Learning Infrastructure for Aline using Amazon Web Services," 2022.
- [152] A. Gupta, N. Dhanda, and K. K. Gupta, "Ingest and Visualize CSV Files using AWS Platform For Transition from Unstructured to Structured Data," in 2023 11th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology-Signal and Information Processing (ICETET-SIP), April 2023, pp. 1-6.
- [153] N. Armenatzoglou, S. Basu, N. Bhanoori, M. Cai, N. Chainani, K. Chinta, ... & D. Terry, "Amazon Redshift re-invented," in Proceedings of the 2022 International Conference on Management of Data, pp. 2205-2217, June 2022.
- [154] L. Hemphill, J. Xing, and L. Fan, "Comparing Costs for Cloud-based Data Archives," 2023.
- [155] D. Nigenda, Z. Karnin, M. B. Zafar, R. Ramesha, A. Tan, M. Donini, and K. Kenthapadi, "Amazon SageMaker Model Monitor: A System for Real-Time Insights into Deployed Machine Learning Models," in Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, pp. 3671-3681, 2022.
- [156] W. Choi, T. Choi, and S. Heo, "A Comparative Study of Automated Machine Learning Platforms for Exercise Anthropometry-Based Typology Analysis:

- Performance Evaluation of AWS SageMaker, GCP VertexAI, and MS Azure," in *Bioengineering*, vol. 10, no. 8, p. 891, 2023.
- [157] L. R. De Carvalho and A. Araujo, "FaaS-oriented Node.js applications in an RPC approach using the Node2FaaS framework," in *IEEE Access*, 2023.
- [158] K. I. D. Kyriakou and N. D. Tselikas, "Complementing JavaScript in High-Performance Node.js and Web Applications with Rust and WebAssembly," in *IEEE Electronics*, vol. 11, no. 19, pp. 3217, 2022.
- [159] A. Al-Kababji, A. Alsalemi, Y. Himeur, R. Fernandez, F. Bensaali, A. Amira, and N. Fetais, "Interactive visual study for residential energy consumption data," in *IEEE Journal of Cleaner Production*, vol. 366, p. 132841, 2022.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. О. Дуда, А. Станько, "Архітектура мережевої платформи моніторингу об'єктів у кіберфізичних системах «розумних міст»," Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», №4(323), ст. 123-130, 2023, **ISSN 2307-5732, DOI 10.31891/2307-5732.**
2. A. Stanko, "Information technology platform for monitoring infectious diseases," Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 110, no. 2, pp. 98–110, 2023, **ISSN: 2522-4433, DOI: 10.33108/visnyk_tntu2023.02.**
3. A. Stanko, O. Palka, L. Matiichuk, N. Martsenko, and O. Matsiuk, "Smart City: A Review of Model Architecture and Technology," 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT 2021) Lviv, 2021, vol. 2, pp. 309-314, **ISSN 2766-3639, doi: 10.1109/CSIT52700.2021.9648606.**
4. О. Палка, А. Станько, Г. Шимчук, О. Герасимчук, "Запобігання поширення коронавірусної інфекції у «розумних містах»," "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк, 2021, № 42, ст. 79-88, **eISSN 2524-0560, ISSN 2524-0552.**
5. O. Duda, L. Dzhydzhora, O. Matsiuk, A. Stanko, N. Kunanets, V. Pasichnyk, and O. Kunanets, "Mobile Information System for Monitoring the Spread of Viruses in Smart Cities," Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks," Issue 8, Lviv Polytechnic National University, pp. 65-70, **ISSN: 2524-065X, DOI:10.23939/sisn2020.08.065.**

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. О. М. Дуда та А. А. Станько, "Організація процесів спостереження даних засобами IoT-пристроїв у «розумних містах»," Міжнародна наукова конференція "Інтелектуальний ресурс сьогодення: наукові задачі, розвиток та запитання," м. Дніпро, Україна, 6 жовтня 2023 р., Міжнародний центр наукових досліджень, Вінниця, Україна, 2023, ст. 76-78, ISBN: 978-617-8126-82-7, DOI: 10.36074/mcnd-06.10.2023.
7. О. М. Дуда, А. Г. Микитишин та А. А. Станько, "Кіберфізичні системи та інформаційно-технологічні платформи «розумних міст»," III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів "Комп'ютерні ігри і мультимедіа як інноваційний підхід до комунікації - 2023," Одеса, Україна, 28-29 вересня 2023 р., ст. 179-180.
8. А. Станько, О. В. Тотосько, і Р. Олег Васильович Ніколайчук, "Особливості технології комунікації по видимому світлі," III Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів "Філософські виміри техніки" (PDT-2022), 2022.
9. А. Станько, "Аналіз концепції всеосяжного інтернету–ІоЕ," X науково-технічна конференція "Інформаційні моделі, системи та технології" Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 2022.
10. А. Станько, А. Микитишин и О. Голотенко, "Комунікаційні технології в енергосистемах," XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій", 2022.
11. О. Головка, А. Станько, "Телемедицина в епоху COVID-19," VIII науково-технічна конференція "Інформаційні моделі, системи та технології " ТНТУ, ст. 92-93, 2020.
12. А. Станько, "Телекомунікаційні технології в проектах розумних міст," Міжнародна науково-технічна конференція "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій " до 60-річчя з дня заснування Тернопільського

національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 181-183., 2020.

13. А. Станько, А. Микитишин, В. Левицький, "Концепція архітектури «Розумного міста» як кіберфізичної системи," Міжнародна науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій" до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 184-186., 2020.

14. А. Станько, О. Мацюк, "Розумне місто як комплексна система інтеграції послуг та функціонування міської інфраструктури," у Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій " 2 ТНТУ, ст. 92-93., 2019.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:


15. O. Duda, A. Mykytyshyn, M. Mytnyk, and A. Stanko, "The network platform cyber-physical systems application for smart buildings air pollution indicators monitoring," Časopis Manažérska Informatika, Univerzita Komenského v Bratislave, Slovakia, vol. 1, no. 1, 2023, **ISSN 2729-8310**.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя

Павло МАРУЦАК
12.09.2023



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**результатів дисертаційного дослідження Станька Андрія Андрійовича
«Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів
кіберфізичних систем «розумних міст»» у науково-дослідний процес
лабораторії кіберфізичних систем Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя**

Результати отримані Станьком А. А. при виконанні ним дисертаційного дослідження «Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»», зокрема:

- сформована на основі гіперкубів інформаційна технологія багатовимірного аналізу метаданих супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»;
- концептуальна структура озер даних;
- прототип цифрової послуги спостереження показників якості повітряного середовища;

використано для формування озера даних «TNTU Smart Campus» та зберігання результатів спостереження показників якості повітряного середовища навчальних приміщень ТНТУ ім. І. Пулюя.

Впровадження результатів дисертаційної роботи дозволило підвищити ступінь повноти подання інформації щодо характеристик повітряного середовища навчальних приміщень завдяки використанню запропонованих дисертантом інформаційно-технологічних засобів.

Завідувач лабораторії
кіберфізичних систем



Олександр КРАМАР

Начальник
науково-дослідної частини



Ярослав ОСАДЦА



ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя

Павло МАРУЦАК

11.09.2023

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**результатів дисертаційного дослідження Станька Андрія Андрійовича
«Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів
кіберфізичних систем «розумних міст»» у роботі відділу Інтернет-
технологій що функціонує при Центрі електронного навчання
Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя**

Результати отримані Станьком А. А. при виконанні ним дисертаційного дослідження «Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»», зокрема:

- структура IoT-пристроїв кіберфізичних систем «розумних будівель» та приміщень;
- структура моделі DaaS для fog-рівня інформаційно-технологічних платформ;
- інформаційно-технологічний набір;
- прототип цифрової послуги на базі інформаційно-технологічної платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

використано для супроводу процесів спостереження та регулювання показників якості повітряного середовища серверного приміщення відділу Інтернет-технологій що функціонує при Центрі електронного навчання Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя.

Впровадження результатів дисертаційної роботи дозволило підвищити ступінь повноти подання інформації щодо стану та характеристик повітряного середовища серверного приміщення завдяки використанню запропонованих дисертантом інформаційно-технологічних та комунікаційних засобів.


Начальник відділу
Інтернет-технологій ЦЕН

Роман МАКОГІН

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя

Павло МАРУЦАК
8.09.2023



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи «Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»» аспіранта кафедри комп'ютерних наук Станька Андрія Андрійовича, представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, в навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Станька А. А. використано при проведенні лабораторних занять з дисципліни «Комп'ютерні мережі» (освітній рівень – бакалавр) для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійної програми «Комп'ютеризовані системи управління та прикладне програмування»

Станько А. А. запропонував застосування моделі надання послуг DaaS, що сформована на базі мережевої NDN-архітектури та дає змогу споживачам отримувати доступ до даних, як до послуги засобами часткової комірчастої «Mesh»-мережі IoT-пристроїв.

Використання вказаних результатів у навчальному процесі дало змогу студентам ознайомитись із сучасними підходами до розв'язку задач формування локальних програмно-конфігурованих мереж та цифрових послуг на їх основі.

Завідувач кафедри
комп'ютерно-інтегрованих
технологій
к.т.н., доцент



Андрій МИКИТИШИН



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету ім. І. Пулюя

Павло МАРУЩАК

5.05.2023

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи «Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст»» аспіранта кафедри комп'ютерних наук Станька Андрія Андрійовича, представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, в навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Станька А. А. використано при проведенні лабораторних занять з дисципліни «Електронні місто та регіон» (освітній рівень – магістр) для студентів спеціальності 122 «Комп'ютерні науки».

Станько А. А. запропонував функціональну модель «розумного міста» з використанням кіберфізичних систем та модель інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст».

Використання вказаних результатів у навчальному процесі дало змогу студентам ознайомитись із сучасними підходами до розв'язку задач формування цифрових послуг та застосунків для потреб «розумних громад», «розумних міст» та «розумних регіонів».

Завідувач кафедри
комп'ютерних науки
к.т.н., доцент

Ігор БОДНАРЧУК

**Товариство з обмеженою відповідальністю
„САХАРА”**

46002, м. Тернопіль, вул. Коцюбинського, 6, тел. (0352) 43-10-89, 43-38-19 - юридична, поштова адреса
04080, м. Київ, вул. Новоконстантинівська, 1В, тел. (044) 425-06-39 - представництво у м. Київ
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шопена, 9, тел. (0342) 50-54-55 - представництво у м. Ів.-Франківськ
79071, м. Львів, вул. В.Великого, 123, тел. (032) 245-75-05 - представництво у м. Львів
код ЄДРПОУ 31138408, ПІН 311384019182
п/р UA033006140000026003500105284 в ПАТ «Креді Агріколь Банк»
п/р UA02380805000000026002228479 в АТ „Райффайзен Банк Аваль”

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ «САХАРА»
Ігор ПОВОРОЗНИК

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**результатів дисертаційного дослідження Станька Андрія Андрійовича
«Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів
кіберфізичних систем «розумних міст»» в ТОВ «САХАРА»**

Результати отримані Станьком А. А. при виконанні ним дисертаційного дослідження «Мережева інформаційно-технологічна платформа супроводу об'єктів кіберфізичних систем «розумних міст», зокрема:

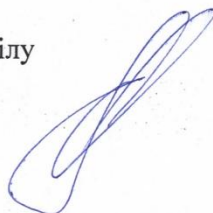
- класифікація мережевих протоколів кіберфізичних систем «розумних міст»;
- комплексна модель оцінки якості внутрішнього середовища «розумних будівель»;
- метод формування інформаційно-технологічних наборів для цифрових послуг та застосунків;

використано для супроводу процесів проектування, інтеграції та використання систем вентиляції та кондиціонування під час експлуатації «розумних будівель» та «розумних приміщень».

Впровадження результатів дисертаційної роботи дозволило підвищити якість обслуговування клієнтів при виконанні робіт по встановленню та обслуговуванню систем вентиляції та кондиціонування.

Даний акт не є підставою для проведення фінансових розрахунків.

Начальник виробничого відділу
ТОВ «САХАРА»



Роман ЦИЦЬ
07.09.2023р.