

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПАЛКА ОЛЕГ ВІКТОРОВИЧ

УДК: 004.58:004.67:004.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПОБУДОВА ГІПЕРСКЛАДНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНЕ МІСТО»:
ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ**

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

_____ / О. В.Палка /

Науковий керівник – Дмитроца Леся Павлівна, кандидат технічних наук, доцент.

Тернопіль – 2024

АНОТАЦІЯ

Палка О. В. Побудова гіперскладної системи «Розумне місто»: інформаційно-технологічні інструменти. – 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, 2024.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп’ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

Зміст анотації. Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі – розроблення методів, засобів та інструментів для формування інформаційно-технологічних платформ гіперскладної системи «Розумне місто».

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

У першому розділі проведено аналіз концепту «Розумне місто» як обширної множини взаємозалежних елементів та інформаційних сутностей, що дало змогу виокремити набір примананих йому характеристик складних систем та вважати «Розумне місто» гіперскладною системою. Проаналізовано множину інформаційних та комунікаційних технологій, зокрема, Інтернет речей, «великі дані», блокчейн, хмарні технології, штучний інтелект, машинне навчання та «відкриті дані» для формування гіперскладної системи «Розумне місто», що дало змогу формалізувати модель життєвого циклу даних в системах такого класу. Сформовано структурну схему інформаційних потоків та узагальнену модель життєвого циклу даних «розумного міста», що дало змогу дослідити процеси стандартизації елементів гіперскладних систем «розумних міст». Досліджено характеристики, фактори та критерії, що використовуються для створення

інформаційно-технологічних інструментів рейтингування «розумних міст», що дало змогу забезпечити сталість процедур оцінювання.

У другому розділі проведений аналіз інформаційно-технологічних платформ, що використовуються для створення «розумних міст», дав змогу зробити висновок, що управління наборами та колекціями даних щодо міських систем вимагає розробки комплексної інформаційно-технологічної платформи гіперскладної системи «Розумне місто», яка зможе забезпечити виконання різнотипових завдань управління на основі життєвого циклу даних. На основі проведеного аналізу виділено множину характеристик, що дало змогу сформулювати задачу вибору серед п'яти інформаційно-технологічних платформ «розумних міст». Проаналізовано розлогий список поширених у виробничих та дослідницьких колах моделей інформаційно-технологічної архітектури «розумних міст», що дало змогу сформулювати перелік ключових характеристик для постановки задачі їх вибору.

У третьому розділі розроблено метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» з використанням правила Байєса, що на відміну від існуючих, надав можливість адаптації ймовірнісних показників критеріїв відповідно до мінливих характеристик гіперскладної системи «Розумне місто». Результати використання методу застосовано в процесі створення інформаційно-технологічних інструментів консолідації та візуалізації «відкритих даних» «розумних міст». Розроблено метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» з використанням методу Сааті для вирішення багатокритеріальної задачі на основі оригінальної узагальненої множини категорій – «масштабованість», «гнучкість», «повнота життєвого циклу даних», «множина ІТ-технологій та повнота реалізації ІТ-архітектури», «варіанти використання», «спеціалізація інформаційно-технологічної платформи» і «умови обслуговування та безпека», що, на відміну від існуючих, дало змогу розширити умови вибору критеріїв для гіперскладної системи «Розумне місто». Створено інформаційно-технологічні інструменти для супроводу процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації даних в гіперскладній системі «Розумне

місто» у вигляді інформаційних панелей з рекомендаційними функціями для виявлення проблемних локацій водопровідної мережі на основі «відкритих даних» щодо запитів громадян до КП «Тернопільводоканал» і установ та організацій при отриманні дозволів на обслуговування міської інфраструктури.

У четвертому розділі розроблено метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічних платформ на основі оригінального застосування принципу Парето, що дало змогу сформувати комплексну множину засобів та інструментів оцінювання результатів практичної реалізації інформаційно-технологічної платформи для формування гіперскладної системи «Розумне місто». На основі вибору методом головного критерію із множини Парето для оцінювання впровадження інформаційно-технологічних платформ «розумного міста» рекомендовано застосовувати індекс «розумності» міста. Розроблено оригінальний метод оцінювання показників «розумності» гіперскладної міської системи, який на відміну від існуючих враховує різномірні характеристики її елементів. Метод використано для оцінювання показників «розумності» українських міст. Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс, який може застосовуватись як інструмент оцінювання показників «розумності» міст за розширеними наборами характеристик та множинами критеріїв гіперскладної системи «Розумне місто».

Ключові слова: розумне місто, інформаційні технології, модель, архітектура, платформа, метод, алгоритм, база даних, великі дані, машинне навчання, набір даних, інформаційна панель, характеристики, критерії, оцінювання.

SUMMARY

Palka O. V. Construction of a hyper-complex system "Smart City": information and technological tools. – Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for obtaining the Doctor of Philosophy scientific degree in specialty 122 "Computer Science". – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2024.

The training was carried out at the Computer Sciences Department of the Ternopil Ivan Puluj National Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Content of the abstract. The dissertation is devoted to solving a practical and scientific problem – the development of methods, means and tools for the formation of information technology platforms of the hyper-complex system "Smart City".

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, indicates connection of the thesis with scientific areas and research works, formulates the purpose and objectives of the study, defines the object, subject and methods of the study, presents the scientific novelty and practical significance of the results obtained, provides information of the test results and their coverage in publications.

In the first chapter, an analysis of the "Smart City" concept as a vast set of interdependent elements and information entities was carried out, which made it possible to single out a set of complex system characteristics inherent in it and to consider the "Smart City" as a hyper-complex system. A number of information and communication technologies were analyzed, in particular, the Internet of Things, big data, blockchain, cloud technologies, artificial intelligence, machine learning and open data for the formation of a hyper-complex system "Smart City", which made it possible to formalize the model of the life cycle data in systems of such a class. A structural diagram of information flows and a generalized model of the smart city data life cycle were formed, which made it possible to investigate the processes of standardization of elements of hyper-complex smart city systems. The characteristics, factors and criteria used to create information and technological tools for rating smart cities were studied, which made it possible to ensure the stability of the evaluation procedures.

In the second chapter, the analysis of information technology platforms used to create smart cities allowed to conclude that the management of data sets and collections regarding urban systems requires the development of a comprehensive information technology platform of the hyper-complex system "Smart City", which will be able to provide performance of various management tasks based on the life cycle of data. On the basis of the conducted analysis, a set of characteristics was highlighted, which made it possible to formulate the task of choosing among five information and technological platforms of smart cities. An extensive model list of information and technological architecture of smart cities common in production and research circles was analyzed, which made it possible to form a list of key characteristics for setting the task of their selection.

In the third chapter, a method of choosing a model of the smart city information-technological architecture was developed using the Bayes rule, which, unlike the existing ones, made it possible to adapt the probability indicators of the criteria in accordance with the changing characteristics of the hyper-complex system "Smart City". The results of using the method were applied in the process of creating information technology tools for consolidation and visualization of open data of smart cities. A method of selecting a smart city information technology platform was developed by using the Saati method for solving a multi-criteria problem based on an original generalized set of categories – "scalability", "flexibility", "completeness of the data life cycle", "set of IT technologies and completeness of implementation IT-architectures", "options of use", "specialization of the information technology platform" and "conditions of service and security", which, unlike the existing ones, made it possible to expand the conditions of selecting criteria for the hyper-complex system "Smart City". Information and technology tools have been created to support the processes of consolidation, analytical processing and visualization the data in the hyper-complex system "Smart City" in the form of information panels with recommendation functions for identifying problematic locations of the water supply network based on open data regarding citizen requests to ME "Ternopilvodokanal", institutions and organizations when obtaining permits for the maintenance of city infrastructure.

In the fourth chapter, a method of selecting tools for evaluating information technology platforms was developed based on the original application of the Pareto principle, which made it possible to form a complex set of tools for evaluating the results of the practical implementation of information technology platforms for the formation of a hyper-complex system "Smart City". Based on the selection of the main criterion from the Pareto set, it is recommended to use the smart city index to evaluate the implementation of smart city information technology platforms. An original method of evaluating the indicators of the "smartness" of a hypercomplex urban system has been developed, which, unlike the existing ones, takes into account the heterogeneous characteristics of its elements. The method was used to evaluate the "smartness" indicators of Ukrainian cities. A software-algorithmic complex has been developed that can be used as a tool for evaluating the indicators of the "smartness" of cities based on extended sets of characteristics and sets of the hyper-complex system "Smart City" criteria.

Keywords: smart city, information technology, model, architecture, platform, method, algorithm, database, big data, machine learning, dataset, dashboard, characteristics, criterion, evaluation.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. О. Палка, «Аналіз інтегрованої архітектури розумного міста з блокчейном та IoT,» Науковий вісник НЛТУ України, 33(6), ст. 94-99, 2023, **ISSN 2519-2477 (Online), ISSN 1994-7836 (Print), doi:10.36930/40330612.**
2. О. Палка, Л. Дмитроца, «Аналіз мікросервісної архітектури розумного міста,» Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», №6(329), ст. 142-149, 2023, **ISSN 2307-5732, doi:10.31891/2307-5732-2023-329-6-142-149.**
3. O. Palka, A. Stanko, 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. Palka, O. Duda, V. Pasichnyk, O. Matsiuk, N. Kunanets and D. Tabachyshyn, «Existing City Assessment Systems,» 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, 2020, pp. 238-241, **ISSN 2766-3639 (Online), ISSN 2766-3655 (Print), doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321907.**

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. О. Палка, «Огляд КРІ розумного міста,» XII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 392, 2023.
7. O. Palka, L. Dmytrotsa, «System Analysis Methodology for Determining the City Smartness,» Proceedings of the ITTAP-2023: The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22-24, 2023), CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol-3628, pp. 554-573, **ISSN 1613-0073 (Online)**.
8. О. Палка, Л. Дмитроца, «Використання інформаційних дашбордів у розумних містах,» Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, no. 6, Nov. 2023, pp. 189-91, **ISSN 2707-1049 (Online), ISSN 2707-1030 (Print), doi:10.31713/MCIT.2023.058**.
9. O. Palka, N. Kunanets, V. Pasichnyk, O. Matsiuk, and S. Matsiuk, «Comparative Analysis of Smart City Platforms,» Proceedings of the COLINS-2023: 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (Kharkiv, Ukraine, April 20–21, 2023), CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol-3403, pp. 487-499, **ISSN 1613-0073 (Online)**.
10. О. Палка, «Мікросервісна архітектура розумного міста,» XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 155-156, 2022.
11. О. Палка, «Інтегрована архітектура розумного міста з блокчейном та IoT,» XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 157, 2022.
12. О. Палка, «Огляд технологічних інструментів розумного міста,» IX Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 62, 2020.

13. О. Палка, А. Шум'як, І. П'ятківський, «Аналіз інтелектуальних транспортних систем,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 107, 2019.
14. О. Палка, Т. Склярова, «Історія розвитку геоінформаційних систем,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 98, 2019.
15. О. Палка, Т. Склярова, А. Шум'як, «Аналіз методу оцінювання розумності міста у Туреччині,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 80, 2019.
16. О. Палка, А. Шум'як, М. Потикевич, «Аналіз терміну Smart City,» XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 79-80, 2019.
17. О. Палка, А. Шум'як, М. Потикевич, «Аналіз методів визначення розумності міста,» XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 67, 2019.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. О. Палка, О. Мацюк, О. Дуда, В. Пасічник, Н. Кунанець, “Комп’ютерна програма «Визначення розумності міста»,” А.с. про реєстрацію авторського права на твір № 101119, 2020.

ЗМІСТ

Перелік скорочень і термінів	13
Вступ.....	15
Розділ 1. «РОЗУМНЕ МІСТО»: ІНФОРМАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА ІНСТРУМЕНТИ РЕЙТИНГУВАННЯ	21
1.1 «Розумне місто» як гіперскладна система.....	21
1.2 Інформаційні та комунікаційні технології – базові інструменти формування гіперскладної системи «Розумне місто».....	27
1.2.1 Інтернет речей у «розумних містах».....	27
1.2.2 «Великі дані» (Big Data) для інформаційного супроводу процесів «розумних міст»	30
1.2.3 Блокчейн для покращення безпеки даних у «розумних містах»	31
1.2.4 Хмарні технології «розумних міст»	33
1.2.5 Штучний інтелект та машинне навчання для підтримки супроводу процесів прийняття рішень у «розумних містах».....	34
1.2.6 «Відкриті дані» (Open Data) для «розумних» послуг та сервісів.....	36
1.3 Стандартизація елементів гіперскладної системи «Розумне місто»	38
1.4 Аналіз інструментів рейтингування «розумних міст»	42
1.5 Висновки до розділу 1	52
Розділ 2. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЛАТФОРМ І МОДЕЛЕЙ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ АРХІТЕКТУР «РОЗУМНОГО МІСТА»	53
2.1 Інформаційно-технологічні платформи – основа реалізації гіперскладних систем «розумних міст».....	53
2.2 Аналіз інформаційно-технологічних платформ «розумних міст».....	61
2.2.1 Інформаційно-технологічна платформа Amazon Web Services.....	62
2.2.2 Інформаційно-технологічна платформа IBM Watson.....	63
2.2.3 Інформаційно-технологічна платформа Microsoft Azure IoT Central	64
2.2.4 Інформаційно-технологічна платформа Google Cloud IoT Core	66
2.2.5 Інформаційно-технологічна платформа Cisco Kinetic for Cities	67

2.3 Аналіз моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста»	70
2.4 Висновки до розділу 2	83
Розділ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ПОБУДОВИ ГІПЕРСКЛАДНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»	84
3.1 Метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста»	84
3.2 Метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста»	90
3.3 Створення інформаційно-технологічних інструментів консолідації, аналізу та візуалізації «відкритих даних» «розумних міст»	99
3.3.1 Інформаційна панель відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал»	101
3.3.2 Інформаційна панель спостереження процесів виконання аварійних та регламентних робіт обслуговування міської інфраструктури	107
3.4 Висновки до розділу 3	111
Розділ 4. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІПЕРСКЛАДНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»	112
4.1 Метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічної платформи «розумного міста»	112
4.2 Метод оцінювання показників «розумності» гіперскладних міських систем	118
4.3 Програмно-алгоритмічний комплекс для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст»	126
4.4 Висновки до розділу 4	138
ВИСНОВКИ	139
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	141
ДОДАТКИ	
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи	160
Додаток Б. Акти впровадження	163
Додаток В. Додатки до розділу 1	167
Додаток Е. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір	172

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ІТ – Інформаційна технологія.

БД – База даних.

ІКТ – Інформаційні та комунікаційні технології.

ГІС – Геоінформаційна система.

ЦСУД – Центральна системи управління даними.

ПАК – Програмно-алгоритмічний комплекс.

МАІ – Метод аналітичної ієрархії.

ІТП – Інформаційно-технологічна платформа.

ОС – Операційна система.

СППР – Система підтримки прийняття рішень.

ШІ – Штучний інтелект.

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

BD (англ. Big Data) – «великі дані».

BL (англ. Blockchain) – Інформаційна технологія блокчейн.

CL (англ. Cloud Computing) – Хмарні технології.

AI (англ. Artificial intelligence) – Штучний інтелект.

ML (англ. Machine learning) – Машинне навчання.

OD (англ. Open Data) – «відкриті дані».

ETL (англ. Extract, Transform, Load) – це процес, що складається з трьох етапів: витяг даних з вихідного джерела, їх перетворення (у тому числі очищення) та завантаження в цільову систему.

RDF (англ. Resource Description Framework) – це відкритий стандарт, що використовується для опису інформаційних ресурсів у вигляді тріад: суб'єкт, предикат та об'єкт даних.

API (англ. Application Programming Interface) – Прикладний програмний інтерфейс.

SaaS (англ. Software as a Service) – Програмне забезпечення як послуга – це модель надання програмного забезпечення, де застосунки розміщуються на віддалених серверах і надаються користувачам через мережу Інтернет, зазвичай на основі підписки.

PaaS (англ. Platform as a Service) – Платформа як послуга – це хмарна модель надання послуг, яка забезпечує розробників інструментами та платформою через інтернет для створення, тестування, запуску та управління програмним забезпеченням і додатками без необхідності купувати, налаштовувати або управляти пов’язаною інфраструктурою.

IaaS (англ. Infrastructure as a service) – Інфраструктура як послуга – це модель надання обчислювальної інфраструктури як онлайн-послуги, що дозволяє користувачам доступ до управління віртуальними ресурсами, такими як сервери, мережеве обладнання, сховища даних, через мережу Інтернет на основі плати за використання.

KPI (англ. Key Performance Indicator) – Ключові показники ефективності.

ВСТУП

Актуальність теми. На даний час відбувається глобальна урбанізація, що супроводжується цифровою трансформацією міського середовища. У зв'язку із постійним зростанням населення виникає ряд труднощів, зокрема, дефіцит ресурсів, забруднення довкілля, транспортні затори, що, в свою чергу, ускладнює процеси проектування, впровадження та використання складних систем міської інфраструктури. «Розумні міста» використовують можливості сучасних інформаційних та комунікаційних технологій та взаємопов'язаних для створення ефективних та надійних систем, що на основі аналітичного опрацювання даних формують якісне міське середовище.

У різних країнах світу обширні групи фахівців проводять дослідження в галузі «розумних міст» для вирішення актуальних задач у містах різного розміру та рівня розвитку. Найбільш активно у цьому напрямку працюють країни, в яких є значні мегаполіси або урбанізовані області з високим рівнем технологічного розвитку та інновацій. Зокрема, у США зосереджено обширний перелік мегаполісів та населених пунктів, де активно впроваджуються інформаційно-технологічні проекти класу «Розумне місто», наприклад, Сан-Франциско, Нью-Йорк, Чикаго, Сіетл. Японія є одним з світових лідерів у розвитку інформаційних та комунікаційних технологій та активно впроваджує інновації для створення «розумних міст», зокрема в Токіо, Осаці, Кіото. Значна частина європейських країн також займається впровадженням інноваційних концептів «розумного міста», наприклад, в Німеччині – Берлін та Мюнхен, у Великій Британії – Лондон, у Франції – Париж, в Іспанії – Барселона та Мадрид, в Нідерландах – Амстердам, у Швеції – Стокгольм. Китай активно інвестує в інформаційні та комунікаційні технології для потреб «розумних міст», зокрема в таких містах Шеньчжень, Шанхай, Пекін та Гуанчжоу.

Вагомий внесок у сферу досліджень «розумних міст» зробили Х. С. Грасіас, Г. С. Парнелл, Е. Спекінг та Е. А. Пол (Університет Арканзасу, США),

Р. Бьюкенен (Віксбургський інженерний науково-дослідний центр, США), А. Осман (Лулеоський технічний університет, Швеція), К. Д. Крістель Адже та У. Хабачі (Університет Клермон-Овернь, Франція), А. Нтафаліас та П. Пападопулос (приватна компанія ELIN VERD S.A., Греція), Д. Демірель (Університет Коджаелі, Туреччина), Ч. Парк та Дж. Ча (Сеульський національний університет науки і технологій, Корея), І. Мутамбік та А. Альмукрін (Коледж гуманітарних і соціальних наук, Університет короля Сауда, Саудівська Аравія), А. Пентланд та К. Ратці (Массачусетський технологічний інститут, США), Д. М. Карктоза (Університет Ворвік, Велика Британія), О. Сахно (Львівський національний університет ім. Івана Франка, Україна), В. Піддубний (Інститут інформаційних технологій і засобів навчання НАПН України, Україна), І. Карпець (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна), С. Ризенко (Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна), В. Пасічник та Н. Кунанець (Національний університет «Львівська політехніка», Україна), О. Мацюк та О. Дуда (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна).

Актуальність роботи полягає у вирішенні важливого наукового завдання – розроблення методів, засобів та інформаційно-технологічних інструментів для побудови та оцінювання характеристик гіперскладних систем класу «Розумне місто» у вітчизняних реаліях.

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 розроблення методів, засобів та інструментів для формування інформаційно-технологічних платформ гіперскладної системи «Розумне місто».

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз інформаційних та комунікаційних технологій, інформаційно-технологічних платформ та моделей інформаційно-технологічної архітектури «розумних міст».

2. Розробити метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста».

3. Розробити метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста».

4. Розробити метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічних платформ «розумного міста».

5. Розробити метод оцінювання показників «розумності» гіперскладної системи «Розумне місто».

6. Розробити інформаційно-технологічні інструменти побудови та оцінювання характеристик гіперскладної системи «Розумне місто».

Об'єктом дослідження є процеси формування інформаційно-технологічних платформ для гіперскладної системи «Розумне місто».

Предметом дослідження є методи та інструменти створення інформаційно-технологічних платформ гіперскладної системи «Розумне місто».

Методи дослідження. Для розв'язання сформульованих задач застосовано: методи синтезу та аналізу, правило Байєса, метод Сааті, принцип Парето та метод машинного навчання на основі випадкових лісів, теоретичні та практичні засади побудови інформаційно-технологічних платформ «розумних міст», методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічних платформ гіперскладної системи «Розумне місто» за принципом Парето, що дало можливість сформулювати комплексну множину засобів та інструментів оцінювання практичних реалізацій інформаційно-технологічних платформ «розумного міста».

2. Вперше розроблено метод оцінювання показників «розумності» міст, який на відміну від існуючих, враховує різнотипові характеристики та критерії оцінювання систем «розумних міст» як елементів гіперскладних систем, що дало змогу виокремити їх переваги та недоліки в контексті взаємодії інформаційно-технологічних інструментів.

3. Отримав подальший розвиток метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» на основі правила Байєса, що дало змогу адаптувати ймовірнісні показники критеріїв відповідно до мінливих характеристик «розумного міста».

4. Отримав подальший розвиток метод вибору інформаційно-технологічної платформи з використанням методу Сааті для вирішення багатокритеріальної задачі на основі узагальненої множини критеріїв експертних оцінок, що дало змогу у порівнянні із існуючими методами розширити переліки категорій та критеріїв, які використовуються при виборі платформи гіперскладної системи «Розумне місто».

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає у розробленні інформаційно-технологічних інструментів: інформаційних панелей для консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації «відкритих даних» з рекомендаційними функціями; програмно-алгоритмічного комплексу для оцінювання «розумності» міст (свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 101119) для підвищення ступеня поінформованості громадян, представників місцевої влади, працівників комунальних підприємств та міських установ.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. 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. XII Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2023.

2. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAР-2023), Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22-24, 2023.

3. VI Міжнародна науково-практична конференція «Моделювання, керування та інформаційні технології», Рівне, 2023.

4. 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS-2023), Kharkiv, Ukraine, April 20–21, 2023.

5. XI Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2022.

6. IX Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2020.

7. VII науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології», Тернопіль, 2019.

8. XXI науковій конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

Публікації. У 18 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них отримано вагомий науковий доробок аспіранта у вигляді опублікованих 5 статей у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 10 тезах доповідей конференцій та 1 авторському свідоцтву на комп'ютерну програму.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 172 сторінках та складається з анотації, змісту, переліку скорочень, вступу, чотирьох основних розділів, в яких міститься 56 рисунків, 21 таблиці та 25 формул, списку використаних джерел з 155 найменувань, а також 4 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. «РОЗУМНЕ МІСТО»: ІНФОРМАЦІЙНІ ТА КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА ІНСТРУМЕНТИ РЕЙТИНГУВАННЯ

1.1 «Розумне місто» як гіперскладна система

Впродовж останнього періоду часу у світі спостерігається посилення міграція населення в міські райони. Урбанізація, що супроводжується значним збільшенням кількості міських мешканців [1], є однією з найважливіших тенденцій минулого та сучасного століття. Вона забезпечує основу міської трансформації та призводить до глобальних змін загалом.

Враховуючи зростаючу роль міських регіонів очікується, що більші міста будуть розвиватись швидше ніж менші. Згідно [2], на ранніх етапах урбанізації передбачається повільніше зростання малих міст порівняно з великими. А під час пізньої урбанізації малі міста збільшаться внаслідок перевантаження міської інфраструктури та перенаселеність великих та середніх міст. Однак дослідники [3] виявили, що міста різного розміру ростуть з однаковими темпами.

За прогнозами [4] до 2050 року 66% світового населення буде проживати в містах, порівняно з теперішнім показником 54%. Це означає, що потенційно міське населення зросте на 2,4 мільярда людей. Така перспектива неминуче призведе до розширення міського середовища та необхідності створення нових міст. Сучасні міста використовують менш ніж 2% від земної поверхні, проте споживають понад 75% доступних у всьому світі природних ресурсів. За оцінками програми ООН з довкілля [4] споживання первинної енергії, сировини, викопного палива, води та їжі збільшиться містами з 40 млрд. тонн у 2010 році до 90 млрд. тонн до 2050 року.

Для підвищення якості життя (QoL – Quality of Life) [5] мешканців у сучасних містах активно впроваджуються інформаційні технології та інноваційні підходи.

Обширні кола дослідників трактують термін «розумне місто» дещо по різному (див. у додатку В).

У цій дисертаційній роботі будемо послуговуватись означенням:

«Розумне місто – це місто, яке використовує цифрові технології, комунікаційні технології та аналітику даних для створення ефективного та дієвого сервісного середовища, яке покращує якість життя в місті та сприяє його сталому розвитку» [6].

Проте «розумні міста» впроваджують соціальні та технологічні інновації [7]. Концепція «розумних міст» охоплює міста будь-якого розміру, включаючи «розумні» громади та інтегруючись в «розумні» регіони. Значна частина досліджень в царині «розумних міст» базується на технологіях, що сформовані завдяки корпоративним організаціям Amazon, Cisco, GE, IBM, Intel, Microsoft та Oracle [8] тощо, при цьому увага зосереджена на розробці хмарних платформ та застосунків для проектів класу «Розумне місто». Технології є ключем для створення нових виробництв, управління міськими процесами, трансформації організаційних та інституційних механізмів, інформування про індивідуальний вибір та поведінку громадян.

Зростання інтересу до проектів «Розумних міст» у всьому світі підтверджує статистика пошукових запитів Google Trends (див. рис. 1.1), що робить «розумне» найпопулярнішим прикметником міст у порівнянні з іншими, такими як стійке, здорове, придатне для життя, зелене та гнучке. Примітки означають покращення системи збору даних у 2016 і 2022 році.

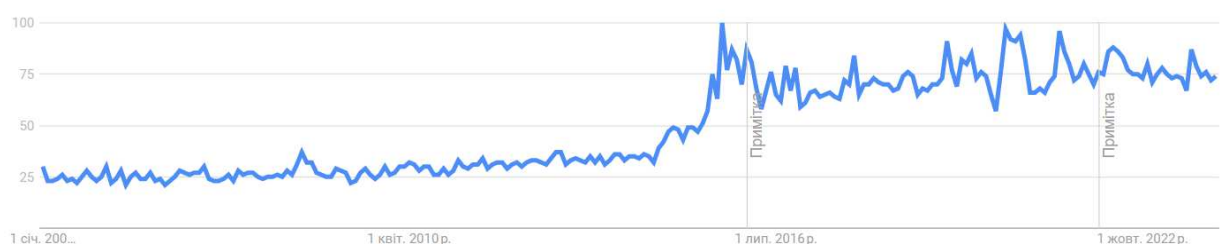


Рис. 1.1. Статистика пошукових запитів щодо «розумних міст» у Google Trends [9]

«Розумні міста» покращують якість життя громадян за допомогою цифрових технологій, змін інфраструктури та колекції зібраних наборів даних. Напрямки формування «розумних міст» головним чином залежать від динаміки формування потреб громадян, що безпосередньо впливає на показники територіальних та загальносвітових індексів «розумних міст». Зокрема подані на рис. 1.2 [10] результати рейтингування базувались на показниках інновацій, якості життя, економіки, транспорту, мобільності тощо.

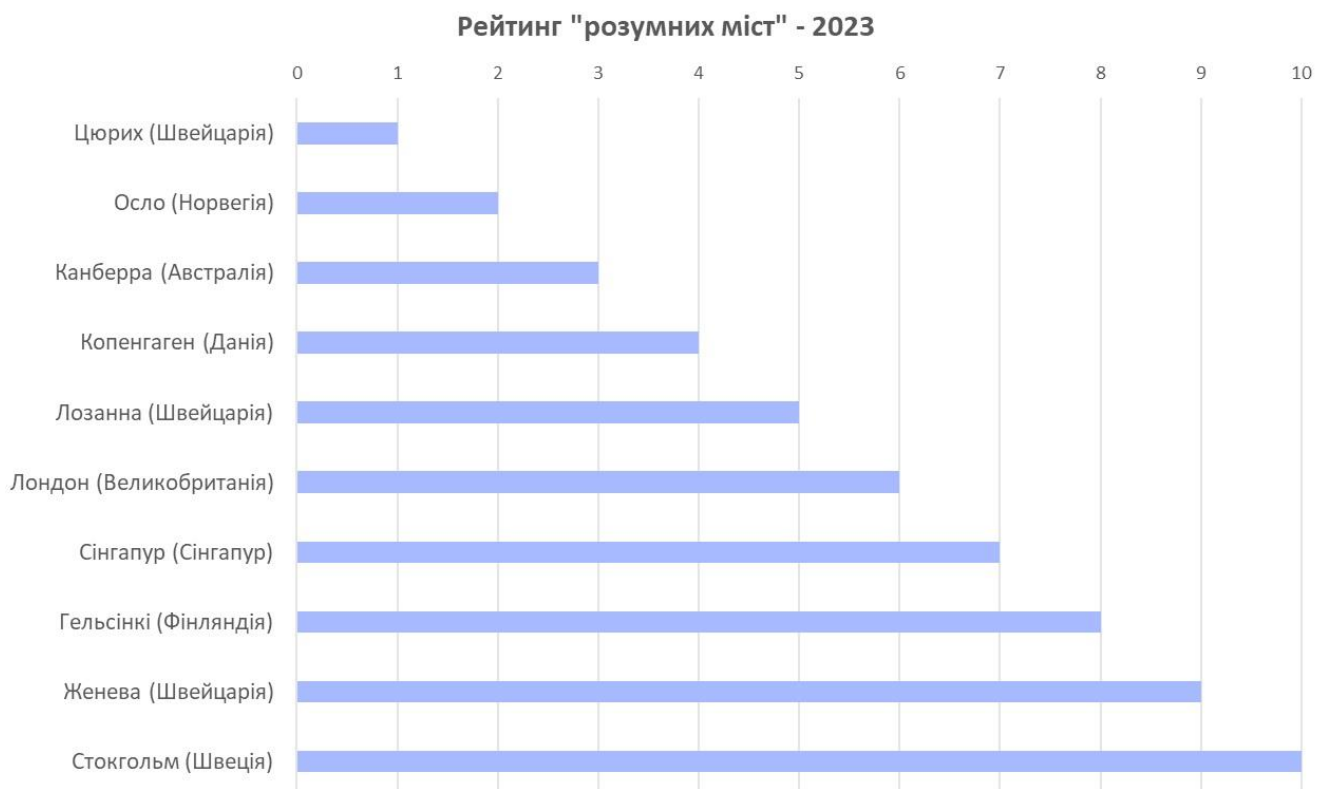


Рис. 1.2. Світовий рейтинг «розумних міст» за 2023 рік [10]

За даними [10] швейцарське місто Цюріх посіло в загальносвітовому рейтингу перше місце у 2023 році. Класифікація базувалася на ряду факторів: доступності житла, відсутності заторів на дорогах, низьким показникам забруднення повітря, високому рівню забезпечення громадян, безпеці, високоефективній переробці відходів, обширним зонам зелених насаджень тощо (див. рис. 1.3).

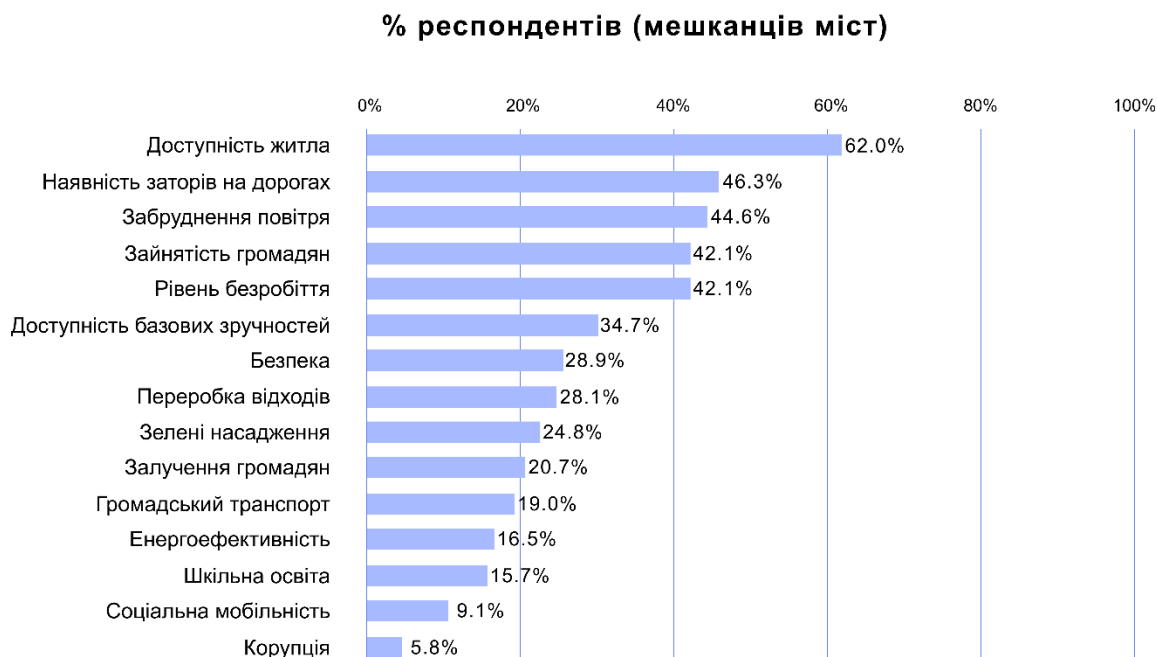


Рис. 1.3. Категорії показників оцінювання «розумних міст»

Відповідно до концепції «розумного міста» [11] його основні елементи подано на рис. 1.4.

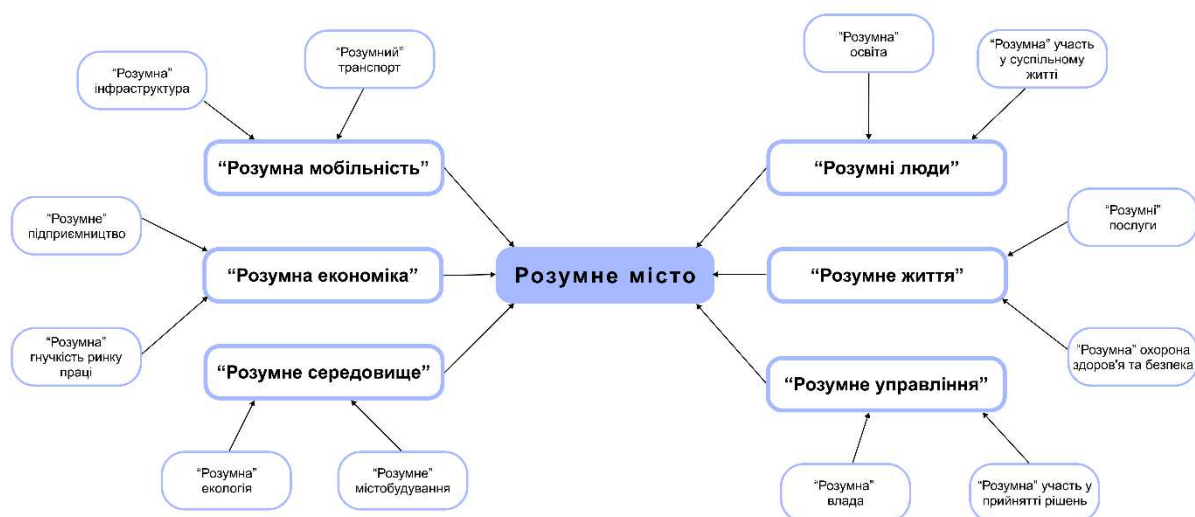


Рис. 1.4. Ключові елементи концепту «розумне місто» (сформовано на основі [11])

Охарактеризуємо кожен із них:

- «розумна мобільність» забезпечується використанням «розумних» давачів, інформаційних та комунікаційних технологій з метою постачання та

розподілу ресурсів, оперативного управління транспортними технологічними системами та мережами в режимі реального часу;

- в умовах «розумної економіки» впровадження та використання інформаційних технологій та інновацій призводить до зростання економічних показників «розумних міст»;

- «розумне середовище» впроваджує охорону довкілля та збереження природних ресурсів за допомогою «розумних» технологій в системах переробки відходів та контролю забруднення навколишнього середовища тощо;

- елемент «розумні люди» потребує інновацій у соціальній сфері, зокрема, інвестування у творчість людей;

- елемент «розумне життя» забезпечує високий рівень якості життя громадян та гостей міст і розглядає всі аспекти міського життя, включно з «розумним туризмом» [12];

- «розумне управління» забезпечує високий рівень якості процесів управління, що здатні оперативно адаптуватися до змін.

Ключова особливість, завдяки якій розглянуті елементи характеризуються як «розумні», полягає в ефективному використанні ресурсів та підвищення якості життя міських жителів.

Автори [13] зазначають, що *«Системою можна назвати тільки такий комплекс відповідним чином відібраних компонентів, взаємодія яких та взаємовідношення між якими набувають характеру спільної взаємодії, орієнтованої на отримання запланованого корисного результату»*.

Згідно [14] до гіперскладних систем належать:

- системи з декількома власними системами і підсистемами, що змінюються;

- системи, в яких цілі, перспективи та мотивації складових систем і підсистем змінюються динамічно і непередбачувано;

- системи з різноманітними мінливими підсистемами живлення та управління, а також взаємозв'язками між підсистемами;

- системи, в яких динамічні підсистеми та системні домовленості рефлексивно впливають на системне середовище, а отже, рефлексивно динамічно змінюють структуру, взаємозв'язки, права власності та цілі систем та підсистем;
- системи, в яких структура системи, підсистеми, їхні цілі та межі динамічно змінюються;
- системи, які мають аспекти системи та її підсистем, що іноді функціонують поза межами системи;
- системи з численними динамічно змінними зворотніми зв'язками між підсистемами, середовищем, системою та суб'єктами управління;
- системи, в яких зовнішнє середовище змінюється і впливає на широкий спектр факторів, суб'єктів, цілей, системних ресурсів, поведінки системи та підсистем, а також на можливості всередині системи;
- системи, в яких значна частина підсистем і системних характеристик невідома і динамічно змінюється таким чином, що разом з іншими динамічними факторами впливає на поведінку і структуру системи;
- прогнозування, поведінка системи і результати можуть бути незалежними від видимої причинності.

«Гіперскладні системи епістемологічно відрізняються від складних систем, але можуть включати в себе складні системи» [14].

Враховуючи наявність обширної множини взаємозалежних елементів, які необхідно координувати, інформаційних та комунікаційних технологій, що динамічно розвиваються, а також через складність і багатовимірність, «Розумне місто» є гіперскладною системою.

Тому в даній дисертації інформаційно-технологічні проекти класу «Розумне місто» вважатимемо гіперскладними системами. Далі по тексту вживатимемо цей термін для позначення «розумних міст» як гіперскладних систем.

1.2 Інформаційні та комунікаційні технології – базові інструменти формування гіперскладної системи «Розумне місто»

У праці [15] автори зазначають, що *«Інформаційно-технологічні інструменти – це будь-яке програмне, апаратне забезпечення або обладнання, що використовується для оптимізації виконання обчислювальних завдань, обробки даних, управління інформацією та зв'язком. Ці інструменти можуть варіюватися від простих обчислювальних пристроїв, зокрема настільних комп'ютерів, ноутбуків та смартфонів, до більш складних систем, наприклад, мережесих пристроїв та програмного забезпечення, призначеного для конкретних завдань, зокрема аналізу даних, управління проектами або кібербезпеки».*

Інформаційні технології, що забезпечують функціонування «розумного міста» подамо у вигляді множини:

$$IT = \{IT_{IoT}, IT_{BD}, IT_{BL}, IT_{CL}, IT_{AI}, IT_{ML}, IT_{OD}\}, \quad (1.1)$$

де IT_{IoT} – Інтернет речей, IT_{BD} – «великі дані», IT_{BL} – блокчейн, IT_{CL} – хмарні технології, IT_{AI} – штучний інтелект, IT_{ML} – машинне навчання, IT_{OD} – «відкриті дані».

Основною метою інформаційних та комунікаційних технологій, як інформаційно-технологічних інструментів [16] «розумних міст» є допомога громадянам і організаціям ефективніше й результативніше досягати поставлених цілей. Розглянемо детальніше множину (1.1) інформаційних технологій в контексті їх впровадження та використання в «розумних містах».

1.2.1 Інтернет речей у «розумних містах»

IT_{IoT} відіграє визначну роль у комунікаційній парадигмі «розумних міст». Використання мікроконтролерів, радіомодулів та комунікаційних протоколів дає

змогу IoT-пристроїв здійснювати обмін інформацією в єдиному інформаційному середовищі «розумних міст». Національні, регіональні та муніципальні урядові та приватні організації використовують IT_{IoT} для вирішення широкого спектру задач управління в середовищі «розумного міста» [17]. Концепція IT_{IoT} спрямована на підвищення ефективності використання ресурсів та підвищення якості послуг (QoS) при зниженні операційних і управлінських витрат в гіперскладних системах «розумних міст» [18]. IT_{IoT} відіграють ключову роль у формуванні інформаційно-технологічних платформ «розумних міст», стандартизації елементів та інструментів «розумного міста» [19].

На рис. 1.5 подано класифікацію сфер застосування IoT-пристроїв в «розумних містах» [21].

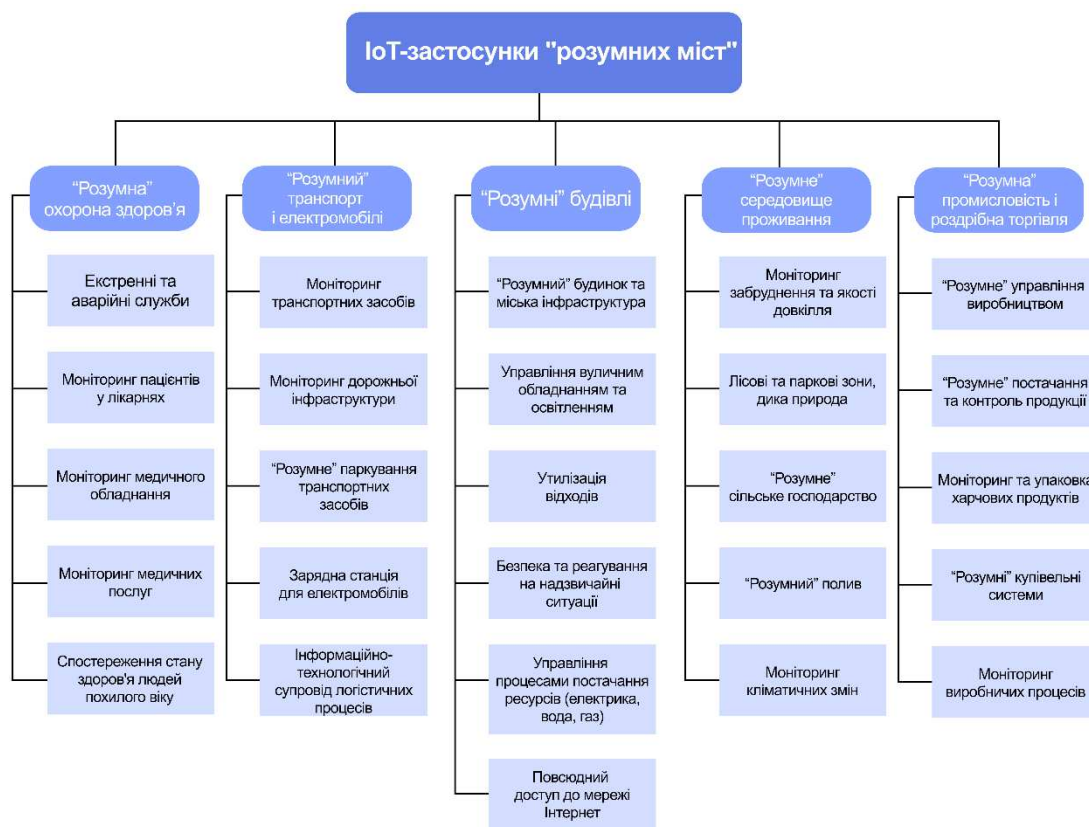


Рис. 1.5. Класифікація сфер застосування IoT-пристроїв в «розумних містах» [21]

IT_{IoT} у «розумних містах» складається з фізичних пристроїв, давачів та виконавчих механізмів, підключених до мережі Інтернет, які забезпечують

перебіг процесів збирання та обміну даними [20]. Давачі відслідковують зміни в міському середовищі, одержані дані передаються, зберігаються та проходять процедури аналітичного опрацювання для виявлення закономірностей, аномалій даних і прогнозування майбутніх подій.

IT_{IoT} активно розвиваються на локальному та глобальному рівнях завдяки промисловим підходам до розробки програмного та апаратного забезпечення [21].

IT_{IoT} у контексті «розумного міста» відіграє ключову роль у підвищенні ефективності послуг і забезпеченні більш комфортного та безпечного середовища проживання мешканців.

На рис. 1.6 подано характеристики мережевих протоколів для IT_{IoT} в «розумних містах» [22].

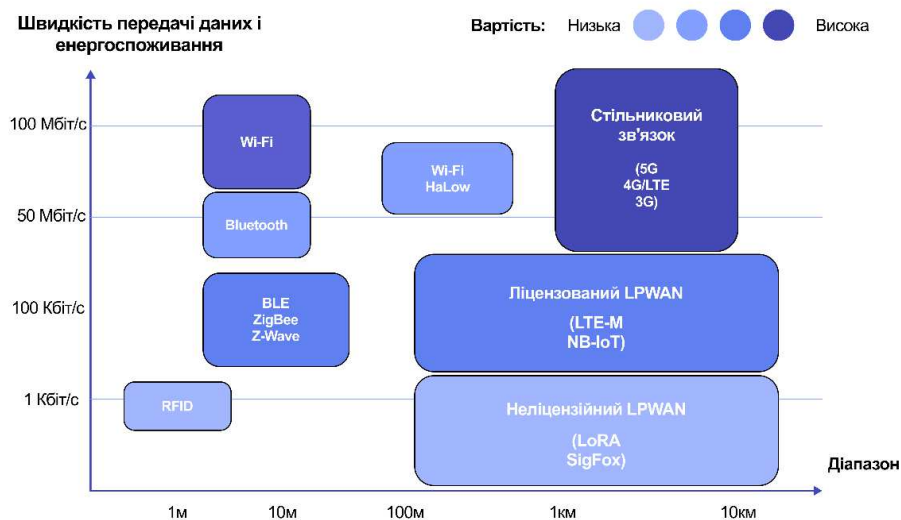


Рис. 1.6. Характеристики мережевих протоколів для IT_{IoT} в «розумних містах» [22]

На даний час IT_{IoT} розглядає ідею найперспективніших інформаційних технологій, що відкриває нові можливості для впровадження «розумних» послуг та «розумних» застосунків.

1.2.2 «Великі дані» (Big Data) для інформаційного супроводу процесів «розумних міст»

На даний час «великі дані», IT_{BD} широко використовуються в усіх сферах міського життя та є однією з ключових інформаційних технологій для супроводу процесів гіперскладної системи «Розумне місто» [23]. IT_{BD} в «розумних містах» мають характеристики [24]:

- обсяг (Volume) – «великі дані» зазвичай містять великі за обсягом інформаційні набори та колекції, що збираються з різнотипових джерел в міському середовищі, наприклад, датчиків, камер відеоспостереження, медіа-ресурсів, мобільних застосунків тощо;
- різноманітність (Variety) – дані надходять у різних формах та форматах: структуровані дані – набори даних та БД, неструктуровані дані – відео, зображення та текст, або напівструктуровані дані;
- швидкість (Velocity) – дані продукуються з високою швидкістю з різних джерел у режимі реального часу, оперативного аналізу, опрацювання та реагування;
- достовірність (Veracity) – якість і точність наборів та колекцій даних «розумних міст» можуть змінюватися з часом, що впливає на надійність джерел даних і довіру до результатів аналітичного опрацювання;
- цінність (Value) – важливо видобувати корисну інформацію з великих за обсягом наборів та колекцій даних, перетворюючи їх у знання, які будуть використані для покращення якості послуг «розумних міст» та супроводу процесів управління середовищем «розумного міста»;
- змінність (Variability) – частота, з якою дані змінюються, може бути непостійною – інформаційні системи (ІС) «розумних міст» повинні оперативно адаптуватися до цих змін;
- візуалізація (Visualization) – перетворення великих за обсягом даних у зрозумілі і зручні формати з використанням засобів візуалізації для спрощення процесів інтерпретації та сприйняття інформації;

- інтеграція (Integration) – здатність інтегрувати та синхронізувати дані з різнотипових джерел і складних міських систем для консолідації даних.

Використання IT_{BD} для видобування прихованих знань є загальною концепцією, що застосовується у багатьох сферах «розумних міст», зокрема для супроводу процесів прийняття рішень [25].

1.2.3 Блокчейн для покращення безпеки даних у «розумних містах»

Інформаційна технологія блокчейн у гіперскладних системах «розумних міст» використовується для реалізації розподілених реєстрів (Distributed Ledger Technologies, DLTs). IT_{BL} виникла у 2008 році завдяки Сатоші Накамото [26] і впроваджена як розподілена БД, в якій зберігається інформація у вигляді блоків. Кожен блок пов'язаний з попереднім і наступним завдяки криптографічним (хеш) функціям. Автори [27] виділяють основні характеристики IT_{BL} у «розумних містах»:

- Децентралізація – всі транзакції в IT_{BL} відбуваються і перевіряються за допомогою протоколу узгодження, після чого вони реплікуються між усіма вузлами блокчейн у мережі. Таким чином, немає потреби в централізованого зберігання всіх даних про транзакції.

- Незмінність – транзакції IT_{BL} зберігаються у вигляді блоків. Кожен блок містить свій хеш і хеш попереднього блоку, створюючи ланцюжок, який є незмінним, оскільки будь-яка зміна блоку вплине на всі наступні блоки. Зловмисник не може змінити інформацію в блоці N, не змінивши всі блоки N+1, N+2,..., M, де M – загальна кількість блоків у ланцюжку. Така зміна є складною з обчислювальної точки зору, тому її неможливо виконати за короткий проміжок часу.

- Прозорість – єдиний спосіб оновити реєстр (розподілену БД) – це досягти консенсусу між більшістю вузлів мережі блокчейн. Публічна доступність всіх змін забезпечує прозорість і безпеку IT_{BL} .

- Відстежуваність – завдяки незмінності та прозорості IT_{BL} дає змогу відстежувати кожну транзакцію аж до моменту її виконання.
- Конфіденційність – у IT_{BL} можна здійснити транзакцію між учасниками, навіть якщо між ними відсутні довірчі відносини. Завдяки відсутності централізованого спостереження можна довіряти дійсності транзакції із забезпеченням конфіденційності відомостей про учасників.

В «розумних містах» IT_{BL} активно впроваджуються в «розумній охороні здоров'я», «розумному транспорті» і «розумних» ланцюгах постачання [28]. IT_{BL} поєднується з іншими інформаційними технологіями, наприклад, IT_{IoT} [29]. Блокчейн забезпечує сталість розвитку «розумних міст» завдяки незмінності, доданої до ланцюжків даних, інформації, анонімності та конфіденційності даних. При цьому кожен учасник гіперскладної системи «Розумне місто» (див. рис. 1.7) повинен мати єдиний інтерфейс для збору даних та використання засобів їх зберігання [27].

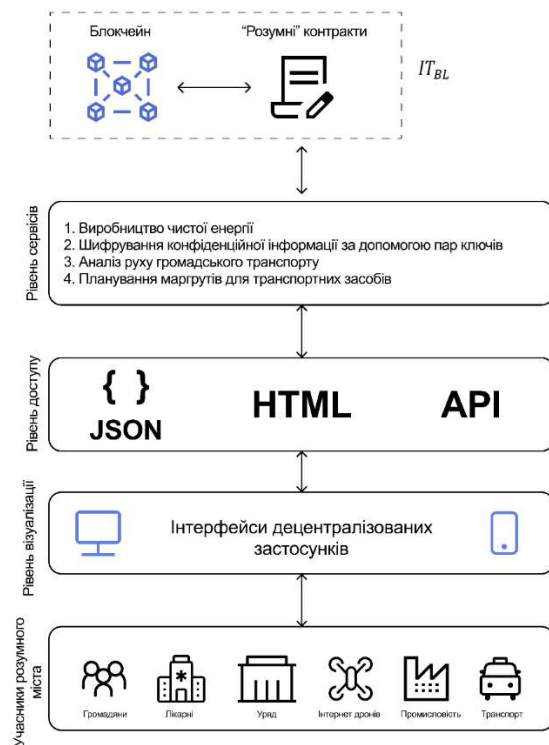


Рис. 1.7. Структура інтерфейсів гіперскладної системи «Розумне місто» на основі інтерфейсів IT_{BL} [27]

IT_{BL} сприяє розвитку «розумних міст» [30] підвищуючи продуктивність та безпеку послуг та застосунків. Розподілена природа IT_{BL} підвищує показники масштабованості та зменшує кількість точок відмови міської інформаційно-технологічної архітектури. Водночас покращуються процеси обміну даними завдяки використанню уніфікованих загальних програмних інтерфейсів.

1.2.4 Хмарні технології «розумних міст»

Хмарні технології набули популярності у виробничих та наукових колах в останні роки, оскільки надають міським установам, організаціям можливість зберігати великі за обсягом набори та колекції даних та програмно-алгоритмічні засоби на віддалених серверах. IT_{CL} мають ряд переваг, зокрема, гнучкість, масштабованість та ощадне використання коштів завдяки підходу до оплати за надані послуги. На даний час популярні мультихмарні та гібридні хмарні середовища, що інтегрують функціональні можливості декількох хмарних провайдерів, наприклад, Amazon Web Services, Microsoft Azure та Google Cloud Platform, для задоволення різнотипових обчислюваних потреб і вимог. Це дає змогу замовникам скористатися перевагами функціональних наборів різних провайдерів та уникнути прив'язки до окремого постачальника хмарних послуг. Контейнеризація дає можливість створювати легкі, портативні та самодостатні програмні пакети, які можна ефективно розгортати та масштабувати в будь-якому хмарному або локальному обчислюваному середовищі [31].

IT_{CL} використовуються для створення та впровадження обширного переліку цифрових послуг «розумних міст» та формування високопродуктивних та масштабованих міських сервісних платформ. На даному етапі розвитку «розумних міст» потрібно розробити методи вибору моделі архітектури інформаційно-технологічної платформи. Програмно-алгоритмічні комплекси та застосунки «розумних міст» потребують оперативного та високопродуктивного аналітичного опрацювання, що продукується завдяки дачачам на базі Інтернету речей [32]. Тому доцільно розробити метод вибору інформаційно-технологічної

платформи, яка буде використовуватись для зберігання та аналітичного опрацювання «великих даних», що продукуються різнотиповими міськими системами [33].

1.2.5 Штучний інтелект та машинне навчання для підтримки супроводу процесів прийняття рішень у «розумних містах»

Згідно з [34], «штучний інтелект – це термін, що використовується для опису систем, що імітують розумові здібності, такі як навчання, мовлення та виконанні завдань». Штучний інтелект активно використовується у сучасних містах для управління «розумними» службами та послугами. Застосунки на базі IT_{AI} дають можливість автоматизувати процеси, скоротити час очікування надання послуг та реагування на запити, адміністративні витрати загалом [35].

На рис. 1.8 подано класифікацію застосунків на базі IT_{AI} , що використовуються у сучасних «розумних містах» [36].

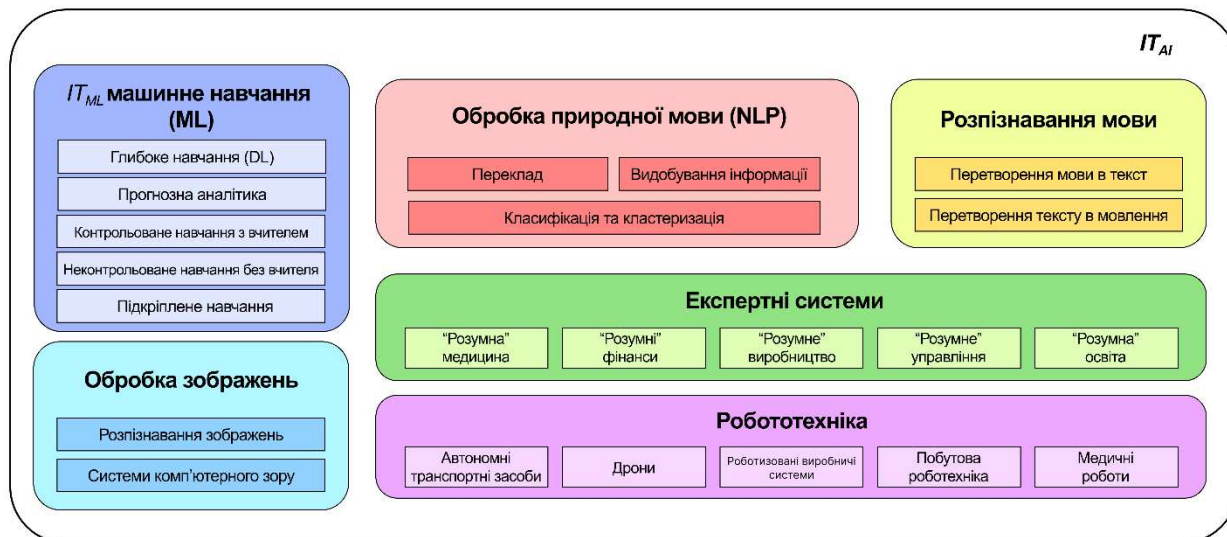


Рис. 1.8. Класифікація застосунків на базі IT_{AI} у «розумних містах» [36]

Повсюдне впровадження цифрових давачів на базі IoT-пристроїв та експоненційне зростання наборів та колекцій «великих даних» формують обширні можливості використання алгоритмів машинного навчання для покращення

міських «розумних» систем і послуг [37]. IT_{ML} – це потужна галузь IT_{AI} , яка дає змогу «розумним» системам автоматично навчатися на основі даних, здійснювати та приймати обґрунтовані рішення [38].

IT_{ML} дає можливість здійснювати аналітичне опрацювання та видобувати цінні знання з «великих даних», що отримані з різних джерел в міському середовищі, зокрема, давачів, соціальних та муніципальних БД [39].

Алгоритми IT_{ML} можна розділити на три основні типи: контрольоване навчання з вчителем, неконтрольоване навчання без вчителя та підкріплене навчання [40].

При контрольованому навчанні алгоритми IT_{ML} навчаються з використанням попередньо відібраних наборів даних, зіставляючи вхідні значення з відповідними вихідними метриками. Зазвичай у гіперскладних системах «розумних міст» цей підхід використовується для таких задач класифікації та регресії [41].

На початкових етапах неконтрольованого навчання відбувається дослідження немаркованих наборів та колекцій даних «розумних міст» для виявлення прихованих закономірностей і структур даних. Кластеризація та зменшення розмірності є типовими застосуваннями алгоритмів IT_{ML} на базі неконтрольованого навчання для потреб гіперскладної системи «Розумне місто».

IT_{ML} з підкріпленням навчанням зосереджено на навчанні алгоритмів взаємодії з обчислювальним середовищем та формуванні оптимальних послідовностей дій на основі винагороди та зворотного зв'язку. Такі підходи використовуються у програмно-алгоритмічних сценаріях, коли у «розумних застосунках» повинні прийматись послідовні рішення [42].

Штучний інтелект використовується при управлінні та при аналізі даних [43]: методи глибокого навчання (deep learning) можуть збільшити виробництво «зеленої» енергії [44, 45], в той час як нейронні мережі можуть покращити управління транспортом [46].

В гіперскладних системах «розумних міст» IT_{ML} ефективно використовуються для виявлення закономірностей, кореляції та тенденцій у наборах та колекціях даних, забезпечуючи обґрунтування процесів прийняття рішень та проактивного керування на основі даних [47]. Зокрема, застосування алгоритмів IT_{ML} до наборів та колекцій на основі даних «розумних міст» дає змогу отримати корисну інформацію та здійснити прогнозування в галузях «розумного» енергоуправління, «розумного» транспорту, «розумної» утилізації відходів, громадській безпеці, залученні містян до процесів міського управління та соціальної інтеграції «розумних» спільнот та громад.

Програмно-алгоритмічні комплекси та засносунки на основі алгоритмів IT_{ML} розширюють можливості цифрової трансформації традиційних міських систем в «розумні» адаптивні мережі продукування, постачання та використання ресурсів, що покращують якість надання послуг та якість життя мешканців загалом [48, 49]. Однак розгортання систем та підсистем на базі IT_{ML} у динамічному та складному міському середовищі формує підвищені вимоги до конфіденційності та безпеки даних, забезпечення коректності етичних аспектів використання ШІ. Їх врахування потребує формування додаткових переліків, категорій та засобів оцінювання «розумності» для розкриття потенціалу IT_{ML} у процесах формування гіперскладних систем «розумних міст», створення надійних та стійких міських систем, що відповідають мінливим запитам та потребам жителів [40].

1.2.6 «Відкриті дані» (Open Data) для «розумних» послуг та сервісів

IT_{OD} , що продукуються різними елементами та суб'єктами міських систем, відіграють вирішальну роль для розвитку «розумного міста» як гіперскладної системи, оскільки їх інтеграція та опрацювання дають змогу створювати, впроваджувати та розвивати «розумні» послуги з високими соціальними та економічними характеристиками. Набори та колекції «відкритих даних» у «розумних містах» продукуються в міському цифровому середовищі, яке

формується на основі фізичної інфраструктури, споруд, будівель тощо та соціальних чинників – громадяни, установи та організації, заклади освіти та культури, органи влади тощо [50].

IT_{OD} можуть бути [51]:

- отримані з офіційних інтернет-ресурсів даних міських установ та організацій;
- отримані за допомогою методів аналітичного опрацювання «великих даних»;
- сформовані на основі інформаційних наборів та колекцій загальнодоступних «відкритих даних».

Однак не всі набори та колекції «відкритих даних» орієнтовані на проекти класу «Розумне місто». Щоб уникнути двозначності даних, автори [52] виокремили категорії IT_{OD} відповідно до елементів «розумних міст» (див. рис. 1.9).



Рис. 1.9. Категорії IT_{OD} в «розумних містах» [52]

Впровадження інноваційних цифрових послуг у гіперскладних системах «розумних міст» потребує консолідацій наборів «відкритих даних» та розробки ефективних аналітичних засобів на базі методів та алгоритмів IT_{ML} . Дослідники [53] підкреслюють важливість інтенсифікації процесів обміну даними та їх аналітичного опрацювання засобами IT_{AI} та IT_{ML} . Після аналітичного

опрацювання IT_{OD} доцільно здійснити розробку інформаційних панелей для візуалізації «відкритих даних» «розумного міста».

1.3 Стандартизація елементів гіперскладної системи «Розумне місто»

Британський інститут стандартів (англ. British Standards Institution, BSI) у співпраці з ISO (англ. International Organization for Standardization – міжнародна організація зі стандартизації) розробив обширний перелік стандартів «розумних міст» і показників міської ефективності. BSI є провідною організацією в галузі стандартизації «розумних міст» і показників ефективності міського господарства у Великобританії та світі. Загальнодоступна специфікація PAS 180 (PAS – англ. Publicly Available Specification) детально описує узгоджене галузеве розуміння визначень і термінів «розумного міста» у Великобританії для формування термінологічної основи майбутньої стандартизації [54]. Також подано означення термінів в галузі «розумних міст» для формування спільної галузевої мови проєктувальників, розробників, замовників і виробників. PAS 180 подає визначення термінів, що охоплюють концептуальні основи для елементів «розумної» інфраструктури та систем «розумних міст». Водночас, стандарт охоплює процеси, матеріали, програмно-алгоритмічні засоби та методології «розумних міст».

Стандарт PAS 181 містить концепцію «розумного міста», яка допомагає міському керівництву створювати, узгоджувати та впроваджувати стратегії «розумного міста». Вміст стандарту спрямовано на трансформацію сучасних міст, підвищення їх стійкості та розкриття їхнього потенціалу [55].

Концепція «розумного міста» ґрунтується на сучасних передових підходах та узагальнює набір високотехнологічних інноваційних завдань, які можна впроваджувати для створення комфортного міського середовища та реалізації планів розвитку громад, міст та регіонів. Концепція PAS 181 не містить опис універсальної моделі міст Великобританії, а зосереджується на сприянні

процесам інноваційного використання даних та інформаційних технологій у поєднанні з організаційними змінами міського управління і середовища, які допомагають розкрити різноманітні потенційні переваги міст, підвищити їхню стійкість та ефективність «розумних» послуг та сервісів [56].

На основі [57] сформовано подану на рис. 1.10 структурну схему інформаційних потоків «розумного міста», яка зосереджена на взаємодії міських підсистем між собою завдяки впровадженню інформаційних та комунікаційних технологій.

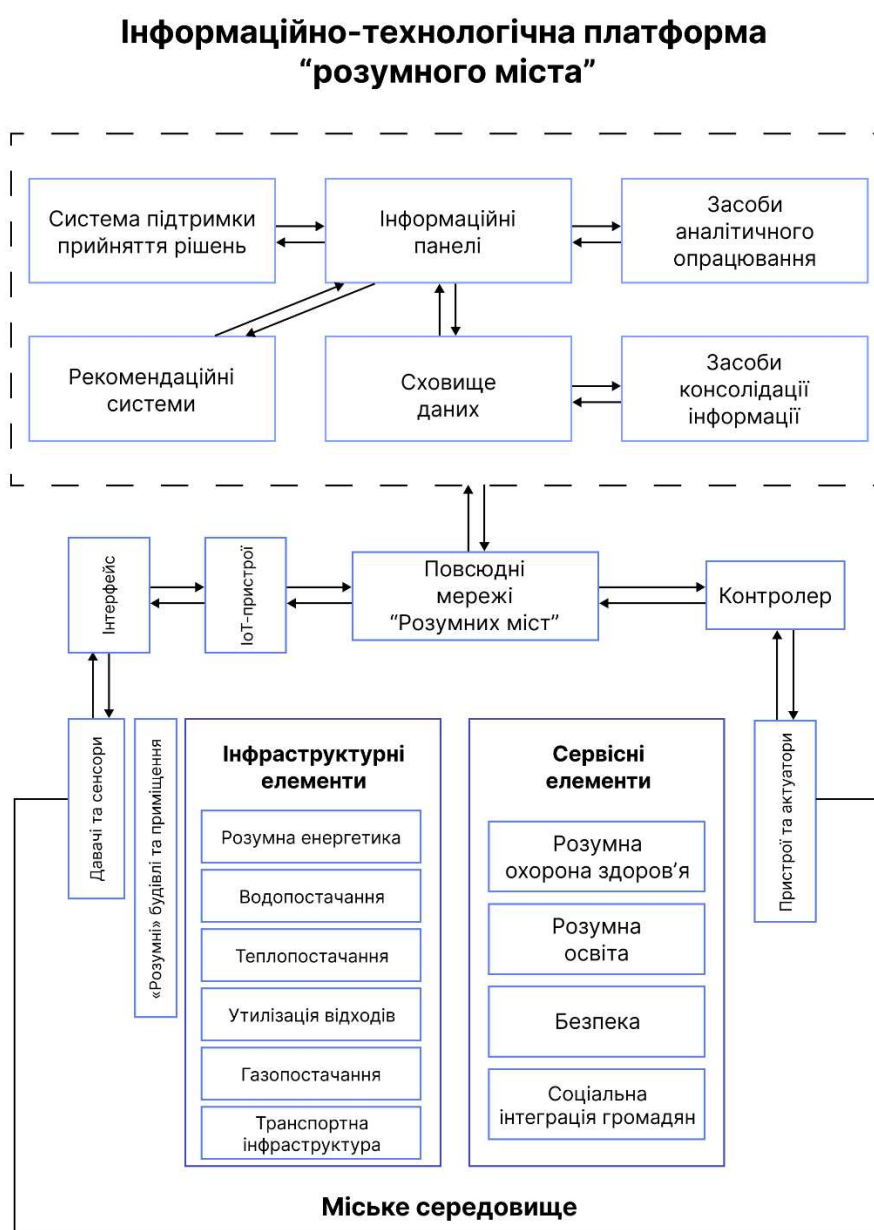


Рис. 1.10. Структурна схема інформаційних потоків «розумного міста»

Структура інформаційних потоків «розумних міст» реалізовується для формалізації етапів проектування та впровадження програмно-алгоритмічних інструментів «розумних» послуг та сервісів [57].

Гіперскладна система «Розумне місто» інтегрує інфраструктурні елементи, «розумні» будівлі та приміщення, сервісні елементи. Можлива взаємодія між системами та елементами в будь-якій з підсистем або їхніми дочірніми підсистемами. Інфраструктурні елементи «розумного міста» забезпечують постачання ресурсів, утилізацію відходів та транспортні послуги. У гіперскладних системах «розумних міст» активно впроваджуються та використовуються різнотипові давачі та сенсори на основі IT_{IoT} . А для збереження, консолідації, аналізу та відображення даних використовуються хмарні інформаційно-технологічні платформи. Це забезпечує високоефективний супровід процесів прийняття рішень учасниками, муніципальними адміністраціями, установами та організаціями, провайдерами «розумних» послуг. Узагальнену модель життєвого циклу даних «розумних міст» подано на рис. 1.11. Ця модель узагальнює процеси життєвого циклу даних в соціокомунікаційних та фізичних системах гіперскладних систем «розумних міст». Вона описує як дані гіперскладних систем «розумних міст» збираються, зберігаються та передаються перед тим, як їх можна консолідувати, проаналізувати, відобразити та використати для супроводу процесів прийняття рішень при формуванні цифрових «розумних» послуг та сервісів. На кожному етапі опрацювання даних задіяні різні суб'єкти. Наприклад, громадяни, чії дії призводять до продукування даних, власники давачів чи IoT-пристроїв, хмарні платформи, постачальники «відкритих даних» та хмарних послуг. Водночас слід враховувати соціальні аспекти життєвого циклу даних, наприклад, конфіденційність, безпека, монетизація та технічні особливості, наприклад, пов'язані з інтерфейсами та сумісністю процесів. Подані на рис. 1.10 «потоки даних» як етапи життєвого циклу даних характерні для переважної більшості систем «розумних міст».

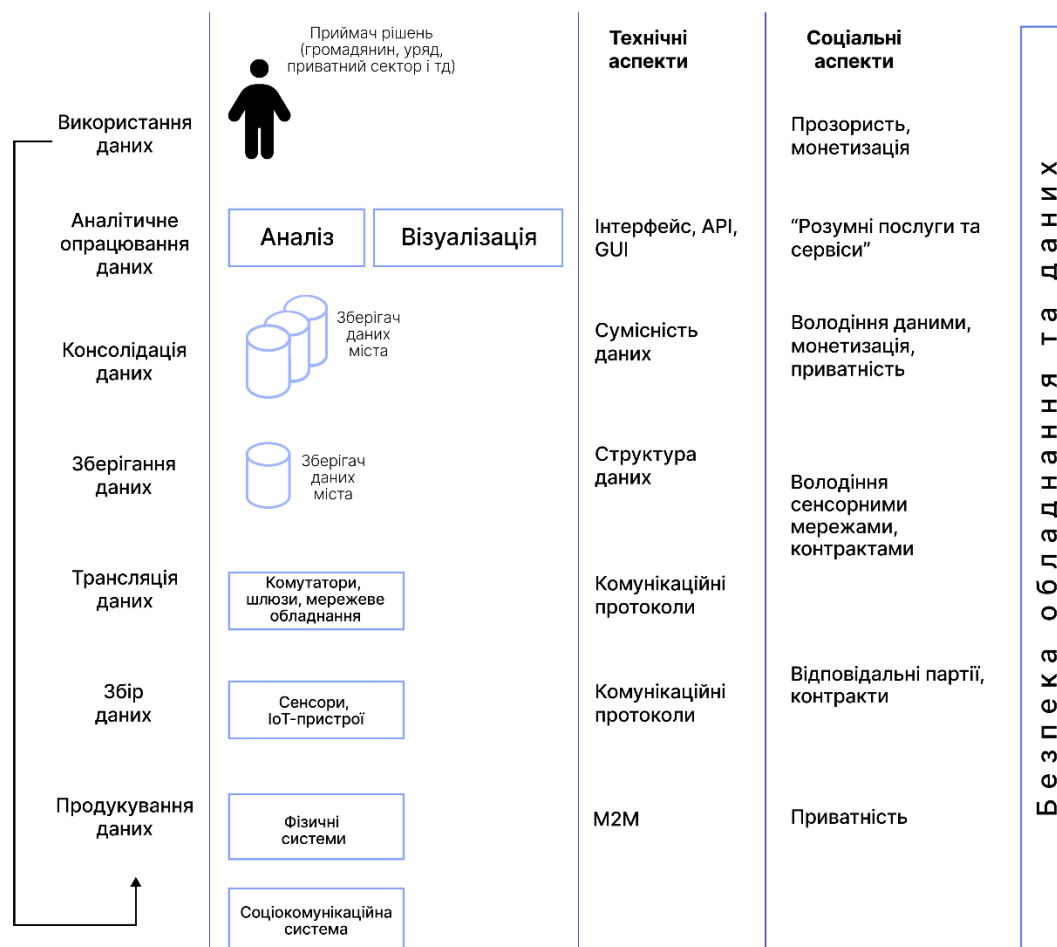


Рис. 1.11. Узагальнена модель життєвого циклу даних «розумних міст»

На даний час впроваджено широке коло стандартів для інфраструктурних секторів «розумних міст», зокрема в області комунікаційних мереж та протоколів і розгорнуто обширний перелік ініціатив щодо розробки стандартів в інфраструктурних секторах та міському середовищі. Проте відносно мало стандартів зосереджено в секторі «розумних» послуг, за винятком безпекової галузі. Взаємодія між окремими пристроями в гіперскладних системах «розумних міст» здебільшого регламентується стандартами, але стандарти взаємодії між елементами гіперскладних систем «розумних міст» все ще рідкісні [57]. Можна встановити зв'язок між «розумним» енергопостачанням та «розумним» транспортом, наприклад, завдяки масовому поширенню електромобілів, через те,

що вони вбудовані в гіперскладну систему «розумного міста». На рис. 1.12 зображено розподіл стандартів у галузі «розумного міста».



Рис. 1.12. Стандарти «розумних міст»

Зважаючи на важливість формування якісного соціокомунікаційного середовища «розумних міст» доцільно розглянути потоки даних при соціальній взаємодії в гіперскладних системах «розумних міст».

1.4 Аналіз інструментів рейтингування «розумних міст»

Концепція «розумних міст» привертає значну увагу у представників органів влади та дослідників впродовж останнього періоду часу. Європейська комісія визначає «розумне місто» як *«місце, де традиційні мережі та послуги стають більш ефективними завдяки використанню цифрових та комунікаційних*

технологій на користь мешканців та бізнесу» [58]. Водночас автори [59] зазначають, що не існує узгодженого визначення «розумного міста», оскільки не існує «найкращого способу» зробити кожне місто «розумним». Тому для визначення ступеня впровадження елементів у гіперскладних системах «розумних міст» використовується рейтингування.

«Рейтингування «розумних міст» є цінним інструментом для вимірювання ступеня розвитку міст за допомогою набору показників, пов'язаних з різними характеристиками, проте воно повинне вимірювати якість впроваджених і «розумних» послуг, а також обсяг технологічної інфраструктури» [60].

Для рейтингування використовується індекс «розумності» міст.

«Індекс розумних міст є одним із найвідоміших інструментів, який включає характеристики (життя, економіка, люди, управління, мобільність та навколишнє середовище), фактори і критерії та використовується для рейтингування міст за рівнем наданих послуг» [61].

Концепція «розумного міста» передбачає розвиток ключових напрямків міської інфраструктури, зокрема «розумна» енергетика, «розумні» мережі постачання ресурсів, транспорт, охорона здоров'я та безпека, та формування на їх основі обширної множини «розумних» послуг і сервісів [62].

Не зважаючи на багатогранність сучасних міст та різноманітність їх індивідуальних характеристик, спільні риси «розумних міст» дають змогу об'єднати науковців та практичні підходи.

На даний час було зроблено низку спроб рейтингувати міста за різними наборами параметрів, серед яких найбільш популярними є «конкурентоспроможність міста», «придатність для життя» громадян, «сталість міста», «глобальність міста», «розумність міста» тощо. Ці спроби реалізуються завдяки оцінюванню характеристик: «розумна мобільність», «розумна економіка», «розумне середовище», «розумні люди», «розумне життя» та «розумне управління» [63, 64].

Лін [65] провів аналіз показників надійності систем «розумних міст», щоб перевірити запропоновану ним систему рейтингування. Порівняльне дослідження між трьома моделями рейтингування «розумних міст» провели автори [66]. А Ву [67] розробив систему «розумного рейтингування» показників китайських міст. Через різноманітність регіональних та національних стандартів життя, дослідження характеристик «розумного середовища» проживання привертає значну увагу науковців [68].

Автори [69] склали рейтинг двадцяти восьми європейських столиць за рівнем їхньої «розумності» та сталості, використовуючи тридцять два показники. Запропонована методологія базується на головному компонентному аналізі (РСА – англ. Principal component analysis) та ієрархічній кластеризації.

Переважає більшість існуючих на даний час підходів для рейтингування «розумних міст» індексів використовує сім характеристик індексів «розумного міста», а саме: «розумне управління», «розумна економіка», «розумне життя», «розумна ефективність», «розумні проекти», «розумні технології» та комплексну характеристику, яка визначає індекси, що охоплюють дві або більше характеристик [68].

На рис. 1.13 подано індекси (рейтинги) «розумності» міст та елементи для їх визначення.

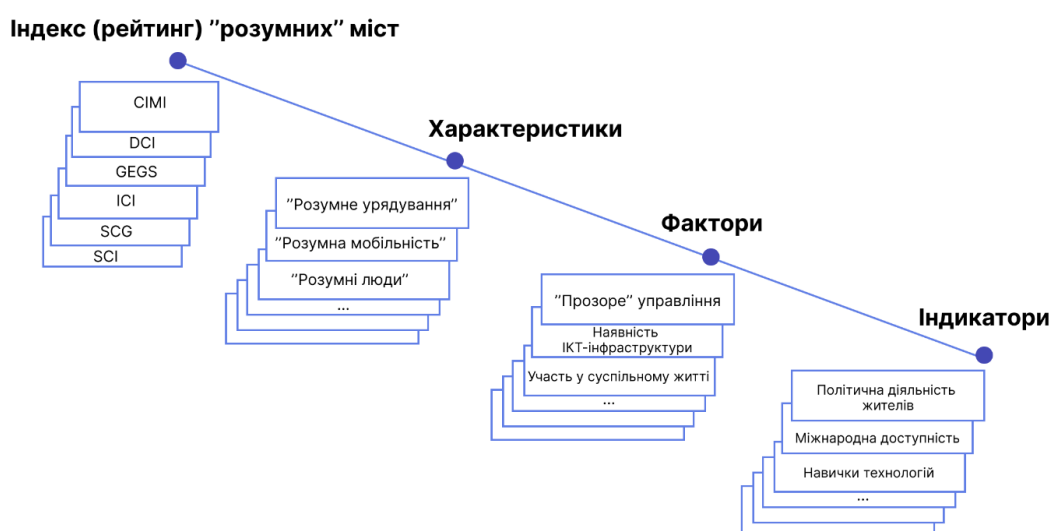


Рис. 1.13. Індекси (рейтинги) «розумності» міст та елементи для їх визначення

Індекс «Cities in Motion» (CIMI), що публікується бізнес-школою IESE в Іспанії, є щорічно оновлюваним рейтингом найбільших міст світу. Починаючи з 2014 року CIMI розглядає «розумне місто» як спосіб управління містами для забезпечення їх стійкості та підвищення якості життя мешканців. Формування індексу CIMI відбувається на основі дев'яти характеристик та сто одного індикатора, що включають людський капітал, соціальну інтеграцію громадян, економічні показники урядування та управління, охорону довкілля, мобільність і транспорт, міське планування, прогнозування процесів та подій, та рівень впровадження технологій [70].

Індекс цифрових міст (англ. Digital City Index, DCI) був опублікований лише один раз іспанською консалтинговою компанією у 2018 році [71]. DCI відзначає, що «розумне місто» викликало підвищений інтерес громадян. DCI використано для оцінювання міст Європи, Азії, Америки та Африки. Хоча рейтингові списки були розділені відповідно до чотирьох континентів, також було сформовано та опубліковано загальний рейтинг провідних міст світу. Індекс був сформований на основі вимірювання загальної кількості пошукових запитів, здійснених мешканцями всього світу щодо «розумних міст». Для аналізу було використано три характеристики: «робота», «життя» та «навчання», а також дев'ять підкатегорій у кожній з них [71].

Індекс «Глобальне дослідження електронного урядування» (англ. Global E-Government Survey, GEGS) зосереджується на веб-ресурсах місцевих органів влади, які розглядаються для оцінки «розумного урядування» [72, 73]. При формуванні GEGS відзначається, що надання державних послуг та участь громадян в міському управлінні є двома ключовими елементами цифрового врядування. Дослідження публікується американською дослідницькою групою один раз на два роки, починаючи з 2003 року і має найдовшу історію серед шести розглянутих індексів. При формуванні GEGS обирається сто міст зі ста провідних країн світу, опублікованого Міжнародним союзом електрозв'язку на основі аналізу загальної кількості користувачів мережі Інтернет. В останній редакції

GEGS для аналізу було використано п'ять факторів: «конфіденційність/безпека», «зручність використання», «контент», «сервіс» та «громадянська та соціальна активність» та вісімдесят шість індикаторів [72].

Індекс інноваційних міст (англ. Innovation Cities Index, ICI) публікується австралійським інформаційним агентством щорічно, починаючи з 2007 року. У 2020 році цей індекс не було опубліковано через Covid-19. Він оцінює найбільшу кількість міст. ICI розглядає «розумне місто» як процес інновацій, а отже, як генерування, впровадження та реалізацію ідей. Він також пропонує три фактори для оцінки інноваційності міста: «культурні активи», «людська інфраструктура» та «мережеві ринки». У останній редакції ICI для аналізу було використано сто шістдесят два індикатори. Крім того, ICI класифікує міста на чотири категорії за їхньою роллю: «Nexus», «Hub», «Node» та «Upstart» [74].

Індекс Smart City Governments (SCG) публікується сінгапурською консалтинговою компанією з 2018 року. Його друга редакція опублікована у 2021 році. SCG розглядає «розумне місто» як спосіб управління містом, що дає змогу:

- використовувати інвестиції в цифрових рішеннях;
- виявляти та залучати вразливі групи населення;
- готувати міста до майбутніх змін та інновацій;
- орієнтувати міста на задоволення потреб громадян.

Структура цього індексу складається з десяти індикаторів: лідерство, концептуальне бачення, бюджет, фінансові стимули, програми підтримки, готовність до розвитку талантів, орієнтованість на людей, інноваційність міських систем, «розумна політика» та історія розвитку [75].

Індекс «розумних міст» (англ. Smart City Index, SCI) формується Центром світової конкурентоспроможності (англ. IMD) у Сінгапурі щорічно з 2019 року. SCI розглядає «розумне місто» як міське середовище, яке використовує інформаційні та комунікаційні технології для посилення переваг та зменшення недоліків урбанізації для міських жителів. У останній редакції SCI, що була опублікована в 2023 році, міста оцінювалися за тридцятьма дев'ятьма показниками,

об'єднаними в п'ять категорій: здоров'я та безпека, людська мобільність, діяльність, можливості та міське урядування. У 2023 році SCI містить рейтинг сто вісімнадцяти міст світу. При формуванні SCI було враховано результати опитування ста двадцяти мешканців у кожному місті [76]. Підсумковий показник кожного міста було розраховується на основі оцінок за останні три роки дослідження з ваговими коефіцієнтами 3:2:1 для 2023:2022:2021 відповідно. У SCI враховано пріоритетні сфери розвитку міст та ставлення жителів до формування процесів реалізації «розумного міста», що підкреслює високий пріоритет, орієнтованого на громадян концепту «розумного міста» [77].

Автори [76] виділяють ряд підходів щодо рейтингування «розумних міст».

Глобальний індекс міст (англ. Global Cities Index, GCI) [78], розроблений компанією AT Kearney – один з найстаріших існуючих індексів «розумних міст», який запроваджено з 2008 року. GCI формує глобальний рейтинг міст на основі п'яти характеристик за двадцяти дев'ятьма критеріями. Зокрема, GCI враховує ділову активність, людський капітал, обмін інформацією між структурними елементами «розумного міста», культурний досвід громадян та політичну залученість містян. Ділова активність характеризує кількості компаній зі списку Fortune 500, що мають у місті штаб-квартири, кількість міжнародних конференцій, що проводяться в місті, фінансові потоки та обсяг товарів, що проходять через місто. При формуванні GCI ваговий коефіцієнт фактору «ділова активність» становить тридцять відсотків. Фактор «людський капітал» характеризує наскільки місто приваблює різноманітні таланти на основі кількісної оцінки індикаторів: населення іноземного походження, університети, міжнародні школи, випускники з вищою освітою та іноземні студенти. Фактор «людський капітал» має ваговий коефіцієнт тридцять відсотків. Впродовж останніх одинадцяти років рейтинг GCI для топ-5 міст був досить стабільним. Він містить міста Азійсько-Тихоокеанського регіону: Токіо, Гонконг, Сінгапур і Сеул.

Індекс міст майбутнього (англ. Cities of the Future Index, CFI) [79] сфокусовано на впроваджені нових технологій для створення сталого для життя

містیان середовища. Індекс CFI формується шведською компанією EasyPark Group. CFI оцінює чотири фактори: «цифрове життя», «інновації у сфері мобільності», «інфраструктура» та «сталій розвиток». Фактор «цифрове життя» характеризує впровадження інформаційних та комунікаційних технологій, наявність освітніх закладів, інноваційні системи в галузі охорони здоров'я [80], а також кількісну оцінку технологій, що впровадженні містом. Фактор «інновації у сфері мобільності» характеризує системи управління управління дорожнім рухом, паркування та екологічні показники міського транспорту [81]. Фактор «інфраструктура» характеризує розвиток міських систем електронних платежів та комерції, та повсюдність підключення до мережі Інтернет. Фактор «сталість» характеризує вплив міста на навколишнє середовище. Він містить індикатори кліматичних змін, «розумної» утилізації відходів, «розумних» будівель та використання екологічно чистої енергії.

Згідно [79] при формуванні рейтингів «розумності» міста поділяються на групи відповідно до чисельності населення. Великі міста – це міста з населенням понад три мільйони людей. Середні міста – це міста з населенням від шістсот тисяч до трьох мільйонів. Малі міста – це міста з населенням від 50 000 до 600 000 жителів. Індекс CFI оцінює понад тисячу міст з усього світу.

Подібно до CІМІ, індекс EasyPark CFI формує рейтинг «розумних міст» на основі обчислення факторів. Згідно EasyPark CFI даними за 2017, 2019, 2021 та 2023 роки Лондон, Нью-Йорк і Сан-Франциско займають провідні позиції, за ними знаходяться Сінгапур, Берлін і Роттердам. Однак рейтинги EasyPark CFI в 2017 та 2019 роках суттєво відрізняються. При цьому Лондон і Нью-Йорк не потрапили до топ-10. А Париж жодного разу не увійшов до топ-10 EasyPark CFI.

Значні коливання в рейтингах CFI свідчать про їх нестабільність, спричинені набором оцінюваних факторів та індикаторів. Використано лише чотири фактори, що групують п'ятдесят індикаторів.

Починаючи з 2008 року, Global Power City Index (GPCI) [82] використовується для глобального рейтингування міст за шістьма факторами, а

саме: економіка, наукові дослідження та розробки, соціокультурне середовище, придатність для життя, охорона навколишнього середовища та доступність. При оцінюванні міст кожен фактор розділяється на підмножину індикаторів. При формуванні GPCI використано сімдесят індикаторів. По кожному індикатору обчислюється середній бал у межах фактора, який об'єднується для обчислення рейтингу GPCI функціональні показники сумуються. У сфері досліджень і розробок GPCI здійснює оцінку міських освітніх та академічних ресурсів, дослідницького середовища та впровадження інновацій. Для фактора соціокультурного середовища здійснюється оцінювання туристичної галузі, культурного середовища міст та міжнародної взаємодії. При оцінюванні фактора придатності для життя розглядають критерії вартості та зручності проживання, характеристики виробничих середовищ. При оцінюванні фактора безпека та охорона навколишнього середовища оцінюються індикатори: добробут довкілля, сталість, якість повітря та води, та кількість міської зелені. Для фактора доступність відбувається аналіз транспортної інфраструктури.

Розроблений компанією SmartEcoCity індекс «розумного екоміста» (SECI) [83] базується на семи категоріях: транспорт і мобільність, сталість розвитку, міське управління та урядування, інноваційна економіка, цифровізація, якість життя та оцінки експертів. Рейтинг SECI сформовано на основі факторів:

- «розумні» критерії – покращення якості життя громадян, соціальна інтеграція жителів міст, публічний доступ до послуг та сервісів «розумних міст», збалансований розвиток усіх міських громад та спільнот тощо;
- екологічні критерії – зменшення впливу на навколишнє середовище з метою покращення якості життя, сталості функціонування міської інфраструктури, екологічно чистої енергії, використання відновлюваних джерел природних ресурсів;
- критерії міського управління та урядування – залучення містян до створення ініціатив міського розвитку, відкритість та прозорість процесів управління містом, чітке бачення, відкритість інноваційних процесів, планування

стійкості міста для зменшення впливу стихійних лих, надзвичайних випадків та катастроф.

При формуванні рейтингу SECI критерії мають різновагові коефіцієнти. Загальна оцінка міста в рейтингу SECI – це сума балів за всіма критеріями.

У світовому рейтингу SmartEcoCity за 2018 рік багато міст набрали однакову кількість балів, це свідчить про тенденції до впровадження міської «розумності» та екологічності. Зауважимо, що з 2018 року SmartEcoCity не було опубліковано жодних нових звітів чи рейтингів. Судячи з інформації на офіційному веб-ресурсі компанії, вона зосередилась на азійських містах [83].

У таблиці 1.1 подано порівняння результатів рейтингування міст за ключовими індексами. Лондон та Нью-Йорк очолили рейтинги за чотирма індексами (GCI, CIMI, CFI та GPCI).

Таблиця 1.1 – Порівняння результатів оцінювання шістьма індексами

№	Індекс	Міста (2022/2023)	Примітки
1	Smart City Index (SCI)	1. Сінгапур (Сінгапур) 2. Цюрих (Швейцарія) 3. Осло (Норвегія) 4. Тайбей (Тайвань) 5. Лозанна (Швейцарія)	Результати оцінювання суттєво відрізняються від інших. Перші три міста не потрапили до інших рейтингів.
2	Global Cities Index (GCI)	1. Нью-Йорк (США) 2. Лондон (Англія) 3. Париж (Франція) 4. Токіо (Японія) 5. Лос-Анджелес (США)	Для формування індексу використано понад сто показників. Два міста лідери рейтингу такі самі як у рейтингах CIMI, CFI, GPCI тільки в іншому порядку.
3	Cities in Motion (CIMI)	1. Лондон (Англія) 2. Нью-Йорк (США) 3. Париж (Франція) 4. Токіо (Японія) 5. Рейк'явік (Ісландія)	Індекс формується на базі понад п'ятдесяти індикаторів. Перші три міста такі ж як у GCI. Тільки в іншому порядку.
4	Cities of the Future Index (CFI)	1. Лондон (Англія) 2. Нью-Йорк (США) 3. Сан-Франциско (США) 4. Сінгапур (Сінгапур) 5. Берлін (Німеччина)	Індекс формується на основі оцінки п'ятдесяти індикаторів.

Продовження таблиці 1.1

№	Індекс	Міста (2022/2023)	Примітки
5	Global power city index (GPCI)	1. Лондон (Англія) 2. Нью-Йорк (США) 3. Токіо (Японія) 4. Париж (Франція) 5. Сінгапур (Сінгапур)	Формування індексу відбувається на основі семидесяти показників.
6	SmartEcoCity Index (SECI)	Дані відсутні	На даний час SECI рейтинг не використовується для оцінки.

При формуванні проаналізованих у цьому параграфі рейтингів «розумних міст» використано різні набори факторів, індикаторів та інформаційно-технологічні інструменти обчислення індексів.

На основі проведеного аналізу індексів можемо зробити висновок, що на даний час немає загальноприйнятого підходу до оцінювання показників «розумності» міст. Тому для комплексного оцінювання гіперскладних систем «розумних міст» потрібно сформувати множину характеристик, показників та індикаторів. Подамо основні характеристики «розумних міст» у вигляді множини (1.2).

$$CHA = \{CHA_{SEN}, CHA_{SP}, CHA_{SL}, CHA_{SG}, CHA_{SM}, CHA_{SEC}\}, \quad (1.2)$$

де CHA_{SEN} – «розумне середовище»;

CHA_{SP} – «розумні люди»;

CHA_{SL} – «розумне життя»;

CHA_{SG} – «розумне управління»;

CHA_{SM} – «розумна мобільність»;

CHA_{SEC} – «розумна економіка».

Для здійснення рейтингування «розумних міст» є потреба в інформаційно-технологічних інструментах, які включатимуть системи збору даних, аналітичні платформи, панелі управління та інші інструменти для вдосконалення міських систем та послуг.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз концепту «Розумне місто» як обширної множини взаємозалежних елементів та інформаційних сутностей, що дало змогу виокремити набір примананих йому характеристик складних систем та вважати «Розумне місто» гіперскладною системою.

2. Проаналізовано множину інформаційних та комунікаційних технологій, зокрема, Інтернет речей, «великі дані», блокчейн, хмарні технології, штучний інтелект, машинне навчання та «відкриті дані» для формування гіперскладної системи «Розумне місто», що дало змогу формалізувати модель життєвого циклу даних в системах такого класу.

3. Сформовано структурну схему інформаційних потоків та узагальнену модель життєвого циклу даних «розумного міста», що дало змогу дослідити процеси стандартизації елементів гіперскладних систем «розумних міст».

4. Досліджено характеристики, фактори та критерії, що використовуються для створення інформаційно-технологічних інструментів рейтингування «розумних міст», що дало змогу забезпечити сталість процедур оцінювання.

Отже, актуальною науковою задачею є розроблення методів, засобів та інформаційно-технологічних інструментів для побудови та оцінювання характеристик гіперскладних систем класу «Розумне місто» у вітчизняних реаліях.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЛАТФОРМ І МОДЕЛЕЙ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ АРХІТЕКТУР «РОЗУМНОГО МІСТА»

2.1 Інформаційно-технологічні платформи – основа реалізації гіперскладних систем «розумних міст»

Автори [84] зазначають, що *«Інформаційно-технологічна платформа – це технологічна основа, на якій можуть взаємодіяти застосунки, що дають змогу здійснювати обмін даними між елементами складних систем»*.

Інформаційно-технологічна платформа «розумного міста» застосовується для зберігання, обміну даними та управління цієї гіперскладної системи та інтеграції різнотипових підсистем. На даний час в реальних проектах «розумних міст» ряд інформаційно-технологічних платформ успішно впроваджено [85].

Запропонована в [86], інформаційно-технологічна платформа (ІТП), скорочує час впровадження процесів інтеграції даних та зменшує витрати ресурсів, даючи змогу систематизувати процедури даних для відбору та консолідації цифрових послуг та застосунків «розумного міста». Сформований ІТП набір даних може використовуватися множиною міських цифрових послуг та сервісів для виконання процедур аналітичного опрацювання даних, пошуку інформації, обчислення статистичних показників або створення наборів «відкритих даних». ІТП базується на програмно-алгоритмічних інструментах з відкритим кодом, які охоплюють всі етапи життєвого циклу даних (див. рис. 2.1). Зазначені інструменти використовуються для системної інтеграції даних [87], агрегування та узгодження даних, створення онтології W3C Семантичної сенсорної мережі та оновлення онтологій [88], формування онтології «розумного міста» [89], інтеграція даних давачів навколишнього середовища [90].

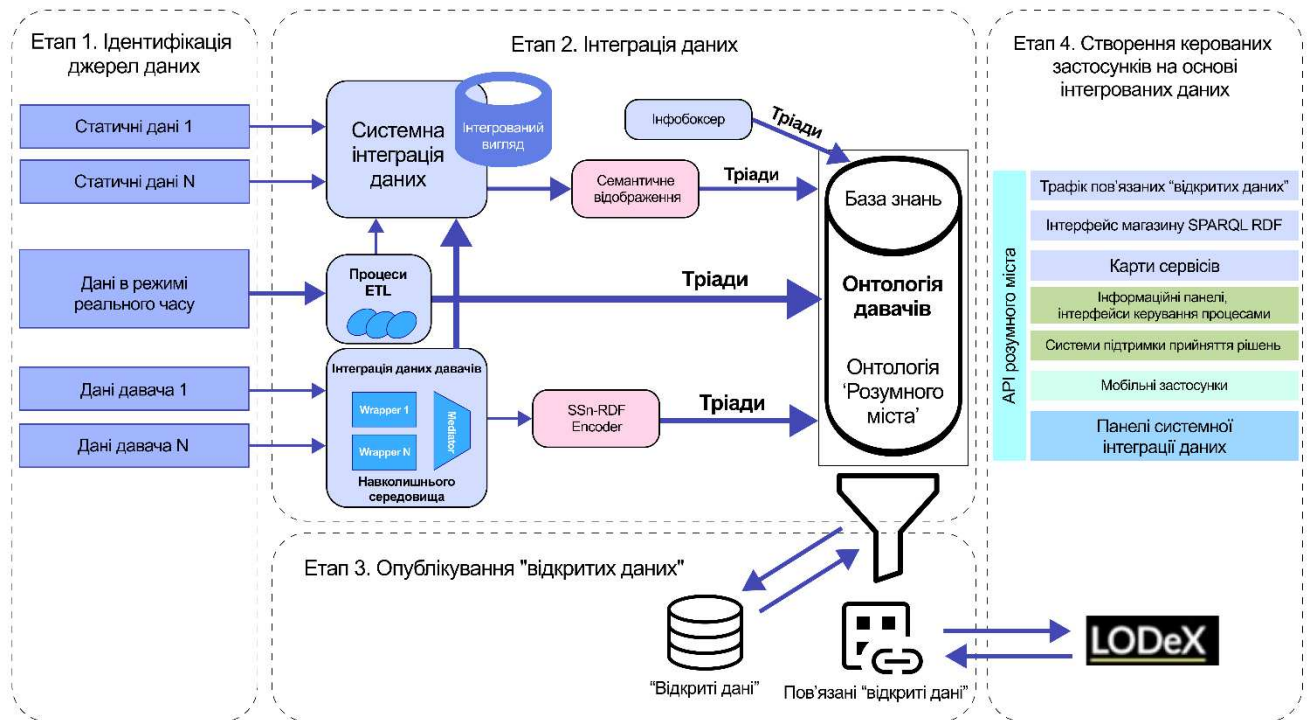


Рис. 2.1. Інформаційно-технологічна платформа для системної інтеграції життєвого циклу даних «розумного міста» [86]

Впродовж останнього періоду часу експоненційно збільшуються обсяги даних, що продукуються, збираються та опрацьовуються урядовими установами та міськими адміністраціями. Україна підписала декларацію Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР), у якій зазначено, що профінансовані державою процеси повинні містити загальнодоступні та «відкриті дані» [91]. Тому активно впроваджуються ініціативи «відкритих даних», що спрямовані на розвиток методологій, інформаційних технологій та стандартів їх публікації, консолідації та інтеграції. Однією з найуспішніших є, спрямована на покращення процедур доступу та інтеграції публічних даних, ініціатива пов'язаних «відкритих даних» [90]. Вона запроваджена для поширення машиносприйнятних різнотипових наборів даних.

Ініціатива спрямована на використання «великих даних» для покращення процесів міського управління та підвищення якості життя громадян CitySDK [60]. Окремі проекти орієнтовані на конкретні галузі розвитку сучасних

міст, наприклад, енергетика, екологія, транспорт, туризм або потреби цифрових застосунків, наприклад, формування прогнозів у певній галузі, і на основі інтеграції конкретних наборів даних [60, 90].

На даний час немає сформовано універсальної інформаційно-технологічної платформи, яка б враховувала всі ключові етапи життєвого циклу даних для створення цифрових послуг «розумних міст». Проте ряд інформаційно-технологічних платформ має інструменти для інтеграції та консолідації даних для конкретних задач, наприклад, інтеграція наборів та колекцій даних, формування словників та онтологій тощо.

При цьому в ІТП реалізуються ключові етапи життєвого циклу даних, оскільки *«життєвий цикл даних описує потік інформації як серію кроків, необхідних для створення нових значення на основі аналізу даних»* [92]. Запропонована в [93] інформаційно-технологічна платформа охоплює ключові етапи життєвого циклу даних (див. рис. 2.1).

1 Етап – «Ідентифікація джерел даних» починається з визначення конкретної задачі опрцювання даних. Потім проводиться розширений пошук відкритих джерел місцевих, регіональних, національних та міжнародних даних. При цьому, відбувається оцінювання, приналежності джерел даних до окремого домену «розумного міста» [93]. ІТП дає змогу повторювати процес ідентифікації джерел даних для розширення спектру цифрових послуг «розумного міста».

2 Етап – «Інтеграція даних» присвячений процесам інтеграції та інтерпретації вибраних наборів та колекцій даних відносно моделі знань «розумного міста» та онтології семантичної сенсорної мережі (SSN). Модель знань «розумного міста» зосереджена на формуванні словника для підвищення ефективності програмно-алгоритмічних засобів цифрових послуг «розумних міст». А SSN – це доменно-орієнтована онтологія, розроблена W3C Semantic Sensor Networks Incubator Group для опису давачів та результатів спостережень [94]. Інтеграція та візуалізація наборів та колекцій даних «розумних міст» здійснюється за допомогою різномісцевих інформаційно-технологічних

інструментів з врахуванням типів та структур обраних джерел даних. На цьому етапі дані давачів обробляються семантичною службою спостереження давачів. При цьому в режимі реального часу відбуваються процедури фільтрації та трансформації за допомогою ETL-інструментів перетворення та завантаження. Дані статичних гетерогенних джерел інтегруються за допомогою системної інтеграції даних. Цей інструмент дає змогу агрегувати інформацію, що надходить як із структурованих так і з напівструктурованих джерел даних «розумних міст» напівавтоматичним способом, щоб виявити приховані знання. Сформоване інтегроване подання наборів та колекцій даних перетворюється на RDF-тріади. Сформовану базу знань у форматі RDF можна розширити або оновити за допомогою спеціалізованих інструментів із застосуванням семантичних обмежень. Інтеграція даних з різнотипових державних та приватних джерел «розумних міст» обов'язково потребує врахування мінливості, складності наборів даних та колекцій, різноманітності, геопросторових аспектів, особливостей системної інтеграції та обсягів джерел даних. Процеси відбору, агрегування та консолідації даних повинні враховувати особливості «великих даних» [95]. Це завдання можна частково вирішити, використовуючи специфічні програмно-алгоритмічні процедури звірки нових наборів та колекцій даних для забезпечення сумісності з раніше зібраними. Швидкість накопичення та опрацювання нових даних безпосередньо пов'язана з частотою їх оновлення. Це дає можливість здійснити поділ даних на статичні та динамічні.

Етап 3 – «Публікація наборів «відкритих даних»». На цьому етапі відбувається перетворення накопичених інформаційних наборів та колекцій у доступні для пошуку в мережі Інтернет формати. Власники наборів та колекцій даних можуть вибрати або відфільтрувати частину приналежної їм RDF-бази знань та опублікувати у вигляді «відкритих даних» або множини наборів пов'язаних «відкритих даних». Зокрема, метою цього етапу є надання користувачам ІТІІ змоги публікувати один або декілька наборів даних відповідно до запропонованої Бернерс-Лі [96] схеми розгортання пов'язаних наборів

«відкритих даних». При створенні набору «відкритих даних» відбувається пов'язування із зовнішніми джерелами.

Етап 4 – «Створення застосунків, керованих на основі інтегрованих даних» використовує інтегровані вхідні інформаційні набори та колекції і забезпечує програмно-алгоритмічні засоби, інтерфейси та інформаційно-технологічні інструменти для аналізу, статистичного оцінювання, географічних запитів, дослідження та навігації джерелами пов'язаних наборів «відкритих даних». Ці застосунки базуються на основі запитів до онтології давачів та онтології «розумного міста» [97] та пропонують інформаційно-технологічні інструменти та послуги обширним колам користувачів, зокрема, громадянам, співробітникам компаній, що надають «розумні» міські послуги, працівникам державних адміністрацій, персоналу мобільних операторів тощо. Наприклад, пошук «розумних» послуг довкола певної GPS-локації, аналітичні послуги виявлення та прогнозування критичних умов або причинно-наслідкових зв'язків, рекомендаційні «розумні» служби на основі аналізу статистичних даних, «розумні» системи підтримки прийняття рішень (СППР), інформаційні панелі для аналізу ключових показників ефективності (KPI) процесів тощо. Програмно-алгоритмічні інструменти «розумних» послуг та сервісів можуть взаємодіяти з ІТП, запитуючи або надаючи дані за допомогою API «розумного міста» [89].

Описана в [86] ІТП «розумного міста» призначена для інтеграції, консолідації та аналітичного опрацювання даних. При цьому муніципальні, державні та приватні джерела даних використовуються для покращення процесів міського урядування та управління, підвищення якості життя громадян загалом. Вона являє собою набір з програмно-алгоритмічних інструментів з відкритим кодом, орієнтованих на:

- інтеграцію джерел даних;
- публікацію «відкритих» наборів та колекцій даних «розумних міст»;
- системне оновлення інформації щодо джерел даних;
- служби спостереження давачів;

- інформаційні панелі.

Сучасний концепт «розумного міста» базується на збиранні наборів та колекцій даних щодо міської інфраструктури: водопостачання, енергетики, комунікаційних мереж, транспортних систем тощо; міських «розумних» послуг та сервісів: адміністративних, безпекових, комунальних, культурних, майнових, освітніх, спортивних; процесів використання та обслуговування будівель; різнотипових даних щодо погодних умов, якісних характеристик повітря, транспортних заторів, аварійних ситуацій, безпеки громадян, економічної діяльності та соціальних аспектів. Важливі для функціонування «розумних міст» набори та колекції даних доступні з соціокомунікаційних джерел (див. рис. 2.2).



Рис. 2.2. Концептуальна модель структури даних «розумного міста»

Процеси управління даними «розумного міста» потребують розроблення комплексної ІТП, яка може забезпечити виконання обширного переліку завдань для збирання, зберігання, аналітичного опрацювання та візуалізації даних «розумних міст», а також взаємодію з програмно-алгоритмічними комплексами та інформаційно-технологічними інструментами «розумних» послуг та сервісів (у таблиці 2.1).

Таблиця 2.1 – Етапи опрацювання даних ІТП «розумного міста»

Етап	Набори та колекції даних	Характеристика етапу
Збір даних	Дані про активи, а також дані від давачів, камер, соціальних мереж	Встановлення зв'язків з різними джерелами даних «розумних міст». Зосередження на безпеці, надійності, відновленні втрачених даних.
Зберігання даних	«Великі дані» (цифрові, зображення, відео)	Впровадження інструментів для зберігання та управління «великими даними». Зосереджено увагу на безпеці, сумісності та ефективності «великих даних».
Аналіз даних для управління гіперскладною системою	«Великі дані», «відкриті дані»	Впровадження інструментів для управління та обробки даних, аналізу даних, оптимізації, машинного навчання, інженерного аналізу, контролю, екологічної оцінки, управління містом, економічного та соціального аналізу; зосередження уваги на сумісності та ефективності.
Візуалізація даних	«Великі дані», «відкриті дані»	Використання 3D та динамічної візуалізації даних та інформації, застосування різних категорій даних, виявлення тенденцій та прихованої інформації. Інтеграція віртуальної та доповненої реальності.
Взаємодія «розумних» послуг та сервісів	API, інтерфейс користувача	Використання медіа для взаємодії із зацікавленими сторонами міста (SMS, електронна пошта, телефон, Інтернет, професійні мережі та соціокомунікаційні процеси).

На першому етапі в «розумному місті» проходить відбір даних з різних джерел, зокрема, щодо функціонування міської інфраструктури, процесів надання та споживання послуг «розумних міст», міського середовища, безпеки, економічної діяльності та соціокомунікаційних процесів. Процеси спостереження, збирання та передавання даних в міському середовищі ускладнюються через різноманітність наборів та колекцій даних та жорсткі вимоги щодо забезпечення конфіденційності. ІТП «розумного міста» повинна містити інформаційно-технологічні інструменти для захисту, перевірки достовірності та надійності, очищення та відновлення наборів та колекцій даних.

На другому етапі набори та колекції даних слід зберігати у міських сховищах та базах даних, які повинні надавати можливості оперативно та безпечно зберігати різноманітні та різнотипові цифрові дані, зображення, відео тощо. ІТП «розумного міста» повинна містити набори інформаційно-

технологічних інструментів для безпечного та ефективного зберігання та управління даними.

На етапі «Аналізу даних для управління гіперскладною системою» ІТП «розумного міста» повинна інтегрувати програмно-алгоритмічні засоби та інформаційно-технологічні інструменти для обробки, видобування, оцінювання та аналітичного опрацювання на основі методів машинного навчання, для супроводу процесів управління «розумними» міськими системами. Зазначені набори інформаційно-технологічних інструментів повинні мати функціональні можливості обміну даними між собою та з зовнішніми API «розумних» послуг та сервісів.

ІТП «розумного міста» повинна інтегрувати засоби моделювання на основі геоінформаційних систем (ГІС) [98], цивільне та містобудівельне інформаційне моделювання. Крім того, ІТП проектів класу «Розумного міста» повинні інтегрувати аналітичні інструменти для оперативного опрацювання «великих даних», оскільки їх ефективний аналіз дає додаткову корисну інформацію для цифрових послуг та сервісів «розумного міста».

Етап «Візуалізації даних» важливий для ефективного функціонування ІТП «розумного міста», оскільки спрямований на подання великих за обсягом та складних за структурою наборів та колекцій даних «розумних міст» у зручній, зрозумілій та сприйнятній формі.

ІТП «розумного міста» повинна містити потужні та зручні у використанні інструменти візуального подання даних, а їх компонування у часовому та геопросторовому вимірах, формування зрізів та перетинів різноманітних категорій даних, виявлення та візуального подання тенденцій видобування прихованої в них інформації тощо. Водночас доцільна інтеграція зміни наборів та колекцій даних, розроблених з використанням віртуальної та доповненої реальності інструментів, які зможуть забезпечити потужні візуалізаційні можливості [99].

На рівні «Взаємодії «розумних» послуг та сервісів» ІТП «розумного міста» повинна інтегрувати інформаційно-технологічні інструменти для міських жителів, представників муніципальної влади, співробітників міських установ та організацій з можливістю поширення інформації для різних соціальних груп та спільнот. При цьому ІТП «розумного міста» може використовувати обширний перелік комунікаційних інструментів, зокрема, електронну пошту, SMS-інформування, телефонні дзвінки, соціокомунікаційні медіа-ресурси.

2.2 Аналіз інформаційно-технологічних платформ «розумних міст»

ІТП «розумних міст» використовують інформаційні та комунікаційні технології (див. рис. 2.3). Набори та колекції даних «розумного міста» та інформаційно-технологічні інструменти для формування цифрових послуг та сервісів у гіперскладних системах сучасних міст (див. параграф 1.1 на рис. 1.4)..

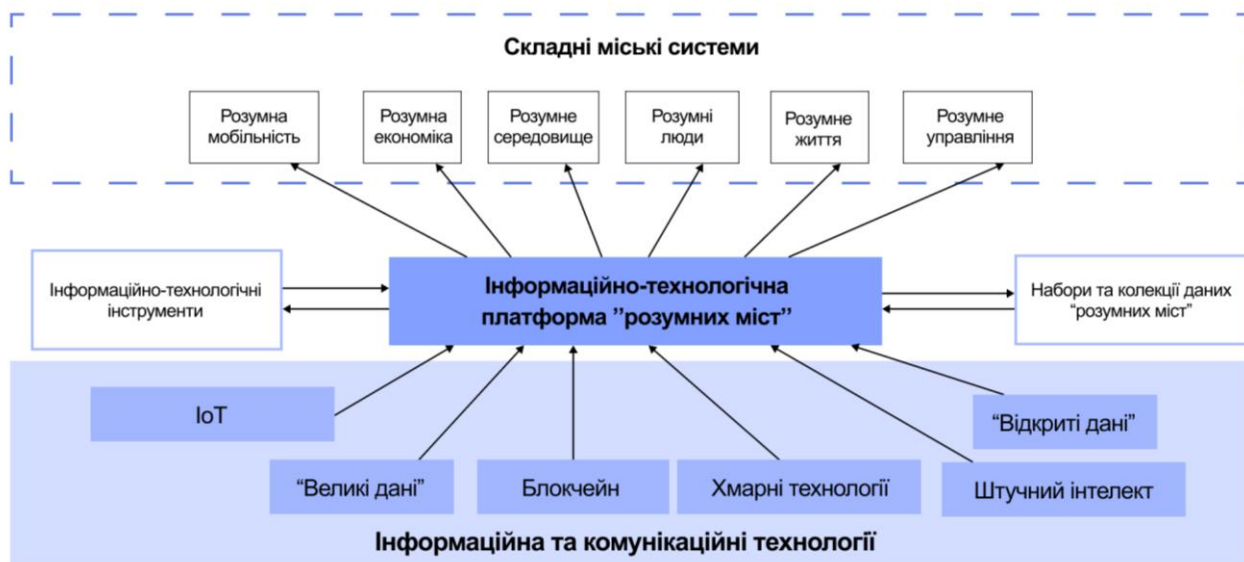


Рис. 2.3. Елементи структури «розумного міста»

На даний момент часу переважна більшість ІТП використовують хмарні технології для управління даними [100], послугами, сервісами та застосунками

для обширного списку проектів класу «Розумне місто» по всьому світу. Подамо перелік найпоширеніших ІТП у вигляді множини (2.1).

$$ITP = \{ITP_{AWS}, ITP_{IBM}, ITP_{MS}, ITP_{GL}, ITP_{CS}\}, \quad (2.1)$$

де ITP_{AWS} – Amazon Web Services [101];

ITP_{IBM} – IBM Watson [102];

ITP_{MS} – Microsoft Azure IoT Central [103];

ITP_{GL} – Google Cloud IoT Core [104];

ITP_{CS} – Cisco Kinetic for Cities [105].

Розглянемо детальніше особливості та характеристики цих ІТП.

2.2.1 Інформаційно-технологічна платформа Amazon Web Services

На даний момент часу AWS [101] є лідером на ринку хмарних технологій [106]. Ця ІТП для створення веб-сервісів «розумного міста» пропонує широкий спектр програмно-алгоритмічних інструментів для своєї взаємодії та виконання аналітичних обчислень зберігання наборів та колекцій даних. Всі AWS сервіси надають доступ засобами поширених інтернет-протоколів, водночас ряд API пошлюзових сервісів можуть бути налаштовані індивідуально. Найпопулярнішими сервісами є:

- EC2 (англ. Elastic Compute Cloud) – для створення та розгортання віртуальних машин;
- S3 (англ. Simple Storage Service) – для забезпечення перебігу процедур зберігання даних.

При формуванні інформаційно-технологічної інфраструктури «розумних міст» корисною послугою є AWS IoT [107], що дає можливість підключати пристрої Інтернету речей, збирати, передавати, зберігати та аналізувати їхні дані. Клієнти AWS можуть використовувати один з, розподілених по всьому світу, центрів обробки даних або за допомогою послуги AWS IoT Greengrass

здійснювати процедури обробки та первинного аналізу даних ближче до точок їх відбору. Структура ITP_{AWS} базується на основі обширної множини функціональних елементів, зокрема, модулі Amazon S3, Kinesis, Lambda призначені для опрацювання даних. Підсистема AWS IoT Device Management забезпечує супровід IoT-сервісів на рівні управління пристроями. Вона дає змогу організувати ієрархічну структуру IoT-пристроїв моніторити їх стан та реалізувати розподіл прав доступу на основі пріоритетів. Послуга AWS IoT Core дає користувачам ІТП можливість сформувати комунікаційний рівень AWS IoT. ITP_{AWS} активно використовується провідним виробниками промислового обладнання для розробки та впровадження застосунків в галузях «розумного» виробництва, «розумного» сільського господарства та «розумних» будинків. ITP_{AWS} набуває популярності завдяки експоненційному зростанню кількості IoT-пристроїв окремих виробників одного бренду [108].

2.2.2 Інформаційно-технологічна платформа IBM Watson

ITP_{IBM} [102] була започаткована як обчислювальна система для пошуку інформації та подання знань. На даний час ITP_{IBM} інтегрує готові для використання інформаційно-технологічні, програмно-алгоритмічні інструменти та засоби застосунків на основі ШІ. Водночас доступні функціональні набори для оптимізації. ITP_{IBM} надає обширний перелік хмарних сервісів з функціональними можливостями реєстрації підключення IoT-пристроїв, контролю процесів передавання, зберігання та візуалізації даних, моніторингу фінансових витрат при оплаті за використання хмарних сервісів. Підсистема IBM Cloud BLUEMIX, що базується на Cloud Foundry і IBM Maximo [109], забезпечує механізми автоматичного балансування та масштабування обчислювального навантаження при взаємодії хмарних послуг IaaS, PaaS та SaaS. Це дає можливість ITP_{IBM} забезпечувати ефективний супровід, розгортання та взаємодії IoT-сервісів. Вбудовані інформаційно-технологічні інструменти моделювання є характерною особливістю підсистеми Watson IoT Platform, що застосовується для створення та

супроводу віртуальних інформаційних сутностей. ITP_{IBM} використовує блокчейн для процесів обміну даними та надає API Watson при створенні, розгортанні та використанні «розумних» послуг та сервісів на базі IoT-пристроїв.

ITP_{IBM} активно застосовується у різних сферах міського життя, зокрема, в галузях «розумної» охорони здоров'я, «розумного» виробництва, «розумної» економіки, оцінки ризиків та прогнозування надзвичайних ситуацій, «розумного» сільського господарства та «розумного» містобудування тощо [108].

2.2.3 Інформаційно-технологічна платформа Microsoft Azure IoT Central

Розроблена корпорацією Microsoft, ITP_{MS} є ще одним із лідерів ринку та однією з найвідоміших на даний час хмарних інформаційно-технологічних платформ для системної інтеграції проектів класу «Розумне місто». Ця ІТП була започаткована у лютому 2010 року із назвою Windows Azure, але незабаром була перейменована на Microsoft Azure. ITP_{MS} можна використовувати для створення віртуальних серверів або розгортання «розумних» застосунків, оскільки вона містить програмно-алгоритмічні засоби на основі штучного інтелекту для здійснення високопродуктивних обчислень цифрового маркетингу та Інтернету речей [110].

ITP_{MS} надає користувачам функціональні можливості формування, впровадження та супроводу «розумних» послуг на основі Інтернету речей (див. рис. 2.4). Широкий спектр підсистем такого класу простягається від простих і зрозумілих програмно-алгоритмічних засобів для малого бізнесу до універсальних високорівневих методів та засобів, які потребують значних обчислювальних ресурсів [111]. Ключовими характеристиками ITP_{MS} є універсальність інформаційно-технологічних інструментів та безпека даних. Незважаючи на розробку корпорацією Microsoft ITP_{MS} сумісна з обширним переліком сторонніх програмно-алгоритмічних засобів та операційних систем (ОС).



Рис. 2.4. Структура інформаційних технологій програмно-алгоритмічних засобів послуг та сервісів ITP_{MS} [111]

Підсистема Azure IoT Central сформована на основі IT_{IoT} . Її програмно-алгоритмічні засоби, послуги та застосунки мають доступні та зручні користувацькі інтерфейси.

У ITP_{MS} доступні функціональні можливості для створення спеціалізованих інформаційних панелей, захисту даних та керування IoT-пристроями. На рис. 2.5 подано структуру ITP_{MS} [110].



Рис. 2.5. Структура ITP_{MS} [110]

ITP_{MS} сформована на основі інформаційно-технологічного підходу PaaS, але створені на її основі застосунки зазвичай керуються та розміщуються у сховищі Azure згідно парадигми SaaS. Завдяки цьому забезпечуються процедури централізованого розгортання «розумних» застосунків для цифрових послуг та сервісів на основі шаблонів (див. рис. 2.4).

2.2.4 Інформаційно-технологічна платформа Google Cloud IoT Core

Google Cloud (ITP_{GL}) – це обширний набір хмарних обчислювальних послуг та сервісів від компанії Google для високопродуктивних обчислень, зберігання та аналітичного опрацювання даних з вбудованими функціями машинного навчання [112]. Для забезпечення функціонального супроводу Інтернету речей в ITP_{MS} є так зване ядро Google Cloud IoT Core [113], яке використовується для підключення та управління різнотиповими IoT-пристроями та системами. Програмно-алгоритмічні засоби та компоненти ITP_{GL} , що забезпечують «розумне», універсальне і масштабоване управління IoT-пристроями та системами:

- Підсистема Cloud Dataflow, що забезпечує функції потокового та пакетного аналітичного опрацювання даних на рівні IoT-процесів.
- Компонента Cloud Pub/Sub управляє комунікаційними з'єднаннями та процесами передачі даних.
- Підсистема Big Query дає змогу створювати масштабовані сховища даних та оперативно опрацьовувати запити для консолідації та систематизації отриманих даних.
- Компонента Cloud ML Engine призначена для формування наборів та колекцій навчання, розгортання та застосування моделей машинного навчання на основі наборів та колекцій даних IoT-пристроїв.

Останні два пункти забезпечують сервісний рівень супроводу IoT-пристроїв та систем. На даний момент часу ITP_{GL} має широкий спектр застосування: для прогнозування подій «розумного» спостереження в режимі реального часу та «розумного» супроводу логістичних процесів. ITP_{GL} активно використовується для створення, розгортання та експлуатації застосунків «розумних міст», зокрема в галузях «розумної енергетики», «розумного паркування» та «розумного транспорту» [108].

2.2.5 Інформаційно-технологічна платформа Cisco Kinetic for Cities

ITP_{CS} надає функціональні можливості для збору даних з різнотипових IoT-пристроїв і датчиків, відповідно до міських потреб, комплексного аналізу даних різних міських доменів, програмно-алгоритмічні API та засоби для керування ключами безпеки [114]. Основні характеристики ITP_{CS} :

- наскрізні процедури обміну даними від IoT-датчиків, периферійних пристроїв та базових мереж до програмних комплексів, інформаційних панелей та аналітичних засобів;
- інноваційні сенсорні технології розподілу пристроїв між провайдерами та доменами «розумних міст»;

- програмно-алгоритмічні засоби для публікації, консолідації та опрацювання «відкритих даних»;
- API для взаємодії з зовнішніми інформаційно-технологічними інструментами;
- програмно-алгоритмічні засоби для забезпечення конфіденційності даних;
- безпековий функціонал для керування правами доступу та привілеями на основі ролей;
- комплексна підтримка людей і людино-центроване формування процесів та розгортання інформаційних технологій;
- можливість ефективного масштабування обчислювальної інфраструктури та розширення функціональних наборів у процесі цифрової трансформації «розумних міст» [114].

ITP_{CS} інтегрує набори API для міських доменів «розумних» послуг: зовнішнє освітлення, паркування, міська мобільність, керування привеликому скупченні громадян, управління транспортним трафіком, охорона навколишнього середовища, безпека, управління процесами утилізації відходів [115].

На рис. 2.6 подано структура, розробленої компанією Cisco, *ITP_{CS}* для цифровізації «розумних міст».



Рис. 2.6. Узагальнена структура ITPCs

Модель розгортання хмарної ITPCs використовується для збирання даних від IoT-давачів за допомогою дротових та бездротових безпечних мережевих підключень. При цьому використовуються хмарні технології для віртуалізації та адаптивності ресурсів та послуг, зберігання та аналітичного опрацювання даних, підвищення швидкості процесів обміну даними та зниження фінансових витрат при оплаті за спожиті обчислювальні ресурси чи послуги. Структуру ITPCs подано на рис. 2.7.

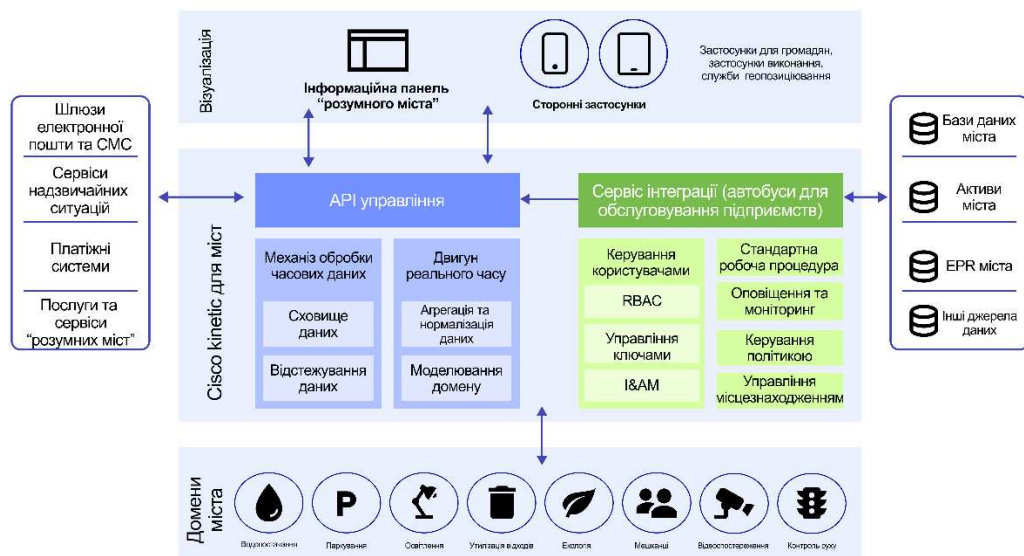


Рис. 2.7. Структура потоків ITPCs

ITP_{CS} інтегрує функціональні можливості взаємодії з IoT-пристроями, доступу до загальноміських наборів та колекцій даних, розгортання програмно-алгоритмічних застосунків для «розумних» послуг та сервісів у різних міських доменах. Функціональні набори ITP_{CS} спеціалізовані для безпечного передавання, комбінування, консолідації та використання даних з багатьох джерел, незалежно від окремих комунікаційних протоколів геоінформаційних систем [115]. Узагальнену структуру мережевої взаємодії подано на рис. 2.8.

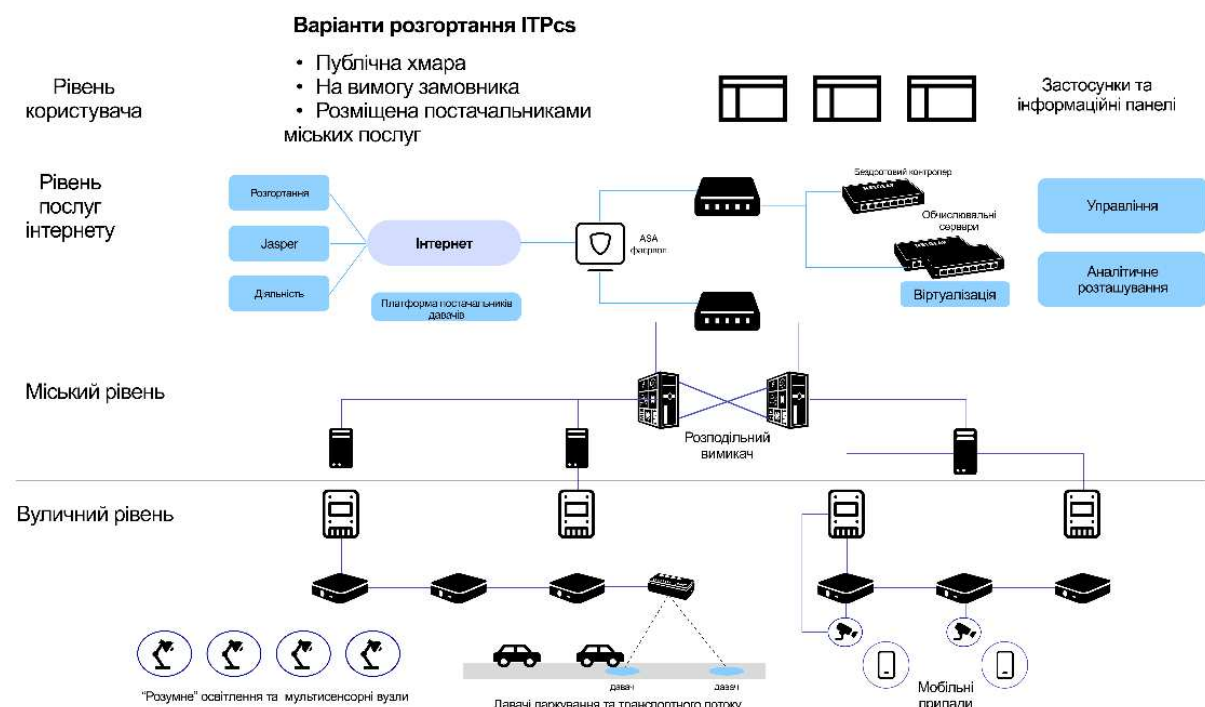


Рис. 2.8. Узагальнена структура мережевої взаємодії ITP_{CS}

На базі ITP_{CS} сформовано множини «розумних» послуг прототипів розумних міст Пусан та Сонгдо (Південна Корея).

2.3 Аналіз моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста»

Згідно прогнозів фахівців очікується, що капіталізація ринку інновацій в галузі «розумних міст», яка в 2019 році становила приблизно чотириста мільярдів

доларів США, досягне до 2030 року майже приблизно тисячу чотириста мільярдів доларів США [116].

«Інформаційно-технологічна архітектура «розумного міста» визначається як організація та взаємозв'язок усіх потенційних підсистем та елементів, які надають усі очікувані послуги «розумного міста» його мешканцям» [117].

Автори [118] запропонували централізовану інформаційно-технологічну архітектуру «розумного міста» у виді концептуальної піраміди на основі «розумної інфраструктури», «розумних» інформаційних ресурсів, «розумних» послуг та «розумних» інтерфейсів.

Провідні науковці та виробничі компанії пропонують обширний перелік моделей інформаційно-технологічних архітектур [119, 120] для створення «розумних міст».

Автори [121] пропонують інформаційно-технологічну трьохрівневу архітектуру «розумних міст», що інтегрує інструментальний рівень, рівень зв'язків та рівень «розумних». Вимірювальні та сенсорні IoT-пристрої дають змогу збирати реальні дані за допомогою інтегрованих в міське середовище давачів. Таким способом можна вимірювати показники якості повітря та води, збирати покази лічильників витрат ресурсів або визначати показники енергоспоживання «розумних» будівель та споруд. Рівень зв'язків збирає та консолідує, зібрані на інструментальному рівні дані, водночас цей рівень здійснює процеси передавання інформації між різнотиповими програмно-алгоритмічними засобами. На «розумному» рівні відбувається аналітичне опрацювання наборів та колекцій даних «розумних міст» для задоволення актуальних міських потреб.

Заснована на сервісно-орієнтованій архітектурі (SOA) модель MA_{SOA}^{IT} активно використовується існуючими на даний час програмно-алгоритмічними комплексами та системами управління «розумних міст» для передавання, перетворення та аналітичного опрацювання даних. Група авторів [122] запропонувала модель інформаційно-технологічної архітектури «розумного

міста», засновану на базі інноваційної парадигми іменованих даних мереж (NDN). Зазначена інформаційно-технологічна архітектура «розумних міст» функціонує на двох рівнях: сервісному та технологічному. Вони взаємодіють через NDN інтерфейс. При цьому для надання цифрових послуг запропоновано три послідовні етапи: ідентифікації потреб, ініціалізації та безпеки, використання «розумної» послуги.

Дослідники [123] висунули припущення, що сучасні «розумні» міста базуються на шести ключових системах, що інтегрують різнотипові елементи міської інфраструктури: вода, економіка, жителі, зв'язок, енергетика та транспорт. Водночас увагу акцентовано на соціокомунікаційних системах, громадській безпеці, охороні здоров'я та освіті. А економічні системи віднесено до міського середовища, з яким взаємодіють підприємства, установи та організації для ефективного впровадження та регулювання міської політики. На думку авторів [123] зазначені шість систем разом формують гіперскладну систему «розумного міста».

У працях [124, 125] автори досліджують інформаційно-технологічну архітектуру «розумного міста» на базі блокчейн та IoT, з використанням мікросервісів.

В [126] запропоновано узагальнену багаторівневу інформаційно-технологічну архітектуру для опису обширної множини атрибутів «розумного міста». Вона містить:

- інформаційний рівень узагальнює процеси інформації та збирання в «розумному місті»;
- інфраструктурний рівень інтегрує повсюдні міські мережі, інформаційні та комунікаційні системи, програмно-алгоритмічні засоби, служби розгортання та масштабування інформаційно-технологічних інструментів;
- сервісний рівень містить множину цифрових послуг «розумного міста»;

- рівень користувачів узагальнено подає інтереси споживачів та провайдерів цифрових послуг «розумного міста».

Автор [123] запропонував модель інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста», що описує три ключові компоненти «розумного міста». На його думку із якими гіперскладна міська система спрямована на інтеграцію економічних, екологічних та соціальних складових. Адже саме вони сприяють розгортанню цифрових послуг на інформаційному рівні «розумних міст». Економічна складова «розумних міст» інтегрує громадські адміністративні та економічні суб'єкти для впровадження моделей міського розвитку та управління на основі інформаційних та комунікаційних технологій, зокрема, «відкритих даних», «великих даних», повсюдних мереж хмарних технологій, безпекових технологій та аналітичних засобів тощо. Екологічна складова «розумних міст» охоплює природні ресурси та для управління процесами:

- постачання та використання води, повітря та енергоносіїв;
- збирання, транспортування та утилізації відходів;
- транспортування вантажів та перевезення громадян;
- озеленення будівель, зон та територій;
- реагування та регулювання кліматичних змін тощо.

До соціальної складової «розумних міст» належать міські жителі, соціальні групи та громади. Вона узагальнює процеси покращення життя громад, демократичні ініціативи, соціальні інновації, залучення громадян до міського управління тощо.

На основі проведеного аналізу виділимо множину моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» (2.2):

$$MA^{IT} = \{MA_{DO}^{IT}, MA_{IER}^{IT}, MA_{MLA}^{IT}, MA_{OPD}^{IT}, MA_{SOA}^{IT}\}, \quad (2.2)$$

де MA_{DO}^{IT} – доменно-орієнтована модель;

MA_{IER}^{IT} – ієрархічна модель «розумного міста», що структурує компоненти у формі ієрархії від базової інфраструктури до аналітичних і управлінських систем;

MA_{MLA}^{IT} – багатошарова модель «розумного міста», що охоплює фізичний шар, шар даних, шар послуг та шар цифрових застосунків;

MA_{OPD}^{IT} – модель «відкритих даних», що зосереджена на забезпеченні відкритого доступу до даних та забезпеченні прозорості процесів функціонування «розумних міст» та впровадження інновацій;

MA_{SOA}^{IT} – модель на базі сервіс-орієнтованої архітектури.

Для характеристик множини (2.2) використовуємо множину критеріїв (2.3):

$$CRI^{MA} = \{CRI_{SC}^{MA}, CRI_{FL}^{MA}, CRI_{DLC}^{MA}\}, \quad (2.3)$$

де CRI_{SC}^{MA} – показник масштабованості, характеризує здатність інформаційно-технологічної архітектури ефективно опрацьовувати зростаючі обсяги даних та обчислювальне навантаження, адже в розумних міських системах вони можуть динамічно змінюватися, потребуючи оперативного додавання або вивільнення обчислювальних ресурсів і інфраструктури;

CRI_{FL}^{MA} – показник гнучкості, характеризує спроможність інформаційно-технологічної архітектури адаптуватися до швидкоплинних змін, умов експлуатації програмно-алгоритмічних комплексів експлуатації та здатність інтегрувати інноваційні підходи, впроваджувати стандарти і оперативно адаптувати розумні послуги;

CRI_{DLC}^{MA} – показник, що характеризує повноту супроводу всіх етапів інформаційно-технологічною архітектурою життєвого циклу даних: збір, зберігання, опрацювання, аналіз, використання, архівацію та їх утилізацію; для цього інформаційно-технологічна архітектура повинна для кожного з цих етапів забезпечувати високоефективні та безпечні програмно-алгоритмічні інструменти.

MA_{IER}^{IT} інформаційно-технологічної архітектури дає змогу оперативно взаємодіяти з розподіленими сховищами даних та обробляти великі за обсягом набори та колекції для супроводу процесів прийняття рішень. При цьому

забезпечується зменшення мережевих затримок та надмірність даних для доповнення сервіс-орієнтованої архітектури та покращення конфіденційності.

Обчислювальна інфраструктура формує інформаційно-технологічний фундамент – основу «розумного міста», на якому розгортаються програмно-алгоритмічні компоненти. Вона об'єднує високошвидкісні інтегровані повсюдні міські мережі, високопродуктивні центри обробки даних, в міське середовище «розумні» IoT-пристрої, давачі, приводи та актуатори тощо [127].

Системи «розумного» урядування сприяють розвитку стратегічних зв'язків між різнотиповими муніципальними підрозділами. На цьому рівні MA_{IER}^{IT} формуються системні політики та правила для покращення взаємодії установ та організацій, що пропонують громадянам цифрові послуги «розумного міста». Відповідно до міської обчислювальної системної політики, різні атипові цифрові послуги будуть пропонуватися громадянам максимально ефективно та повсюдно.

Здебільшого підсистеми міського управління та урядування функціонують незалежно та самостійно, обмінюючись обмеженими за обсягом наборами інформації між собою. Тому обчислювальні ресурси та інфраструктура міських департаментів зосереджені лише на процесах їхнього функціонування. Цей підхід суттєво утруднює та затримує процеси впровадження та інтеграції інноваційних цифрових послуг «розумних міст». Групи громадян стикаються з численними труднощами, коли потрібно одночасно отримати доступ до інформації з декількох міських департаментів. У випадку катастрофи чи надзвичайних подій, зростає час взаємодії та координації міських підрозділів, планування процесів використання ресурсів на основі даних у режимі реального часу взагалі неможливе.

MA_{IER}^{IT} зосереджена на процесах обміну інформацією між структурними підрозділами «розумних міст». Водночас послуги з передавання наборів та колекцій обширним групам зацікавлених користувачів відбувається на основі MA_{DO}^{IT} . Мешканці «розумних міст» потребують комплексного підходу до формування послуг на основі даних з широкого кола міських доменів у режимі реального часу для пришвидшення процесів та підвищення ефективності міських

служб загалом. Завдяки процесам обміну інформацією, різнотипові міські домени отримують можливість прогнозувати та виявляти задачі для оперативного реагування. У «розумних містах» реакція на події та інформаційні потоки повинна бути майже миттєвою. Спостереження міських процесів та наявність даних у режимі реального часу підвищує ефективність планування ресурсів та допомагає оптимізувати процеси їх використання на рівні організацій та на загальноміському рівні. У «розумних містах» загальноміські процеси активно використовують дані з обширного кола спеціалізованих доменів. Завдяки цьому може відбуватися постійне прогнозування тенденцій та подій в міському середовищі та активне реагування на них [127].

MA_{IER}^{IT} управління даними, яка полегшує виконання процедур розподіленого управління даними на локальному рівні, що підвищує ефективність, доступність та масштабованість цифрових послуг «розумних міст». MA_{IER}^{IT} дає змогу ефективно обробляти «великі дані» з неоднорідних джерел, що продукуються в міському середовищі.

MA_{OD}^{IT} «розумного міста» орієнтована на дослідників та фахівців в галузі розробки інформаційно-технологічних інструментів та застосунків для формування цифрових послуг «розумних міст».

На рис. 2.9 подано MA_{DO}^{IT} інформаційно-технологічної архітектури для комплексного управління даними в «розумних містах». MA_{DO}^{IT} сфокусована на процесах управління «розумним містом» як гіперскладною системою на основі центральної системи управління даними (ЦСУД), до якої інтегровано окремі підсистеми. Усі підсистеми передають набори та колекції даних до ЦСУД, яка, використовується для інтеграції даних та надання міждомених цифрових послуг. ЦСУД використовуються для супроводу процесів прийняття рішень у режимі реального часу. У кожній локації використовується власний обчислювальний центр хмарного опрацювання даних зі спеціалізованим набором веб-інтерфейсів та API. Наприклад, системи водопостачання та водовідведення мають численні сегменти в місті, кожне з яких передає зібрані дані на рівні локації.

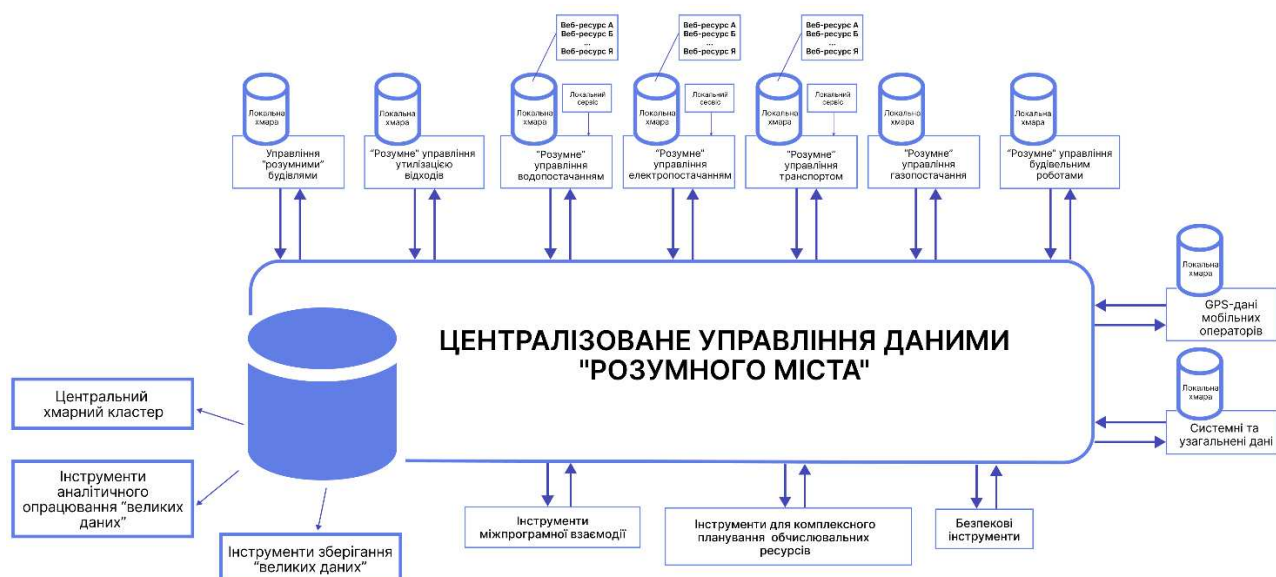


Рис. 2.9. MA_{DO}^{IT} «розумного міста»

Кожна підсистема ЦСУД збирає дані з різних міських локацій (див. рис. 2.10).

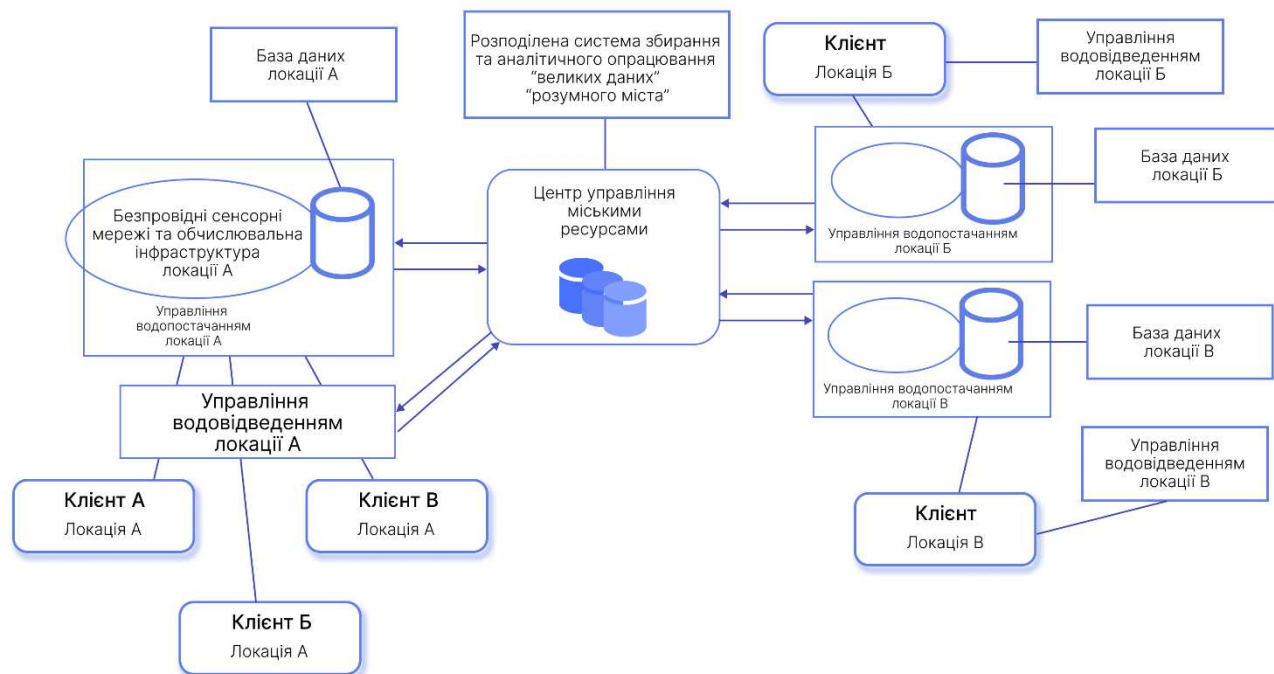


Рис. 2.10. Територіально-розподілена MA_{DO}^{IT} «розумного міста»

Аналогічно організовані міські інформаційні системи управління процесами постачання та споживанням електроенергії, тепла, газу тощо. Це дає змогу

інтегрувати державні, муніципальні, комунальні та приватні системи обслуговування, надання різнотипових послуг та сервісів «розумних міст».

Здебільшого міста умовно поділяються на територіально-адміністративні підрозділи, кожен з яких має власні служби. MA_{DO}^{IT} добре підходить для сценарію, коли кожна муніципальна служба або комунальне підприємство має територіально розподілену структуру. Інформаційно-технологічні проекти класу «Розумне місто» впроваджується поступово з врахуванням соціальних та технічних особливостей окремих міст. Поділяючи концепції «розумного міста» на рівні локацій архітектура MA_{DO}^{IT} сприяє сталому розвитку та підвищенню якості обслуговування громадян [127].

MA_{DO}^{IT} управління даними «розумного міста» містить міждоменні інформаційно-технологічні інструменти та служби, які дають змогу обробляти запити декількох доменів у режимі реального часу. При цьому різні домени можуть координувати співпрацю та обмінюватися даними через онлайн-сервіси. Планування процесів використання обчислювальних ресурсів у ЦСУД «розумного міста» та в локальних центрах обробки даних підвищує ефективність процесів аналітичного опрацювання в режимі реального часу.

Кожен локальний інформаційний ресурс комунальних чи муніципальних служб має власну систему IoT давачів, мережеву інфраструктуру, локальний центр аналітичного опрацювання даних та інформаційну систему для надання цифрових послуг та сервісів. Локальний інформаційний ресурс – це обчислювальне середовище, яке забезпечує процеси управління IoT-пристроями, формування мереж, зберігання та управління да «розумного міста». Вони взаємодіють між собою через API та сервіси обміну даними, щоб системно інтегрувати цифрові послуги у всіх локаціях «розумного міста».

На рис. 2.11 подано територіально-розподілену модель управління ресурсами «розумних міст» на основі даних. Кожна територіальна формація «розумного міста» має окреме хмарне сховище для зберігання даних IoT-давачів та пристроїв.

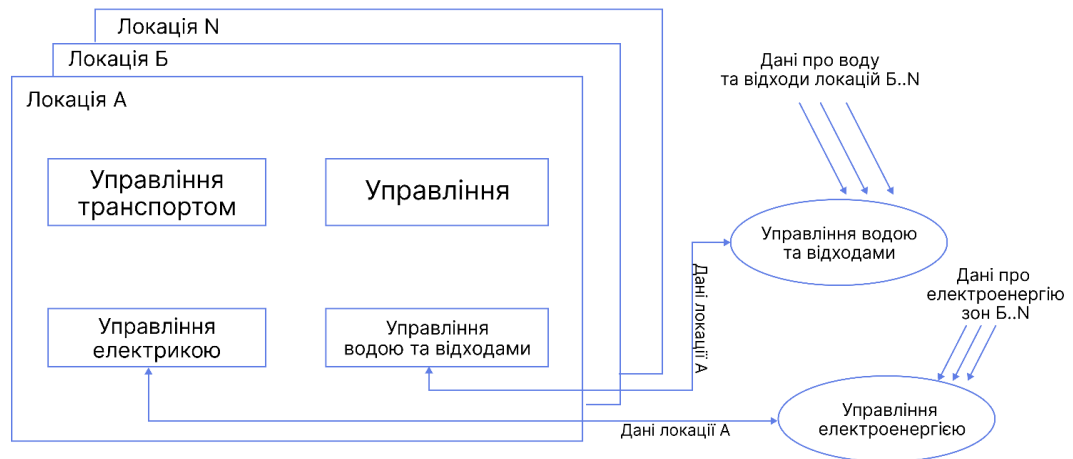


Рис. 2.11. Територіально-розподілена модель управління процесами постачання та споживання ресурсів

Користувачі локації отримують цифрові послуги, що сформовані обчислювальними засобами центру аналітичного опрацювання даних. Для структурованих даних доцільно використовувати реляційні БД. Для підвищення швидкості обробки користувацьких запитів потрібно здійснювати оптимізацію запитів. Усі територіально-розподілені центри аналітичного опрацювання даних (локація А, локація В, локація С, ..., локація N) взаємодіють з основним центром аналітичного опрацювання даних через надійні високошвидкісні мережеві з'єднання API. Зібрані з усіх локальних центрів аналітичного опрацювання дані агрегуються та зберігаються у розподілених сховищах даних, що організовані на базі Google Spanner, Nuodb, ClustrixDB тощо. Набори та колекції «великих даних» продукуються інтегрованими в міське середовище давачами, агрегуються та консоліднуються локальним та загальним центром аналітичного опрацювання даних.

MA_{SOA}^{IT} використовується для інтеграції усіх компонент «розумного міста» – це, по суті, широкомасштабна, складна, децентралізована, розподілена обчислювальна система. MA_{SOA}^{IT} в «розумному місті» використовує відкриті стандарти обміну даними та сервіси «розумного міста»: XML, WSDL, SOAP,

UDDI тощо (див. рис. 2.12). MA_{SOA}^{IT} відповідає неоднорідному обчислювальному та інформаційно-технологічному середовищу «розумних міст».

MA_{SOA}^{IT} «розумного міста» не тільки забезпечує [127]:

- сумісність між різнотиповими інформаційно-технологічними платформами;
- модульний дизайн програмно-алгоритмічних засобів;
- системне використання програмного забезпечення;
- високопродуктивну взаємодію та інтеграцію застосунків.

Послуги, що пропонуються однією комунальною службою, наприклад, системами використання та водовідведення можуть бути використані службами надзвичайних ситуацій, застосовують інші програмно-алгоритмічні засоби та інформаційно-технологічні інструменти та платформи.

Інформаційно-технологічна архітектура «розумного міста» характеризується неоднорідністю IoT-пристроїв, мереж, програмно-алгоритмічних засобів та застосунків, інформаційно-технологічних інструментів та платформ тощо.



Рис. 2.12. MA_{SOA}^{IT} «розумного міста»

Для MA_{SOA}^{IT} розгортання служб даних у вигляді онлайн-сервісів підвищує доступність інформації для широкого кола споживачів [128]. Масштабованість та доступність повинні бути невід’ємною характеристикою інформаційно-технологічної архітектури гіперскладної системи «Розумне місто», у якій можуть динамічно змінюватися вимоги до обробки даних, управління та аналітики. MA_{SOA}^{IT} підтримує як горизонтальну, так і вертикальну масштабованість. Горизонтальна масштабованість дає змогу безперешкодно впровадити більше послуг. Водночас впровадження кожної послуги на основі MA_{SOA}^{IT} забезпечує вертикальну масштабованість, підвищуючи якість обслуговування (QoS) загалом. Безпека та конфіденційність послуг та даних є невід’ємними задачами сьогодення, тому MA_{SOA}^{IT} рекомендує публікувати дані за допомогою онлайн-сервісів. Такий підхід використовує безпекові дані на рівні шифрування повідомлень [129]. Водночас кожна служба MA_{SOA}^{IT} має власний локальний центр опрацювання даних.

При використанні MA_{SOA}^{IT} програмно-алгоритмічні засоби та інформаційно-технологічні інструменти «розумного міста» обмінюються даними в режимі реального часу, але сама інформаційна система не потребує жорсткого централізованого контролю. Атаки на локальні центри опрацювання даних не можуть зруйнувати ЦСУД «розумного міста» завдяки надмірності реплікації даних та високій ефективності, що властиві хмарним системам. Водночас анонімність та конфіденційність даних забезпечується онлайн-сервісами за згодою користувача [130].

Ефективність програмно-алгоритмічних засобів та інформаційно-технологічних інструментів має вирішальне значення для підвищення ефективності та адаптивності, оперативності різнотипових систем «розумних міст». Наприклад, підвищення оперативності екстрених служб підвищує показники стійкості «розумних міст» в кризових та надзвичайних ситуаціях.

На даний час IT_{BD} використовуються практично в кожному міському центрі аналітичного опрацювання даних. MA_{SOA}^{IT} впроваджує інноваційну концепцію «відкритих даних», в якій набори та колекції даних «розумного міста» надаються

розробникам програмного забезпечення, постачальникам, та споживачам розумних послуг через API (див. рис. 2.13).



Рис. 2.13. Концептуальна структура потоків даних MA_{SOA}^{IT} «розумного міста»

Розробники програмно-алгоритмічних комплексів та застосунків мають можливість розробляти нові інформаційно-технологічні інструменти для аналітичного опрацювання даних та впровадження інноваційних, цифрових послуг «розумних міст» для широкого кола громадян. Наприклад, міські системи управління дорожнім рухом збирають великі за обсягом набори та колекції даних про пересування транспортних засобів та дорожню ситуацію загалом. При цьому для громадян будуть корисними застосунки, які зможуть прогнозувати пікове транспортне навантаження та затори, або прогнозувати перекриття доріг внаслідок аварійних ситуацій тощо.

ІТ-інфраструктура потребує формування обширної множини «розумних» давачів на базі IoT-пристроїв та формування розлогої повсюдної інфраструктури. Обрана MA^{IT} дає змогу реалізувати в окремих локаціях «розумні» послуги, що не потребують одночасного розгортання всієї обчислювальної та комунікаційної інфраструктури. Це не знижує вимоги щодо якості апаратних та програмно-

алгоритмічних засобів, але сприяє стабільному поетапному впровадженню обраної моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста», що описується кількістю та мірою впроваджених характеристик та показників загальної моделі «розумного міста».

Проведений аналіз моделей «розумного міста» дає можливість сформулювати метод вибору інформаційно-технологічної архітектури для рекомендації впровадження в українських містах.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Проведений аналіз інформаційно-технологічних платформ, що використовуються для створення «розумних міст», дав змогу зробити висновок, що управління наборами та колекціями даних щодо міських систем вимагає розробки комплексної інформаційно-технологічної платформи гіперскладної системи «Розумне місто», яка зможе забезпечити виконання різнотипових завдань управління на основі життєвого циклу даних.

2. На основі проведеного аналізу виділено множину характеристик, що дало змогу сформулювати задачу вибору серед п'яти інформаційно-технологічних платформ «розумних міст».

3. Проаналізовано розлогий список поширених у виробничих та дослідницьких колах моделей інформаційно-технологічної архітектури «розумних міст», що дало змогу сформулювати перелік ключових характеристик для постановки задачі їх вибору.

РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ПОБУДОВИ ГІПЕРСКЛАДНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»

3.1 Метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста»

Для формування інформаційно-технологічних інструментів цифрових послуг «розумних міст» необхідно здійснити вибір моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» з множини моделей MA^{IT} .

Вибір моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» проводимо серед поданих в параграфі 2.3 моделей (2.2) та критеріїв (2.3).

Отже, є такі 5 моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» для прийняття рішення:

1. $A_1 - MA_{DO}^{IT}$ – доменно-орієнтована;
2. $A_2 - MA_{IER}^{IT}$ – ієрархічна;
3. $A_3 - MA_{MLA}^{IT}$ – багат шарова;
4. $A_4 - MA_{OPD}^{IT}$ – «відкритих даних»;
5. $A_5 - MA_{SOA}^{IT}$ – сервіс-орієнтована.

Критерії:

1. $B_1 - CRI_{SC}^{MA}$ – масштабованість;
2. $B_2 - CRI_{FL}^{MA}$ – гнучкість;
3. $B_3 - CRI_{DLC}^{MA}$ – повнота забезпечення життєвого циклу даних.

Для кожної з яких характерним є розподіл умовних ймовірностей $P(B_j|A_i)$ появи критеріїв B_j ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$), де n – кількість моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста», m – кількість критеріїв.

Ймовірності використання моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» $P(A_i)$ називають апіорними, оскільки вони характеризують

міру можливості використання моделі A_i до появи критерію B_j . Поява критерію B_j приводить до зміни міри можливості використання моделі A_i , тому, ймовірності $P(A_i|B_j)$ називають апостеріорними.

При вирішенні задачі вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» задано:

- розподіли умовних ймовірностей $P(B_j|A_i)$ критеріїв для кожної моделі;
- апіорні ймовірності моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» $P(A_i)$.

Ймовірнісні характеристики визначаємо на основі експертного оцінювання моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» та значимості кожного із критеріїв.

Задача, яку необхідно вирішити, полягає у визначенні критеріїв та моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста».

Отриману задачу вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» вирішуємо на основі розглянутого Б. Б. Млинко в [131] правила Байєса, яке для апостеріорної ймовірності моделі A_i :

$$P(A_i|B_j) = \frac{P(B_j|A_i)P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(B_j|A_i)P(A_i)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (3.1)$$

де $P(A_i)$, $i = \overline{1, n}$ – апіорна ймовірність використання моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» A_i , $\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1$;

$P(A_i|B_j)$ – ймовірність використання для «розумного міста» моделі інформаційно-технологічної архітектури A_i при умові, що з'явився критерій B_j ;

$P(B_j|A_i)$ – ймовірність появи критерію за умови, що істинною є модель інформаційно-технологічної архітектури A_i .

Якщо для моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» A'_i : ймовірність використання $P(A'_i | B_j) \gg P(A_i | B_j)$ для інших $i \neq i'$, то ставимо у відповідність досліджуваній моделі – A'_i .

До проведення обчислювального експерименту задамо апріорні ймовірності моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» так, щоб $\sum_{i=1}^n P(MA_i^{IT}) = 1$. На початковому етапі усі моделі можуть бути використані з однаковою ймовірністю, тому:

$$P(MA_{DO}^{IT}) = P(MA_{IER}^{IT}) = P(MA_{MLA}^{IT}) = P(MA_{OPD}^{IT}) = P(MA_{SOA}^{IT}) = \frac{1}{5}. \quad (3.2)$$

Визначимо розподіл умовних ймовірностей $P(CRI_j^{MA} | MA_i^{IT})$ появи критеріїв CRI^{MA} . Для цього здійснимо розподіл ймовірностей відповідно до важливості критеріїв у моделях інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста».

Розподіл умовних ймовірностей $P(CRI_j^{MA} | MA_i^{IT})$ подано у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розподіл умовних ймовірностей $P(CRI_j^{MA} | MA_i^{IT})$ появи критеріїв CRI^{MA}

$P(CRI_j^{MA} MA_i^{IT})$	$j=1$	$j=2$	$j=3$
$i=1$	1/5	2/5	2/5
$i=2$	2/5	1/5	2/5
$i=3$	1/5	2/5	2/5
$i=4$	1/6	1/2	1/3
$i=5$	3/5	1/5	1/5

На рис. 3.1 подано діаграму діяльності розробленого в дисертаційному дослідженні методу вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста».

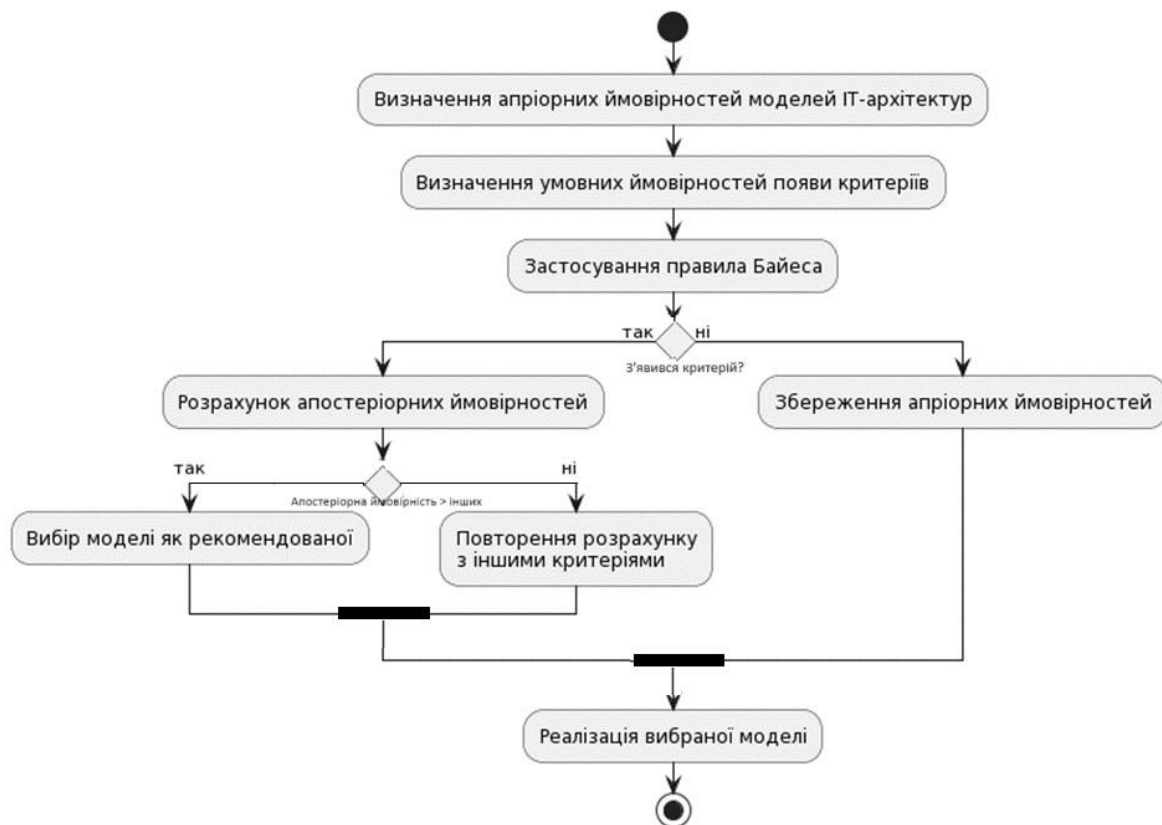


Рис. 3.1. Діаграма діяльності розробленого методу вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста»

Розглянемо детальніше етапи практичної реалізації запропонованого методу. На рис. 3.2 зображено діалогове вікно інтерфейсу розробленого програмно-алгоритмічного комплексу (ПАК) для вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» із використанням правила Байєса.

Оскільки вибір моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» відбувається на початковому етапі проектування гіперскладних систем класу «Розумне місто», то призначені для цього програмно-алгоритмічні засоби є спеціалізованими для системних проєктантів інформаційно-технологічними інструментами. Тому їх розробку проведемо за допомогою Microsoft Visual Studio з використанням мови програмування C#, оскільки дане середовище розробки є безкоштовним у використанні та підтримує розробку різнотипових ПАК.

Вибір моделі ІТ-архітектури

Вибір моделі ІТ-архітектури із використанням правила Байєса

Задача:

Модель A1: Модель A2: Модель A3: Модель A4: Модель A5:

Критерій B1: Критерій B2: Критерій B3:

Почати розрахунок

Рис. 3.2. Стартове вікно інтерфейсу розробленого ПАК для вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста»

На початковому етапі використання розробленого ПАК можна здійснити введення назв моделей та критеріїв для вирішення задачі із п'ятьма моделями і трьома критеріями.

На рис. 3.3 зображено етап введення назв моделей і критеріїв для вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста».

Вибір моделі ІТ-архітектури

Вибір моделі ІТ-архітектури із використанням правила Байєса

Задача: Вибір моделі ІТ-архітектури "розумного міста"

Модель A1: Модель A2: Модель A3: Модель A4: Модель A5:

Доменно-орієнтована Ієрархічна Багатшарова "Відкритих даних" Сервіс-орієнтована

Критерій B1: Критерій B2: Критерій B3:

Масштабованість Гнучкість Повнота забез. жит. циклу даних

Почати розрахунок

Рис. 3.3. Введення переліку моделей та критеріїв для вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста»

Наступним етапом є введення апріорних ймовірностей моделей та умовних ймовірностей критеріїв (див. рис. 3.4).

№	Моделі	Числові значення ймовірностей			
		Масштабованість	Гнучкість	Повнота забез. жит.	
		$P(A_i)$	$P(B1 A_i)$	$P(B2 A_i)$	$P(B3 A_i)$
1	Доменно-орієнтована	1/5	1/5	2/5	2/5
2	Ієрархічна	1/5	2/5	1/5	2/5
3	Багатощарова	1/5	1/5	2/5	2/5
4	"Відкритих даних"	1/5	1/6	1/2	1/3
5	Сервіс-орієнтована	1/5	3/5	1/5	1/5

Почати розрахунок Очистити поля

Рис. 3.4. Введення апріорних ймовірностей моделей інформаційно-технологічних архітектур «розумного міста» та умовних ймовірностей критеріїв

На завершальному етапі обчислювального експерименту відбувається пошук апостеріорних ймовірностей за правилом Байєса (3.1) та вибір рекомендованої моделі (див. рис. 3.5).

№	Моделі	Числові значення ймовірностей		
		Масштабованість	Гнучкість	Повнота забез. жит. циклу даних
		$P(A_i B1)$	$P(A_i B2)$	$P(A_i B3)$
1	Доменно-орієнтована	0,1277	0,2353	0,2308
2	Ієрархічна	0,2553	0,1176	0,2308
3	Багатощарова	0,1277	0,2353	0,2308
4	"Відкритих даних"	0,1064	0,2941	0,1923
5	Сервіс-орієнтована	0,383	0,1176	0,1154

Отже, найбільш ймовірним є використання моделі А5 при критерії В1.

Рис. 3.5. Етап вибору однієї моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» серед множини MA^{IT}

Оскільки кожен із критеріїв впливає на задачу вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури, тому при подальших розрахунках буде враховано всю множину критеріїв.

На основі правила Байєса програмно-алгоритмічний комплекс здійснює обчислення та формує рекомендацію щодо вибору моделі у вигляді текстового повідомлення із вказанням максимального значення ймовірностей.

На основі проведеного обчислювального експерименту для реалізації в українських «розумних містах» було рекомендовано до використання сервіс-орієнтовану модель інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» MA_{SOA}^{IT} . Метод вибору MA^{IT} використано ТОВ «ЛІМБЕР» (акт впровадження подано у додатку Б).

3.2 Метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста»

В параграфі 3.1 обґрунтовано використання MA_{SOA}^{IT} для інформаційно-технологічних платформ «розумних міст». Щоб забезпечити весь спектр функціональних можливостей сервісів та цифрових послуг потрібно розв'язати багатокритеріальну задачу вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста». У [132] описано процес вибору однієї з трьох інформаційно-технологічних платформ на основі методу аналізу ієрархій, тому при формуванні методу вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» використаємо даний підхід.

Метод Сааті ґрунтується на ієрархічній структурі задачі багатокритеріального вибору, застосуємо його в контексті найкращої імплементації інформаційно-технологічної платформи «розумного міста». Основний підхід до представлення задачі включає створення ієрархії, в якій для кожного критерію існують інформаційно-технологічні платформи з однаковою

кількістю та однаковими функціональними наборами [133]. Іншими словами, це ієрархія, де різні ІТП оцінюються згідно набору критеріїв.

Спершу було здійснено експертне опитування серед представників місцевої влади, комунальних підприємств та ІТ-компаній, яке дало можливість виокремити для подальшого аналізу 5 досліджуваних інформаційно-технологічних платформ (множину яких описано у параграфі 2.2), адже вони подібні за своєю реалізацією, взаємодією інформаційно-технологічних інструментів та методів збору та опрацювання даних.

Для порівняльного аналізу задамо множину критеріїв:

$$CRI^{ITP} = \{CRI_{SC}^{ITP}, CRI_{FL}^{ITP}, CRI_{DLC}^{ITP}, CRI_{IT\&MA}^{ITP}, CRI_{UO}^{ITP}, CRI_{PS}^{ITP}, CRI_{SCS}^{ITP}\}, \quad (3.3)$$

де CRI_{SC}^{ITP} – масштабованість;

CRI_{FL}^{ITP} – гнучкість;

CRI_{DLC}^{ITP} – повнота життєвого циклу даних;

$CRI_{IT\&MA}^{ITP}$ – множина ІТ-технологій та повнота реалізації ІТ-архітектури;

CRI_{UO}^{ITP} – варіанти використання;

CRI_{PS}^{ITP} – спеціалізація інформаційно-технологічної платформи;

CRI_{SCS}^{ITP} – умови обслуговування та безпека.

На основі проведеного експертного оцінювання за цими критеріями побудовано ієрархію для вибору кращої ІТП для формування «розумного міста» (див. рис. 3.6).

У методі Сааті пріоритети використовуються для попарного порівняння критеріїв, тобто в даному випадку для попарного порівняння інформаційно-технологічних платформ «розумного міста» [134].

Для оцінювання пріоритетів використаємо шкалу:

- «1» – обидва порівнювані критерії однаково сприяють вибору ІТП;
- «3» – міркування та досвід експертів надають перевагу однієї ІТП над іншою;

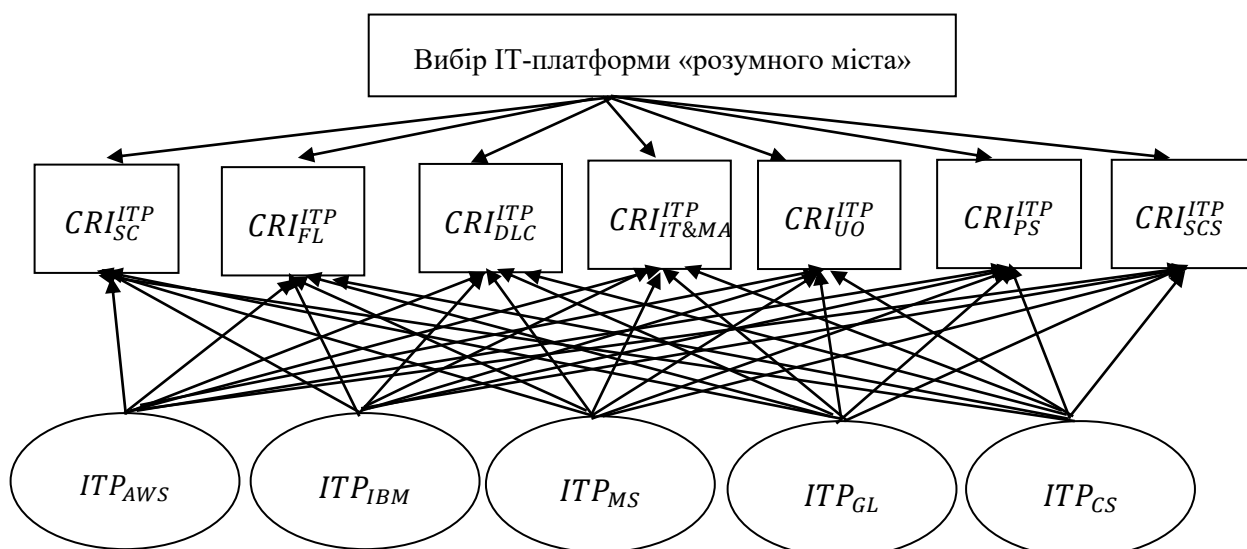


Рис. 3.6. Ієрархія для вирішення задачі вибору ІТП «розумного міста»

- «5» – міркування та досвід експертів свідчать про сильну перевагу однієї ІТП над іншою;
- «7» – міркування та досвід експертів дуже сильно засвідчують перевагу однієї ІТП над іншою;
- «9» – міркування та досвід експертів надають повну перевагу однієї ІТП над іншою.

При оцінюванні ІТП експерти могли використовувати оцінки «2», «4», «6» або «8» для вираження проміжного рівня переваги [134]. У таблиці 3.2 подано результати експертного оцінювання ІТП «розумних міст» за 10-бальною шкалою.

Таблиця 3.2 – Узагальнені результати експертного оцінювання інформаційно-платформ «розумного міста»

ІТП	CRI_{SC}^{ITP}	CRI_{FL}^{ITP}	CRI_{DLC}^{ITP}	$CRI_{IT\&MA}^{ITP}$	CRI_{UO}^{ITP}	CRI_{PS}^{ITP}	CRI_{SCS}^{ITP}
ITP_{AWS}	8	6	5	7	6	7	9
ITP_{IBM}	5	3	4	6	4	5	7
ITP_{MS}	9	7	6	8	7	8	10
ITP_{GL}	6	3	5	4	5	6	4
ITP_{CS}	4	2	3	4	5	4	6

На основі результатів експертного оцінювання ІТП «розумного міста» визначимо найкращу реалізацію на основі методу Сааті.

Локальні пріоритети визначаються через розрахунок набору основних власних векторів для кожної обернено симетричної матриці у ієрархії відповідно до формули (3.4):

$$A \cdot x = \lambda_{\max} \cdot x, \quad (3.4)$$

де $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – головний власний вектор квадратної матриці попарних порівнянь $A = \{a_{ij}\}$;

λ_{\max} – максимальне власне значення матриці A .

Основним завданням даної задачі є визначення глобальних пріоритетів та вибір ІТП «розумного міста», тобто їх ранжування відносно всієї ієрархії.

У таблиці 3.3 подано нормовану матрицю попарних порівнянь критеріїв задачі вибору ІТП «розумного міста».

Таблиця 3.3 – Нормована матриця попарних порівнянь критеріїв задачі вибору ІТП «розумного міста»

Вибір ІТ-платформи «розумного міста»	CRI_{SC}^{ITP}	CRI_{FL}^{ITP}	CRI_{DLC}^{ITP}	$CRI_{IT\&MA}^{ITP}$	CRI_{UO}^{ITP}	CRI_{PS}^{ITP}	CRI_{SCS}^{ITP}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
CRI_{SC}^{ITP}	1	3	1/4	1/9	3	2	1/5	0,720	0,064
CRI_{FL}^{ITP}	1/3	1	1/3	1/7	3	2	1/3	0,611	0,055
CRI_{DLC}^{ITP}	4	3	1	1/5	5	7	2	2,079	0,186
$CRI_{IT\&MA}^{ITP}$	9	7	5	1	9	9	5	5,363	0,480
CRI_{UO}^{ITP}	1/3	1/3	1/5	1/9	1	2	1/3	0,400	0,036
CRI_{PS}^{ITP}	1/2	1/2	1/7	1/9	1/2	1	1/9	0,300	0,027
CRI_{SCS}^{ITP}	5	3	1/2	1/5	3	9	1	1,697	0,152
Сума	20,17	17,83	7,43	1,88	24,50	32,00	8,98	11,170	1
$\lambda_{\max} = 7,660$; $IY = 0,11$; $BIY = 1,32$; $BY = 0,08 < 0,10$									

Характеристиками кількісного змісту послідовності експертних оцінок є індекс узгодженості та відношення узгодженості. Визначення індексу узгодженості подається за формулою (3.5):

$$I_y = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (3.5)$$

де I_y – індекс узгодженості;

λ_{\max} – максимальне власне число ($\lambda_{\max} \approx n$);

n – порядок матриці.

Середні значення індексу узгодженості $M(I_y)$ для випадкових матриць різної розмірності подані в таблиці 3.4 [135].

Таблиця 3.4 – $M(I_y)$ в залежності від розмірності матриці

Розмірність матриці, n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M(I_y)$	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Відношення узгодженості I_0 визначають за формулою (3.6):

$$I_0 = \frac{I_y}{M(I_y)}. \quad (3.6)$$

Відповідно до матриці попарних порівнянь відносно критеріїв можемо дійти висновку, що визначальним критерієм є $CRI_{IT\&MA}^{ITP}$ – множина ІТ-технологій та повнота реалізації ІТ-архітектури ІТП «розумного міста».

У таблиці 3.5 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{SC}^{ITP} – масштабованість.

Відносно критерію CRI_{SC}^{ITP} – масштабованість можна виділити три найкращі реалізації досліджуваних ІТП як ITP_{MS} , ITP_{AWS} та ITP_{GL} . ITP_{IBM} та

ITP_{CS} відповідно отримують найнижчі результати оцінювання щодо даного критерію.

Таблиця 3.5 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{SC}^{ITP}

CRI_{SC}^{ITP}	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	5	1/3	5	7	2,255	0,278
ITP_{IBM}	1/5	1	1/7	3	1/2	0,533	0,066
ITP_{MS}	3	7	1	9	9	4,427	0,546
ITP_{GL}	1/5	1/3	1/9	1	6	0,536	0,066
ITP_{CS}	1/7	2	1/9	1/6	1	0,351	0,043
Сума	4,54	15,33	1,70	18,17	23,50	8,102	1
$\lambda_{\max} = 5,420$; $IY = 0,11$; $BIY = 1,12$; $BY = 0,09 < 0,1$							

У таблиці 3.6 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{FL}^{ITP} – гнучкість.

Таблиця 3.6 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{FL}^{ITP}

CRI_{FL}^{ITP}	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	1	1/3	5	5	1,528	0,208
ITP_{IBM}	1	1	1/7	2	4	1,027	0,140
ITP_{MS}	3	7	1	7	7	4,004	0,544
ITP_{GL}	1/5	1/2	1/7	1	1/2	0,372	0,051
ITP_{CS}	1/5	1/4	1/7	2	1	0,428	0,058
Сума	5,40	9,75	1,76	17,00	17,50	7,359	1
$\lambda_{\max} = 5,317$; $IY = 0,079$; $BIY = 1,12$; $BY = 0,071 < 0,1$							

Відносно критерію CRI_{FL}^{ITP} – гнучкість, найбільш вдалою є ITP_{MS} .

У таблиці 3.7 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{DLC}^{ITP} – повнота життєвого циклу даних.

Таблиця 3.7 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{DLC}^{ITP}

CRI_{DLC}^{ITP}	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	3	1/3	4	2	1,516	0,208
ITP_{IBM}	1/3	1	1/7	0,5	4	0,625	0,086
ITP_{MS}	3	7	1	5	9	3,936	0,540
ITP_{GL}	1/4	2	1/5	1	7	0,931	0,128
ITP_{CS}	1/2	1/4	1/9	1/7	1	0,288	0,039
Сума	5,08	13,25	1,79	10,64	23,00	7,296	1
$\lambda_{\max} = 5,421$; $IY = 0,11$; $BIY = 1,12$; $BY = 0,09 < 0,1$							

Відносно критерію CRI_{DLC}^{ITP} – повнота життєвого циклу даних, найбільш вдалою є реалізація ITP_{MS} .

У таблиці 3.8 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП відносно критерію $CRI_{IT\&MA}^{ITP}$ – множина ІТ-технологій та повнота реалізації ІТ-архітектури.

Таблиця 3.8 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію $CRI_{IT\&MA}^{ITP}$

$CRI_{IT\&MA}^{ITP}$	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	5	1/3	7	7	2,412	0,284
ITP_{IBM}	1/5	1	1/9	2	3	0,668	0,079
ITP_{MS}	3	9	1	9	9	4,656	0,548
ITP_{GL}	1/7	1/2	1/9	1	3	0,474	0,056
ITP_{CS}	1/7	1/3	1/9	1/3	1	0,281	0,033
Сума	4,49	15,83	1,67	19,33	23,00	8,491	1
$\lambda_{\max} = 5,275$; $IY = 0,07$; $BIY = 1,12$; $BY = 0,06 < 0,1$							

Відносно критерію $CRI_{IT\&MA}^{ITP}$ – множина ІТ-технологій та повнота реалізації ІТ-архітектури, найбільш вдалою є реалізація ITP_{MS} .

У таблиці 3.9 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП

відносно критерію CRI_{UO}^{ITP} – варіанти використання.

Таблиця 3.9 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{UO}^{ITP}

CRI_{UO}^{ITP}	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	5	1/2	7	7	2,616	0,315
ITP_{IBM}	1/5	1	1/7	5	6	0,970	0,117
ITP_{MS}	2	7	1	9	9	4,082	0,492
ITP_{GL}	1/7	1/5	1/9	1	1/2	0,276	0,033
ITP_{CS}	1/7	1/6	1/9	2	1	0,351	0,042
Сума	3,49	13,37	1,87	24,00	23,50	8,294	1
$\lambda_{\max} = 5,370$; $IY = 0,09$; $BIY = 1,12$; $BY = 0,08 < 0,1$							

Відносно критерію CRI_{UO}^{ITP} – варіанти використання, найбільш вдалою є реалізація ITP_{MS} .

У таблиці 3.10 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{PS}^{ITP} – спеціалізація ІТП.

Таблиця 3.10 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{PS}^{ITP}

CRI_{PS}^{ITP}	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	5	1/3	6	5	2,187	0,291
ITP_{IBM}	1/5	1	1/5	2	1/3	0,484	0,065
ITP_{MS}	3	5	1	7	7	3,743	0,499
ITP_{GL}	1/6	1/2	1/7	1	1/3	0,331	0,044
ITP_{CS}	1/5	3	1/7	3	1	0,762	0,102
Сума	4,57	14,50	1,82	19,00	13,67	7,507	1
$\lambda_{\max} = 5,398$; $IY = 0,10$; $BIY = 1,12$; $BY = 0,09 < 0,1$							

Відносно критерію CRI_{PS}^{ITP} – спеціалізація ІТП, найбільш вдалою є реалізація ITP_{MS} .

У таблиці 3.11 подано нормовану матрицю попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{SCS}^{ITP} – умови обслуговування та безпека.

Таблиця 3.11 – Нормована матриця попарних порівнянь ІТП відносно критерію CRI_{SCS}^{ITP}

CRI_{SCS}^{ITP}	ITP_{AWS}	ITP_{IBM}	ITP_{MS}	ITP_{GL}	ITP_{CS}	Вектор локальних пріоритетів	Нормований вектор цих пріоритетів
ITP_{AWS}	1	5	0,5	5	9	2,572	0,330
ITP_{IBM}	1/5	1	1/5	3	6	0,936	0,120
ITP_{MS}	2	5	1	7	8	3,545	0,456
ITP_{GL}	1/5	1/3	1/7	1	3	0,491	0,063
ITP_{CS}	1/9	1/6	1/8	1/3	1	0,238	0,031
Сума	3,51	11,50	1,97	16,33	27,00	7,783	1
$\lambda_{\max} = 5,298$; $IU = 0,07$; $BIU = 1,12$; $BU = 0,07 < 0,1$							

Відносно критерію CRI_{SCS}^{ITP} – умови обслуговування та безпека, найбільш вдалою є реалізація ITP_{MS} .

Ієрархічний синтез використовується для врахування ваг власних векторів матриць парних порівнянь ІТП відповідно до ваг критеріїв (елементів), присутніх у ієрархії (див. рис. 3.6). Локальні пріоритети множаться на пріоритет відповідного критерію на більш високому рівні, і потім ці значення сумуються для кожного елемента. Також ієрархічний синтез використовується для розрахунку загальних пріоритетів ІТП «розумного міста».

Здійснимо обчислення індексу узгодженості ІТП «розумного міста», ієрархії, а також знайдемо значення випадкового індексу узгодженості для ієрархії та відношення узгодженості ієрархії (3.7) щодо вибору кращої ІТП для формування «розумного міста».

$$IU_{\text{альт}} = 0,081; IU_{\text{ієрархії}} = 0,191; BIU_{\text{ієрархії}} = 2,44; BU_{\text{ієрархії}} = 0,078 < 0,1. \quad (3.7)$$

Знайдемо вектор значущості глобальних пріоритетів альтернатив (3.8).

$$\begin{pmatrix} 0,278 & 0,208 & 0,208 & 0,284 & 0,315 & 0,291 & 0,330 \\ 0,066 & 0,140 & 0,086 & 0,079 & 0,117 & 0,065 & 0,120 \\ 0,546 & 0,544 & 0,540 & 0,548 & 0,492 & 0,499 & 0,456 \\ 0,066 & 0,051 & 0,128 & 0,056 & 0,033 & 0,044 & 0,063 \\ 0,043 & 0,058 & 0,039 & 0,033 & 0,042 & 0,102 & 0,031 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,064 \\ 0,055 \\ 0,186 \\ 0,480 \\ 0,036 \\ 0,027 \\ 0,152 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,274 \\ 0,090 \\ 0,529 \\ 0,070 \\ 0,038 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

В результаті проведеного дослідження встановлено, що ITP_{MS} має найкращу оцінку із 52,90% переваги з помітно слабшими ITP_{AWS} (27,40%), ITP_{IBM} (9,00%), ITP_{GL} (7,00%), а найменшу оцінку отримала ITP_{CS} (3,80%). Відповідно можемо рекомендувати за основу реалізації для українських міст інформаційно-технологічну платформу ITP_{MS} .

Метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» впроваджено ТОВ «МЕРКАДА» (акт впровадження подано у додатку Б).

3.3 Створення інформаційно-технологічних інструментів консолідації, аналізу та візуалізації «відкритих даних» «розумних міст»

За допомогою запропонованого в параграфі 3.1 методу вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» було вибрано MA_{SOA}^{IT} , а на основі описаного в параграфі 3.2 методу вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» було обрано інформаційно-технологічну платформу ITP_{MS} . Сформуємо інформаційно-технологічні інструменти для консолідації та аналітичного опрацювання «відкритих даних» для «розумних» міських послуг та сервісів. Оперативне реагування працівників комунальних підприємств та представників органів місцевої влади на запити та потреби містян підвищує показники життєдіяльності міста та оцінку «розумності» міста загалом.

Тому в процесі дисертаційних досліджень розроблено інформаційно-технологічні інструменти консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації «відкритих даних» для міста Тернопіль. У зв'язку із дією воєнного стану в Україні на даний момент часу значно обмежено відкритий доступ до даних. Проте окремі

набори даних, що не розкривають критично важливої інформації, публікуються, зокрема є ряд груп наборів «відкритих даних» на «Порталі відкритих даних Тернополя» [136].

Щомісячно публікуються та оновлюються 16 наборів даних:

- громадський транспорт – 3 набори даних;
- економіка та інвестиції – 2 набори даних;
- житлово-комунальне господарство – 3 набори даних;
- земельні ресурси – 1 набір даних;
- міська інфраструктура – 1 набір даних;
- комунальна власність – 3 набори даних;
- місцеве самоврядування – 2 набори даних;
- охорона здоров'я – 1 набір даних.

В дисертації розроблено інформаційно-технологічні інструменти консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації наборів «відкритих даних» про надходження звернень на телефонні «гарячі лінії» в аварійно-диспетчерські служби КП «Тернопільводоканал» та дані про виконання аварійних та регламентних робіт щодо обслуговування міської інфраструктури.

Для обробки наборів «відкритих даних», їх перетворення у придатні до аналітичного опрацювання та візуалізації формати використано інформаційно-технологічні інструменти *ITP_{MS}* Microsoft PowerBI [137]. Вони дають можливість створювати крос-платформенні інтерактивні інформаційні панелі [138], що доступні локально, через веб-інтерфейси або через мобільні застосунки. Обробка даних здійснюється програмно-алгоритмічними засобами, інструментами консолідації різнорідних та різнотипових даних PowerQuery. Ці засоби надають можливість налаштувати автоматизоване оновлення інформаційних наборів із динамічних джерел «відкритих даних» за розкладом.

3.3.1 Інформаційна панель відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал»

Інформаційно-технологічний інструмент для відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал» розроблено у виді інформаційної панелі, в якій консолідовано та опрацьовано дані за 2023 рік. З набору «відкритих даних» на етапі початкового опрацювання було виділено поля:

- requestAddresser – назва організації чи підприємства, на яке надійшло звернення;
- quarter – номер кварталу в році;
- month – назва місяця, коли надійшло звернення громадян;
- requesterDate – дата звернення;
- dayOfTheWeek – назва дня тижня – використана для відстеження тенденції навантаження щодо звернень;
- requestNumb – унікальний ідентифікатор набору даних щодо звернення громадян;
- typeOfRequest – тип набору даних (аварія, звернення громадян, скарга мешканців тощо);
- reasonForTheRequest – перелік можливих причин звернення;
- status – статус процесу опрацювання звернення громадян;
- nameOfTheCityPart – тип міської локації чи мікрорайону;
- street – назва локації;
- buildingNumber – номер будинку.

Сукупність наборів «відкритих даних» щодо звернень громадян забезпечує можливість оцінити показники роботи комунальних підприємств, що експлуатують міську інфраструктуру та розробити шляхи покращення якості обслуговування (QoS).

На рис. 3.7 подано діаграму процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації наборів «відкритих даних» міста.

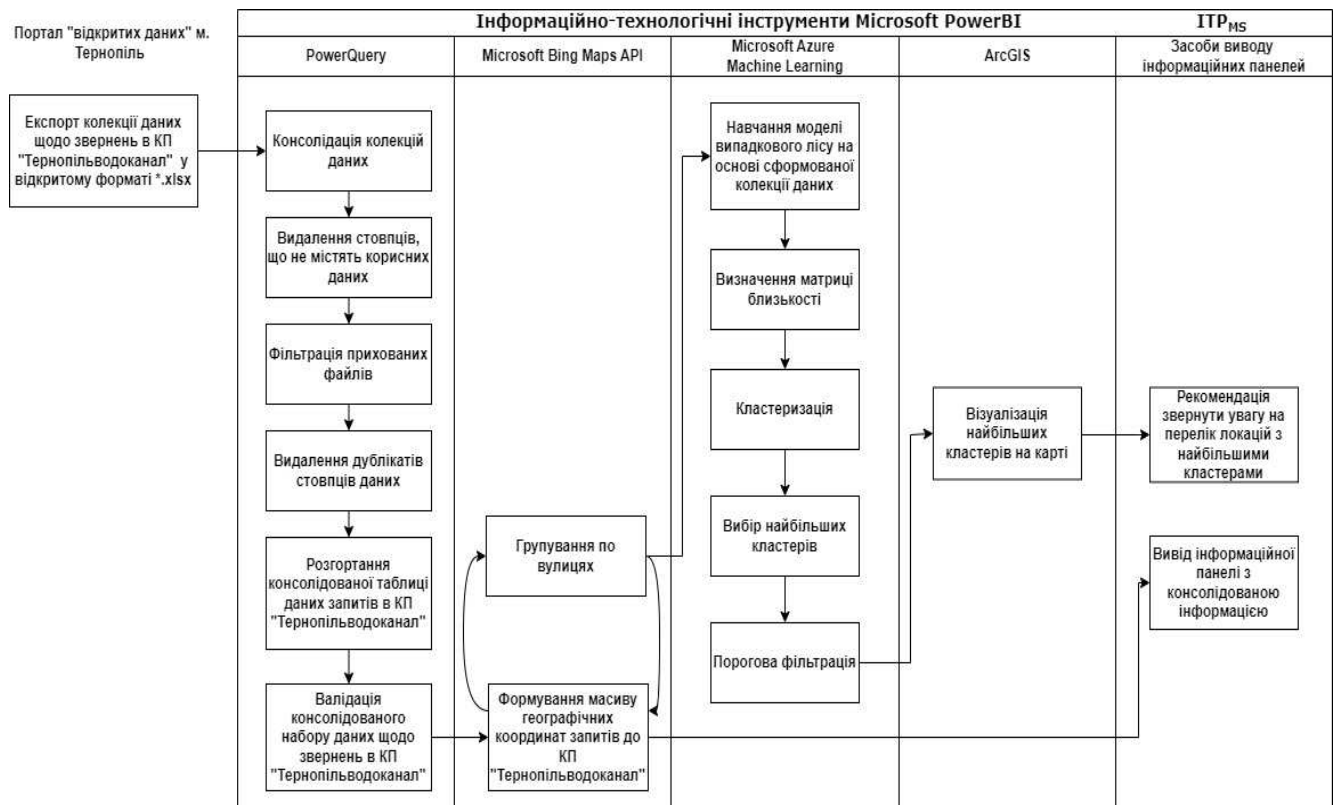


Рис. 3.7. Діаграма діяльності процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації «відкритих даних» щодо запитів до КП «Тернопільводоканал»

На першому етапі відбувається експорт колекцій «відкритих даних» щодо звернень громадян до КП «Тернопільводоканал» (див. рис. 3.7).

Потім відбувається консолідація вхідних наборів даних відбувається із вхідних наборів даних в *xlsx* файлах, що подані окремо за кожен місяць календарного року. Використані функції інформаційно-технологічних інструментів *ITP_{MS}* дають змогу автоматизувати об'єднання усі файлів з колекції за зразком першого файлу.

На рис. 3.8 подано відображення процесів консолідації, фільтрації та очищення даних засобами інформаційно-технологічних інструментів PowerQuery. При цьому можна динамічно переглядати дані відповідно до кварталу, місяця та стану виконання. Ключовими показниками колекцій даних є кількість звернень громадян, їх розподіл за датами, типом, причинами звернень і географічного розташування.

requestAddresser	Ua_edr	Requester_data	Request_Numbr	AcquestContent	Request_Res
1	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64682 Аварія, Тече каналізація	Виконано, проспект СТЕПАНА БАНДЕРИ, 99-10
2	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64683 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця КАМІННА, 7
3	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64684 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця БРОДЯВСЬКА, 50
4	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64685 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця І.КОТЛЯРЕВСЬКОГО, 69
5	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64686 Аварія, Промити гідромашинною кан.	Виконано, вулиця Івана Гадири, 5
6	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64687 Аварія, Тече каналізація	Виконано, вулиця КНІЗЯ ОСТРОЗЬКОГО, 51
7	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64688 Звернення, Виліз з лабораторією	Виконано, вулиця БІЛЕЦЬКА, вк-1
8	КП «Тернопільводоканал»	3353845	01.01.2023	64689 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця ЧЕРНІВЕЦЬКА, 56
9	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64690 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, бульвар С.ПЛЕТИ, 2
10	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64691 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця КНІЗЯ ОСТРОЗЬКОГО, 51
11	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64692 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця В.СИМОНЕНКА, 5
12	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64693 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця БЕРЕЖАНСЬКА, 49
13	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64694 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця В'ЯЧЕСЛАВА ЧОРНОВОЛА, 2
14	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64695 Аварія, Витік води	Виконано, вулиця МИТРОПОЛИТА ШЕПТИЦЬКО...
15	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64696 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця БІЛОГІРСЬКА, 18 в
16	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64697 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, проспект ЗЛУМІ, 11
17	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64698 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця О.ДОЖЕНКА, 7
18	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64699 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, проспект СТЕПАНА БАНДЕРИ, 95
19	КП «Тернопільводоканал»	3353845	02.01.2023	64700 Аварія, Тече ПТ	Передано, бульвар ТАРАСА ШЕВЧЕНКА, 4
20	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64701 Аварія, Витік води з колодязя (вод.)	Виконано, вулиця ДІВЧА, 7-9
21	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64702 Аварія, Деорова каналізація	Передано, вулиця ВОЛКІВ ДИВІЙ ГАЛИЧИНА, 26
22	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64703 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця Є.КОРЧАКОВСЬКА, 12
23	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64704 Не визначо, Не визначо	Виконано, вулиця ЯБЛУНЬВА, КУТКІВЦІ, 15
24	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64705 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця ЗОЛОТОГОРСЬКА, КУТКІВЦІ, 20
25	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64706 Аварія, Провал на мережі	Виконано, вулиця Тарташів, 37а
26	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64707 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця ГАЛИЦЬКА, 6
27	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64708 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця ГАЛИЦЬКА, 35-37
28	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64709 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця М.КАРПЕНКА, 13-15
29	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64710 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця РОМАНА КУПЧИНСЬКОГО, 9
30	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64711 Аварія, Промити гідромашинною кан.	Виконано, проспект ЗЛУМІ, 3а
31	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64712 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця ЧЕРНІВЕЦЬКА, 52
32	КП «Тернопільводоканал»	3353845	03.01.2023	64713 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця ПРОТАСЕВИЧА, 22
33	КП «Тернопільводоканал»	3353845	04.01.2023	64714 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця 15 КВІТНЯ, 39
34	КП «Тернопільводоканал»	3353845	04.01.2023	64715 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця МИКОЛИВЕЦЬКА, 115
35	КП «Тернопільводоканал»	3353845	04.01.2023	64716 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця НАЗАРЯ ЯРЕМЧУКА, 37
36	КП «Тернопільводоканал»	3353845	04.01.2023	64717 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця М.ВЕРБИЦЬКОГО, 7
37	КП «Тернопільводоканал»	3353845	04.01.2023	64718 Аварія, Деорова каналізація	Виконано, вулиця М.КОЮБИНСЬКОГО, 56
38	КП «Тернопільводоканал»	3353845	04.01.2023	64719 Аварія, Зруйнований колодязь (кан.)	Виконано, вулиця В.СИМОНЕНКА, 4

Рис. 3.8. Процес консолідації, фільтрації та очищення даних засобами інформаційно-технологічних інструментів PowerQuery

Розроблена в дисертаційному дослідженні інформаційна панель здійснює аналітичне опрацювання «відкритих даних» щодо запитів до КП «Тернопільводоканал» та формує рекомендації щодо виявлених проблемних локацій водопровідної мережі. Функції супроводу процесів прийняття рішень реалізовано на основі машинного навчання. Зокрема, для виділення кластерів геолокаційних даних запитів громадян до КП «Тернопільводоканал» було використано метод некерованого випадкового лісу (англ. Unsupervised Random Forest). При цьому використано матрицю проксиміті (близькості) для вимірювання частоти потрапляння пар геолокаційних точок в один лист кінцевих дерев випадкового лісу.

В параграфі 3.1 було обрано MA_{SOA}^{IT} , на основі якої організовано взаємодію засобами інформаційно-технологічних інструментів ITP_{MS} Microsoft PowerBI:

- Microsoft Bing Maps API – сервіс для отримання геолокаційних координат;
- Azure Machine Learning – сервіс для здійснення кластеризації геоданих;

- ArcGIS – інструмент для візуалізація кластерів на карті.

На рис. 3.9 подано інтерфейс розробленої інформаційної панелі для консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації запитів до КП «Тернопільводоканал».

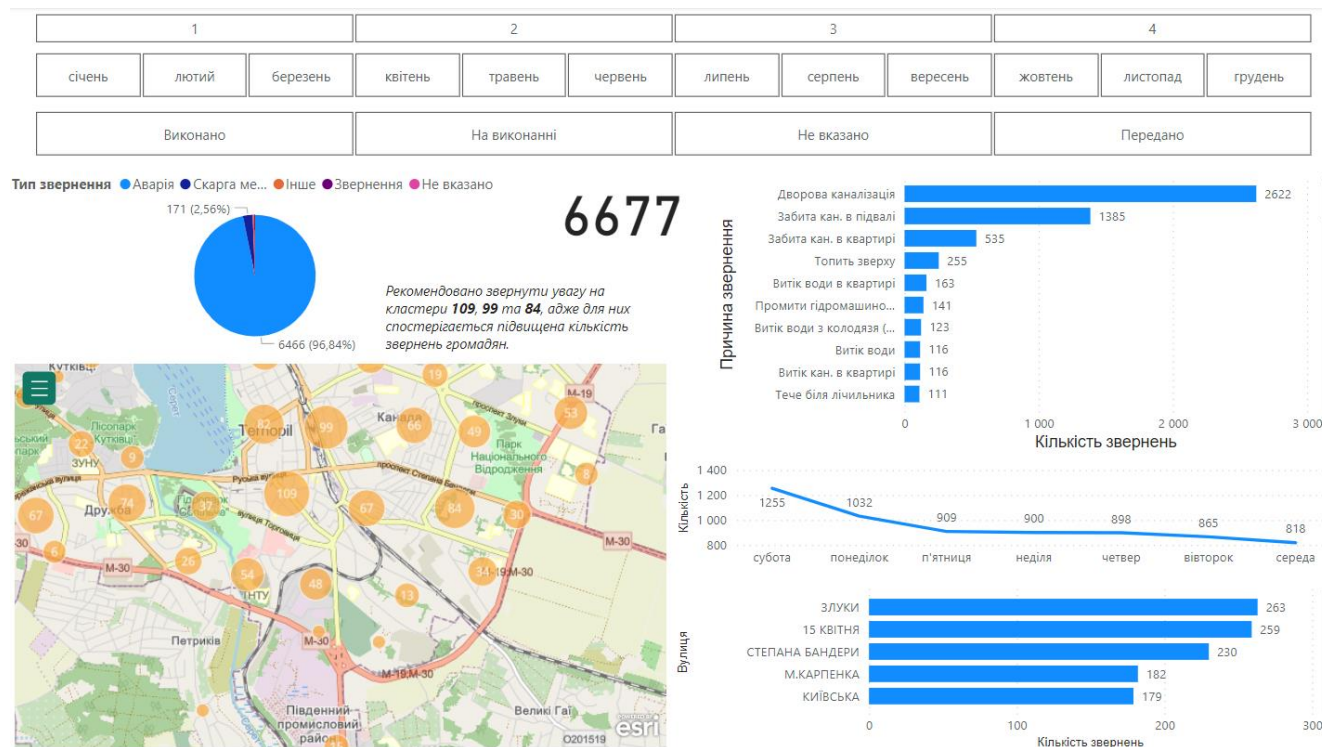


Рис. 3.9. Інформаційна панель відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал»

На рис. 3.9 подано рекомендації щодо проблемних кластерів міста (109, 99 та 84).

За допомогою розробленої інформаційної панелі відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал» при опрацюванні колекції «відкритих даних» за 2023 рік було консолідовано 6677 наборів даних щодо звернень мешканців міста. Серед них 6466 звернень, тобто 96,84%, було через аварії. Найбільше звернень надійшло від жителів вулиць Злуки, 15 Квітня та Степана Бандери (м. Тернопіль). Найчастіше громадяни звертались в суботу – 1255 звернень, в середньому – 114 звернень на місяць.

Для перевірки динамічної візуалізації даних оберемо за досліджуваний період 3 квартал 2023 року, виконані звернення, тип звернення – аварія, причина звернення – забита каналізація в підвалі. На рис. 3.10 подано відображення консолідованих колекцій даних за третій квартал 2023 року.

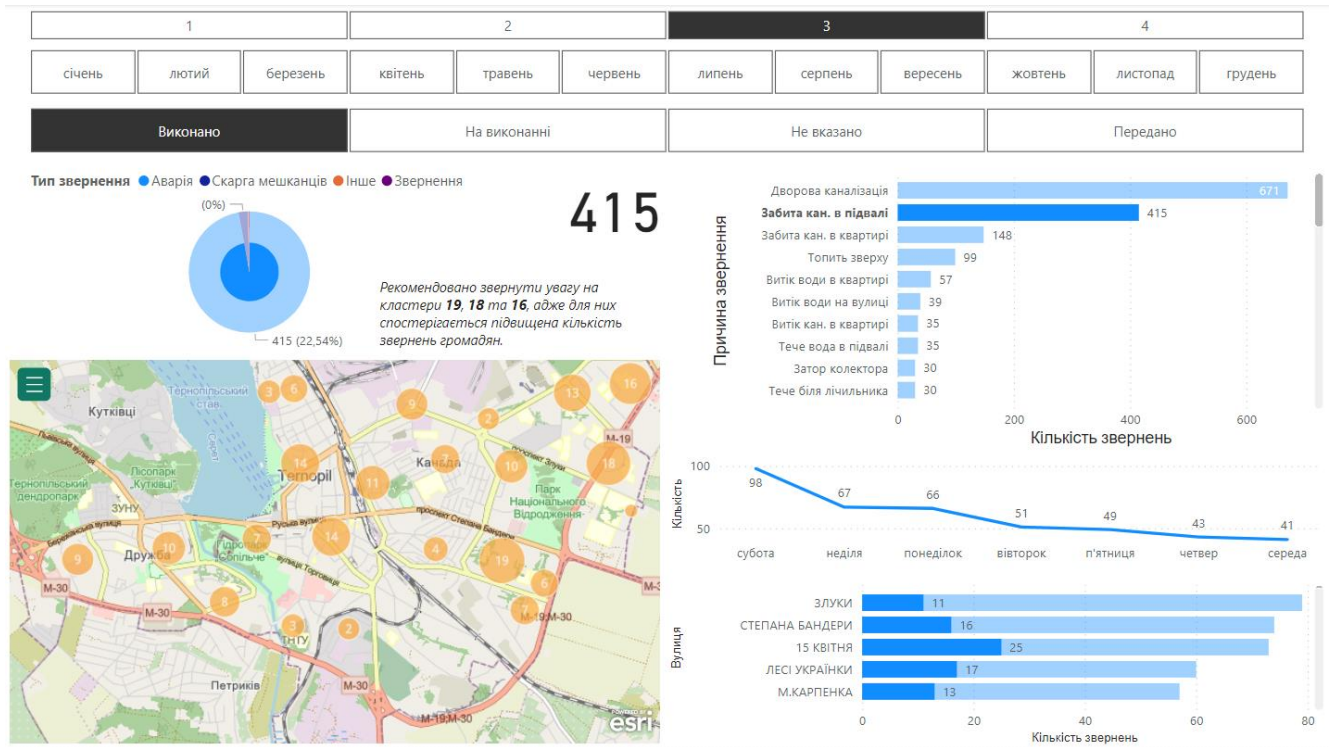


Рис. 3.10. Відображення консолідованих колекцій «відкритих даних» щодо звернень в КП «Тернопільводоканал» за третій квартал 2023 року

В результаті аналітичного опрацювання спродуковано інформаційне повідомлення про виконання чотирьохсот п'ятнадцяти аварійних виїздів, що становить 22,54% від загальної кількості запитів громадян.

В розробленій інформаційній панелі відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал» передбачені функціональні можливості для побудинкового групування даних щодо запитів громадян окремої вулиці. Зокрема, на рис. 3.11 подано дані щодо вулиці 15 Квітня (м. Тернопіль).



Рис. 3.11. Побудинковий розподіл звернень громадян вул. 15 Квітня (м. Тернопіль)

Для інформаційної панелі відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал» розроблено інтерфейс для мобільних пристроїв (див. рис. 3.12).

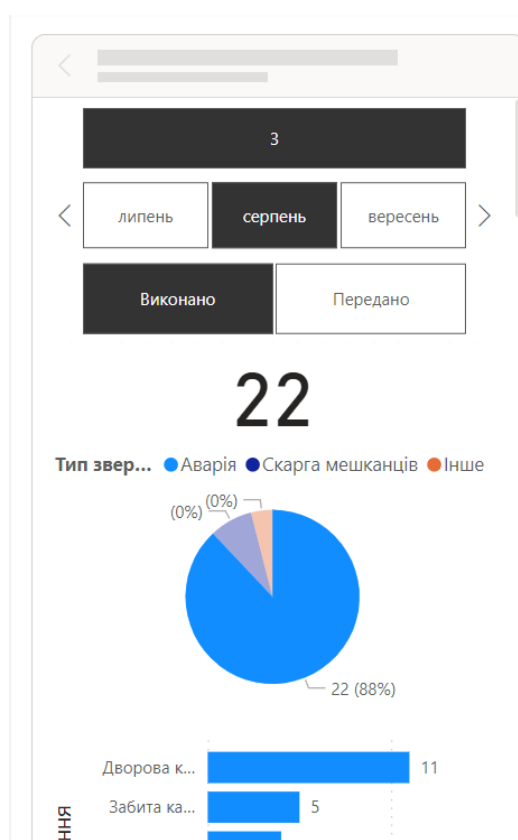


Рис. 3.12. Інтерфейс інформаційної панелі щодо звернень містян до КП «Тернопільводоканал» для мобільних пристроїв

Розроблені в процесі дисертаційних досліджень інформаційно-технологічні інструменти, зокрема, описана в цьому параграфі інформаційна панель використана при плануванні робіт та визначення найбільш аварійних частин міста Тернопіль КП «Тернопільводоканал» (акт впровадження подано в додатку Б).

3.3.2 Інформаційна панель спостереження процесів виконання аварійних та регламентних робіт обслуговування міської інфраструктури

Інформаційно-технологічний інструмент для спостереження процесів виконання аварійних та регламентних робіт обслуговування міської інфраструктури розроблено у виді інформаційної панелі, в якій консолідовано та опрацьовано дані за період із 2021 по 2023 роки. З експортованого та консолідованого набору даних щодо аварійних та регламентних робіт виділено інформаційні поля:

- `id` – унікальний ідентифікатор запису;
- `dateIssue` – дата отримання дозволу на виконання аварійних та регламентних;
- `placeWorks` – адреса;
- `name` – назва підприємства чи організації, яким видано дозвіл на проведення аварійних та регламентних робіт;
- `object` – тип території;
- `nameOwner` – назва територіальної громади;
- `typeWork` – тип робіт (аварійні або планові);
- `startDate` – дата початку обслуговування міської інфраструктури;
- `endDate` – дата завершення робіт;
- `year` – рік отримання дозволу на обслуговування міської інфраструктури;
- `quarter` – квартал отримання дозволу;
- `month` – місяць отримання дозволу;

- day – день тижня, у який отримано дозвіл на обслуговування міської інфраструктури;
- duration – тривалість робіт.

На рис. 3.13 подано діаграму процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації наборів «відкритих даних» щодо виконання аварійних та регламентних робіт обслуговування міської інфраструктури.

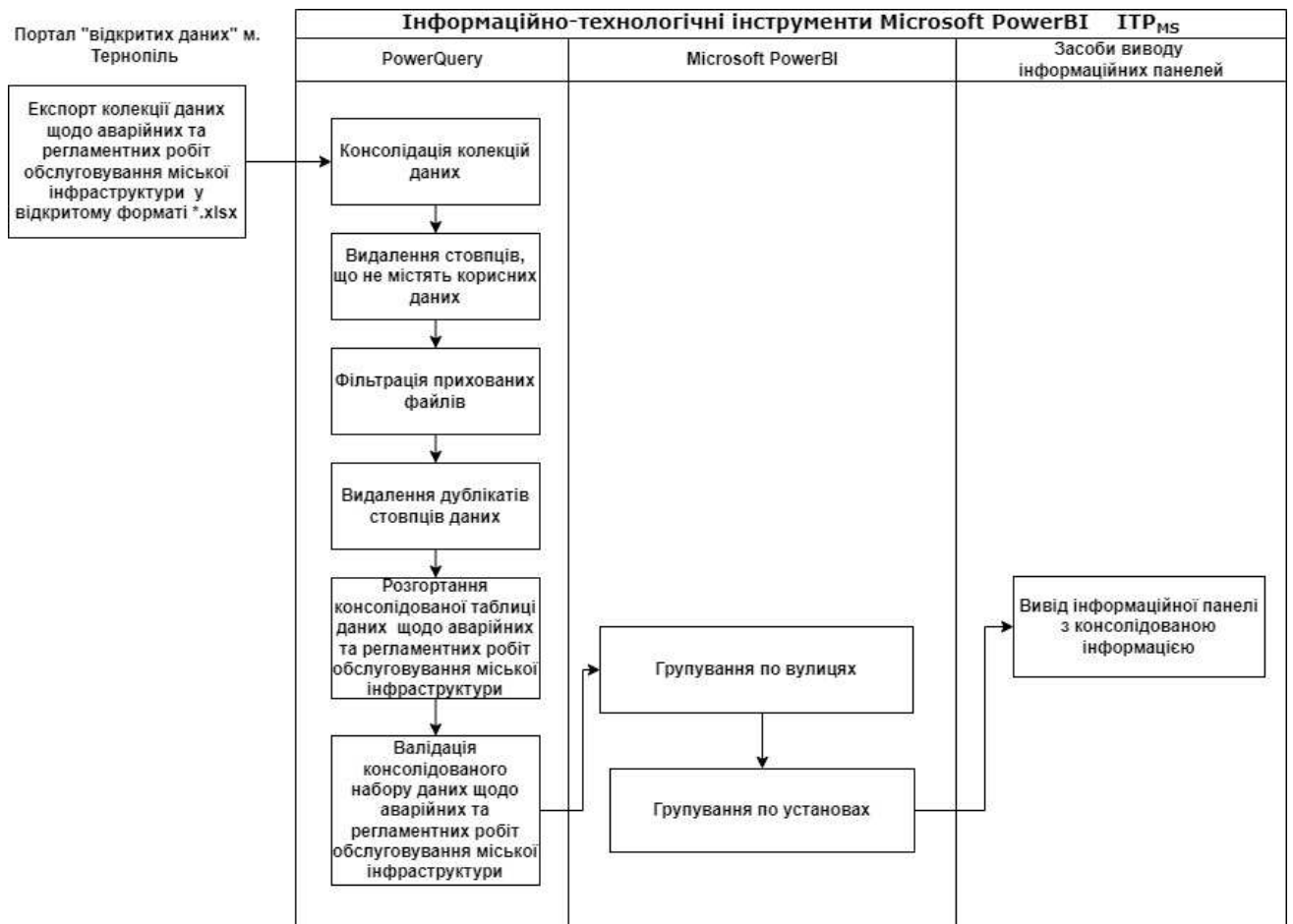


Рис. 3.13. Діаграма діяльності процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації «відкритих даних» щодо виконання аварійних та регламентних робіт обслуговування міської інфраструктури

Наявність наборів та колекцій даних надасть можливість працівникам міської адміністрації, муніципальних та комунальних установ та організацій спостерігати за процесами виконання аварійних та регламентних робіт щодо

обслуговування міської інфраструктури за допомогою поданої на рис. 3.14 інформаційної панелі.

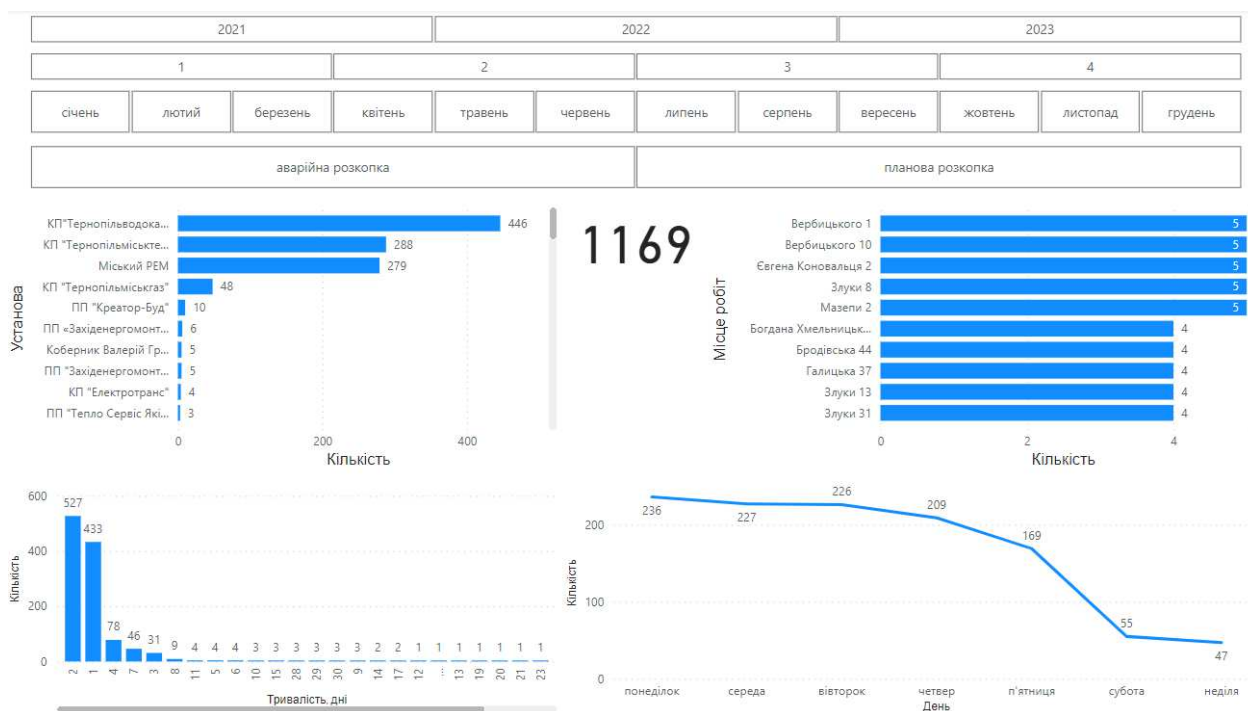


Рис. 3.14. Інтерфейс інформаційної панелі для спостереження процесів виконання аварійних та регламентних робіт обслуговування міської інфраструктури в м. Тернопіль

З опублікованих на «Порталі відкритих даних Тернополя» колекцій даних було консолідовано 1169 наборів даних за період із 2021 по 2023 роки щодо дозволів на обслуговування міських інфраструктурних об'єктів:

- 446 – КП «Тернопільводоканал»;
- 288 – КП «Тернопільміськтеплокомуненерго»;
- 279 – Тернопільський міський РЕМ.

Після отримання дозволів переважну більшість робіт було виконано впродовж декількох днів.

Розроблена в дисертаційному дослідженні інформаційна панель дає змогу динамічно обирати дані для аналізу згідно часового інтервалу, типу робіт, установи чи локації (див. рис. 3.15).

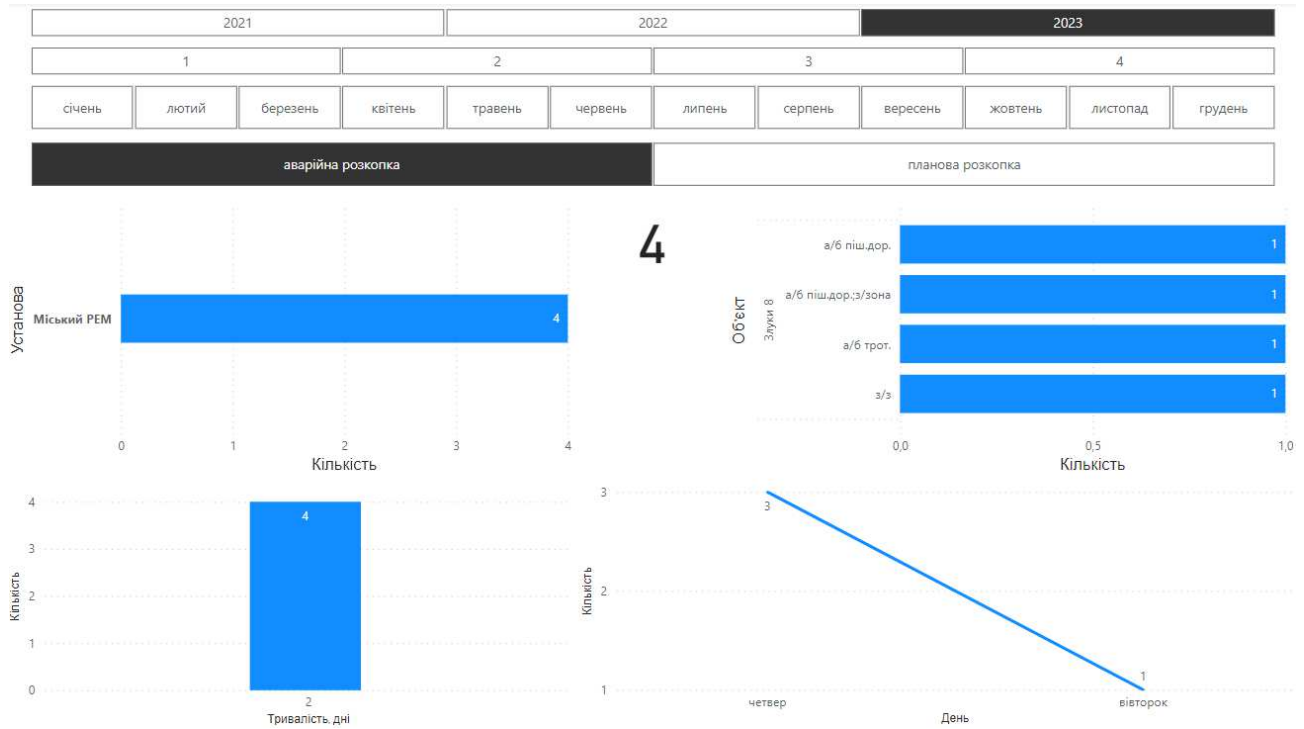


Рис. 3.15. Консолідація даних за 2023 рік щодо аварійних та регламентних робіт за адресою м. Тернопіль, вул. Злуки 8

Розроблена інформаційна панель спостереження процесів виконання аварійних та регламентних робіт буде корисна для співробітників міських адміністрацій при розробці та впровадженні КРІ. Зокрема, можна відслідковувати тривалість робіт і у випадку порушення термінів виконання оперативно узгоджувати подальші дії з виконавцями. Для інформаційної панелі розроблено мобільний інтерфейс, що потребує підключення до мережі Інтернет.

На основі вибору MA_{SOA}^{IT} та ITP_{MS} було розроблено інформаційну панель спостереження процесів виконання аварійних та регламентних робіт. В процесі формування інформаційно-технологічних платформ «розумного міста» потрібно провести вибір засобів їх оцінювання та результатів використання.

3.4 Висновки до розділу 3

У третьому розділі отримано важливі результати дисертаційного дослідження, зокрема:

1. Розроблено метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» з використанням правила Байєса, що на відміну від існуючих, надав можливість адаптації ймовірнісних показників критеріїв відповідно до мінливих характеристик гіперскладної системи «Розумне місто». Результати використання методу застосовано в процесі створення інформаційно-технологічних інструментів консолідації та візуалізації «відкритих даних» «розумних міст».

2. Розроблено метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» з використанням методу Сааті для вирішення багатокритеріальної задачі на основі оригінальної узагальненої множини категорій – «масштабованість», «гнучкість», «повнота життєвого циклу даних», «множина ІТ-технологій та повнота реалізації ІТ-архітектури», «варіанти використання», «спеціалізація інформаційно-технологічної платформи» і «умови обслуговування та безпека», що, на відміну від існуючих, дало змогу розширити умови вибору критеріїв для гіперскладної системи «Розумне місто».

3. Створено інформаційно-технологічні інструменти для супроводу процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації даних в гіперскладній системі «Розумне місто» у вигляді інформаційних панелей з рекомендаційними функціями для виявлення проблемних локацій водопровідної мережі на основі «відкритих даних» щодо запитів громадян до КП «Тернопільводоканал» і установ та організацій при отриманні дозволів на обслуговування міської інфраструктури.

РОЗДІЛ 4. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГІПЕРСКЛАДНИХ СИСТЕМ «РОЗУМНИХ МІСТ»

4.1 Метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічної платформи «розумного міста»

Після вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» MA_{SOA}^{IT} (див. параграф 3.1) та інформаційно-технологічної платформи IIP_{MS} (див. параграф 3.2), та розроблення поданих в параграфі 3.3 інформаційних панелей при формуванні ІТП гіперскладної системи «Розумне місто» постає потреба вибору засобів їх оцінювання. Вибір реалізуємо із використанням принципу Парето, адже він дає змогу виділити множину засобів оцінювання, що можуть бути використані комплексно, а також дає змогу із використанням методу головного критерію обрати один найкращий засіб оцінювання ІТП. Для вирішення цієї задачі виділимо множину (4.1) засобів оцінювання ІТП «розумного міста».

$$AT^{IIP} = \{AT_{SCI}^{IIP}, AT_{CS}^{IIP}, AT_{DA}^{IIP}, AT_{CA}^{IIP}, AT_{RP}^{IIP}\}, \quad (4.1)$$

де AT_{SCI}^{IIP} – індекс «розумності» міста;

AT_{CS}^{IIP} – опитування громадян;

AT_{DA}^{IIP} – аналіз даних;

AT_{CA}^{IIP} – порівняльний аналіз;

AT_{RP}^{IIP} – звітність.

Для їх характеристик використовуємо множину критеріїв (4.2).

$$CRI^{AT} = \{CRI_{SC}^{AT}, CRI_{FL}^{AT}, CRI_{DLC}^{AT}, CRI_{EB}^{AT}\}, \quad (4.2)$$

де CRI_{SC}^{AT} – масштабованість;

CRI_{FL}^{AT} – гнучкість;

CRI_{DLC}^{AT} – повнота забезпечення життєвого циклу даних;

CRI_{EB}^{AT} – економічна вигода.

Задамо для критеріїв засобів оцінювання ІТП числові оцінки. Позначимо їх $CRI_i^{AT}(AT^{ITP})$, $i = \overline{1, n}$. У даному випадку будь-якому засобу AT^{ITP} може бути наведена у відповідність точка n -вимірного простору E^n , координатами якої є значення відповідних критеріїв (де n – кількість використаних критеріїв). Такий простір називається критеріальним [131]. При більшому значенні i -го критерію $CRI_i^{AT}(AT^{ITP})$, отримаємо відповідний засіб оцінювання ІТП «розумного міста», який переважає над іншими засобами, що порівнюються за тим же критерієм. Розглянемо два довільні засоби оцінювання ІТП. Можливі дві ситуації:

1. один засіб не гірший за інший за всіма критеріями:

$$CRI_i^{AT}(AT_2^{ITP}) \geq CRI_i^{AT}(AT_1^{ITP}), i = \overline{1, n}, \quad (4.3)$$

причому хоча б одна нерівність виконується як строга;

2. один засіб гірший за інший за всіма критеріями.

Умова (4.3) – це умова переважання засобу оцінювання ІТП AT_2^{ITP} над засобом AT_1^{ITP} . Таким чином, перехід від AT_1^{ITP} до AT_2^{ITP} покращує наш вибір. Обмеженість значень критеріїв $CRI_i^{AT}(AT^{ITP})$, $i = \overline{1, n}$.

Оскільки метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» сформовано на основі принципу Парето, то множину непокращуваних засобів будемо називати множиною Парето [139] для даної задачі.

Для подальшої формалізації процесу вибору введемо метод головного критерію для цього. Фіксуємо набір чисел (рівнів, обмежень) A_i , $i = \overline{2, n}$, і шукаємо засіб, у якого на всі критерії, крім одного, накладені обмеження $CRI_i^{AT}(AT^{ITP}) \geq A_i$, а критерій CRI_1^{AT} максимальний. Вибір головного критерію

саме CRI_1^{AT} є умовним, адже він, як і важливі у цій задачі рівні A_i , підлягає спеціальному вибору [140].

Діаграму послідовності методу вибору AT^{ITP} подано на рис. 4.1.

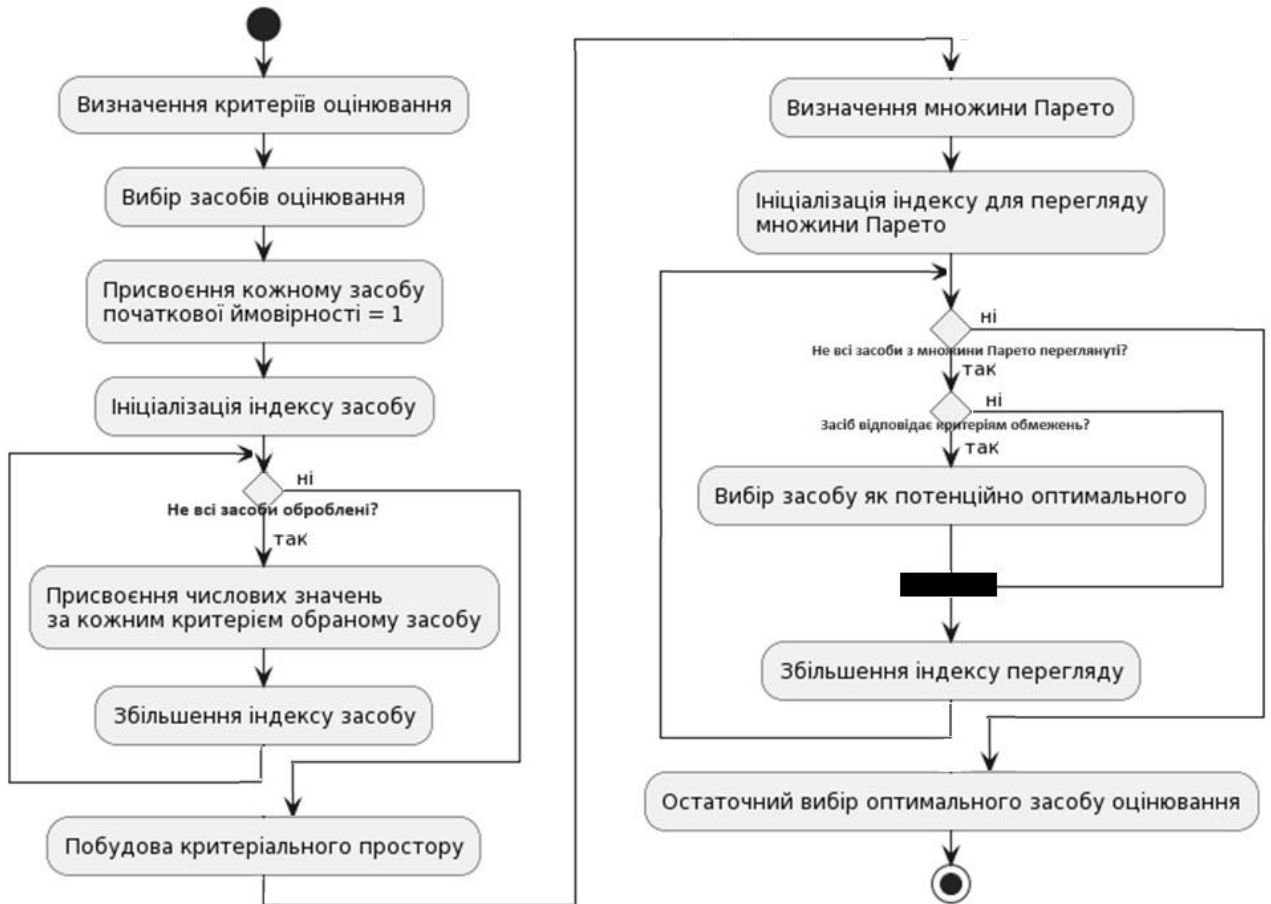


Рис. 4.1. Діаграма послідовності методу вибору AT^{ITP}

У множину Парето ввійдуть засоби, для яких $P_i = 1$. На рис. 4.2 подано інтерфейс розробленого ПАК для вибору засобу оцінювання інформаційно-технологічних платформ з використанням методу головного критерію на основі синтезованої множини Парето.

Рис. 4.2. Інтерфейс розробленого ПАК для вибору засобів оцінювання ІТП «розумних міст»

В розробленому ПАК можна здійснювати введення назв чотирьох критеріїв та п'яти засобів.

У таблиці 4.1 подано перелік засобів оцінювання та критеріїв вибору засобу оцінювання ІТП «розумних міст».

Таблиця 4.1 – Засоби оцінювання та критерії вибору ІТП «розумних міст»

№	Засоби оцінювання	Критерії вибору			
		CRI_{SC}^{AT}	CRI_{FL}^{AT}	CRI_{DLC}^{AT}	CRI_{EB}^{AT}
1	AT_{SCI}^{ITP}	18	14	20	17
2	AT_{CS}^{ITP}	11	8	17	19
3	AT_{DA}^{ITP}	12	13	15	12
4	AT_{CA}^{ITP}	10	7	6	9
5	AT_{RP}^{ITP}	15	14	10	17

Наступним етапом роботи розробленого ПАК для вибору засобів оцінювання ІТП «розумних міст» є формування множини Парето. Для цього спершу заповнимо показники критеріїв вибору засобів оцінювання відповідно до двадцятибальної шкали (див. рис. 4.3).

№	Засоби	Критерії та їх числові значення			
		Масштабованість	Гнучкість	Повнота забез. жит. циклу д. Економічна вигода	
		1	2	3	4
1	Індекс "розумності" міста	18	14	20	17
2	Опитування громадян	11	8	17	19
3	Аналіз даних	12	13	15	12
4	Порівняльний аналіз	10	7	6	9
5	Звітність	15	14	10	17

Оберіть головний (основний) критерій:

Введіть обмеження (>=):

Введіть значення критеріїв засобів (або бали у довільній шкалі).

Визначити множину Парето Очистити поля Вибір засобу методом головного критерію (критеріальних обмежень)

Рис. 4.3. Критерії оцінювання ІТП «розумних міст» за двадцятибальною шкалою

Після цього у ПАК для вибору засобів оцінювання ІТП «розумного міста» буде виведено текстове повідомлення про засоби, що віднесені до множини Парето. При цьому вони будуть позначені зеленим кольором (див. рис. 4.4).

№	Засоби	Критерії та їх числові значення			
		Масштабованість	Гнучкість	Повнота забез. жит. циклу д. Економічна вигода	
		1	2	3	4
1	Індекс "розумності" міста	18	14	20	17
2	Опитування громадян	11	8	17	19
3	Аналіз даних	12	13	15	12
4	Порівняльний аналіз	10	7	6	9
5	Звітність	15	14	10	17

Оберіть головний (основний) критерій:

Введіть обмеження (>=):

До множини Парето входять такі засоби: 1, 2, 5.

Визначити множину Парето Очистити поля Вибір засобу методом головного критерію (критеріальних обмежень)

Рис. 4.4. Відображення результатів визначення множини Парето

Визначення множини Парето здійснюється для кожного засобу оцінювання відповідно до критеріїв за умови (4.1). Тобто, коли хоча б одне числове значення або бал критеріїв для даного засобу оцінювання є кращим або рівнозначним із числовим значенням або балом іншого засобу. Наприклад, для засобу оцінювання «Звітність» (див. на рис. 4.4) перевірка здійснюється таким чином:

- Звітність – Опитування громадян: $15 \geq 11$, $14 \geq 8$, $10 < 17$, $17 < 19 - 1$;
- Звітність – Аналіз даних: $15 \geq 12$, $14 \geq 13$, $10 < 15$, $17 \geq 19 - 1$;
- Звітність – Порівняльний аналіз: $15 \geq 10$, $14 \geq 7$, $10 \geq 6$, $17 \geq 9 - 1$;
- Звітність – Індекс «розумності» міста: $15 < 18$, $14 \geq 14$, $10 < 20$, $17 \geq 17 - 1$.

Завершальним етапом багатокритеріальної оптимізації за принципом Парето є вибір на множині Парето одного засобу оцінювання ІТП «розумних міст» методом головного критерію, який здійснюється у програмному режимі. При цьому відбувається вибір головного критерію та введення обмеження щодо інших критеріїв. Найкращий засіб оцінювання ІТП «розумних міст» виводиться у текстовому полі та позначається червоним кольором (див. рис. 4.5).

№	Засоби	Критерії та їх числові значення			
		Масштабованість	Гнучкість	Повнота забез. жит. циклу д. Економічна вигода	
		1	2	3	4
1	Індекс "розумності" міста	18	14	20	17
2	Опитування громадян	11	8	17	19
3	Аналіз даних	12	13	15	12
4	Порівняльний аналіз	10	7	6	9
5	Звітність	15	14	10	17

Оберіть головний (основний) критерій:

Введіть обмеження (>=): 12 10 14

Отже, найкращим є засіб №1.

Визначити множини Парето Очистити поля Вибір засобу методом головного критерію (критеріальних обмежень)

Рис. 4.5. Результати вибору засобу оцінювання ІТП «розумного міста»

Отже, після вибору методом головного критерію із множини Парето для оцінювання впровадження інформаційно-технологічних платформ «розумних міст» рекомендовано застосовувати AT_{SCI}^{ITP} . Розроблений метод вибору AT^{ITP} використано в навчальному процесі кафедри комп'ютерних наук та кафедри менеджменту та адміністрування ТНТУ ім. І. Пулюя (акт впровадження подано у додатку Б).

4.2 Метод оцінювання показників «розумності» гіперскладних міських систем

Після вибору засобу оцінювання ІТП «розумних міст» AT_{SCI}^{ITP} , в процесі формування та розвитку інформаційно-технологічних інструментів, програмно-алгоритмічних комплексів та застосунків «розумних» цифрових послуг виникає потреба їх перевірки та оцінювання у конкретному місті. Для цього розроблено метод оцінювання показників «розумності» міст в Україні. При цьому оцінювання критеріїв мають ієрархічну структуру. На їх основі обчислюватимемо загальний індекс «розумності» міста, що базується на шести характеристиках, поданих у параграфі 1.4, двадцяти п'яти факторах та п'ятдесяти індикаторах-критеріях. У таблиці 4.2 подано фактори та критерії CHA_{SEN} .

Таблиця 4.2 – Фактори та критерії оцінювання характеристики CHA_{SEN}

№	Фактор	№	Критерії
1	Привабливість природніх умов	1.1	Наявність сонячних годин
		1.2	Частка зеленого простору
2	Забруднення міського середовища	2.1	Тверді частинки
		2.2	Смертельні хронічні захворювання нижніх дихальних шляхів на одного жителя
3	Охорона навколишнього середовища	3.1	Індивідуальні зусилля щодо охорони природи

CHA_{SEN} характеризує процеси створення комфортних та екологічних умов проживання громадян в «розумному місті». При оцінюванні враховуються три фактори та п'ять індикаторів.

У таблиці 4.3 подано фактори та критерії $СНА_{SP}$.

Таблиця 4.3 – Фактори та критерії оцінювання характеристики $СНА_{SP}$

№	Фактор	№	Критерії
4	Рівень кваліфікації жителів міста	4.1	Важливість центрів знань
		4.2	Знання іноземних мов
5	Навчання громадян впродовж життя	5.1	Наявність книг на одного мешканця міста
		5.2	Участь громадян у навчанні впродовж життя
		5.3	Участь громадян у мовних курсах
6	Соціальна та етнічна більшість громадян	6.1	Частка іноземців
		6.2	Частка громадян, народжених за кордоном
7	Креативність міських жителів	7.1	Частка жителів, що працюють у творчих галузях
8	Космополітизм та відкритість міської спільноти	8.1	Явка виборців на виборах
		8.2	Іміграційне середовище та ставлення до іммігрантів
		8.3	Знання про Європу, країни
9	Участь громадян у суспільному житті	9.1	Явка виборців на місцевих виборах
		9.2	Участь жителів міста у добровільній роботі

Дану характеристику, що містить шість факторів та тринадцять індикаторів слід детально досліджувати та аналізувати, адже саме освічені та успішні люди зможуть забезпечити процес впровадження розвитку елементів «розумності» у місті.

У таблиці 4.4 подано фактори та критерії $СНА_{SL}$. Ця характеристика містить ієрархію з семи факторів та одинадцяти індикаторів, які висвітлюють якість життя мешканців міста.

Таблиця 4.4 – Фактори та критерії оцінювання характеристики $СНА_{SL}$

№	Фактор	№	Критерії
1	2	3	4
10	Культурні об'єкти «розумного міста»	10.1	Показник відвідуваності кіно, театрів, музеїв одним жителем
11	Стан здоров'я громадян	11.1	Кількість лікарів та лікарняних місць у перерахунку на одного жителя
		11.2	Задоволення якістю системи охорони здоров'я
12	Індивідуальна безпека міських жителів	12.1	Рівень злочинності
		12.2	Смертність від злочинних нападів
		12.3	Рівень задоволення особистою безпекою

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4
13	Якість житла	13.1	Рівень задоволення громадян особистим житловим становищем
14	Освітні споруди	14.1	Рівень задоволення громадян якістю освітньої системи
15	Туристична привабливість «розумного міста»	15.1	Показник туристичного розташування, визначні місця туристичної інфраструктури
16	Соціальна згуртованість міських спільнот та громад	16.1	Сприйняття особистого ризику бідності
		16.2	Рівень бідності

Значна частина індикаторів CHA_{SL} охоплює важливі складові життя та персональної діяльності мешканців міста. Водночас вони спрямовані на оцінку рівня задоволення громадян від одержаних міських послуг.

У таблиці 4.5 подано фактори та критерії для «розумного управління» CHA_{SG} .

Таблиця 4.5 – Фактори та критерії оцінювання характеристики CHA_{SG}

№	Фактор	№	Критерії
17	Участь у прийнятті рішень	17.1	Кількість представників міста на одного жителя
		17.2	Політична діяльність жителів
		17.3	Важливість політики для мешканців
18	Громадські та соціальні послуги	18.1	Витрати муніципалітету на одного жителя в нормах купівельної потужності
		18.2	Частка дітей у дитячому садку
		18.3	Задоволеність якістю шкіл
19	Прозоре управління	19.1	Задоволення прозорістю бюрократії
		19.2	Задоволення боротьбою з корупцією

CHA_{SG} базується на трьох факторах і восьми індикаторах та дає змогу оцінити прихильність жителів до міських органів влади та наданих ними послуг.

У таблиці 4.6 подано фактори та критерії CHA_{SM} . CHA_{SM} містить три фактори та вісім індикаторів, які дають можливість перевірити рівень задоволеності транспортними послугами «розумного міста» та рівень комп'ютеризації населення – наявність ПК та доступу до мережі Інтернет.

Таблиця 4.6 – Фактори та критерії оцінювання характеристики CHA_{SM}

№	Фактор	№	Критерії
20	Місцева та міжнародна доступність міста	20.1	Мережа громадського транспорту на одного жителя «розумного міста»
		20.2	Задоволеність жителів умовами доступу до громадського транспорту
		20.3	Задоволеність жителів якістю громадського транспорту
		20.4	Міжнародна доступність «розумного міста»
21	Наявність ІКТ-інфраструктури	21.1	Комп'ютеризація «розумних» домашніх господарств
		21.2	Повсюдний ширококутний доступ до Інтернету «розумних» домогосподарств
22	Сталі, інноваційні та безпечні транспортні системи «розумного міста»	22.1	Безпека руху
		22.2	Використання енергоефективних транспортних засобів

У таблиці 4.7 подано фактори та критерії CHA_{SEC} .

Таблиця 4.7 – Фактори та критерії оцінювання характеристики CHA_{SEC}

№	Фактор	№	Критерії
23	Підприємництво	23.1	Рівень зайнятості громадян
		23.2	Зареєстровані нові підприємства
24	Продуктивність	24.1	ВВП на одну зайняту особу
25	Гнучкість ринку праці	25.1	Рівень безробіття громадян
		25.2	Питома вага в умовах неповної зайнятості

CHA_{SEC} містить три фактори та п'ять індикаторів, серед яких доцільно виокремити рівень самозайнятості жителів міста та рівень безробіття, адже саме ці чинники є визначальними для залучення інвесторів та побудови бізнесу.

Значення кожного із індикаторів можна отримати із джерел «відкритих даних», зокрема з «Єдиного державного веб-порталу відкритих даних» [141].

Етап обчислення розпочинається із розрахунку ваг індикаторів (4.4):

$$W = 1 \cdot P_1 + 2 \cdot P_2 + 3 \cdot P_3 + 4 \cdot P_4 + 5 \cdot P_5, \quad (4.4)$$

де W – вага індикатора;

P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 – ймовірності важливості індикатора (критерію) при опитуванні мешканців міста.

Оскільки розрахунок ваг відбувається в діапазоні від одного до п'яти, тому для нормалізації ваг змасштабуємо їх в значення між 1 та 2 з використанням методу мінімально-максимального значення за допомогою формули (4.5):

$$newW_i = \frac{w_i - \min(w)}{\max(w) - \min(w)} + 1, \quad (4.5)$$

де w_i – це початкові ваги;

$\max(w)$ – максимальне значення ваги;

$\min(w)$ – мінімальне значення ваги.

Для порівняння різних за походженням показників потрібно стандартизувати їх значення. Використовуємо метод Z-перетворення для стандартизації (4.6):

$$Zscore = \frac{x_i - \mu}{\sigma}, \quad (4.6)$$

де x_i – вихідні значення даних вибірки ваг кожного індикатора;

μ – математичне сподівання вибірки ваг кожного індикатора;

σ – середнє квадратичне відхилення вибірки ваг кожного індикатора.

На наступному етапі σ розраховуємо за формулою (4.7):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (4.7)$$

де N – обсяг вибірки ваг індикаторів.

Значення фактора обчислюються за формулою (4.8):

$$F = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N (Z_x \cdot W_x), \quad (4.8)$$

де N – число показників, що належать даному фактору;

Z_x – значення Zscore показників, які відносяться до цього фактора;

W_x – вага індикаторів (критеріїв).

Значення характеристик C обчислюються як середнє арифметичне факторів, що належать до даної характеристики, за формулою (4.9):

$$C = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^N F_x, \quad (4.9)$$

де N – кількість факторів, що належать даній характеристиці.

Щоб оцінити місто всебічно, значення отримуються шляхом усереднення, адже для кожної характеристики обрано різну кількість факторів та їх показників. Різна кількість факторів та показників зумовлена вибором найважливіших аспектів, що впливають на життя мешканців «розумного міста».

Комплексну оцінку міста або індекс «розумності» міста I отримуємо шляхом агрегації значень характеристик (4.10):

$$I = \sum_{x=1}^6 C_x. \quad (4.10)$$

Не можна оцінювати маленькі містечка і великі мегаполіси однаково. Тому необхідно застосовувати диференціацію індексу «розумності» міст за чисельністю

населення, зокрема, розділити українські міста на декілька груп відповідно до чисельності населення. Відповідно можна умовно поділити масштаби проектів «Розумне місто» у різних населених пунктах та оцінити чи вони мають позитивний вплив на конкретне місто.

При цьому виділимо групи міст відповідно до кількості жителів:

1. 1 000 000 та більше осіб;
2. 100 000 – 1 000 000 осіб;
3. менше 100 000 осіб.

У таблиці 4.8 подано згруповану відповідно до чисельності населення множину українських міст станом на 2022 рік [142].

Таблиця 4.8 – Українські міста, у яких для реалізуються інформаційно-технологічні проекти класу «Розумне місто»

Група	Місто	Кількість жителів	Група	Місто	Кількість жителів
1	Київ	2 797 553	2	Хмельницький	271 263
	Харків	1 430 885		Чернівці	266 533
	Одеса	1 013 159		Рівне	255 106
2	Дніпро	998 103		Івано-Франківськ	236 602
	Запоріжжя	738 728		Тернопіль	221 820
	Львів	717 803	Дрогобич	79 406	
	Вінниця	369 839	Чортків	28 858	
3			Кременець	21 063	
			Збараж	13 746	

Наприклад, при обчисленні показника якості надання медичних послуг в м. Тернопіль, визначимо відношення чисельності населення до максимальної кількості жителів серед українських міст у м. Київ:

$$221\,820 / 2\,797\,553 = 0.07929 = 7.93\%.$$

Обчислене значення відображає реальні спроможності даного міста у порівнянні з більшим містом.

Вдосконалимо процес обчислення комплексної оцінки міста при порівнянні із іншим відповідно до запропонованого поділу міст на три групи за чисельністю населення:

- міста-мегаполіси;
- міста із середньою чисельністю населення;
- невеличкі міста.

Для цього введемо показник масштабованості міста k , який обчислюється за формулою (4.11):

$$k = \frac{N_{min}}{N_{max}}, \quad (4.11)$$

де N_{min} – кількість жителів меншого за чисельністю населення міста;

N_{max} – кількість жителів більшого за чисельністю населення міста.

Наприклад, при порівнянні показників «розумності» міст Тернопіль та Львів у чисельнику буде кількість жителів Тернополя, а його комплексна оцінка I_{min} набуде вигляду (4.12):

$$I_{min} = k \sum_{x=1}^6 C_x. \quad (4.12)$$

Для міста із більшою кількістю мешканців оцінка здійсниться за формулою (4.10). Даний підхід передбачає рівноцінний вплив кожної характеристики на загальний результат оцінювання показників «розумності» міста, а при порівняння міст буде застосовано диференціацію, адже усі міста розвиваються по-різному і відрізняються по кількості та показниках впроваджених інформаційно-технологічних інструментів. Метод оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» використано при

проведенні лекційних занять з дисципліни «Електронні місто та регіон» у ТНТУ ім. І. Пулюя (акт впровадження подано у додатку Б).

4.3 Програмно-алгоритмічний комплекс для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст»

Для автоматизації процесу визначення «розумності» міста відповідно до запропонованого в параграфі 4.2 методу реалізовано ПАК [143] на основі переліку вимог:

- вимоги щодо авторизації та реєстрації користувачів;
- перелік типових ролей користувачів, їх прав доступу та привілеїв;
- оцінювання ваг;
- перегляд оцінок міських характеристик та візуалізація процесу формування загальної оцінки;
- функціональні можливості порівняння міст;
- експорт графічного подання результатів оцінювання у форматі .png;
- збереження результатів оцінювання;
- функціональні можливості внесення міст до аналітичного переліку;
- перегляд статистичних результатів опитуваних;
- експорт звітів про оцінку у форматі .pdf.

На рис. 4.6 подано множину акторів ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст».

Актори «Житель міста», «Представник муніципалітету» та «Представники міських організацій» мають функціонально обмежені набори прав та привілеїв, зокрема:

- актор «Житель міста» – це громадянин, що проживає у оцінюваному місті та бажає долучитися до опитування або переглянути результати оцінки;
- актор «Представник муніципалітету» – це здебільшого представники органів місцевої влади, що мають потребу відстежувати результати впровадження

«розумних» послуг та сервісів, ефективність реалізації елементів та складових гіперскладної системи «розумного міста» для покращення міських КРІ [144];

- актори «Представники міських організацій» – уособлюють керівників та персонал комунальних підприємств міста, що надають «розумні» послуги та сервіси, та мають змогу побачити результати оцінювання наданих послуг для врахування відгуків жителів міста.

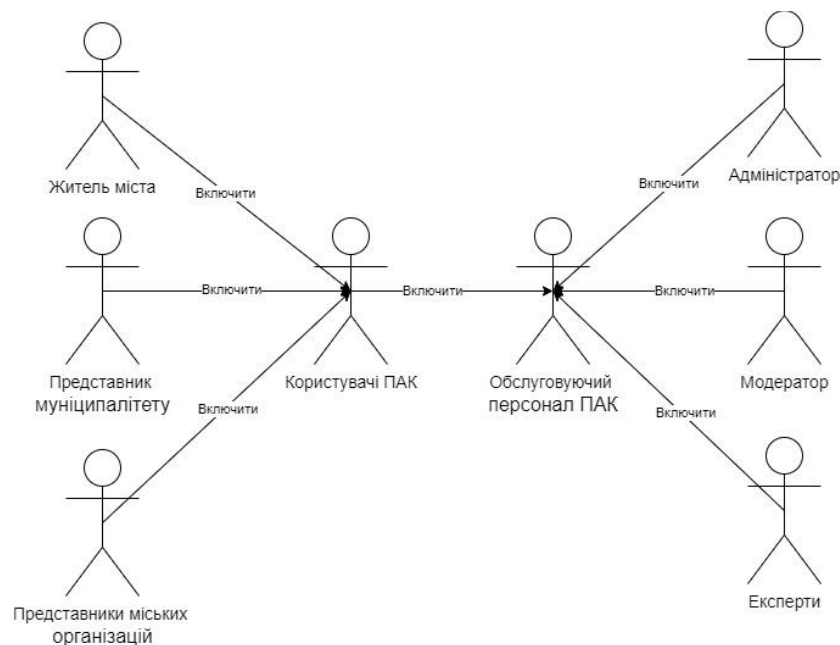


Рис. 4.6. Множина акторів ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем

Група акторів «Експерт», «Модератор» та «Адміністратор» мають функціонально багатші набори прав та привілеїв ПАК для визначення «розумності» гіперскладних систем. Зокрема:

- актор «Експерт» – це фахівець в окремій галузі або декількох галузях міської діяльності, якого залучено до процесу експертного оцінювання показників «розумності»;

- актор «Модератор» – це обслуговуючий персонал ПАК, що супроводжує процеси збору даних в ході проведення оцінювання показників «розумності» елементів гіперскладних систем;

- актор «Адміністратор» забезпечує коректне функціонування та використання ПАК та керування облікових записів інших груп користувачів.

Для актора «Житель міста» у розробленому ПАК передбачено: функціональні набори для оцінювання індикаторів, перегляду інформації про результати оцінювання, порівняння міст та перегляд діаграм показників.

Для акторів «Представники муніципалітету» та «Представники міських організацій» у ПАК передбачено функції перегляду результатів оцінювання, доменно-орієнтоване подання результатів оцінювання та експорт діаграм у вигляді окремих рисунків.

Актори «Експерт» мають можливість здійснювати процедури експертної оцінки.

Актори «Модератор» та «Адміністратор» мають найбільші функціональні набори ПАК, зокрема додавання нових міст для аналізу, перегляд статистичних результатів опитування громадян та експертного оцінювання, збереження звітної інформації у форматі .pdf.

На рис. 4.7 подано діаграму варіантів використання ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст».

На даній діаграмі подано узагальнений перелік ключових варіантів використання ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст». Для акторів «Житель міста» доступні функції реєстрації. При цьому, новий обліковий запис «Житель міста» отримує мінімальний набір функціональних можливостей, який в подальшому може бути розширений акторами «Модератор» або «Адміністратор».

Для зберігання даних ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» було створено БД «SCIndex» засобами СКБД MySQL з наборами даних базових облікових записів користувачів, оцінками індикаторів та результатами оцінювання досліджуваних міст.

У залежності від функціональності в процесі обчислень, визначено два типи таблиць.

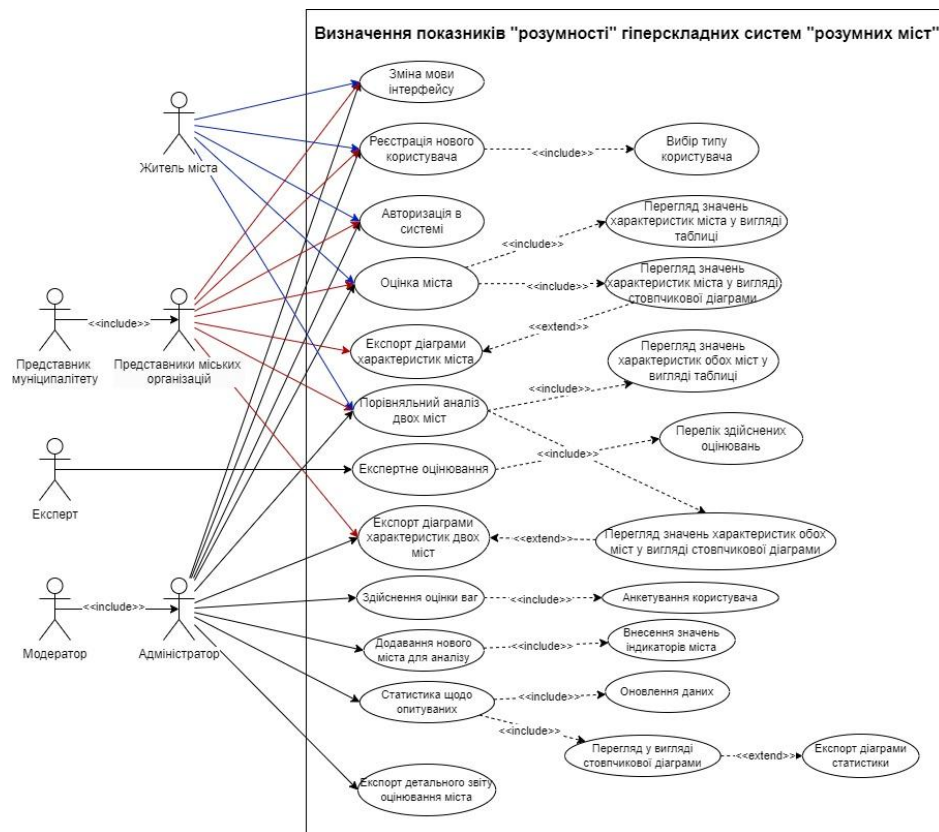


Рис. 4.7. Узагальнена діаграма прецедентів ПАК для оцінювання показників «розумності» міст

У залежності від функціонального призначення, задіяно два типи таблиць БД «SCIndex» А саме сім основних таблиць, що містять інформацію про користувачів та необхідні для розрахунків набори параметрів:

- таблиця `all_weight` – містить дані щодо здійснених серед жителів міста оцінок, при цьому інформація автоматично імпортується з Google-таблиці результатів опитування, яка використовується разом із Google-формою;
- таблиця `all_indicators` – містить отриману з джерел «відкритих даних» інформацію та результати експертних оцінок у масштабі від одного до ста;
- таблиця `users` – інформація про користувачів з авторизаційними даними;
- таблиця `indicators` – назви всіх індикаторів українською та іанглійською мовами, оскільки ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» має двомовний інтерфейс;

- таблиця `all_factors` – містить інформацію про відношення та відповідність між факторами та індикаторами;
- таблиця `all_characteristics` – містить дані про відповідність між характеристиками та факторами, що використовуються для визначення показників «розумності»;
- таблиця `cities` – містить назви та опис міст обома мовами, кількість мешканців тощо.

Додаткові таблиці автоматично генеруються ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» за допомогою попередньо сформованих запитів СКБД в процесі оцінювання певного міста.

Розробка ПАК здійснювалась засобами Microsoft Visual Studio з використанням мови програмування C# та методології об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). Розроблено графічний користувацький інтерфейс. ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» сформовано з використанням семи основних класів. Але цей перелік містить класи, що використовуються зовнішніми бібліотеками. Основні класи для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст»:

- клас `Program` – основний клас, відповідальний за запуск програм;
- клас `EnterUser` – форма авторизації користувача;
- клас `RegisterNewUser` – форма реєстрації нового користувача;
- клас `Run` – основна робоча область ПАК, де здійснюється опрацювання даних та отримання результатів;
- клас `Statistic` – форма із діаграмою, що відображає статистичні результати опитування мешканців міст;
- клас `RegisterNewCity` – форма для реєстрації нового міста;
- клас `Evaluate` – форма для здійснення оцінки ваг показників «розумності».

На рис. 4.8 подано діаграму класів ПАК «Визначення розумності міста».

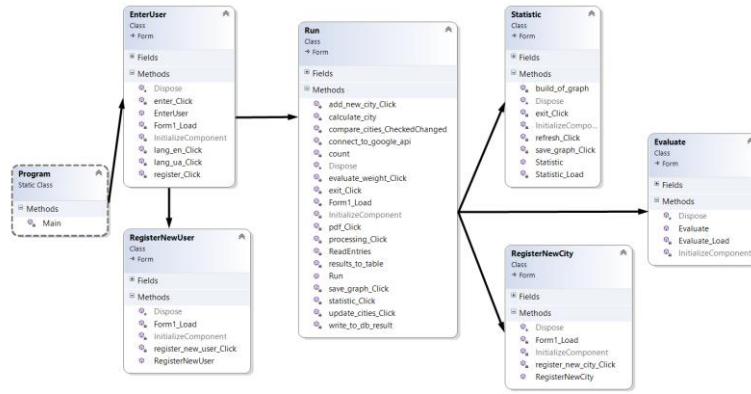


Рис. 4.8. Діаграма класів ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем

Діаграму послідовності для ПАК «Визначення розумності міста» подано на рис. 4.9.

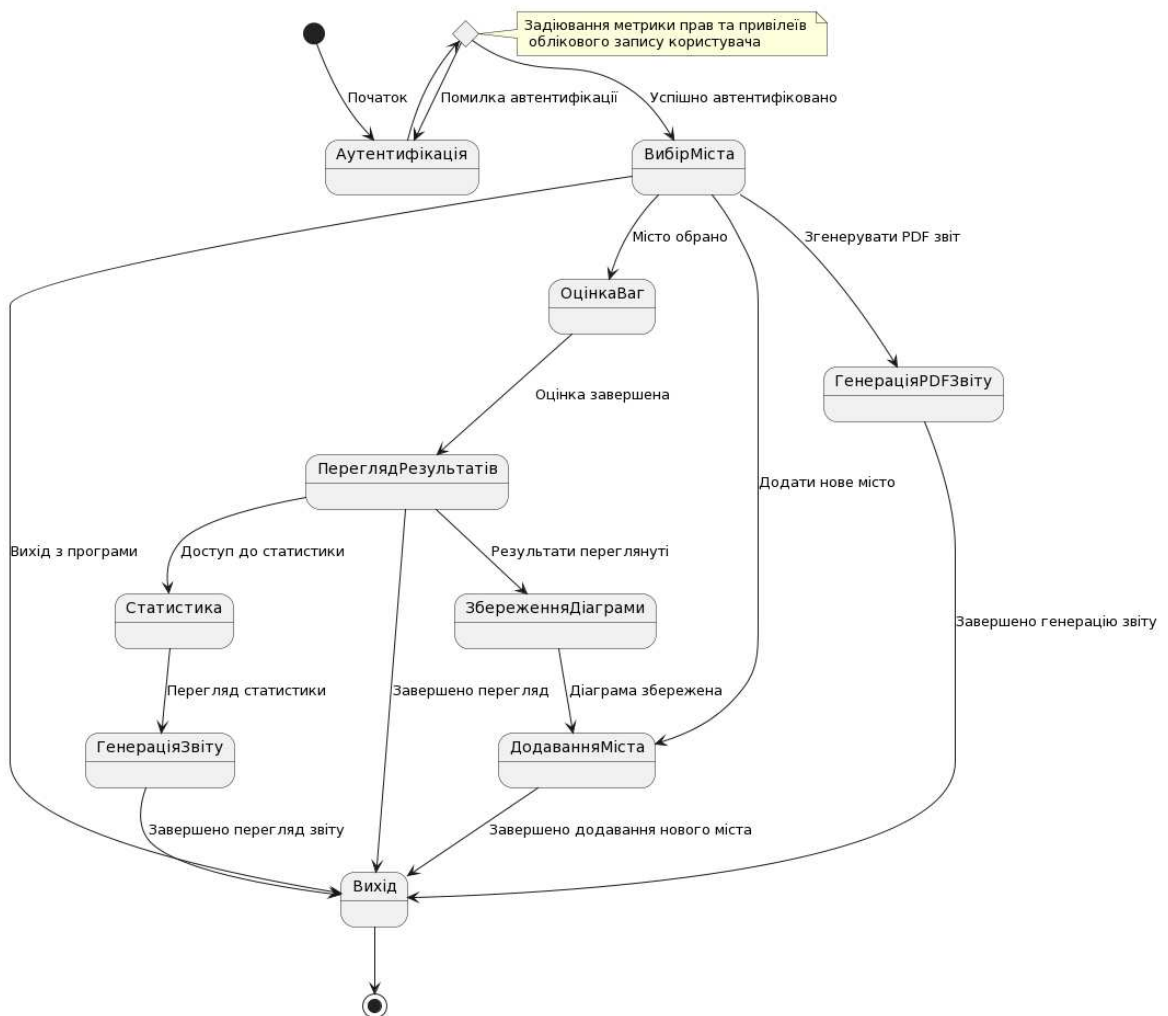


Рис. 4.9. Діаграма послідовності ключових етапів функціонування ПАК для оцінювання «розумності»

На основі переліку функціональних вимог, структури бази даних та діаграми класів (див. рис. 4.10) розроблено ПАК «Визначення розумності міста», у додатку Е подано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

На рис. 4.10 подано інтерфейс діалогового вікна для авторизації користувачів ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст».

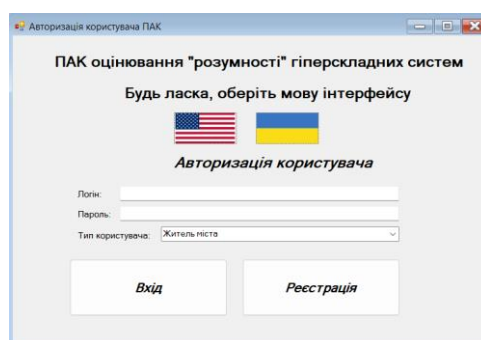


Рис. 4.10. Діалогове вікно для авторизації користувачів у ПАК для оцінювання «розумності»

При цьому користувач має змогу обирати мову інтерфейсу, ввести авторизаційні дані та у випадку коректного вводу інформації, буде відкрито діалогове вікно «Визначення розумності міста», інакше буде відображено вікно із повідомленням про помилковість введеної інформації. При необхідності реєстрації, за допомогою кнопки «Реєстрація» можна відкрити відповідне діалогове вікно (див. рис. 4.11).

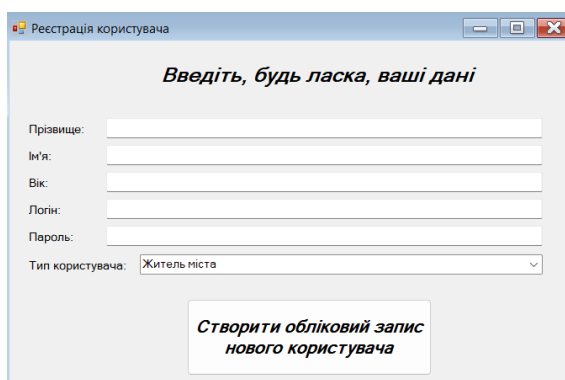


Рис. 4.11. Діалогове вікно «Авторизація у програмі»

У цьому вікні можна ввести дані нового користувача, обрати його тип, оскільки різні типи користувачів мають визначені різні рівні доступу, функціональні набори, права та привілеї при використанні ПАК для оцінювання «розумності» гіперскладних систем «розумних міст».

На рис. 4.12 зображено інтерфейс ПАК для визначення «розумності» гіперскладної системи «Розумне місто».

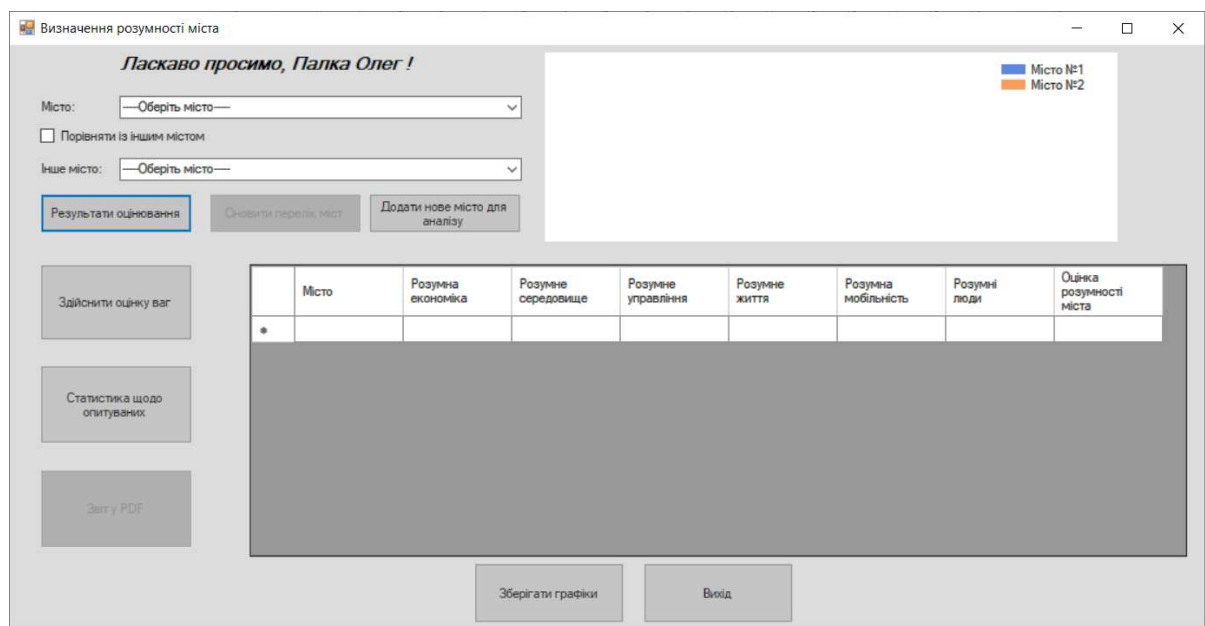


Рис. 4.12. Інтерфейс ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладної системи «Розумне місто»

У діалоговому вікні ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» для користувачів доступні:

- Кнопка «Результати оцінювання», яка спрацьовує при обранні міста для аналізу. Дає змогу ввести значення характеристик у таблиці та стовпчиковій діаграмі. При обранні опції «Порівняти із іншим містом» та виборі другого міста буде відображено дані для обох міст.

- Кнопка «Здійснити оцінку ваг» дає змогу відкривати нове вікно «Оцінка ваг».

- Кнопка «Статистика щодо опитуваних» – відкриває одноіменне нове вікно з інформацією щодо статистичного опитування громадян».
- Кнопка «Звіт у PDF» доступна при оцінюванні одного міста. Вона дає можливість згенерувати файл звіту та зберегти його у поточній папці з .exe-файлом ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст».
- Кнопка «Додати нове місто для аналізу» відкриває діалогове вікно «Додавання нового міста».
- Кнопка «Зберегти графіки» дає змогу зберегти спродуковані діаграми у вигляді окремих файлів.
- Кнопка «Вихід» – завершити роботу ПАК та всіх процесів оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем.

Подамо перелік основних функцій ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст» ключових користувачів:

- Авторизація – використовується для аутентифікації користувачів та формування набору функціональних можливостей. У випадку відсутності облікового запису користувача відбувається реєстрація.
- «Вибір міста» – дає змогу обирати місто або міста для проведення аналізу.
- Функція «Оцінювання ваг індикаторів» – при необхідності дає змогу здійснити коректування вагових коефіцієнтів індикаторів оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем.
- «Перегляд результатів і графіків» дає змогу користувачам переглядати результати оцінювання показників «розумності» та відповідні графіки.
- Функція «Збереження діаграм» використовується для ініціалізації процесу збереження діаграм. Ця функція доступна для всіх груп користувачів, крім «Жителя міста».

- Функціонал «Додавання нового міста» доступний лише для користувачів з набором привілеїв «Модератор» або «Адміністратор», які можуть додавати нові міста до аналітичного переліку.

- Функція «Статистика опитуваних» дає можливість перегляду статистичних результатів опитування громадян та експертів тільки для облікових записів користувачів типу «Модератор» та «Адміністратор».

- Функціонал «Генерування звіту у форматі PDF» доступний лише для користувачів з наборами прав та привілеїв «Модератор» та «Адміністратор», які можуть генерувати звітну інформацію у форматі PDF.

- Функція «Вихід» дає змогу завершувати роботу ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст».

Користувачі з обліковими записами різних типів мають доступ до різних функціональних наборів при використанні ПАК:

- Функціональний набір «Житель міста» містить п'ять ключових елементів.

- Функціонал «Представники муніципалітету» та «Представники міських організацій» об'єднує шість процесів.

- Функціональні набори «Модератор» та «Адміністратор» узагальнюють до дев'яти ключових процесів.

Після авторизації користувачів відбувається автоматичне відкриття головного робочого вікна ПАК для оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст», зокрема на рис. 4.13 подано результати оцінювання міста Тернопіль.

На підставі отриманих результатів можемо зробити висновок, що на момент оцінювання показників «розумності» у м. Тернопіль найбільш розвинуті такі сфери: «розумна економіка», «розумне середовище проживання» та «розумне урядування». Однак спродуковані ПАК рекомендації для міського керівництва акцентують увагу на перспективності покращення показників «розумних людей» та «розумного життя».

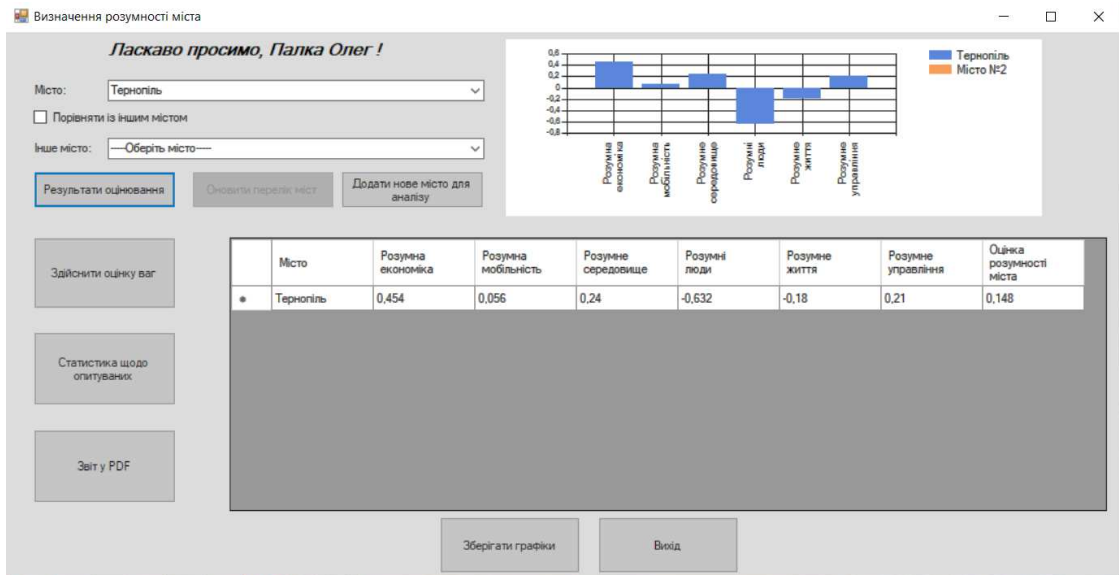


Рис. 4.13. Результати оцінювання показників «розумності» міста Тернопіль

На рис. 4.14 подано порівняння показників «розумності» Львова і Тернополя.

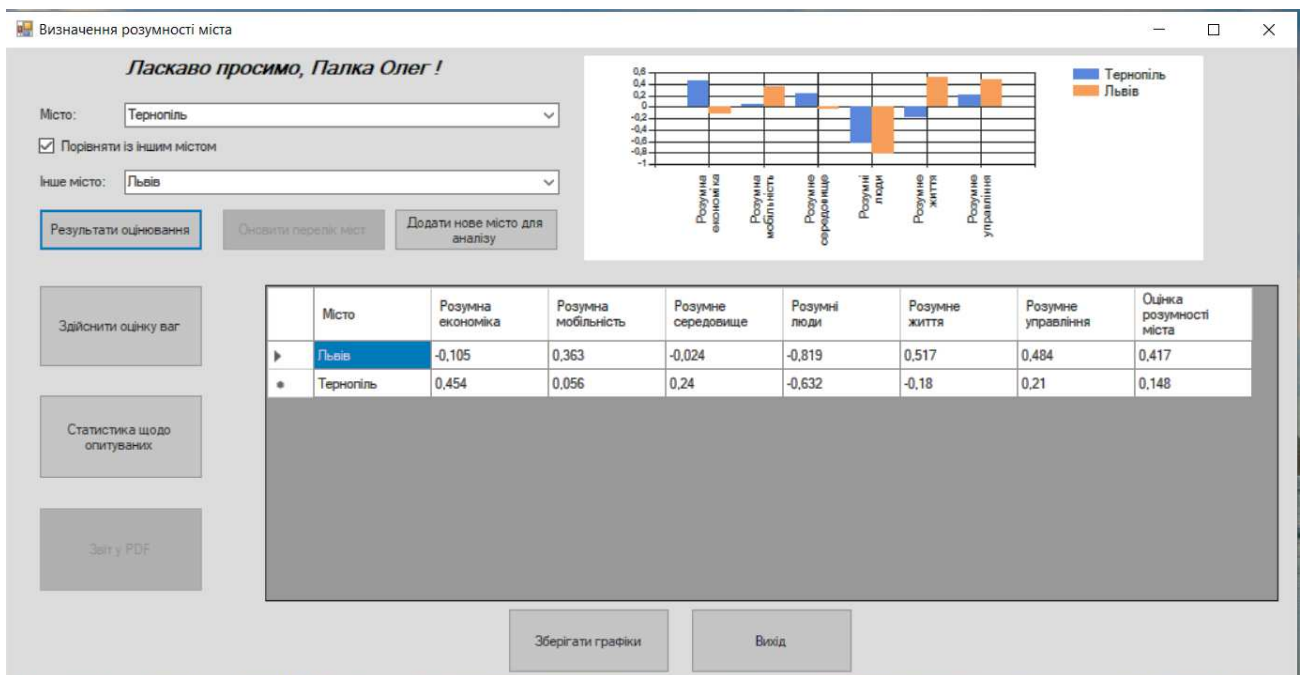


Рис. 4.14. Результати оцінювання показників «розумності» в режимі порівняння міст

На рис. 4.15 зображено частину згенерованого PDF-звіту щодо результатів оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем міста Тернопіль.

table_of_results_Ternopil_UA

ID	Indicators	X	W	Z_score	Factors	F	Characteristics	C	Smart_City_Index
1	Рівень самозайнятості	85,65	2	1,116	Підприємство	1,769	Розумна економіка	0,454	0,148
2	Зареєстровані нові підприємства	83,21	1,333	0,979	Продуктивність	-0,678	Розумна мобільність	0,056	
3	ВВП на одну зайняту особу	56,67	1,333	-0,508	Гнучкість ринку праці	0,27	Розумне середовище	0,24	
4	Рівень безробіття	41,32	1,222	-1,369	Місцева та міжнародна доступність	0,632	Розумні люди	-0,632	
5	Питома вага в умовах неповної зайнятості	95,36	1,333	1,66	Наявність ІКТ-інфраструктури	-0,304	Розумне життя	-0,18	

Рис. 4.15. Згенерований PDF-звіт звіту щодо результатів оцінювання показників «розумності»

У згенерованому звіті міститься понад п'ятдесят рядків із даними щодо показників, понад двадцять п'ять рядків із значеннями факторів, шість рядків із значеннями характеристик та загальна комплексна оцінка показників «розумності» міста. Оновлення звіту дасть можливість виявити переваги та недоліки гіперскладних систем «розумних міст», будучи корисним для представників місцевої влади для внесення удосконалення міських «розумних» послуг та сервісів.

Запропонований в дисертаційному дослідженні метод та розроблений ПАК дають змогу здійснювати оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем сучасних міст для системного покращення інформаційно-технологічних інструментів для «розумних» цифрових послуг.

4.4 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі отримано важливі результати дисертаційного дослідження, зокрема:

1. Розроблено метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічних платформ на основі оригінального застосування принципу Парето, що дало змогу сформувати комплексну множину засобів та інструментів оцінювання результатів практичної реалізації інформаційно-технологічної платформи для формування гіперскладної системи «Розумне місто». На основі вибору методом головного критерію із множини Парето для оцінювання впровадження інформаційно-технологічних платформ «розумного міста» рекомендовано застосовувати індекс «розумності» міста.

2. Розроблено оригінальний метод оцінювання показників «розумності» гіперскладної міської системи, який на відміну від існуючих враховує різномірні характеристики її елементів. Метод використано для оцінювання показників «розумності» українських міст.

3. Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс, який може застосовуватись як інструмент оцінювання показників «розумності» міст за розширеними наборами характеристик та множинами критеріїв гіперскладної системи «Розумне місто».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання – розроблення методів, засобів та інструментів для формування інформаційно-технологічних платформ гіперскладної системи «Розумне місто».

Основні наукові й практичні результати роботи полягають в наступному:

1. У результаті проведеного аналізу інформаційних та комунікаційних технологій, інформаційно-технологічних платформ та моделей інформаційно-технологічної архітектури «розумних міст», запропоновано множину характеристик, факторів та критеріїв для формування інструментів, що на відміну від існуючих, забезпечує сталість процедур оцінювання показників «розумних міст».

2. Розроблено метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» з використанням правила Байєса, що на відміну від існуючих, надав можливість адаптації ймовірнісних показників критеріїв відповідно до мінливих характеристик гіперскладної системи «Розумне місто».

3. Розроблено метод вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» з використанням методу Сааті для вирішення багатокритеріальної задачі на основі оригінальної узагальненої множини категорій, що, на відміну від існуючих, дало змогу розширити умови вибору критеріїв для гіперскладної системи «Розумне місто».

4. Створено інформаційно-технологічні інструменти для супроводу процесів консолідації, аналітичного опрацювання та візуалізації даних в гіперскладній системі «Розумне місто» у вигляді інформаційних панелей з рекомендаційними функціями для виявлення проблемних локацій водопровідної мережі на основі «відкритих даних» щодо запитів громадян до КП «Тернопільводоканал» і установ та організацій при отриманні дозволів на обслуговування міської інфраструктури.

5. Розроблено метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічних платформ, при цьому оригінальне застосування принципу Парето

дало змогу сформуванню комплексної множини засобів та інструментів оцінювання практичної реалізації інформаційно-технологічних платформ «розумного міста».

6. Розроблено оригінальний метод оцінювання показників «розумності» гіперскладної системи «Розумне місто», який на відміну від існуючих враховує різноманітні характеристики її елементів. Метод використано для оцінювання «розумності» українських міст.

7. Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс, який може застосовуватись як інструмент оцінювання показників «розумності» міст за розширеними наборами характеристик та множинами критеріїв гіперскладної системи «Розумне місто».

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] E. Koomen, M.S. van Bommel, J. van Huijstee, B.P.J. André, P.A. Ferdinand, and F.J.A. van Rijn, "An integrated global model of local urban development and population change," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 100, pp. 101935, 2023.
- [2] S. Cividino, R. Halbac-Cotoara-Zamfir, and L. Salvati, "Revisiting the 'City Life Cycle': Global Urbanization and Implications for Regional Development," *Sustainability*, vol. 12, no. 3, pp. 1151, 2020.
- [3] S. Zhang, J. Ding, H. Zheng, and H. Wang, "Does spatial functional division in urban agglomerations reduce negative externalities in large cities? Evidence from urban agglomerations in China," *Heliyon*, vol. 9, e20419, 2023.
- [4] D. Mekonen, A. Bazezew, M. Anteneh, and T. Kassie, "Analysis of food security using various indicators for policy implications: Empirical evidence from the two large cities of Bahir Dar and Gondar, the Amhara region, Ethiopia," *Geo: Geography and Environment*, vol. 10, e00122, 2023.
- [5] О. Палка, А. Шум'як, М. Потикевич, «Аналіз терміну Smart City,» XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 79-80, 2019.
- [6] 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.
- [7] O. Palka, A. Stanko, 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.
- [8] D. Kumar, "The Conception and Discourse of Smart City," *Smart Cities and Regional Development Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 71-84, 2023.

- [9] Google Trends – smart city. Доступно: <https://trends.google.com/trends/explore?date=all&q=smart%20city>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [10] World Competitiveness Center. IMD Smart City Index 2023. Доступно: <https://www.imd.org/wp-content/uploads/2023/06/SmartCityIndex-2023-V8.pdf>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [11] P. Lee, W.C. Hunter, and N. Chung, "Smart Tourism City: Developments and Transformations," *Sustainability*, vol. 12, no. 3958, 2020.
- [12] O. Palka, O. Duda, V. Pasichnyk, O. Matsiuk, N. Kunanets and D. Tabachyshyn, «Existing City Assessment Systems,» 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, 2020, pp. 238-241, ISSN 2766-3639 (Online), ISSN 2766-3655 (Print), doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321907.
- [13] Я.І. Вихлюк, Р.М. Камінський, В.В. Пасічник Моделювання складних систем: посібник / Львів: Видавництво «Новий Світ – 2000», 2020. – 404 с.
- [14] T. Love and T. Cooper, "Variety Dynamics: A New Body of Systems Methods and a New Mathematical Field for Management and Control of Dynamically Complex Multi-Actor Systems," *Journal of the International Society for the Systems Sciences*, 67th Meeting of the International Society for the Systems Sciences, 2023.
- [15] K.C. Laudon and J.P. Laudon, "Management Information Systems: Managing the Digital Firm," Pearson Prentice Hall, vol. 16, 2020.
- [16] О. Палка, «Огляд технологічних інструментів розумного міста,» IX Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 62, 2020.
- [17] 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, pp. 5206, 2023.

- [18] A.S. Syed, D. Sierra-Sosa, A. Kumar, and A. Elmaghraby, "IoT in Smart Cities: A Survey of Technologies, Practices and Challenges," *Smart Cities*, vol. 4, pp. 429-475, 2021.
- [19] P. Bellini, P. Nesi, and G. Pantaleo, "IoT-Enabled Smart Cities: A Review of Concepts, Frameworks and Key Technologies," *Applied Sciences*, vol. 12, 1607, 2022.
- [20] F.M. Talaat, and H. ZainEldin, "An improved fire detection approach based on YOLO-v8 for smart cities," *Neural Computing and Applications*, vol. 35, pp. 20939-20954, 2023.
- [21] 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, e12262, pp. 1-25, 2023.
- [22] B. Foubert, and N. Mitton, "Long-Range Wireless Radio Technologies: A Survey," *Future Internet*, vol. 12, no. 13, pp. 1-17, 2020.
- [23] J. Kandt, and M. Batty, "Smart cities, big data and urban policy: Towards urban analytics for the long run," in *Proceedings of the 109th volume of Cities*, pp. 102992, 2021.
- [24] M. Zhao, and C. Xing, "Research on the Application of Big Data Technology in Smart City," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Internet of Things and Smart City (IoTSC 2023)*, Vol. 12708, pp. 691-696, 2023.
- [25] A. Osman, "Smart Cities and Big Data Analytics: A Data-Driven Decision-Making Perspective," *Luleå University of Technology*, 2023.
- [26] S. F. Mohd Radzi, M. S. Hassan, and N. S. Shaari, "Security, Sustainability, and Legal Issues of Blockchain Technology Implementation: A Short Literature Review," in *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 275-281, 2023.
- [27] M. Fiore and M. Mongiello, "Blockchain for smart cities improvement: an architecture proposal," in *2023 7th International Conference on Computer, Software and Modeling (ICCSM 2023)*, pp. 1-5, IEEE, 2023.

- [28] J. Xie, H. Tang, T. Huang, F. R. Yu, R. Xie, J. Liu, and Y. Liu, "A survey of blockchain technology applied to smart cities: Research issues and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2794–2830, 2019.
- [29] A. Rejeb, K. Rejeb, S. J. Simske, and J. G. Keogh, "Blockchain technology in the smart city: A bibliometric review," *Quality & Quantity*, vol. 56, no. 5, pp. 2875–2906, 2022.
- [30] N.F.M. Shari and A. Malip, "State-of-the-art solutions of blockchain technology for data dissemination in smart cities: A comprehensive review," *Computer Communications*, vol. 189, pp. 120-147, 2022.
- [31] S. Achar, "The Intersection of Cloud Computing and Smart Cities: An Exploratory Review of Applications and Challenges in Deployment," in *2022 5th International Conference on Applied Research in Artificial Intelligence and Cloud Computing*, pp. 38–54, IEEE, 2022.
- [32] A. Kumar, S. B. Khan, S. K. Pandey, A. Shankar, C. Maple, A. Mashat, and A. A. Malibari, "Development of a cloud-assisted classification technique for the preservation of secure data storage in smart cities," *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, vol. 12, no. 1, p. 92, 2023.
- [33] R. Dirik and M. Dirik, "Artificial Intelligence and Communication Technologies in Smart Cities," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, no. 1, pp. 317-325, April 2023.
- [34] Y. K. Dwivedi, L. Hughes, E. Ismagilova, G. Aarts, C. Coombs, T. Crick, Y. Duan, R. Dwivedi, M. Janssen, et al., "Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy," *International Journal of Information Management*, vol. 57, 101994, 2021.
- [35] I. Pratama and S. Suswanta, "Artificial Intelligence in Realizing Smart City through City Operation Center," in *Proceedings of the International Conference*

- on Public Organization (ICONPO 2021), *Advances in Economics, Business and Management Research*, vol. 209, pp. 53-60, 2022.
- [36] H.M.K.K.M.B. Herath, and M. Mittal, "Adoption of artificial intelligence in smart cities: A comprehensive review," *International Journal of Information Management Data Insights*, vol. 2, 100076, 2022.
- [37] M. Mohseni, F. Amirghafouri, and B. Pourghebleh, "CEDAR: A cluster-based energy-aware data aggregation routing protocol in the internet of things using capuchin search algorithm and fuzzy logic," *Peer-to-Peer Networking and Applications*, Oct. 2022.
- [38] C. Han and X. Fu, "Challenge and Opportunity: Deep Learning-Based Stock Price Prediction by Using Bi-Directional LSTM Model," *Frontiers in Business, Economics and Management*, vol. 8, no. 2, pp. 51-54, 2023.
- [39] S. Mehta, B. Bhushan, and R. Kumar, "Machine learning approaches for smart city applications: Emergence, challenges and opportunities," *Recent Advances in Internet of Things and Machine Learning: RealWorld Applications*, pp. 147-163, 2022.
- [40] X. Dou, W. Chen, L. Zhu, Y. Bai, Y. Li, and X. Wu, "Machine Learning for Smart Cities: A Comprehensive Review of Applications and Opportunities," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 14, no. 9, pp. 999-1016, 2023.
- [41] X. Zhou, H. Liu, F. Pourpanah, T. Zeng, and X. Wang, "A survey on epistemic (model) uncertainty in supervised learning: Recent advances and applications," *Neurocomputing*, vol. 489, pp. 449-465, 2022.
- [42] S. N. H. Bukhari, J. Webber, and A. Mehbodniya, "Decision tree based ensemble machine learning model for the prediction of Zika virus T-cell epitopes as potential vaccine candidates," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 7810, 2022.

- [43] A. Sharma, E. Podoplelova, G. Shapovalov, A. Tselykh, and A. Tselykh, "Sustainable smart cities: convergence of artificial intelligence and blockchain," *Sustainability*, vol. 13, no. 23, p. 13076, 2021.
- [44] R. Godahewa, C. Deng, A. Prouzeau, and C. Bergmeir, "A generative deep learning framework across time series to optimize the energy consumption of air conditioning systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 6842-6855, 2022.
- [45] R. Olu-Ajayi, H. Alaka, I. Sulaimon, F. Sunmola, and S. Ajayi, "Building energy consumption prediction for residential buildings using deep learning and other machine learning techniques," *Journal of Building Engineering*, vol. 45, p. 103406, 2022.
- [46] M. Saleem, S. Abbas, T. M. Ghazal, M. A. Khan, N. Sahawneh, and M. Ahmad, "Smart cities: Fusion-based intelligent traffic congestion control system for vehicular networks using machine learning techniques," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 417-426, 2022.
- [47] H. Kosarirad, M. Ghasempour Nejati, A. Saffari, M. Khishe, and M. Mohammadi, "Feature selection and training multilayer perceptron neural networks using grasshopper optimization algorithm for design optimal classifier of big data sonar," *Journal of Sensors*, vol. 2022, 2022.
- [48] S. Tiwari, A. Jain, K. Yadav, and R. Ramadan, "Machine learning-based model for prediction of power consumption in smart grid," *Int. Arab J. Inf. Technol.*, vol. 19, no. 3, pp. 323-329, 2022.
- [49] X. Li, D. Zhang, Y. Zheng, W. Hong, W. Wang, J. Xia, and Z. Lv, "Evolutionary computation-based machine learning for Smart City high-dimensional Big Data Analytics," *Applied Soft Computing*, vol. 133, p. 109955, 2023.
- [50] K. D. C. Adje, A. Ben Letaifa, M. Haddad, and O. Habachi, "Smart City Based on Open Data: A Survey," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 56726-56748, 2023.
- [51] R. Rattle, "Negotiating Privacy and Trust in the Geoaware Smart City," Doctor of Philosophy dissertation, School of Communication, Faculty of Creative

Industries, Education and Social Justice, Queensland University of Technology, 2023.

- [52] A. E. Prieto, J. Mazón, and A. Lozano-Tello, "Framework for prioritization of open data publication: An application to smart cities," *IEEE Trans. Emerg. Topics Comput.*, vol. 9, no. 1, pp. 131–143, 2021.
- [53] C. D. Kokane, G. Mohadikar, S. Khapekar, B. Jadhao, T. Waykole, and V. V. Deotare, "Machine Learning Approach for Intelligent Transport System in IOV-Based Vehicular Network Traffic for Smart Cities," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 11, no. 11s, pp. 06-16, 2023.
- [54] PAS 180 Smart Cities Vocabulary. Доступно: <https://www.bsigroup.com/en-GB/smart-cities/SmartCities-Standards-and-Publication/PAS-180-smart-cities-terminology/>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [55] PAS 181 Smart City Framework. Доступно: <https://www.bsigroup.com/en-GB/smart-cities/SmartCities-Standards-and-Publication/PAS-181-smart-cities-framework/>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [56] C. S. Lai, Y. Jia, Z. Dong, D. Wang, Y. Tao, Q. H. Lai, R. T. K. Wong, A. F. Zobaa, R. Wu, and L. L. Lai, "A Review of Technical Standards for Smart Cities," *Clean Technologies*, vol. 2, pp. 290-310, 2020.
- [57] D. Palmer, S. Alfi, and K. van Dam, "Mapping Smart City Standards-Based on a data flow model," British Standards Institution (BSI). Доступно: <https://www.bsigroup.com/LocalFiles/en-GB/smart-cities/resources/BSI-smart-cities-report-Mapping-Smart-City-Standards-UK-EN.pdf>. Дата доступа: липень, 2023.
- [58] A. Ntafalias, G. Papadopoulos, P. Papadopoulos, and A. Huovila, "A Comprehensive Methodology for Assessing the Impact of Smart City Interventions: Evidence from Espoo Transformation Process," *Smart Cities*, vol. 5, no. 1, pp. 90–107, 2022.

- [59] K. Kuru and D. Ansell, "TCitySmartF: A Comprehensive Systematic Framework for Transforming Cities Into Smart Cities," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 18615-18644, 2020.
- [60] D. Demirel, "The Impact of Managing Diversity on Building the Smart City A Comparison of Smart City Strategies: Cases From Europe, America, and Asia," *SAGE Open*, vol. 13, no. 3, pp. 1-18, 2023.
- [61] E. Hodson et al., "Evaluating Social Impact of Smart City Technologies and Services: Methods, Challenges, Future Directions," *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 7, no. 3, p. 33, 2023.
- [62] M. A. U. R. Tariq, M. Hussein, and N. Muttill, "Smart City Ranking System: A Supporting Tool to Manage Migration Trends for Australian Cities," *Infrastructures*, vol. 6, no. 3, p. 37, 2021.
- [63] О. Палка, А. Шум'як, М. Потикевич, «Аналіз методів визначення розумності міста,» XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 67, 2019.
- [64] О. Палка, Т. Склярова, А. Шум'як, «Аналіз методу оцінювання розумності міста у Туреччині,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 80, 2019.
- [65] D. Li, W. Wang, G. Huang, S. Zhou, S. Zhu, and H. Feng, "How to Enhance Citizens' Sense of Gain in Smart Cities? A SWOT-AHP-TOWS Approach," *Social Indicators Research*, vol. 165, no. 3, pp. 787-820, 2022.
- [66] A. Khamseh, S. S. Ghasemi, and A. Khamseh, "A Model for the Success of Smart City Services with a Focus on Information and Communication Technology," *International Journal of Supply and Operations Management*, vol. 10, no. 1, pp. 76–88, 2023.
- [67] Z. Liu and J. Wu, "A Review of the Theory and Practice of Smart City Construction in China," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7161, 2023.

- [68] W.K.N.C. Withanage, D.C. Wijesinghe, and M.D.K.L. Gunathilaka, "A Quality of Life Index for a Rural Periphery in Sri Lanka Using GIS Multi-Criteria Decision Analysis Techniques," preprint, uploaded by W.K.N.C. Withanage on 22 June 2023, accessed on ResearchGate, April 2023.
- [69] C. Nikoloudis et al., "An Evaluation Model for Smart City Performance with Less Than 50,000 Inhabitants: A Greek Case Study," Proceedings of the 9th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems, 2020.
- [70] IESE, "IESE Cities in Motion Index". Доступно: <https://media.iese.edu/research/pdfs/ST-0633-E.pdf>. Дата доступа: серпень, 2023.
- [71] Bloom Consulting, "Digital city index". Доступно: <https://www.digitalcityindex.com/>. Дата доступа: серпень, 2023.
- [72] M. Holzer, A. Manoharan, and J. Melitski, "Global E-Government Survey Shows Increased Performance Among Cities Globally," E-Governance Institute, 2020.
- [73] A. C. van den Berg, S. N. Giest, S. M. Groeneveld, and W. Kraaij, "Inclusivity in Online Platforms: Recruitment Strategies for Improving Participation of Diverse Sociodemographic Groups," Public Administration Review, vol. 80, no. 6, pp. 989–1000, 2020.
- [74] Innovation cities index. Доступно: <https://www.innovation-cities.com/city-rankings-2021/>. Дата доступа: серпень, 2023.
- [75] Eden Strategy Institute. About. Доступно: <https://www.edenstrategyinstitute.com/about/>. Дата доступа: серпень, 2023.
- [76] C.K. Toh, "Smart city indexes, criteria, indicators and rankings: An in-depth investigation and analysis," IET Smart Cities, vol. 4, pp. 211-228, 2022.
- [77] B. Lanvin, "Asian and European citizens see their cities as the 'smartest', finds 2023 IMD Smart City Index - IMD News". Доступно: <https://www.imd.org/news/competitiveness/asian-and-european-citizens-see->

- their-cities-as-the-smartest-finds-2023-imd-smart-city-index/. Дата доступу: серпень, 2023.
- [78] AT Kearney GLOBAL CITIES INDEX REPORTS From 2008 – 2023. Доступно: <https://www.kearney.com/global-cities/previous-indices>. Дата доступу: серпень, 2023.
- [79] Cities Of The Future Index. Доступно: <https://easyparkgroup.com/studies/cities-of-the-future/en/>. Дата доступу: серпень, 2023.
- [80] 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**.
- [81] О. Палка, А. Шум'як, І. П'ятківський, «Аналіз інтелектуальних транспортних систем,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 107, 2019.
- [82] H. Ichikawa, H. Takenaka, et al., "Global Power City Index 2022: The Comprehensive Ranking and Analysis of City Competitiveness," Institute for Urban Strategies, The Mori Memorial Foundation, 2022.
- [83] SmartEcoCity Index. Доступно: <https://www.smartecocity.com/smartecocity-index/>. Дата доступу: липень, 2023.
- [84] 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.
- [85] S. Silvestri, and M. Ciampi, "A Platform to Support the Implementation of Smart City Systems," Institute of High Performance Computing and Networking (ICAR), National Research Council of Italy (CNR), 2023.
- [86] P. Nesi, L. Po, J. R. R. Viqueira, and R. T. Lado, "An Integrated Smart City Platform." Доступно: <https://www.researchgate.net/profile/Laura->

Po/publication/322999093_An_Integrated_Smart_City_Platform/links/5a8be53c458515b8af96a987/An-Integrated-Smart-City-Platform.pdf. Дата доступа: серпень, 2023.

- [87] S. Bergamaschi, D. Beneventano, A. Corni, E. Kazazi, M. Orsini, L. Po, and S. Sorrentino, "The open source release of the MOMIS data integration system. In: Proceedings of the Nineteenth Italian Symposium on Advanced Database Systems (SEBD)." Доступно: https://www.researchgate.net/profile/Sonia-Bergamaschi/publication/268289419_The_Open_Source_release_of_the_MOMIS_Data_Integration_System/links/54bce3ab0cf29e0cb04c5300/The-Open-Source-release-of-the-MOMIS-Data-Integration-System.pdf. Дата доступа: серпень, 2023.
- [88] R. Yus, V. Mulwad, T. Finin, and E. Mena, "Infoboxer: Using statistical and semantic knowledge to help create wikipedia infoboxes." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/265249567_Infoboxer_Using_Statistical_and_Semantic_Knowledge_to_Help_Create_Wikipedia_Infoboxes. Дата доступа: серпень, 2023.
- [89] P. Bellini, M. Benigni, R. Billero, P. Nesi, and N. Rauch, "Km4city ontology building vs data harvesting and cleaning for smart-city services." Доступно: https://www.researchgate.net/profile/Paolo-Nesi/publication/264286780_Km4City_Ontology_Building_vs_Data_Harvesting_and_Cleaning_for_Smart-city_Services/links/53f4529c0cf256ab87b7adc0/Km4City-Ontology-Building-vs-Data-Harvesting-and-Cleaning-for-Smart-city-Services.pdf. Дата доступа: серпень, 2023.
- [90] M.A. Regueiro, J.R.R. Viqueira, C. Stasch, and J.A. Taboada, "Semantic mediation of observation datasets through sensor observation services." Доступно: https://citius.usc.es/sites/default/files/publicacions_preprints/ODSM-SOS.pdf. Дата доступа: серпень, 2023.

- [91] M.A. Regueiro, J.R.R. Viqueira, J.A. Taboada, and J.M. Cotos, "Virtual integration of sensor observation data." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/275103808_Virtual_integration_of_sensor_observation_data. Дата доступа: сепень, 2023.
- [92] E. Curry, "The big data value chain: Definitions, concepts, and theoretical approaches." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/280625243_The_Big_Data_Value_Chain_Definitions_Concepts_and_Theoretical_Approaches. Дата доступа: вересень, 2023.
- [93] D. Beneventano, S. Bergamaschi, L. Gagliardelli, and L. Po, "Driving innovation in youth policies with open data". Доступно: https://www.researchgate.net/publication/312660437_Driving_Innovation_in_Youth_Policies_with_Open_Data. Дата доступа: вересень, 2023.
- [94] S. K. Mishra, and A. Sarkar, "Service-oriented architecture for Internet of Things: A semantic approach," *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 3, pp. 8765–8776, 2022.
- [95] P. Nesi, P. Bellini, and I. Bruno, "Graph databases lifecycle methodology and tool to support index/store versioning." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/300465649_Graph_Databases_Lifecycle_Methodology_and_Tool_to_Support_IndexStore_Versioning. Дата доступа: вересень, 2023.
- [96] T. Berners-Lee, "Linked data." Доступно: <https://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [97] F. Benedetti, S. Bergamaschi, and L. Po, "Lodex: A tool for visual querying linked open data." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/291102594_Lodex_A_tool_for_visual_querying_linked_open_data. Дата доступа: вересень, 2023.

- [98] О. Палка, Т. Склярова, «Історія розвитку геоінформаційних систем,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 98, 2019.
- [99] I. Shahrour, S. Ali, Z. Maaziz, and A. Soulhi, "Comprehensive Management Platform for Smart Cities." Доступно: https://www.researchgate.net/profile/Isam-Shahrour/publication/320083239_Comprehensive_Management_Platform_for_Smart_Cities/links/5a3f6920aca272d2944eeb7b/Comprehensive-Management-Platform-for-Smart-Cities.pdf. Дата доступу: вересень, 2023.
- [100] C. Park, and J. Cha, "Analysis of Component Technology for Smart City Platform", International Journal of Advanced Culture Technology, vol. 7, no. 3, pp. 143-148, 2019.
- [101] Amazon Web Services. Доступно: <https://aws.amazon.com>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [102] IBM Watson. Доступно: <https://www.ibm.com/watson>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [103] Azure IoT Central. Доступно: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/iot-central>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [104] Google Cloud. 2021. Доступно: <https://cloud.google.com/>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [105] A. Elberse, "Smart Cities & Communities: Cisco Kinetic for Cities." Доступно: <https://www.ciscolive.com/c/dam/r/ciscolive/emea/docs/2018/pdf/BRKIOT-1493.pdf>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [106] The Leading Cloud Providers Continue to Run Away with the Market. Доступно: <https://www.srgresearch.com/articles/leading-cloud-providers-continue-run-away-market>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [107] AWS IoT. Доступно: <https://aws.amazon.com/iot/>. Дата доступу: вересень, 2023.

- [108] G. Fortino, A. Guerrieri, P. Pace, C. Savaglio, and G. Spezzano, "IoT Platforms and Security: An Analysis of the Leading Industrial/Commercial Solutions," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2196, 2022.
- [109] Watson IoT Platform. Доступно: <https://www.ibm.com/cloud/watson-iot-platform>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [110] A. Kinnunen, "LoRaWAN and IoT Platforms as Part of Remote Energy Metering," Bachelor's Degree Programme Thesis, Technology, Communication and Transport, Savonia University of Applied Sciences, pp. 1-52, 2023.
- [111] What Azure technologies and services can you use to create IoT solutions? Доступно: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot/iot-services-and-technologies>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [112] Google Cloud. Доступно: <https://cloud.google.com/>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [113] Google Cloud IoT Core. Доступно: <https://cloud.google.com/solutions/iot/>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [114] A. Elberse, "IoT Solutions for Smart Cities and Communities." Доступно: <https://www.ciscolive.com/c/dam/r/ciscolive/emea/docs/2020/pdf/BRKIOT-2497.pdf>. Дата доступа: вересень, 2023.
- [115] Cisco Kinetic for Cities Release Notes, Release 4.2. Доступно: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/cloud-systems-management/kinetic/cities/b_ckc_release_notes_4_2/m_release_notes_ckc.html. Дата доступа: вересень, 2023.
- [116] I. Mutambik, A. Almuqrin, F. Alharbi, and M. Abusharhah, "How to Encourage Public Engagement in Smart City Development – Learning from Saudi Arabia," *Land*, vol. 12, no. 1851, pp. 1-16, 2023.
- [117] L. G. Anthopoulos, "Defining smart city architecture for sustainability." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/277958808_Defining_Smart_City_Architecture_for_Sustainability. Дата доступа: вересень, 2023.

- [118] M. Al-Hader, et al., "Smart city components architecture." Доступно: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5350055>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [119] О. Палка, «Мікросервісна архітектура розумного міста,» XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 155-156, 2022.
- [120] О. Палка, «Інтегрована архітектура розумного міста з блокчейном та IoT,» XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 157, 2022.
- [121] C. Harrison, et al., "Foundations for smarter cities." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/224157181_Foundations_for_Smarter_Cities. Дата доступу: вересень, 2023.
- [122] G. Piro, I. Cianci, L. A. Grieco, G. Boggia, and P. Camarda, "Information Centric Services in Smart Cities." Доступно: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0164121213002586>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [123] S. Daniel, and M. A. Doran. "GeoSmartCity: Geomatics contribution to the Smart City." Доступно: https://www.researchgate.net/publication/241687959_GeoSmartCity_Geomatics_contribution_to_the_Smart_City. Дата доступу: вересень, 2023.
- [124] О. Палка, «Аналіз інтегрованої архітектури розумного міста з блокчейном та IoT,» Науковий вісник НЛТУ України, 33(6), ст. 94-99, 2023, ISSN 2519-2477 (Online), ISSN 1994-7836 (Print), doi:10.36930/40330612.
- [125] О. Палка, Л. Дмитроца, «Аналіз мікросервісної архітектури розумного міста,» Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», №6(329), ст. 142-149, 2023, ISSN 2307-5732, doi:10.31891/2307-5732-2023-329-6-142-149.

- [126] L. G. Anthopoulos, and I. A. Tsoukalas, "The implementation model of a Digital City. The case study of the Digital City of Trikala, Greece: e-Trikala." Доступно:
https://www.researchgate.net/publication/230851451_The_implementation_model_of_a_Digital_City_The_implementation_model_of_a_Digital_City_The_case_study_of_the_Digital_City_of_Trikala_Greece_e-Trikala. Дата доступу: вересень, 2023.
- [127] N. Z. Bawany, and A. S. Jawwad "Smart City Architecture: Vision and Challenges." Доступно:
https://pdfs.semanticscholar.org/367c/0305624022395856296886507423224bb80f.pdf?_ga=2.155474811.1776191994.1616006094-390855979.1615720237. Дата доступу: вересень, 2023.
- [128] H. Hamad, M. Saad, and R. Abed, "Performance Evaluation of RESTful Web Services for Mobile Devices." Доступно:
https://www.researchgate.net/publication/50367401_Performance_Evaluation_of_RESTful_Web_Services_for_Mobile_Devices. Дата доступу: вересень, 2023.
- [129] E. Yuan, and J. Tong, "Attributed based access control (ABAC) for web services." Доступно:
https://www.researchgate.net/publication/4186774_Attributed_Based_Access_Control_ABAC_for_web_services. Дата доступу: вересень, 2023.
- [130] J. Manyika, et al. "Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity." Доступно:
https://www.researchgate.net/publication/312596137_Big_data_The_next_frontier_for_innovation_competition_and_productivity. Дата доступу: вересень, 2023.

- [131] М. Є. Фриз, Б. Б. Млинко, “Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Системний аналіз» (для студентів зі спеціальності 126 – інформаційні системи та технології),” ELARTU, 2020. Доступно: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/34139>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [132] M. Fahmideh, J. Yan, J. Shen, D. Mougouei, Y. Zhai and Aakash Ahmad, "A Comprehensive Framework for Analyzing IoT Platforms: A Smart City Industrial Experience," *Smart Cities*, vol. 4, pp. 588–622, 2021.
- [133] O. Palka, N. Kunanets, V. Pasichnyk, O. Matsiuk, and S. Matsiuk, «Comparative Analysis of Smart City Platforms,» *Proceedings of the COLINS-2023: 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (Kharkiv, Ukraine, April 20–21, 2023)*, CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol-3403, pp. 487-499, **ISSN 1613-0073 (Online)**.
- [134] A. Siekelova, I. Podhorska, and J. J. Impola, "Analytic Hierarchy Process in Multiple-Criteria Decision-Making: A Model Example," *SHS Web of Conferences, ECCW 2020*, vol. 90, 01019, 2021.
- [135] T. L. Saaty, and L. G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston, MA: Springer US, 2012.
- [136] Портал відкритих даних Тернополя. Доступно: <https://opendata.ternopilcity.gov.ua/>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [137] Power BI. Доступно: <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi>. Дата доступу: вересень, 2023.
- [138] О. Палка, Л. Дмитроца, «Використання інформаційних дашбордів у розумних містах,» *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*, no. 6, Nov. 2023, pp. 189-91, **ISSN 2707-1049 (Online)**, **ISSN 2707-1030 (Print)**, **doi:10.31713/MCIT.2023.058**.
- [139] Z. Masoumi, and J.L. van Genderen, “Artificial intelligence for sustainable development of smart cities and urban land-use management,” *Geo-spatial Information Science*, pp. 1–25, 2023.

- [140] O. Palka, L. Dmytrotsa, «System Analysis Methodology for Determining the City Smartness,» Proceedings of the ITTAP-2023: The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22-24, 2023), CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol-3628, pp. 554-573, ISSN 1613-0073 (Online).
- [141] Портал відкритих даних «Єдиний державний веб-портал відкритих даних». Доступно: <https://data.gov.ua>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [142] Population of Cities in Ukraine. Доступно: <https://worldpopulationreview.com/countries/cities/ukraine>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [143] О. Палка, О. Мацюк, О. Дуда, В. Пасічник, Н. Кунанець, «Комп'ютерна програма «Визначення розумності міста»,» А.с. про реєстрацію авторського права на твір № 101119, 2020.
- [144] О. Палка, «Огляд КРІ розумного міста,» XII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 392, 2023.
- [145] Concepts, definitions and data sources for the study of urbanization: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Доступно: <https://www.un.org/en/development/desa/population/events/pdf/expert/27/papers/II/paper-Moreno-final.pdf>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [146] OECD/European Commission, "Cities in the World: A New Perspective on Urbanisation," OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, 2020.
- [147] S. Cividino, R. Halbac-Cotoara-Zamfir, and L. Salvati, "Revisiting the 'City Life Cycle': Global Urbanization and Implications for Regional Development," Sustainability, vol. 12, no. 1151, pp. 1-18, 2020.
- [148] R. Giffinger, C. Fertner, H. Kramar, et al., "Smart Cities: Ranking of European Medium-Sized Cities." Доступно:

- https://www.researchgate.net/publication/261367640_Smart_cities_-_Ranking_of_European_medium-sized_cities. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [149] D. Washburn, U. Sindhu, et al., "Helping CIOs understand 'smart city' initiatives: Defining the smart city, its drivers, and the role of the CIO." Доступно: https://s3-us-west-2.amazonaws.com/itworldcanada/archive/Themes/Hubs/Brainstorm/forrester_help_cios_smart_city.pdf. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [150] A. Caragliu, C. Del Bo, and P. Nijkamp, "Smart cities in Europe." Доступно: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10630732.2011.601117>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [151] M. Bouskela, M. Casseb, S. Bassi, and M. Facchina, "The Road toward Smart Cities: Migrating from Traditional City Management to the Smart City." Доступно: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/The-Road-toward-Smart-Cities-Migrating-from-Traditional-City-Management-to-the-Smart-City.pdf>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [152] M. Kleinman, "Cities, Data and Digital Innovation, IMFG Papers on Municipal Finance and Governance." Доступно: <https://ideas.repec.org/p/mfg/wpaper/24.html>. Дата доступу: жовтень, 2023.
- [153] OECD, "Enhancing the Contribution of Digitalisation to the Smart Cities of the Future," OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, 2019.
- [154] A.M. Tîrziu, "Urbanization and Cities of the Future," International Journal for Innovation Education and Research, vol. 8, no. 3, pp. 235-245, 2020.
- [155] OECD, "Smart Cities and Inclusive Growth: Building on the Outcomes of the 1st OECD Roundtable on Smart Cities and Inclusive Growth," OECD Publishing, Paris, 2020.

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. Палка, «Аналіз інтегрованої архітектури розумного міста з блокчейном та IoT,» Науковий вісник НЛТУ України, 33(6), ст. 94-99, 2023, **ISSN 2519-2477 (Online), ISSN 1994-7836 (Print), doi:10.36930/40330612.**
2. О. Палка, Л. Дмитроца, «Аналіз мікросервісної архітектури розумного міста,» Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки», №6(329), ст. 142-149, 2023, **ISSN 2307-5732, doi:10.31891/2307-5732-2023-329-6-142-149.**
3. O. Palka, A. Stanko, 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. Palka, O. Duda, V. Pasichnyk, O. Matsiuk, N. Kunanets and D. Tabachyshyn, «Existing City Assessment Systems,» 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, 2020,

pp. 238-241, ISSN 2766-3639 (Online), ISSN 2766-3655 (Print),
doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321907.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. О. Палка, «Огляд КРІ розумного міста,» XII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 392, 2023.
7. O. Palka, L. Dmytrotsa, «System Analysis Methodology for Determining the City Smartness,» Proceedings of the ITTAP-2023: The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22-24, 2023), CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol-3628, pp. 554-573, **ISSN 1613-0073 (Online)**.
8. О. Палка, Л. Дмитроца, «Використання інформаційних дашбордів у розумних містах,» Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, no. 6, Nov. 2023, pp. 189-91, **ISSN 2707-1049 (Online), ISSN 2707-1030 (Print), doi:10.31713/MCIT.2023.058**.
9. O. Palka, N. Kunanets, V. Pasichnyk, O. Matsiuk, and S. Matsiuk, «Comparative Analysis of Smart City Platforms,» Proceedings of the COLINS-2023: 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (Kharkiv, Ukraine, April 20–21, 2023), CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org), Vol-3403, pp. 487-499, **ISSN 1613-0073 (Online)**.
10. О. Палка, «Мікросервісна архітектура розумного міста,» XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 155-156, 2022.
11. О. Палка, «Інтегрована архітектура розумного міста з блокчейном та IoT,» XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 157, 2022.

12. О. Палка, «Огляд технологічних інструментів розумного міста,» IX Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», ТНТУ, ст. 62, 2020.
13. О. Палка, А. Шум'як, І. П'ятківський, «Аналіз інтелектуальних транспортних систем,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 107, 2019.
14. О. Палка, Т. Склярова, «Історія розвитку геоінформаційних систем,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 98, 2019.
15. О. Палка, Т. Склярова, А. Шум'як, «Аналіз методу оцінювання розумності міста у Туреччині,» VII науково-технічна конференція «Інформаційні моделі, системи та технології», ТНТУ, ст. 80, 2019.
16. О. Палка, А. Шум'як, М. Потикевич, «Аналіз терміну Smart City,» XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 79-80, 2019.
17. О. Палка, А. Шум'як, М. Потикевич, «Аналіз методів визначення розумності міста,» XXI наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, ТНТУ, ст. 67, 2019.


Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. О. Палка, О. Мацюк, О. Дуда, В. Пасічник, Н. Кунанець, “Комп’ютерна програма «Визначення розумності міста,»” А.с. про реєстрацію авторського права на твір № 101119, 2020.

ДОДАТОК Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Проректор з наукової роботи
 Тернопільського національного
 технічного університету ім. І. Пулюя
 Павло МАРУЦАК
 24.10.2023



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи «Побудова гіперскладної системи «розумне місто»: інформаційно-технологічні інструменти» здобувача ступеня доктор філософії PhD за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» Палки Олега Вікторовича в навчальному процесі Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя.

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи здобувача ступеня доктор філософії Палки О. В. використано в навчальному процесі кафедри комп'ютерних наук та кафедри менеджменту та адміністрування. Зокрема, метод вибору засобів оцінювання інформаційно-технологічних платформ «розумного міста» та метод оцінювання показників «розумності» гіперскладних систем «розумних міст», використано при проведенні лекційних занять з дисципліни «Електронні місто та регіон» для студентів освітнього рівня магістр спеціальностей 122 «Комп'ютерні науки» та 281 «Публічне управління та адміністрування».

Використання вказаних результатів у навчальному процесі дало змогу підвищити ступінь проінформованості студентів щодо процесів формування цифрових послуг та застосунків для потреб «розумних громад», «розумних міст» та «розумних регіонів».

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

Ігор БОДНАРЧУК

Завідувач кафедри
 менеджменту та адміністрування
 д.е.н., професор

Олена СОРОКІВСЬКА



**ТЕРНОПІЛЬСЬКА МІСЬКА РАДА
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ТЕРНОПІЛЬВОДОКАНАЛ»**

вул. Старий Поділ, 7, м. Тернопіль, Тернопільська область, 46008
тел./факс: +380 (35) 2525220
e-mail: info@vodokanal.te.ua web: http://www.vodokanal.te.ua
Код ЄДРПОУ 03353845

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор КП «Тернопільводоканал»

Володимир КУЗЬМА

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

**результатів дисертаційного дослідження Палки Олега Вікторовича
«Побудова гіперскладної системи «розумне місто»: інформаційно-
технологічні інструменти» в КП «Тернопільводоканал»**

Результати, отримані Палкою О. В. при виконанні ним дисертаційного дослідження «Побудова гіперскладної системи «розумне місто»: інформаційно-технологічні інструменти», зокрема:

- метод вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста»;
- інформаційно-технологічні інструменти консолідації, аналізу та візуалізації «відкритих даних» «розумних міст»;
- інформаційна панель відстеження звернень громадян в КП «Тернопільводоканал» з можливістю кластеризації геолокаційних даних та рекомендаційними функціями;

взято на аналіз можливості інтеграції для супроводу процесів прийняття рішень щодо виявлення проблемних локацій водопровідної мережі м. Тернопіль.

Впровадження результатів дисертаційної роботи дало б змогу підвищити якість обслуговування абонентів при виконанні аварійних та ремонтних робіт.

Даний акт не є підставою для проведення фінансових розрахунків.

Начальник відділу інформаційних технологій
КП «Тернопільводоканал»

Іван РАКОЧИЙ
26.10.2023

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ЛІМБЕР»

Код ЄДРПОУ: 44557102,

м. Тернопіль, вул. Князя Острозького, 12, 3 пов., e-mail: nteua2011@gmail.com

АКТ

**про впровадження у ТОВ «ЛІМБЕР» результатів дисертації
Олега Вікторовича Палки на тему
«Побудова гіперскладної системи «розумне місто»: інформаційно-
технологічні інструменти»**

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційних досліджень здобувача ступеня доктор філософії PhD за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» ТНТУ ім. І. Пулюя Палки Олега Вікторовича впроваджено у ТОВ «ЛІМБЕР». Застосування запропонованого Олегом Палкою методу вибору моделі інформаційно-технологічної архітектури дало можливість сформуванню множини інструментів для супроводу аналітичних та транспортних процесів ТОВ «ЛІМБЕР». Запропоновані Олегом Палкою інформаційні панелі дали змогу покращити візуалізацію процедур аналізу даних для супроводу процесів прийняття оперативних рішень ТОВ «ЛІМБЕР».

Даний акт не є підставою для проведення фінансових розрахунків.

Термін впровадження листопад 2023 року.

Директор ТОВ «ЛІМБЕР» _____



Наталія ГАВРИЛЮК

02.11.2023

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«МЕРКАДА»

Код ЄДРПОУ: 44645717,

м. Тернопіль, вул. Шашкевича, 11, 2-3 пов., e-mail: merkadatov@gmail.com

Від « 03 » Містограда 2023 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Палки Олега Вікторовича на тему:
«ПОБУДОВА ГІПЕРСКЛАДНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНЕ МІСТО»:
ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ»

Цим актом підтверджується, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Палки Олега Вікторовича впроваджено у ТОВ «МЕРКАДА». Використання запропонованого Олегом Вікторовичем Палкою методу вибору інформаційно-технологічної платформи «розумного міста» дало змогу здійснити інтеграцію «розумних» логістичних послуг, консолідувати в режимі реального часу дані про трафік та дорожні роботи, зменшити час процесів транспортування. Аналіз «відкритих даних» вибраної, за допомогою запропонованого Олегом Палкою методу, інформаційно-технологічної платформи надав можливість передбачити попит на послуги ТОВ «МЕРКАДА».

Даний акт не є підставою для проведення фінансових розрахунків.

Директор ТОВ «МЕРКАДА»



Наталія МІГОЦЬКА

ДОДАТОК В

Додатки до розділу 1

«Розумне місто» як гіперскладна система

Міста стали позитивною та потужною силою для вирішення задач сталого економічного зростання, розвитку і процвітання. Вони стимулюють інновації, споживання та інвестиції у розвиток міста і, безумовно, можуть взяти на себе ініціативу для вирішення багатьох глобальних викликів 21 століття, включаючи бідність, нерівність, безробіття, деградацію навколишнього середовища та кліматичні зміни [145].

У 1975 р. 37% населення світу проживало в містах (див. рис. В.1). Ця частка зросла до 48% у 2015 році, але прогнозується подальше збільшення до 55% до 2050 року. Можна пересвідчитись, що урбанізація сповільнюється. До 2015 року частка міського населення зросла майже на 3% за десятиліття, тоді як до 2050 року зростання буде менше, ніж 2% [146].

Частка сільського населення зменшується – з 30% у 1975 році до 24% у 2015 році. Прогноз свідчить, що це скорочення також уповільниться. До 2015 року частка сільського населення зменшилася майже на 2% за десятиліття, тоді як, ймовірно, це буде менше 1%. Населення в містах та напівгустих районах (території, у яких середня густина населення) втратило 1% на десятиріччя між 1975 і 2015 роками і продовжувати це робити до 2050 року [146].

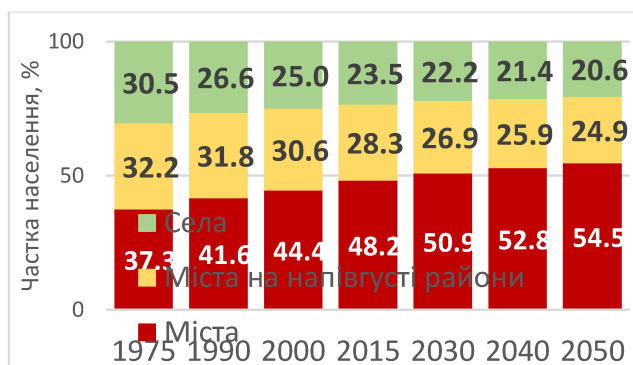


Рис. В.1. Частка населення у світі за ступенем урбанізації, 1975-2050 [146]

Вперше в історії більшість світового населення зараз живе в містах. Глобальна урбанізація продовжуватиметься з високою швидкістю, оскільки прогнозується збільшення міського населення у світі більш ніж на 3 мільярди людей у проміжку між 2010 і 2050 роками. Хоча міста відіграють ключову роль у формуванні світових тенденцій чисельності населення, проте виникають різні шляхи розвитку залежно від швидкості урбанізації, можливо, вказуючи на те, що майбутня демографічна динаміка лише частково перекриватиме те, що спостерігалось у минулому, будучи менш послідовною, більш непередбачуваною та неоднорідною [147]. У таблиці В.1 наведено визначення «розумного міста» дослідниками.

Таблиця В.1 – Визначення «розумного міста» дослідниками

Визначення «розумного міста»	Автори
Місто, яке успішно працює в економіці, людях, управлінні, мобільності, навколишньому середовищі та житті, побудоване на «розумному» поєднанні дарів та діяльності самостійних, незалежних та обізнаних громадян.	[148]
Місто, що поєднує фізичну інфраструктуру, ІТ-інфраструктуру, соціальну інфраструктуру та інфраструктуру бізнесу, щоб використовувати колективний «розум» міста.	[121]
Використання «розумних» технологій робить важливі компоненти інфраструктури та послуги міста, які включають міську адміністрацію, освіту, охорону здоров'я, громадську безпеку, нерухомість, транспорт та комунальні послуги, більш «розумними», взаємопов'язаними та ефективними.	[149]
Місто, яке має бути «розумним», коли інвестиції у людський та соціальний капітал та традиційну (транспортну) та сучасну ІКТ (інформаційні та комунікаційні технології) інфраструктуру підживлюють стійке економічне зростання та високу якість життя з «розумним» управлінням природними ресурсами, завдяки участі в управлінні.	[150]
Комунікаційні технології в управлінні містом та використовують ці елементи як технологічні інструменти для стимулювання проекту ефективного уряду, що включає спільне планування та участь громадян. Сприяючи інтегрованому та сталому розвитку, «розумні міста» стають більш інноваційними, конкурентоспроможними, привабливими та стійкими, тим самим покращуючи життя.	[151]

Впродовж останніх двох десятиліть концепція «розумного міста» в основному була спрямована на пропозицію, а приватний сектор «взяв на сьогоднішню провідну роль у визначенні як задачі, так і її рішення» [152] щодо того, як цифрові інновації можуть допомогти створити нові економічні можливості, покращити надання державних послуг та полегшити залучення громадян до міст. Ця тенденція прискорила на тлі зростання попиту на послуги, скорочення державного бюджету та зниження довіри до уряду.

Однак ІКТ – не єдині компоненти у наданні «розумних» рішень. Соціальні інновації, що створюють нові соціальні форми та форми співпраці у суспільстві, також мають важливе значення. У цьому контексті спроможність муніципалітетів залучати різні зацікавлені сторони (підприємців, науковців, неурядові організації та громадян) до планування. Слід виділити процеси впровадження, а також їх здатність узгоджувати найкращі рішення для розвитку, відповідальності та інвестицій в результаті спільних зусиль.

У «розумних містах» багато «розумних» застосунків використовуються в послугах, що базуються на інфраструктурі, у сферах безпеки, охорони здоров'я, мобільності, енергетики, води, утилізації відходів, економічного розвитку, житла, залучення населення та громади.

Назвемо декілька із них:

- мережі допомагають управляти споживанням енергії; «розумні» лічильники та труби допомагають відстежувати якість води та виявляти витіки;
- давачі покращують рух транспорту, ефективність транспорту та шляхи збору твердих побутових відходів;
- мобільні застосунки дають змогу громадянам повідомляти про несправності в режимі реального часу та безпосередньо взаємодіяти з міськими службами;
- компанії-платформи, такі як Airbnb та Uber, зараз є опорою у містах по всьому світу;

- недорогі мобільні повідомлення, телемедицина та відеоконсультації покращують медичні результати та знижують витрати на охорону здоров'я;
- самохідні машини та платформи для спільного використання автомобілів зменшують тиск на землекористування;
- платформи електронної кар'єри стимулюють місцеві робочі місця та зв'язки між поколіннями;
- «розумні міста» також надають можливість стартапам, постачальникам послуг та консультаціям, пов'язаним з цифровими інноваціями, та залучають кваліфікованих працівників [153].

Для успішного вирішення міських задач існує кілька основних підходів, які можна застосувати, такі як: партнерство між зацікавленими сторонами (міста створюють партнерські відносини з приватним сектором, різними організаціями та іншими містами), стратегії розвитку міст (на основі SWOT-аналізів та бачень на довгостроковий період), місцеве співробітництво (зв'язок між сільською та міською місцевістю), міста як екосистеми, адже їм потрібно знайти баланс між економічними, соціальними та екологічними проблемами та керівниками міст як економічними менеджерами (вони необхідні для прийняття методів підприємницького та економічного управління) [154].

У таблиці В.2 наведено визначення «розумного міста» урядами різних країн світу.

Таблиця В.2 – Визначення «розумного міста» урядами (на основі [153, 155])

Визначення «розумного міста»	Країна
Спочатку ця концепція використовувалась лише у вузькому та державному контексті, особливо стосовно питань навколишнього середовища, енергетики та інфраструктури, з точки зору того, як ІКТ можуть покращити функціональність міст. Згодом практично всі інші сфери добробуту почали працювати з «розумним містом», наприклад, у розвитку бізнесу, інноваціях, залученні громадян, культурі, охороні здоров'я та соціальних послугах, де використання даних та цифрових платформ допомагає «розумним» новим рішенням.	Данія
Використовує можливості цифровізації, екологічно чистої енергії та	Корея

технологій, а також інноваційні транспортні технології, тим самим надаючи можливість мешканцям робити більш екологічний вибір та стимулювати стійке економічне зростання та надаючи змогу містам покращувати надання послуг.	
Місто, яке впроваджує стратегічний пакет заходів для вирішення найактуальніших викликів та підвищення конкурентоспроможності району, забезпечуючи рішення для громадян та підприємців, серед іншого такі заходи, які 1) не потребують значного обслуговування в довгостроковій перспективі (економлять ресурси); 2) надають ефективніші державні послуги (швидше, комфортніше, дешевше, електронні послуги, принцип єдиного вікна); 3) покращують загальний добробут суспільства, безпеку та громадський порядок; 4) дають змогу своєчасного передбачення та запобігання потенційним викликам (небезпека повені, дефіцит енергії, втрати тепла, витoki каналізації тощо); 5) не впливають, не зменшують та не усувають вплив на навколишнє середовище; і 6) базується на «розумному» плануванні розвитку, яке гнучко реагує на найактуальніші виклики та можливості розвитку в регіоні, визначає існуючі та потенційні конкурентні сектори та сприяє їх розвитку, а також забезпечує співпрацю між різними зацікавленими сторонами (державне управління, підприємці, науковці, громадські організації, громадяни).	Латвія
Концепція «розумного міста» – це цілісний підхід до міст, який використовує ІКТ для покращення якості життя та доступності жителів та забезпечує постійне поліпшення сталого економічного, соціального та екологічного розвитку. Це дає можливість наскрізної взаємодії між громадянами та містами, а також в режимі реального часу, якісного та економічного пристосування до їх потреб, забезпечуючи «відкриті дані» та рішення та послуги, спрямовані на громадян як людей.	Іспанія
Поняття «розумного міста» не є статичним: не існує абсолютного визначення розумного міста, немає кінцевої точки, а, скоріше, процесу або серії кроків, завдяки яким міста стають більш «життєздатними» та стійкими, а отже, здатні швидко реагувати на нові виклики.	Велика Британія

ДОДАТОК Е

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на програму «Визначення розумності міста»

