

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем  
Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій МАКАРЕНКО

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**Дипломна робота  
на здобуття ступеня бакалавра  
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
на тему: «Дослідження телекомунікаційних технологій  
для побудови IoT-інфраструктури в концепції Smart City»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-22

Гребінник Назар Олексійович \_\_\_\_\_

Керівник:

Старший викладач кафедри ЕКІР, доктор філософії

Шмігель Богдан Олегович \_\_\_\_\_

Рецензент:

Старший викладач кафедри ІТТ, к.т.н.,

Педан Станіслав Ігорович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

**Київ – 2026 року**

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем**  
**Кафедра електронних комунікацій та інтернету речей**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма – «Системи електронних комунікацій та Інтернету речей»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій МАКАРЕНКО

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Гребіннику Назару Олексійовичу**

**1. Тема роботи:** «Дослідження телекомунікаційних технологій для побудови IoT-інфраструктури в концепції Smart City», керівник роботи Шмігель Богдан Олегович, старший викладач, доктор філософії, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-С

**2. Термін подання студентом роботи:** «13» червня 2026 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** матеріали переддипломної практики (термін практики 20.04.2026 – 17.05.2026); технічні характеристики типового міського кварталу площею 4 км<sup>2</sup> із 1500 кінцевих пристроїв (лічильники води, тепла, датчики паркування); стандарти ETSI EN 300 220, 3GPP TS 36.300, 3GPP TS 23.501, ITU-T Y.4900, ISO 37120; специфікації LoRaWAN L2 1.0.4 (LoRa Alliance), NB-IoT (3GPP Release 13), LTE-M Cat-M1 (3GPP Release 13); IEEE 802.11ah, IEEE 802.15.4, Bluetooth Core Specification 5.4.

**4. Зміст роботи:**

- проаналізувати концепцію Smart City, її структуру, основні домени застосування та вимоги до телекомунікаційної інфраструктури IoT;
- дослідити багаторівневу архітектуру IoT-інфраструктури Smart City;
- провести систематизований огляд сучасних телекомунікаційних технологій IoT (Wi-Fi/Wi-Fi HaLow, BLE, ZigBee, Thread, LoRaWAN, Sigfox, Mioty, NB-IoT, LTE-M, 5G mMTC/URLLC, NTN);

- сформуувати систему критеріїв порівняльної оцінки телекомунікаційних технологій IoT;
- розробити методику багатокритеріального вибору телекомунікаційних технологій на основі методу аналізу ієрархій (MAI);
- сформулювати рекомендації для шести типових сценаріїв Smart City;
- виконати практичну реалізацію сегмента LoRaWAN-мережі: розрахувати бюджет радіолінії, кількість шлюзів, енергоспоживання, оцінити техніко-економічні показники;
- сформулювати висновки щодо доцільності застосування досліджених технологій.

**5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):**

- презентація PowerPoint (10 слайдів) з основними результатами роботи;
- структурна схема архітектури IoT-інфраструктури Smart City;
- порівняльна таблиця характеристик телекомунікаційних технологій;
- блок-схема методики багатокритеріального вибору на основі MAI;
- розрахункові формули бюджету радіолінії та енергоспоживання.

**6. Дата видачі завдання: «24» лютого 2026 р.**

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи                                                 | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз технічного завдання, формування плану роботи                                     | 10.03.2026 – 15.03.2026        |          |
| 2     | Огляд літератури за темою дослідження                                                   | 20.03.2026 – 24.03.2026        |          |
| 3     | Виконання Розділу 1: концепція Smart City та архітектура IoT-інфраструктури             | 20.04.2026 – 25.04.2026        |          |
| 4     | Виконання Розділу 2: огляд телекомунікаційних технологій IoT                            | 26.04.2026 – 05.05.2026        |          |
| 5     | Виконання Розділу 3: порівняльний аналіз і методика вибору, розрахунок LoRaWAN-сегмента | 06.05.2026 – 10.05.2026        |          |

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи                            | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 6     | Формулювання висновків, оформлення джерел та додатків              | 10.05.2026 – 13.05.2026        |          |
| 7     | Оформлення пояснювальної записки відповідно до ДСТУ 3008:2015      | 20.05.2026 – 27.05.2026        |          |
| 8     | Перевірка на академічну доброчесність, отримання відгуку керівника | 03.06.2026 – 10.06.2026        |          |
| 9     | Підготовка презентації та доповіді до захисту                      | 16.06.2026 – 19.06.2026        |          |

Студент \_\_\_\_\_

Назар ГРЕБІННИК

Керівник роботи \_\_\_\_\_

Богдан ШІМІГЕЛЬ

## РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 83 с., 3 рис., 14 табл., 10 формул, 32 джерела.

Актуальність теми. Стрімкий розвиток концепції розумного міста (Smart City) та зростання кількості підключених IoT-пристроїв (понад 30 млрд до 2030 року за прогнозами Ericsson і IoT Analytics) висуває нові вимоги до телекомунікаційної інфраструктури. Існує велика кількість конкурентних технологій (LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, Wi-Fi, BLE, ZigBee, 5G mMTC), які істотно відрізняються за дальністю, енергоефективністю, пропускну здатністю та вартістю розгортання. Обґрунтований вибір телекомунікаційної технології під типовий сценарій Smart City є актуальною інженерною задачею, особливо в умовах післявоєнного відновлення інфраструктури України.

Об'єкт дослідження — процеси передавання даних у телекомунікаційних мережах, що забезпечують функціонування IoT-інфраструктури в межах концепції Smart City.

Предмет дослідження — характеристики, архітектурні особливості та порівняльні показники сучасних телекомунікаційних технологій IoT, а також методика їх вибору за заданими критеріями оптимальності.

Мета роботи — розробка методики багатокритеріального вибору телекомунікаційних технологій для побудови IoT-інфраструктури Smart City та обґрунтування рекомендацій щодо їх застосування для типових сценаріїв розумного міста.

Методи дослідження: системний аналіз архітектури IoT-інфраструктури; порівняльний аналіз технологій; метод аналізу ієрархій (MAI) для багатокритеріального вибору; інженерні розрахунки бюджету радіолінії за моделлю COST 231-Nata, зони покриття та енергоспоживання.

Отримані результати. Систематизовано сучасні телекомунікаційні технології IoT за дальністю, спектром та призначенням; сформовано систему з восьми кількісних критеріїв оцінки (з них K1–K7 — рейтингові, K8 — критерій-

фільтр доступності); розроблено методику багатокритеріального вибору на основі МАІ з нормалізацією критеріїв і дворівневою процедурою «фільтр доступності — рейтинг»; сформульовано рекомендації щодо вибору технологій для шести типових сценаріїв Smart City; виконано практичну реалізацію — розраховано бюджет радіолінії, кількість шлюзів LoRaWAN (3 шлюзи на 4 км<sup>2</sup>), очікуваний час автономної роботи кінцевих пристроїв (близько 10–15 років, обмежений службовим ресурсом батареї 19 А·год) та техніко-економічні показники сегмента інфраструктури (TCO 135 тис. USD за 5 років).

Результати роботи можуть бути використані проєктувальниками IoT-мереж, інженерами операторів зв'язку та спеціалістами органів місцевого самоврядування для обґрунтованого вибору телекомунікаційних рішень при розгортанні сервісів розумного міста.

SMART CITY, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ IoT, LPWAN, LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M, 5G mMTC, БЮДЖЕТ РАДІОЛІНІЇ, МЕТОД АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ, БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР

## ABSTRACT

The textual part of the bachelor's thesis: 83 p., 3 fig., 14 tab., 10 formulas, 32 references.

Relevance. The rapid development of the Smart City concept and the explosive growth of connected IoT devices (over 30 billion by 2030 according to Ericsson and IoT Analytics) impose new requirements on telecommunication infrastructure. A wide range of competing technologies (LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M, Wi-Fi, BLE, ZigBee, 5G mMTC) differ substantially in range, energy efficiency, throughput and deployment cost. The justified selection of a telecommunication technology for a typical Smart City use case is a topical engineering task, especially under the conditions of post-war infrastructure recovery in Ukraine.

Object of research: data transmission processes in telecommunication networks that support IoT infrastructure within the Smart City concept.

Subject of research: characteristics, architectural features and comparative metrics of modern IoT telecommunication technologies, as well as the methodology of their selection by optimality criteria.

Goal: to develop a multi-criteria selection methodology for telecommunication technologies in Smart City IoT infrastructure and to substantiate recommendations on their application to typical urban scenarios.

Methods: system analysis of IoT architecture; comparative analysis of technologies; Analytic Hierarchy Process (AHP) for multi-criteria decision making; engineering calculations of link budget using COST 231-Hata propagation model, coverage area and energy consumption.

Results. Modern IoT telecommunication technologies are systematized by range, spectrum and purpose; a system of eight quantitative evaluation criteria is formulated (of which K1–K7 are ranking criteria and K8 is an availability filter criterion); a multi-criteria selection methodology based on AHP with normalization is developed; recommendations for six typical Smart City scenarios are derived; a practical implementation is performed — link budget, the number of LoRaWAN gateways (3

gateways for a 4 km<sup>2</sup> area), the expected battery life of end devices (~10–15 years with a 19 Ah cell, limited by the battery service life) and techno-economic indicators of the network segment (TCO 135 k USD over 5 years) are calculated.

The results can be used by IoT network designers, telecom operator engineers and municipal authorities for the justified selection of telecommunication solutions when deploying Smart City services.

SMART CITY, INTERNET OF THINGS, LPWAN, LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M, 5G mMTC, LINK BUDGET, ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, MULTI-CRITERIA DECISION

## ЗМІСТ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ..        | 12 |
| ВСТУП.....                                                          | 14 |
| 1 КОНЦЕПЦІЯ SMART CITY ТА АРХІТЕКТУРА ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ .....      | 18 |
| 1.1 Поняття «розумного міста»: еволюція, моделі реалізації.....     | 18 |
| 1.2 Домени застосування Smart City.....                             | 20 |
| 1.2.1 Інтелектуальна мобільність і транспорт .....                  | 20 |
| 1.2.2 Енергетика та житлово-комунальне господарство .....           | 21 |
| 1.2.3 Екологічний моніторинг .....                                  | 21 |
| 1.2.4 Громадська безпека.....                                       | 22 |
| 1.2.5 Охорона здоров'я та електронне врядування.....                | 22 |
| 1.3 Багаторівнева архітектура IoT-інфраструктури Smart City .....   | 23 |
| 1.3.1 Рівень сприйняття .....                                       | 24 |
| 1.3.2 Рівень мережі / передавання даних .....                       | 24 |
| 1.3.3 Рівень периферійних обчислень (Edge) .....                    | 25 |
| 1.3.4 Рівень обробки даних і платформи .....                        | 25 |
| 1.3.5 Рівень застосувань.....                                       | 26 |
| 1.4 Вимоги до телекомунікаційної підсистеми IoT-інфраструктури..... | 26 |
| 1.5 Особливості реалізації Smart City в умовах України .....        | 28 |
| 1.5.1 Інституційний і регуляторний контекст .....                   | 29 |
| 1.5.2 Стан розгортання базових мереж .....                          | 29 |
| 1.5.3 Чинники післявоєнного відновлення .....                       | 30 |
| 1.6 Висновки до розділу 1 .....                                     | 31 |
| 2 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІОТ .....            | 32 |
| 2.1 Класифікація телекомунікаційних технологій IoT .....            | 32 |
| 2.2 Технології ближнього радіусу дії .....                          | 33 |
| 2.2.1 Wi-Fi (IEEE 802.11) та Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah) .....      | 33 |
| 2.2.2 Bluetooth і Bluetooth Low Energy (BLE).....                   | 34 |
| 2.2.3 ZigBee і Thread.....                                          | 35 |
| 2.2.4 Z-Wave.....                                                   | 36 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                        | 10 |
| 2.3 LPWAN-технології неліцензованого спектра .....                     | 36 |
| 2.3.1 LoRaWAN.....                                                     | 37 |
| 2.3.2 Sigfox .....                                                     | 38 |
| 2.3.3 Mioty .....                                                      | 39 |
| 2.4 LPWAN-технології ліцензованого спектра .....                       | 40 |
| 2.4.1 NB-IoT (Narrow Band IoT) .....                                   | 40 |
| 2.4.2 LTE-M (Cat-M1).....                                              | 41 |
| 2.5 Стільникові мережі 4G/LTE та 5G у контексті IoT .....              | 42 |
| 2.5.1 4G LTE.....                                                      | 42 |
| 2.5.2 5G New Radio .....                                               | 43 |
| 2.5.3 Network Slicing та Multi-Access Edge Computing .....             | 44 |
| 2.6 Прикладні протоколи IoT: MQTT, CoAP, LwM2M .....                   | 45 |
| 2.7 Супутникові IoT-рішення та перспективні технології .....           | 46 |
| 2.7.1 Супутникові IoT-системи .....                                    | 46 |
| 2.7.2 Перспективні технології та 6G .....                              | 47 |
| 2.8 Висновки до розділу 2 .....                                        | 47 |
| <b>3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ І МЕТОДИКА ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ</b>      |    |
| .....                                                                  | 49 |
| 3.1 Формування системи критеріїв оцінки .....                          | 49 |
| 3.2 Зведена порівняльна таблиця характеристик .....                    | 51 |
| 3.3 Методика багатокритеріального вибору на основі MAI.....            | 53 |
| 3.3.1 Приклад застосування методики для сценарію обліку ресурсів ..... | 56 |
| 3.4 Оптимальні технології для типових сценаріїв Smart City.....        | 62 |
| 3.4.1 Розумне освітлення вулиць .....                                  | 62 |
| 3.4.2 Інтелектуальний облік комунальних ресурсів .....                 | 62 |
| 3.4.3 Моніторинг паркувань .....                                       | 63 |
| 3.4.4 Екологічний моніторинг .....                                     | 63 |
| 3.4.5 Відеоспостереження.....                                          | 64 |
| 3.4.6 Інтелектуальний транспорт V2X .....                              | 65 |
| 3.5 Практична реалізація: розрахунок сегмента LoRaWAN-мережі .....     | 66 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                     | 11 |
| 3.5.1 Розрахунок бюджету радіолінії .....                           | 67 |
| 3.5.2 Визначення необхідної кількості шлюзів .....                  | 68 |
| 3.5.3 Оцінка ємності мережі та duty cycle.....                      | 68 |
| 3.5.4 Оцінка часу автономної роботи кінцевих пристроїв.....         | 69 |
| 3.5.5 Техніко-економічна оцінка сегмента .....                      | 71 |
| 3.5.6 Схема розгортання сегмента .....                              | 72 |
| 3.5.7 Аналіз чутливості рішення до зміни вагових коефіцієнтів ..... | 74 |
| 3.6 Висновки до розділу 3 .....                                     | 75 |
| ВИСНОВКИ.....                                                       | 78 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                     | 81 |

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

3GPP — 3rd Generation Partnership Project — Партнерський проєкт третього покоління.

ADR — Adaptive Data Rate — Адаптивна швидкість передачі даних.

ANP / MAI — Analytic Hierarchy Process — Метод аналізу ієрархій.

AES — Advanced Encryption Standard — Стандарт шифрування.

API — Application Programming Interface — Прикладний програмний інтерфейс.

BLE — Bluetooth Low Energy — Bluetooth з низьким енергоспоживанням.

CAPEX — Capital Expenditures — Капітальні витрати.

CSS — Chirp Spread Spectrum — Модуляція з лінійним розширенням спектра.

EIRP — Equivalent Isotropic Radiated Power — Еквівалентна ізотропно випромінювана потужність.

eDRX — Extended Discontinuous Reception — Розширений переривчастий прийом.

ETSI — European Telecommunications Standards Institute — Європейський інститут стандартів зв'язку.

FSPL — Free Space Path Loss — Втрати у вільному просторі.

HVAC — Heating, Ventilation, Air Conditioning — Опалення, вентиляція, кондиціонування.

ICT / IKT — Information and Communication Technologies — Інформаційно-комунікаційні технології.

IoT — Internet of Things — Інтернет речей.

ISM — Industrial, Scientific, Medical — Промисловий, науковий, медичний діапазон частот.

ITU — International Telecommunication Union — Міжнародний союз електрозв'язку.

LoRa / LoRaWAN — Long Range / Long Range Wide Area Network — Мережа дальнього радіозв'язку.

LPWAN — Low Power Wide Area Network — Енергоефективна мережа дальньої дії.

LTE-M — Long Term Evolution for Machines — LTE для машинних комунікацій (Cat-M1).

M2M — Machine-to-Machine — Машино-машинна взаємодія.

mMTC — massive Machine Type Communications — Масовий машинний зв'язок 5G.

NB-IoT — Narrow Band Internet of Things — Вузькосмуговий Інтернет речей.

NTN — Non-Terrestrial Networks — Нетерестріальні (супутникові) мережі.

OPEX — Operational Expenditures — Експлуатаційні витрати.

PSM — Power Saving Mode — Режим заощадження енергії.

QoS — Quality of Service — Якість обслуговування.

RSSI — Received Signal Strength Indicator — Індикатор потужності прийнятого сигналу.

SF — Spreading Factor — Коефіцієнт розширення спектра (LoRa).

SNR — Signal-to-Noise Ratio — Відношення сигнал/шум.

TCO — Total Cost of Ownership — Повна вартість володіння.

URLLC — Ultra-Reliable Low-Latency Communications — Наднадійний зв'язок з низькою затримкою.

ЖКГ — житлово-комунальне господарство.

ЦОД — центр обробки даних.

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку міського середовища характеризується стрімкою цифровою трансформацією та переходом до концепції «розумного міста» (Smart City), яка передбачає інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій в усі сфери життєдіяльності міста — від управління транспортом і енергоспоживанням до моніторингу екологічного стану, забезпечення громадської безпеки та надання комунальних послуг. Ключовою технологічною основою такої трансформації виступає Інтернет речей (Internet of Things, IoT), який об'єднує мільйони сенсорів, виконавчих пристроїв та інтелектуальних систем у єдину інформаційну інфраструктуру [1, 24].

За прогнозами провідних аналітичних агенцій (Ericsson Mobility Report [3], Cisco Annual Internet Report [4], IoT Analytics [5]), кількість підключених IoT-пристроїв у світі перевищить 30 мільярдів до 2030 року, причому значна їх частина буде розгорнута саме в межах урбаністичних екосистем. Це створює безпрецедентне навантаження на телекомунікаційну інфраструктуру та висуває нові вимоги до технологій бездротового і дротового зв'язку: підтримка величезної кількості одночасних з'єднань, мінімальне енергоспоживання кінцевих пристроїв, дальність зв'язку від десятків метрів до десятків кілометрів, низькі затримки передачі даних, висока надійність та економічна ефективність розгортання.

На сьогодні існує значна кількість конкурентних телекомунікаційних технологій, які можуть бути використані для побудови IoT-інфраструктури Smart City: технології ближнього радіусу дії (Wi-Fi [18], Bluetooth/BLE [17], ZigBee, Z-Wave, Thread), технології далекого радіусу дії з низьким енергоспоживанням LPWAN (LoRaWAN [11, 12], Sigfox, NB-IoT [8, 21], LTE-M, Mioty [16]), стільникові мережі 4G/LTE та 5G [14, 15], а також супутникові IoT-рішення. Кожна з цих технологій має власні переваги, обмеження та оптимальні сценарії застосування, що ускладнює вибір оптимального рішення під час проектування міських IoT-систем [7, 9].

В умовах України питання вибору телекомунікаційних технологій для Smart City набуває додаткової актуальності у зв'язку з необхідністю післявоєнного відновлення інфраструктури, переходом до цифрових сервісів громад, впровадженню енергоефективних рішень та забезпеченням стійкості комунальних систем [28, 29]. Тому комплексне порівняльне дослідження телекомунікаційних технологій IoT із визначенням оптимальних варіантів для типових сценаріїв Smart City є актуальним науково-практичним завданням.

**Об'єктом дослідження** є процеси передавання даних у телекомунікаційних мережах, що забезпечують функціонування IoT-інфраструктури в межах концепції Smart City.

**Предметом дослідження** є характеристики, архітектурні особливості та порівняльні показники сучасних телекомунікаційних технологій (LPWAN, стільникових 4G/5G, мереж ближнього радіусу дії), що використовуються для побудови IoT-інфраструктури розумного міста, а також методика їх вибору за заданими критеріями оптимальності.

**Метою роботи** є розробка методики багатокритеріального вибору телекомунікаційних технологій для побудови IoT-інфраструктури в концепції Smart City та обґрунтування рекомендацій щодо їх застосування для типових сценаріїв розумного міста за критеріями вартості розгортання, енергоефективності, дальності зв'язку, швидкості передачі даних, масштабованості та надійності.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні **завдання**:

- проаналізувати концепцію Smart City, її структуру, основні домени застосування та вимоги до телекомунікаційної інфраструктури IoT;
- дослідити архітектуру типової IoT-інфраструктури Smart City з виділенням рівнів сприйняття, передавання, обробки та застосування даних;
- провести систематизований огляд сучасних телекомунікаційних технологій, що застосовуються для побудови IoT-мереж розумного міста;

- сформувати систему критеріїв порівняльної оцінки телекомунікаційних технологій IoT;
- виконати порівняльний аналіз досліджуваних технологій за обраною системою критеріїв і сформувати зведену порівняльну таблицю їх характеристик;
- розробити методику багатокритеріального вибору оптимальних телекомунікаційних технологій для типових сценаріїв Smart City на основі методу аналізу ієрархій (MAI);
- виконати практичну реалізацію запропонованих рішень на прикладі обраного міського кварталу: провести розрахунок зони покриття LoRaWAN-мережі, визначити необхідну кількість шлюзів і параметри радіолінії, розробити схему розгортання сегмента IoT-інфраструктури та оцінити техніко-економічні показники запропонованого рішення;
- сформулювати висновки щодо доцільності застосування досліджених технологій та рекомендації для проєктування IoT-інфраструктури розумних міст в умовах України.

**Методи дослідження.** У роботі застосовуються такі основні методи наукового пізнання: аналіз і синтез — для опрацювання технічної літератури, стандартів та специфікацій телекомунікаційних технологій IoT; методи системного аналізу — для дослідження архітектури IoT-інфраструктури Smart City як складної багаторівневої системи; методи порівняльного аналізу — для зіставлення характеристик різних технологій; метод аналізу ієрархій (MAI, Analytic Hierarchy Process, T. Saaty) [22, 23] — для формування методики багатокритеріального вибору; інженерні методи розрахунку радіолінії за моделлю COST 231-Hata та енергоспоживання — для оцінки очікуваних показників запропонованих рішень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у системному порівняльному аналізі телекомунікаційних технологій IoT з урахуванням специфіки міських сценаріїв застосування та у розробленні адаптованої методики багатокритеріального вибору на основі MAI з нормалізацією критеріїв до

інтервалу  $[0; 1]$ , що дозволяє формалізувати процес вибору оптимальної технології для будь-якого типового сценарію Smart City.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що розроблена методика та сформульовані рекомендації можуть бути використані проєктувальниками IoT-мереж, інженерами операторів зв'язку та спеціалістами органів місцевого самоврядування для обґрунтованого вибору телекомунікаційних рішень при розгортанні сервісів розумного міста. Виконані розрахунки сегмента LoRaWAN-мережі демонструють методологічну застосовність запропонованого підходу до реальних інженерних задач.

**Структура та обсяг роботи.** Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 32 найменувань. Робота містить 71 сторінку основного тексту, 3 рисунки, 14 таблиць та 10 розрахункових формул.

# 1 КОНЦЕПЦІЯ SMART CITY ТА АРХІТЕКТУРА ІОТ-ІНФРАСТРУКТУРИ

## 1.1 Поняття «розумного міста»: еволюція, моделі реалізації

Концепція розумного міста (Smart City) є однією з провідних парадигм розвитку сучасних урбаністичних систем. У найзагальнішому формулюванні Міжнародного союзу електрозв'язку (рекомендація ITU-T Y.4900 / L.1600 [1]) розумне стале місто — це інноваційне місто, яке використовує інформаційно-комунікаційні технології та інші засоби з метою підвищення якості життя, ефективності міських операцій і сервісів, а також конкурентоспроможності, при одночасному забезпеченні задоволення потреб теперішніх і майбутніх поколінь у сфері економіки, соціуму, довкілля та культури.

Еволюція концепції Smart City зазвичай поділяється на три покоління. Smart City 1.0 (близько 2000–2010 рр.) — це етап, на якому ініціативи розгортання інтелектуальних сервісів формувалися переважно постачальниками технологій (IBM, Cisco, Siemens); міста виступали радше «полігонами» для пілотних проєктів, а інтеграція рішень була низькою. Smart City 2.0 (2010–2020 рр.) характеризується тим, що ініціативу починає брати на себе міська влада: формуються комплексні стратегії, з'являються відкриті дані, єдині міські платформи, реалізуються великі проєкти інтелектуального транспорту та енергетики. Smart City 3.0 (з 2020 р. і по сьогодні) робить акцент на залученні громад: жителі міст беруть участь у формуванні сервісів через краудсорсинг, цифрові платформи громадської участі, ініціативи із зеленої трансформації; зростає роль концепцій сталого розвитку, енергоефективності, циркулярної економіки та цифрової інклюзії.

За моделями реалізації прийнято розрізняти три ключові підходи. По-перше, централізована (інтегрована) модель передбачає створення єдиної міської платформи (Urban Operating System), до якої під'єднуються всі вертикалі сервісів — транспорт, ЖКГ, безпека, екологія. Прикладами слугують проєкти Songdo (Південна Корея), Songdo International Business District або платформа City Brain від Alibaba у Ханчжоу. По-друге, децентралізована модель базується на

незалежно розвинених вертикалях, які обмінюються даними через стандартизовані API; такий підхід характерний для більшості європейських міст (Барселона, Амстердам, Хельсінкі), де переважає принцип «екосистеми сервісів» поверх відкритої даних-платформи. По-третє, гібридна модель поєднує централізоване ядро (інтеграційна шина, єдиний реєстр сенсорів, портал відкритих даних) з конкуренцією постачальників на рівні окремих вертикалей; цей підхід усе частіше обирається пострадянськими та латиноамериканськими містами як компроміс між технологічною гнучкістю і керованістю.

Згідно зі стандартом ISO 37120 «Sustainable cities and communities — Indicators for city services and quality of life» [2], ефективність розумного міста вимірюється системою з понад 100 показників, які об'єднані в 19 категорій: економіка, освіта, енергетика, фінанси, охорона здоров'я, відпочинок, безпека, тверді відходи, телекомунікації, транспорт, міське планування, стічні води, водопостачання та інші. Технологічну основу для збирання й обробки цих показників у реальному часі забезпечує саме IoT-інфраструктура міста.

Інша важлива система показників — ITU-T Y.4901/L.1601 «Key performance indicators related to the use of information and communication technology in smart sustainable cities» — спеціально орієнтована на оцінку ефективності використання ІКТ у Smart City: вона включає показники охоплення населення широкосмуговим доступом, цифрову зрілість муніципальних сервісів, кількість підключених сенсорів на одного жителя, частку відкритих даних тощо.

Для України концепція Smart City має додаткові виміри [28, 29]. По-перше, це необхідність післявоєнного відновлення міської інфраструктури з одночасним її цифровим переоснащенням. По-друге, це використання Smart-сервісів як інструмента стійкості (resilience) до надзвичайних ситуацій — від відключень електроенергії до ракетних обстрілів критичної інфраструктури. По-третє, перехід до енергоефективної моделі ЖКГ, зокрема через інтелектуальний облік ресурсів. Усі ці завдання неможливо вирішити без розгортання масштабної IoT-інфраструктури з відповідною телекомунікаційною підсистемою.

## 1.2 Домени застосування Smart City

Прикладні домени Smart City можна структурно об'єднати у шість великих груп: інтелектуальна мобільність, енергетика і ЖКГ, екологія, громадська безпека, охорона здоров'я та електронне врядування. У кожному з доменів IoT відіграє роль базової «нервової системи», яка забезпечує збирання первинних даних з фізичного світу і передачу команд керування.

### 1.2.1 Інтелектуальна мобільність і транспорт

Домен інтелектуальної мобільності (Smart Mobility) охоплює широкий спектр застосувань: моніторинг дорожнього трафіку за допомогою індуктивних петель, відеоаналітики, радарних та лідарних датчиків; адаптивне керування світлофорами (Adaptive Traffic Control Systems); інтелектуальне паркування (Smart Parking) із сенсорами зайнятості місць (магнітometri, ультразвукові датчики, відеоаналітика); системи оплати проїзду та електронні квитки (EMV-картки, мобільні застосунки); ймовірнісні моделі прогнозування пасажиропотоку; інфраструктура для електромобілів — мережі зарядних станцій з єдиним обліком, динамічним ціноутворенням і керуванням навантаженням на енергомережу.

Окрему та все більш значущу підгрупу формують технології Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) і V2X (Vehicle-to-Everything), які дозволяють автомобілям обмінюватися даними з придорожною інфраструктурою (RSU — Roadside Units), іншими автомобілями та центрами керування трафіком. Для C-ITS критично важливими є низькі затримки передачі даних ( $< 100$  мс) і висока надійність, що зумовлює використання технологій 5G URLLC та спеціалізованих стандартів ITS-G5 / IEEE 802.11p.

### **1.2.2 Енергетика та житлово-комунальне господарство**

Smart Energy охоплює інтелектуальний облік електроенергії, газу, води, теплової енергії (AMR/AMI — Automatic Meter Reading / Advanced Metering Infrastructure); моніторинг розподільчих електромереж і трансформаторних підстанцій; системи керування попитом (Demand Response) для побутових і промислових споживачів; інтеграцію розподілених джерел відновлювальної енергії (мікрогенерація на основі сонячних панелей, накопичувачі) у концепції Microgrid. Для України цей домен має критичне значення з огляду на необхідність зменшення енергоспоживання, зниження комерційних і технічних втрат, а також підвищення стійкості енергосистеми. Лічильники електроенергії, води, газу та тепла є типовим прикладом масових IoT-пристроїв, для яких ключовими вимогами є тривала автономна робота, надійна доставка повідомлень і низька вартість підключення.

Розумне ЖКГ (Smart Utilities) також включає інтелектуальне освітлення вулиць (Smart Street Lighting) з диммерами та регулюванням за рівнем освітленості і присутністю людей, моніторинг рівня наповнення сміттєвих контейнерів (Smart Waste) для оптимізації маршрутів збирання, моніторинг тиску і витоків у водопровідних мережах.

### **1.2.3 Екологічний моніторинг**

Smart Environment охоплює моніторинг якості повітря (концентрація PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>), рівня шуму, температури, вологості, ультрафіолетового випромінювання; моніторинг водних об'єктів (рівень води, температура, мутність, pH); раннє виявлення пожеж у лісосмугах і паркових зонах. Особливістю екологічного моніторингу є необхідність розгортання великої кількості сенсорів у різних точках міста (у тому числі в зонах без зовнішнього живлення), що робить ключовою вимогою енергоефективність і дальність зв'язку телекомунікаційної

підсистеми. Типовий цикл вимірювань становить від декількох хвилин до однієї години.

#### **1.2.4 Громадська безпека**

Smart Safety / Public Security включає системи відеоспостереження з інтелектуальною аналітикою (виявлення підозрілої поведінки, розпізнавання номерних знаків транспортних засобів), системи виявлення пострілів (ShotSpotter), системи оповіщення населення про надзвичайні ситуації, інтегровані системи екстреного виклику (eCall у транспорті), системи моніторингу периметра критичних об'єктів. Особливістю цього домену є необхідність високої пропускну здатності (для відеотрафіку) та надійності, що зумовлює застосування технологій 4G/5G, Wi-Fi, оптичних мереж.

#### **1.2.5 Охорона здоров'я та електронне врядування**

Smart Health використовує носимі пристрої (wearables) для моніторингу стану пацієнтів, телемедичні платформи, інтегровані медичні інформаційні системи. Smart Governance охоплює портали відкритих даних, електронні петиції, бюджети громадської участі, цифрові ідентифікатори громадянина (в Україні — мобільний застосунок «Дія»). Хоча телекомунікаційні вимоги цих доменів переважно покриваються традиційним широкосмуговим доступом, окремі сценарії (наприклад, моніторинг хронічних хворих у домашніх умовах) перетинаються з IoT-сервісами.

Зведення основних характеристик доменів подано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Основні домени Smart City та вимоги до телекомунікаційної підсистеми

| Домен                   | Типові сервіси                                   | Інтенсивність трафіку                            | Критичні вимоги                                      |
|-------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Мобільність / транспорт | Адаптивні світлофори, паркування, C-ITS, V2X     | Від низької (паркування) до високої (відео, V2X) | Низька затримка, надійність                          |
| Енергетика і ЖКГ        | Smart Metering, освітлення, Smart Waste          | Низька (поодинокі повідомлення на годину/добу)   | Енергоефективність, масштабованість, низька вартість |
| Екологічний моніторинг  | Якість повітря, шум, моніторинг води             | Низька                                           | Дальність, автономність, помірна точність часу       |
| Громадська безпека      | Відеоспостереження, оповіщення, контроль доступу | Висока (відео); низька (оповіщення)              | Пропускна здатність, надійність, безпека             |
| Охорона здоров'я        | Wearables, телемедицина, моніторинг пацієнтів    | Середня                                          | Захищеність, мобільність, безперервність             |
| Електронне врядування   | Відкриті дані, цифрові сервіси громадян          | Середня (Web-трафік)                             | Широкосмуговий доступ, доступність 99,9%+            |

### 1.3 Багаторівнева архітектура IoT-інфраструктури Smart City

Типова IoT-інфраструктура Smart City реалізується у вигляді багаторівневої архітектури. У літературі найчастіше зустрічаються три-, чотири- і п'ятирівневі моделі. У цій роботі за основу береться чотирирівнева модель ITU-T Y.2060 /

Y.4000 [1], доповнена окремим рівнем периферійних обчислень (Edge), що відповідає сучасним промисловим практикам та узгоджується з еталонною архітектурою ISO/IEC 30141 [25].

Запропонована для подальшого аналізу архітектура містить такі рівні: рівень сприйняття (Perception Layer), рівень мережі / передавання даних (Network Layer), рівень периферійних обчислень (Edge Layer), рівень обробки даних і платформи (Processing & Platform Layer) і рівень застосувань (Application Layer).

### **1.3.1 Рівень сприйняття**

Рівень сприйняття об'єднує всю фізичну інфраструктуру збирання даних і виконання керуючих команд: сенсори (температури, вологості, тиску, концентрації газів, рівня шуму, освітленості, руху, магнітні, акустичні, відеокамери, ЛіДАРи), виконавчі пристрої (актуатори, реле, диммери, замки, контролери освітлення), радіочастотні мітки (RFID, NFC), а також пристрої збору первинних даних (Data Loggers). Класифікація сенсорів за принципом дії включає фізичні, хімічні, біологічні; за способом енергоживлення — мережеві, акумуляторні з періодичним заміненням, з тривалою автономною роботою (3–10 років) на первинній батареї, з енергонезалежним живленням (Energy Harvesting — сонячні, вібраційні, термоелектричні).

Для масових сценаріїв Smart City (інтелектуальний облік ресурсів, паркування, екологічний моніторинг) типовою вимогою є робота кінцевого пристрою впродовж 7–10 років від однієї літій-тіонілхлоридної ( $\text{Li-SOCl}_2$ ) батареї ємністю 13–19 А·год, що накладає жорсткі обмеження на енергоспоживання як самого сенсора, так і телекомунікаційного модуля.

### **1.3.2 Рівень мережі / передавання даних**

Рівень мережі забезпечує транспортування даних від кінцевих пристроїв до платформ обробки. Саме на цьому рівні відбувається вибір телекомунікаційних

технологій, що є предметом цієї роботи. Структурно рівень мережі поділяється на два підрівні: підрівень доступу (Access — від кінцевого пристрою до точки агрегації: базової станції стільникової мережі, шлюзу LPWAN, точки доступу Wi-Fi або сусіднього пристрою mesh-мережі) і підрівень транспорту (Backhaul — від точки агрегації до центральних серверів через волоконно-оптичні лінії, мікрохвильові з'єднання або стільникові мережі).

Особливу роль на рівні мережі відіграють шлюзи (Gateway). Шлюз LPWAN, наприклад, з одного боку приймає радіопакети від тисяч кінцевих пристроїв, а з іншого — передає їх через Ethernet, 4G/5G або супутниковий канал до мережевого сервера (Network Server). Сучасні шлюзи дедалі частіше виконують функції периферійних обчислень, що формує наступний рівень архітектури.

### **1.3.3 Рівень периферійних обчислень (Edge)**

Edge Layer виконує первинну обробку даних безпосередньо біля джерела їх генерації, що дозволяє суттєво зменшити обсяг трафіку, що передається у центральну хмару, знизити затримки реакції та забезпечити автономну роботу при тимчасовій відсутності зв'язку з центром. Типові завдання, що делегуються edge-вузлам: фільтрація і агрегація даних, виявлення аномалій, локальне ухвалення рішень (наприклад, увімкнення освітлення при детектуванні руху), запуск моделей машинного навчання (за допомогою пакетів TensorFlow Lite, ONNX Runtime, OpenVINO).

У контексті Smart City edge-вузлами зазвичай слугують промислові маршрутизатори, шлюзи LPWAN із розширеною обчислювальною підсистемою (на базі ARM Cortex-A), вуличні контролери, RSU.

### **1.3.4 Рівень обробки даних і платформи**

Processing & Platform Layer об'єднує мережеві сервери (Network Server) телекомунікаційних технологій, брокери повідомлень (MQTT, AMQP, Kafka),

сховища часових рядів (InfluxDB, TimescaleDB), реляційні та NoSQL бази даних, аналітичні системи (Spark, Flink), системи машинного навчання та цифрових двійників. Платформи (FIWARE, ThingsBoard, AWS IoT Core, Azure IoT Hub, Google Cloud IoT, ChirpStack) надають уніфіковані API та сервіси керування пристроями, що спрощує розробку прикладних рішень.

### **1.3.5 Рівень застосувань**

Application Layer — це власне прикладні сервіси, з якими взаємодіють кінцеві користувачі (диспетчери, оператори, мешканці міста): диспетчерські панелі (Dashboards), мобільні застосунки, інтегровані системи керування (City Operations Center). На цьому рівні відбувається кінцеве перетворення зібраних даних у цінність для громади.

Узагальнена схема архітектури з прив'язкою конкретних телекомунікаційних технологій до рівнів зображена концептуально у вигляді наступної послідовності: сенсори / актуатори → радіоканал доступу (LPWAN, BLE, ZigBee, 4G/5G) → шлюзи / RAN → транспортна мережа (волокно, 5G, супутник) → edge-обчислення → платформа IoT → прикладні сервіси.

## **1.4 Вимоги до телекомунікаційної підсистеми IoT-інфраструктури**

На основі аналізу доменів і архітектури можна сформулювати узагальнений перелік вимог до телекомунікаційної підсистеми IoT-інфраструктури розумного міста [7, 9, 20]. Ці вимоги є гетерогенними і часто суперечливими, що й зумовлює необхідність порівняльного аналізу і багатокритеріального вибору.

**1. Вимоги до дальності зв'язку.** Залежно від сценарію — від десятків метрів (носимі пристрої, домашня автоматизація) до десятків кілометрів (одиначні сенсори в передмісті, лісосмугах, на віддалених об'єктах ЖКГ). Для більшості міських сценаріїв LPWAN дальність 2–5 км у щільній забудові і 10–15 км у відкритій місцевості є практично достатньою.

**2. Вимоги до швидкості передавання даних.** Для типових IoT-сценаріїв Smart City характерна низька і дуже низька інтенсивність трафіку: телеметричне повідомлення розміром 10–100 байт раз на годину або рідше. Винятки становлять відеоспостереження (1–10 Мбіт/с на камеру) та системи V2X (десятки–сотні кбіт/с).

**3. Вимоги до енергоефективності.** Для масових сенсорів — автономна робота 5–10 років від однієї батареї. Це накладає обмеження на середній струм споживання модуля зв'язку ( $< 5$  мкА у режимі сну,  $< 100$  мА у режимі передачі).

**4. Вимоги до масштабованості (ємності мережі).** Один шлюз або базова станція має підтримувати від сотень до десятків тисяч кінцевих пристроїв одночасно, без істотного зростання частки втрачених пакетів.

**5. Вимоги до затримки.** Від не критичних (хвилини) для лічильників і моніторингу до жорстких ( $< 100$  мс) для V2X і деяких сервісів безпеки.

**6. Вимоги до надійності та якості обслуговування (QoS).** Частка успішно доставлених повідомлень (PDR — Packet Delivery Ratio) має становити не менше 95–99% у середньому, з пріоритезацією критичних повідомлень для сервісів безпеки.

**7. Вимоги до інформаційної безпеки.** Наскрізне шифрування (як правило, AES-128), взаємна автентифікація пристроїв, захист від атак повторного відтворення, ротація сесійних ключів, оновлення прошивки «по повітрю» (FUOTA — Firmware Update Over-The-Air).

**8. Вимоги до вартості розгортання та експлуатації.** Включають вартість обладнання (CAPEX: модулі, шлюзи, антени, монтаж), вартість підключення (передплата у операторів NB-IoT/LTE-M або вартість серверної інфраструктури для приватних LoRaWAN-мереж) та експлуатаційні витрати (OPEX: обслуговування, заміна батарей, оплата трафіку).

**9. Вимоги до інтероперабельності.** Можливість інтеграції різнорідних пристроїв і платформ за допомогою стандартизованих протоколів (LwM2M, CoAP, MQTT) та API, що особливо актуально для гібридних інфраструктур Smart City, де співіснують пристрої різних постачальників.

**10. Вимоги до доступності частотного спектра.** У межах України необхідно враховувати національний регламент (Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку — НКЕК), який погоджується з гармонізованими діапазонами ETSI EN 300 220 для діапазону 863–870 МГц (LoRaWAN, Sigfox, Mioty) і виділеними діапазонами для NB-IoT/LTE-M на смугах LTE.

Зведення вимог за доменами розумного міста подане у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 — Узагальнені вимоги до телекомунікаційної підсистеми за доменами

| Сценарій                       | Дальність      | Швидкість   | Автономність   | Затримка  |
|--------------------------------|----------------|-------------|----------------|-----------|
| Розумне освітлення вулиць      | до 5 км        | < 1 кбіт/с  | не критично    | до 1 хв   |
| Інтелектуальний облік ресурсів | 5–15 км        | < 1 кбіт/с  | 8–10 років     | до 1 год  |
| Моніторинг паркувань           | 2–5 км         | < 1 кбіт/с  | 5–8 років      | до 30 с   |
| Екологічний моніторинг         | 5–15 км        | 1–10 кбіт/с | 3–5 років      | до 5 хв   |
| Відеоспостереження             | оптика / 4G/5G | 1–10 Мбіт/с | не критично    | до 100 мс |
| Інтелектуальний транспорт V2X  | 0,3–1 км       | 100 кбіт/с  | мережеве живл. | < 100 мс  |

### 1.5 Особливості реалізації Smart City в умовах України

Реалізація концепції розумного міста в Україні має низку особливостей, які істотно впливають на вибір телекомунікаційних технологій IoT. Аналіз цих особливостей є важливим для подальшого формування рекомендацій.

### **1.5.1 Інституційний і регуляторний контекст**

Базовим документом, що визначає правове поле розгортання телекомунікаційних мереж в Україні, є Закон України «Про електронні комунікації» від 16 грудня 2020 року № 1089-IX [28], який імплементує положення Європейського кодексу електронних комунікацій (ЕЕСС). Регулятором у сфері електронних комунікацій та радіочастотного спектра є Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку (НКЕК). Питання використання частотного спектра регулюються Планом використання радіочастотного спектра, який, зокрема, виділяє діапазон 863–870 МГц для пристроїв малого радіусу дії (SRD) з обмеженням потужності та duty cycle, що повністю відповідає вимогам LoRaWAN/Sigfox/Mioty у плані EU868 [13].

Цифрова трансформація державних і муніципальних сервісів відбувається у межах національної програми «Дія.City», стратегії цифрового розвитку до 2030 року, рамкової ініціативи Smart Region/Smart City Міністерства цифрової трансформації України. Окремою важливою програмою є Національний план розвитку широкосмугового доступу [29], що зокрема стимулює розгортання фіксованого і мобільного широкосмугового доступу в малих містах і селах — необхідної умови розгортання операторських LPWAN-сервісів NB-IoT/LTE-M.

### **1.5.2 Стан розгортання базових мереж**

Станом на 2024–2026 рр. в Україні функціонують мережі LTE (4G) трьох основних мобільних операторів — Kyivstar, Vodafone Україна, lifecell — з покриттям понад 95% населення. Мережі NB-IoT і LTE-M комерційно запуснені провідними операторами (зокрема, Київстар оголосив про розгортання NB-IoT ще у 2019 році), однак практичне покриття поза великими містами залишається нерівномірним, а тарифи на підключення M2M/IoT поки що не оптимізовані для

масових сценаріїв з мільйонами пристроїв. Розгортання 5G в Україні відстає від країн ЄС на 2–3 роки через військову ситуацію та необхідність відновлення критичної інфраструктури; найбільш ймовірний термін повномасштабного комерційного запуску 5G у мегаполісах — 2026–2027 рр.

Окрему роль відіграють приватні LPWAN-розгортання. У містах України (Київ, Львів, Одеса, Дніпро, Харків, Вінниця) функціонують локальні мережі LoRaWAN, розгорнуті за участю комунальних підприємств для інтелектуального обліку води/тепла, моніторингу освітлення, проєкти Smart Parking. Такі мережі переважно базуються на відкритих програмних рішеннях (ChirpStack, The Things Stack) і обладнанні європейських/китайських виробників [11, 32].

### **1.5.3 Чинники післявоєнного відновлення**

Війна 2022 року сформувала якісно нові вимоги до IoT-інфраструктури міст. По-перше, критичною стала стійкість (resilience): мережі мають продовжувати функціонувати при тривалих відключеннях електроенергії, фізичних ушкодженнях інфраструктури, кіберзагрозах. Це посилює пріоритет автономності кінцевих пристроїв (8–10 років від батареї), наявності резервних каналів зв'язку (мобільні + супутникові), розподіленої архітектури з можливістю продовження роботи окремих сегментів. По-друге, актуалізувалася потреба у швидкому розгортанні моніторингу критичної інфраструктури — енергомереж, водопостачання, теплопостачання — в умовах обмежених ресурсів і часу, що формує попит на технології з мінімальною інженерною підготовкою (plug-and-play батарейні сенсори з LPWAN). По-третє, концепція «розумного відновлення» (smart recovery) передбачає одночасне відновлення зруйнованої інфраструктури з її цифровим переоснащенням (заміна старих лічильників на NB-IoT/LoRaWAN-варіанти, інтелектуальне освітлення замість традиційного, інтегровані системи безпеки).

У сукупності ці чинники роблять масове розгортання LPWAN-інфраструктури одним з пріоритетних напрямів повоєнного цифрового розвитку

українських міст і додатково підвищують актуальність проведеного у цій роботі дослідження.

## **1.6 Висновки до розділу 1**

У першому розділі розглянуто концептуальні засади побудови IoT-інфраструктури в межах концепції Smart City.

По-перше, проаналізовано еволюцію концепції розумного міста від технологічно-орієнтованих ініціатив Smart City 1.0 до сучасних громадсько-центричних моделей Smart City 3.0. Показано, що ефективна реалізація концепції потребує системного підходу та одночасного розвитку шести базових доменів — інтелектуальної мобільності, енергетики і ЖКГ, екологічного моніторингу, громадської безпеки, охорони здоров'я та електронного врядування.

По-друге, обґрунтовано чотирирівневу архітектуру IoT-інфраструктури, доповнену рівнем периферійних обчислень: рівень сприйняття → рівень мережі → рівень Edge → рівень обробки і платформи → рівень застосувань. Показано, що саме рівень мережі визначальною мірою впливає на показники енергоефективності, надійності та вартості всієї системи.

По-третє, сформульовано десять груп вимог до телекомунікаційної підсистеми IoT-інфраструктури Smart City: дальність, швидкість, енергоефективність, масштабованість, затримка, надійність, безпека, вартість, інтероперабельність та відповідність національному частотному регламенту. Складено зведену таблицю вимог за шістьма типовими сценаріями розумного міста, яка є основою для подальшого порівняльного аналізу телекомунікаційних технологій IoT.

Отримані результати становлять методологічну базу для другого розділу, у якому буде проведено систематизований огляд сучасних телекомунікаційних технологій IoT з фокусом на можливість задоволення сформульованих вимог.

## 2 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ІОТ

### 2.1 Класифікація телекомунікаційних технологій ІоТ

Сучасні телекомунікаційні технології, що використовуються в ІоТ-інфраструктурі Smart City, доцільно класифікувати за кількома основними ознаками: дальністю зв'язку, типом використовуваного спектра, моделлю розгортання (приватна / операторська), архітектурою радіодоступу, а також за енергоспоживанням кінцевих пристроїв і пропускнуою здатністю [7, 9, 21].

За дальністю зв'язку технології поділяються на чотири основні класи. WPAN (Wireless Personal Area Network) — мережі особистого простору з дальністю від кількох метрів до десятків метрів (Bluetooth Classic, BLE, ZigBee, Thread, Z-Wave). WLAN (Wireless Local Area Network) — мережі локального масштабу з дальністю до сотень метрів (Wi-Fi, Wi-Fi HaLow). LPWAN (Low Power Wide Area Network) — мережі дальньої дії з низьким енергоспоживанням, дальністю від одиниць до десятків кілометрів (LoRaWAN, Sigfox, Mioty, NB-IoT, LTE-M). WWAN (Wireless Wide Area Network) — мережі широкого покриття (стільникові 4G/LTE, 5G, супутникові).

За типом частотного спектра технології поділяються на дві групи: технології неліцензованого спектра (працюють у безкоштовних ISM-діапазонах 433 МГц, 868 МГц у Європі та Україні, 915 МГц у США, 2,4 ГГц та 5 ГГц глобально) і технології ліцензованого спектра (працюють у виділених частотних смугах стільникових операторів).

За моделлю розгортання розрізняють: приватні мережі (розгортаються власником інфраструктури — підприємством, муніципалітетом, кампусом), операторські (публічні) мережі (розгортаються оператором електрозв'язку та надаються як послуга на основі підписки), а також гібридні рішення (наприклад, приватний LoRaWAN-кластер з виходом на публічний хмарний сервер пристроїв).

На рисунку 2.1 наведено узагальнену класифікацію телекомунікаційних технологій ІоТ за дальністю та швидкістю передавання даних.

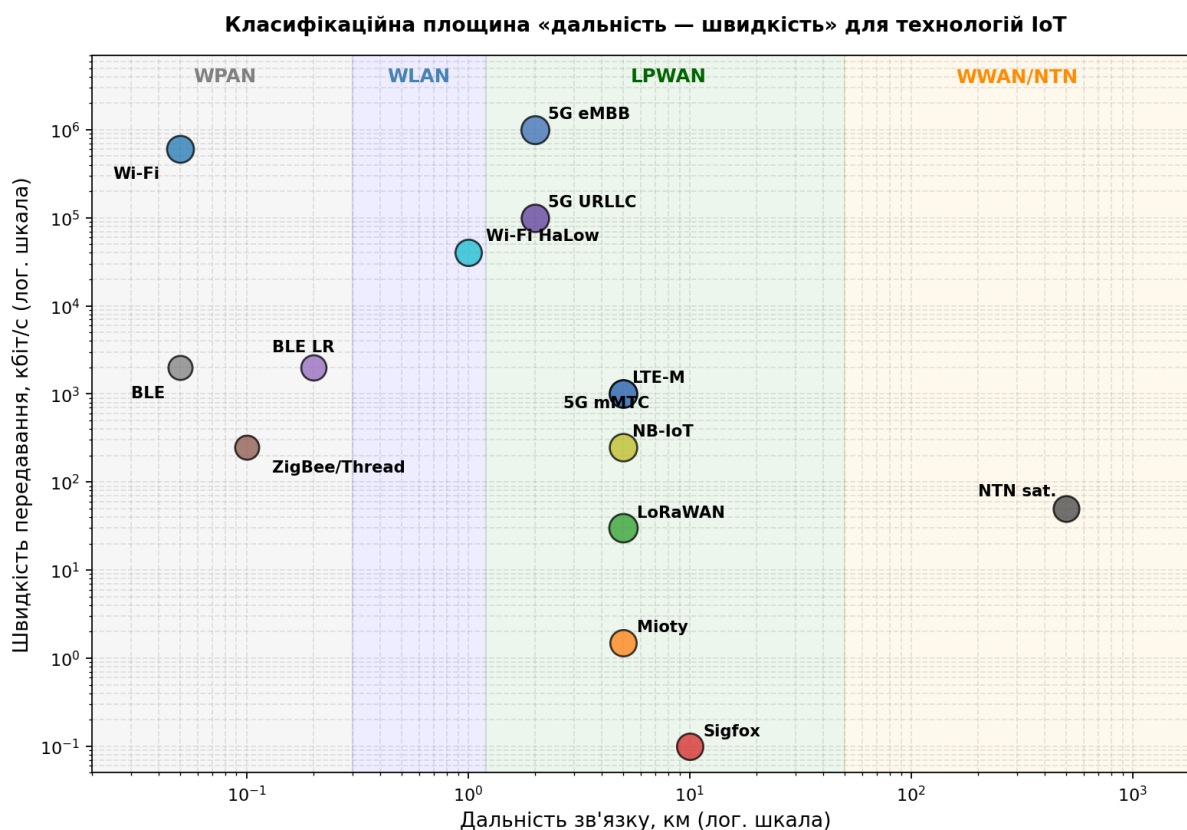


Рисунок 2.1 — Класифікаційна площина «дальність — швидкість» для технологій IoT

## 2.2 Технології ближнього радіусу дії

Технології ближнього радіусу дії є базовою основою побудови персональних і локальних IoT-мереж: домашньої автоматизації, носимих пристроїв, систем контролю доступу, локальних промислових мереж. У контексті Smart City вони відіграють роль як прямих рішень для окремих сценаріїв (Wi-Fi у публічних просторах, BLE-маяки для навігації), так і допоміжних протоколів локальної агрегації даних, що згодом транспортуються через LPWAN або стільникові мережі.

### 2.2.1 Wi-Fi (IEEE 802.11) та Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)

Wi-Fi є найпоширенішою технологією WLAN з підтримкою високих швидкостей (від 11 Мбіт/с у 802.11b до понад 9,6 Гбіт/с у Wi-Fi 6E/7). У сценаріях

Smart City Wi-Fi використовується для забезпечення публічного інтернет-доступу (мережі Wi-Fi у парках, на вокзалах, у громадському транспорті), систем відеоспостереження локального масштабу, мереж кампусів. Основні переваги — висока швидкість, поширеність, низька вартість обладнання; ключові обмеження — обмежена дальність (зазвичай до 50–100 м у приміщеннях, до 250 м у відкритому просторі), висока енергоспоживність, що робить технологію непридатною для масових батарейно-живлених сенсорів.

Wi-Fi HaLow (стандарт IEEE 802.11ah [18], прийнятий у 2017 році) орієнтований саме на IoT-сценарії: працює у субгігагерцовому діапазоні (902–928 МГц у США, 863–868 МГц у Європі), забезпечує дальність до 1 км і підтримку до 8000 пристроїв на точку доступу при швидкості від 150 кбіт/с до 86,7 Мбіт/с. Енергоспоживання у режимі очікування є суттєво нижчим, ніж у класичного Wi-Fi. HaLow дотепер залишається технологією з обмеженим поширенням в Україні через відсутність гармонізованого виділення відповідних частот для немовних застосувань і малу кількість сертифікованого обладнання, проте перспектива її використання у міських сценаріях зростає.

### **2.2.2 Bluetooth і Bluetooth Low Energy (BLE)**

Bluetooth Low Energy (стандарт Bluetooth 4.0+, оновлений у версіях 5.0, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 [17]) є ключовою технологією для енергоефективних персональних мереж IoT. BLE працює у діапазоні 2,4 ГГц, підтримує швидкості до 2 Мбіт/с (LE 2M), а також модифікації Long Range (Coded PHY) із збільшенням дальності у 4 рази за рахунок зниження швидкості. Дальність типових BLE-пристроїв становить 10–50 м у приміщенні, до 100–300 м на відкритому просторі (для Long Range).

BLE 5.1 додав функцію точного визначення напрямку прибуття сигналу (AoA — Angle of Arrival), що дозволяє реалізовувати високоточну внутрішню навігацію (Indoor Positioning) з точністю до десятків сантиметрів. У Smart City BLE використовується для маячкових систем (iBeacon, Eddystone), що надають контекстну інформацію відвідувачам музеїв, ТРЦ, транспортних хабів, а також

для систем моніторингу присутності, контролю доступу, носимих пристроїв охорони здоров'я.

Bluetooth Mesh (специфікація 2017 року) додав підтримку багатовузлових самоорганізованих мереж, що розширює застосування BLE на сценарії розумного освітлення усередині будівель і промислових об'єктів.

### **2.2.3 ZigBee і Thread**

ZigBee (на основі стандарту IEEE 802.15.4, специфікації ZigBee Pro, ZigBee 3.0) — це усталена технологія WPAN, орієнтована на низькошвидкісні самоорганізовані mesh-мережі з низьким енергоспоживанням. Працює у діапазонах 868 МГц (Європа), 915 МГц (Америка), 2,4 ГГц (глобально). Швидкість становить 20–250 кбіт/с, дальність — 10–100 м. Завдяки mesh-топології ZigBee забезпечує самовідновлення мережі при відмові окремих вузлів і покриття значних територій усередині будівель через ретрансляцію між пристроями.

Thread — це новіший протокол (Nest Labs / Thread Group, перша специфікація 2014 року, останні оновлення — 2023 року), також на базі IEEE 802.15.4, але із вбудованою підтримкою IPv6 (через 6LoWPAN). Thread позиціонується як майбутній стандарт смарт-будинку: разом з протоколом Matter (раніше CHIP, від Connectivity Standards Alliance, 2022 рік) він формує єдину екосистему сумісних пристроїв розумного дому від різних виробників (Apple, Google, Amazon, Samsung).

У Smart City Thread/ZigBee знаходять застосування у внутрішньому управлінні будівлями (Smart Buildings) — освітлення, HVAC, замки, датчики затоплення.

## 2.2.4 Z-Wave

Z-Wave — пропрієтарна (нині відкрита) технологія для домашньої автоматизації, що працює у субгігагерцовому діапазоні (868,4 МГц у Європі, 908,4 МГц у США). Швидкість становить 9,6–100 кбіт/с, дальність до 100 м у вільному просторі. Перевагою Z-Wave є відсутність взаємних завад з Wi-Fi і BLE через роботу у іншому діапазоні; обмеженням — невелика кількість постачальників обладнання (близько 700 сертифікованих пристроїв станом на 2024 рік) порівняно з ZigBee/Thread.

Зведення характеристик технологій ближнього радіусу дії наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Порівняння технологій ближнього радіусу дії

| Технологія     | Діапазон         | Швидкість              | Дальність | Топологія    |
|----------------|------------------|------------------------|-----------|--------------|
| Wi-Fi (802.11) | 2,4/5/6 ГГц      | до 9,6 Гбіт/с          | 50–250 м  | зірка        |
| Wi-Fi HaLow    | 863–928 МГц      | 150 кбіт/с – 86 Мбіт/с | до 1 км   | зірка        |
| Bluetooth/BLE  | 2,4 ГГц          | до 2 Мбіт/с            | 10–300 м  | зірка / mesh |
| ZigBee         | 868 МГц, 2,4 ГГц | 20–250 кбіт/с          | 10–100 м  | mesh         |
| Thread         | 2,4 ГГц          | 250 кбіт/с             | 10–30 м   | mesh (IPv6)  |
| Z-Wave         | 868,4 МГц        | 9,6–100 кбіт/с         | до 100 м  | mesh         |

## 2.3 LPWAN-технології неліцензованого спектра

LPWAN-технології неліцензованого спектра працюють у ISM-діапазонах і характеризуються поєднанням значної дальності (одиниці–десятки кілометрів) з мінімальним енергоспоживанням кінцевих пристроїв [7, 21]. Це досягається за

рахунок специфічних модуляцій (з розширенням спектра, ультранарроубенд) і відносно низьких швидкостей передавання (від десятків біт/с до десятків кбіт/с). Для Smart City основними представниками є LoRaWAN, Sigfox і Mioty.

### 2.3.1 LoRaWAN

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) — це найпоширеніша у світі LPWAN-технологія неліцензованого спектра [11, 12]. У основі радіофізичного рівня лежить запатентована компанією Semtech модуляція LoRa (Long Range), що є різновидом модуляції з лінійним розширенням спектра (Chirp Spread Spectrum, CSS). У 2022 році, за даними LoRa Alliance, LoRaWAN досягнув 65,9 млн поставлених чипсетів проти 22,4 млн у NB-IoT.

Робочі діапазони LoRaWAN залежать від регіону: 433 МГц і 868 МГц (плани EU868, IN865, RU864), 915 МГц (US915, AU915), 470 МГц (CN470). В Україні застосовується план EU868 (863–870 МГц), сумісний з ETSI EN 300 220 [13] і національним частотним планом. Швидкість передавання даних залежить від коефіцієнта розширення спектра (Spreading Factor, SF) і смуги пропускання каналу, варіюючись від 0,3 кбіт/с (SF12, BW 125 кГц) до 50 кбіт/с (SF7, BW 250 кГц у режимі FSK) [11].

Архітектура LoRaWAN є «зірка зірок» (star-of-stars): кінцеві пристрої передають радіопакети до всіх шлюзів у радіусі покриття, шлюзи у свою чергу пересилають отримані пакети через IP-канал до мережевого сервера (Network Server), який відповідає за маршрутизацію, дедуплікацію, керування швидкістю передавання (ADR — Adaptive Data Rate) і взаємодію з прикладними серверами. Підтримуються три класи пристроїв: Class A (найекономніший, передавання тільки за ініціативою пристрою; вікно для прийому open downlink відразу після передачі), Class B (синхронізовані вікна прийому за beacon-сигналом шлюза), Class C (постійно відкритий канал прийому — для пристроїв з мережевим живленням).

Безпека LoRaWAN базується на схемі з двома 128-бітними ключами AES (NwkSKey для шифрування на рівні мережі, AppSKey — на рівні застосувань) та процедурі активації OTAA (Over-The-Air Activation) з взаємною автентифікацією [11]. Версія LoRaWAN 1.1 (2017) усунула низку відомих уразливостей попередньої версії 1.0 і додала повне розділення мережевих та прикладних ключів.

Згідно з дослідженнями реальних розгортань [10, 32], LoRaWAN забезпечує понад 2 роки автономної роботи від однієї батареї і дальність до 11 км у сільській місцевості; водночас при понад 1000 пристроїв на один шлюз спостерігається істотне зростання частки колізій. У міських сценаріях типовою практикою є розгортання 1 шлюзу на 1,5–3 км<sup>2</sup> [6, 32].

Ключові переваги LoRaWAN для Smart City: значна дальність у міській забудові (2–5 км), мінімальне енергоспоживання, можливість приватного розгортання без операторської інфраструктури, низька вартість обладнання (модулі від \$5, шлюзи від \$200), широка екосистема сумісних пристроїв та активна спільнота LoRa Alliance [11]. Ключові обмеження: низька пропускна здатність, чутливість до колізій при високій щільності пристроїв, обмеження duty cycle (1% у діапазоні 863–868 МГц за ETSI EN 300 220 [13]), невелика підтримка мобільності.

### 2.3.2 Sigfox

Sigfox — пропріетарна LPWAN-технологія французької компанії Sigfox (заснованої у 2009 році). Використовує модуляцію UNB (Ultra Narrow Band) у субгігерцових діапазонах (868 МГц у Європі, 902 МГц у Північній Америці). Швидкість становить близько 100 біт/с (uplink) і 600 біт/с (downlink). Розмір корисного навантаження обмежений 12 байтами на пакет (uplink) і 8 байтами (downlink). Кількість повідомлень обмежена 140 uplink і 4 downlink на день на пристрій.

Архітектура Sigfox є виключно операторською моделлю: пристрої підключаються до публічної мережі Sigfox, що розгортається національними операторами-партнерами. Перевагами Sigfox є максимально низьке енергоспоживання, простота протоколу та значна дальність (до 40 км у сільській місцевості, рекордно — 280 км). Обмеження — жорсткі ліміти на трафік, неможливість приватного розгортання, обмежена кількість країн з активною мережею (станом на 2024 рік — близько 75).

У 2022 році Sigfox оголосив про процедуру реорганізації та частково перейшов під управління Unabiz. Це створює певну невизначеність щодо довгострокової стратегії технології, що знижує її привабливість для нових масштабних розгортань. В Україні мережа Sigfox станом на 2024 рік не розгорнута.

### **2.3.3 Mioty**

Mioty — порівняно нова LPWAN-технологія, розроблена німецьким Fraunhofer IIS і стандартизована ETSI TS 103 357 [16] (2020). Використовує запатентовану техніку Telegram Splitting Multiple Access (TSMA): кожне повідомлення розбивається на множину коротких субпакетів, які передаються випадково у часі й частоті, що дозволяє радикально знизити чутливість до колізій і завад.

Mioty підтримує дальність до 15 км у сільській і близько 5 км у щільній міській забудові, ємність до 1,5 мільйона повідомлень на день на одну базову станцію, енергоспоживання порівнянне з LoRaWAN. Mioty Alliance (заснований у 2020 році) активно розвиває екосистему, а технологія розглядається як перспективна для індустріальних застосувань і масових сенсорних мереж Smart City. В Україні Mioty поки що знаходиться на етапі ранніх пілотних проєктів.

## 2.4 LPWAN-технології ліцензованого спектра

LPWAN-технології ліцензованого спектра базуються на інфраструктурі стільникових операторів, працюють у виділених LTE-смугах і стандартизовані 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Основними представниками є NB-IoT (Narrow Band IoT) і LTE-M (LTE for Machines, Cat-M1).

### 2.4.1 NB-IoT (Narrow Band IoT)

NB-IoT був стандартизований 3GPP Release 13 (2016 рік) як виділена технологія для масових IoT-сценаріїв [8, 21]. Працює у смузі 200 кГц (1 PRB — Physical Resource Block у LTE), що дозволяє розгортати його одним з трьох режимів: in-band (всередині існуючої смуги LTE), guard-band (у захисних смугах LTE) або standalone (у звільнених GSM-смугах). NB-IoT використовує OFDMA (downlink) і SC-FDMA / Single Tone (uplink).

Швидкість передавання даних становить близько 250 кбіт/с (Release 13, NB1) і до 159 кбіт/с (Release 14, NB2) у downlink, та 250 кбіт/с (NB1) / 127 кбіт/с (NB2) у uplink. Енергозберігаючі режими PSM (Power Saving Mode) і eDRX (extended Discontinuous Reception) дозволяють кінцевому пристрою перебувати у глибокому сні до десятків годин, що забезпечує автономну роботу 5–10 років від батареї [8].

За дослідженнями реальних розгортань [10, 21], NB-IoT забезпечує 96–100% PDR при рівнях сигналу до  $-127$  дБм і підтримку десятків тисяч пристроїв на одну стільникову соту, проте при мобільному використанні енергоспоживання істотно зростає.

Ключові переваги NB-IoT для Smart City: операторська підтримка (для замовника не потрібно розгортати інфраструктуру), глибоке проникнення у приміщення (понад 20 дБ покращення лінкового бюджету порівняно зі звичайним LTE), стандартизація 3GPP з гарантованою сумісністю, тривала автономність. Обмеження: залежність від оператора, поточна вартість підключення (часто від

декількох гривень на пристрій на місяць), порівняно низька швидкість, незадовільна підтримка мобільності, поточно неповне покриття на території України (зокрема, у сільських районах).

#### 2.4.2 LTE-M (Cat-M1)

LTE-M (також відома як eMTC — enhanced Machine Type Communications, або Cat-M1) також стандартизована 3GPP Release 13 (2016) [14]. На відміну від NB-IoT, LTE-M працює у смузі 1,4 МГц (6 PRB), підтримує мобільність з handover між стільниковими сотами і вищу швидкість — до 1 Мбіт/с (Cat-M1) і до 4 Мбіт/с (Cat-M2, Release 14). Підтримуються голосові сервіси (VoLTE) і відеотелефонія.

Енергоспоживання LTE-M є дещо вищим за NB-IoT через ширшу смугу та підтримку додаткових сервісів, проте перевагою є нижча затримка (200 мс і менше) і можливість real-time комунікації. У дослідженнях [10] зазначається, що LTE-M забезпечує найвищу серед LPWAN-технологій пропускну здатність і затримки нижче 200 мс, проте погіршує своїх показників при рівнях сигналу нижче  $-113$  дБм.

Для Smart City LTE-M є оптимальною технологією у тих сценаріях, де потрібна комбінація енергоефективності і мобільності: відстеження транспортних засобів, носимі пристрої безпеки, ехокардіографи і інші медичні монітори, моніторинг рухомих контейнерів і поштових відправлень. Ключовим обмеженням є знов-таки залежність від оператора і нерівномірне покриття на території України.

Зведення параметрів LPWAN-технологій наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Зведене порівняння LPWAN-технологій

| Параметр          | LoRaWAN        | Sigfox    | Mioty          | NB-IoT     | LTE-M    |
|-------------------|----------------|-----------|----------------|------------|----------|
| Спектр            | ISM 868        | ISM 868   | ISM 868        | LTE        | LTE      |
| Смуга             | 125/250 кГц    | 100 Гц    | 200 кГц        | 200 кГц    | 1,4 МГц  |
| Швидкість uplink  | 0,3–50 кбіт/с  | 100 біт/с | 0,4–1,5 кбіт/с | 250 кбіт/с | 1 Мбіт/с |
| Дальність (місто) | 2–5 км         | 3–10 км   | 2–5 км         | 1–5 км     | 1–5 км   |
| Автономність      | до 10 р.       | до 15 р.  | до 10 р.       | до 10 р.   | до 7 р.  |
| Мобільність       | обмежена       | немає     | обмежена       | обмежена   | повна    |
| Розгортання       | приватне/опер. | опер.     | приватне/опер. | опер.      | опер.    |

## 2.5 Стільникові мережі 4G/LTE та 5G у контексті IoT

Стільникові мережі є базовою інфраструктурою для забезпечення широкосмугового зв'язку Smart City. Окрім LPWAN-варіантів NB-IoT і LTE-M (розглянутих у попередньому підрозділі), стандартні версії 4G/LTE [14] і 5G [15] також активно використовуються для тих IoT-сценаріїв, що потребують високої пропускної здатності, низьких затримок або мобільності.

### 2.5.1 4G LTE

Технологія LTE (Long Term Evolution) забезпечує швидкості downlink до 1 Гбіт/с (LTE Advanced Pro) при типових значеннях 30–100 Мбіт/с у мережах операторів. Категорії LTE-пристроїв (від Cat-1 до Cat-22) дають можливість

гнучко вибирати компроміс між швидкістю, складністю модуля та вартістю. Для IoT-сценаріїв Smart City категорія LTE Cat-1 (10 Мбіт/с downlink, 5 Мбіт/с uplink) часто є оптимальною для відеоспостереження, цифрової реклами, маршрутизаторів громадських Wi-Fi-зон.

В Україні мережі LTE покривають понад 95% населених пунктів (за даними операторів Kyivstar, Vodafone, lifecell станом на 2024 рік), що робить LTE найдоступнішою високошвидкісною технологією для Smart City.

### 2.5.2 5G New Radio

Мережі 5G стандарту 3GPP Release 15+ (2018 рік і пізніші) визначають три основні типи сервісів: eMBB (enhanced Mobile Broadband — швидкісний широкосмуговий доступ), URLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications — наднадійний зв'язок з мінімальними затримками) і mMTC (massive Machine Type Communications — масовий машинний зв'язок). Для IoT Smart City ключовими є саме URLLC і mMTC.

URLLC забезпечує затримки нижче 1 мс і надійність 99,999%, що робить його придатним для критичних застосувань — V2X, дистанційного керування критичною інфраструктурою, промислової автоматизації. mMTC (через NB-IoT і LTE-M, які офіційно увійшли до 5G-сімейства починаючи з Release 16) забезпечує підключення до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр.

eMBB (enhanced Mobile Broadband) є сервісом 5G, орієнтованим на максимально високу швидкість передавання даних (пікові швидкості до 10–20 Гбіт/с у міліметровому діапазоні, реальні швидкості користувача 100–1000 Мбіт/с у типових міських умовах) при помірних вимогах до затримки (10–20 мс). У контексті Smart City eMBB є основною технологією для застосувань з масивним потоковим трафіком: міське відеоспостереження високої роздільної здатності (1080p–4K), AR/VR-сервіси для громадян, мобільні робочі місця оперативних служб, потокова трансляція з безпілотних літальних апаратів. У порівнянні з LTE Cat-4/6 eMBB забезпечує вищу спектральну ефективність завдяки технологіям

Massive MIMO, формуванню променя (beamforming) та широким смугам каналу (100 МГц у sub-6 ГГц, 400 МГц у mmWave).

Окрему важливу групу формують технології зв'язку для інтелектуального транспорту (V2X — Vehicle-to-Everything). Дві паралельні гілки стандартизації — ITS-G5 (IEEE 802.11p / ETSI EN 302 663, на основі модифікованого Wi-Fi у діапазоні 5,9 ГГц) та C-V2X (Cellular V2X у двох режимах: PC5 — пряма передача між пристроями без участі базової станції, і Uu — через стільникову мережу), розроблений 3GPP Release 14+ і розвинутий до NR-V2X у Release 16. C-V2X у режимі Uu спирається на інфраструктуру LTE/5G і використовує URLLC-механізми, тоді як PC5 забезпечує децентралізовану взаємодію між автомобілями (V2V), з придорожною інфраструктурою (V2I) і пішоходами (V2P) у радіусі до 1 км з затримкою менше 100 мс. У межах роботи C-V2X і ITS-G5 не входять до основної порівняльної таблиці LPWAN-фокусу (таблиця 3.1), оскільки належать до спеціалізованого класу транспортних технологій; їх характеристики розглядаються окремо у підрозділі 3.4.6 як спеціалізовані рішення для сценарію V2X.

Розгортання 5G в Україні станом на 2024 рік перебуває на стадії підготовки до комерційного запуску. Очікується, що повномасштабне розгортання 5G у мегаполісах (Київ, Львів, Одеса) сприятиме якісному стрибку у можливостях Smart City, зокрема у сферах V2X, AR/VR-сервісів для громадян, інтегрованих систем безпеки.

### **2.5.3 Network Slicing та Multi-Access Edge Computing**

Окремою важливою функціональністю 5G є network slicing — можливість логічного розділення єдиної фізичної мережі на множину віртуальних мереж з різними характеристиками (пропускною здатністю, затримкою, надійністю, безпекою) під різні класи сервісів. Для Smart City це означає, що один оператор може одночасно надавати критичним сервісам безпеки слайс із гарантованою

якістю, муніципальним сервісам — слайс з підтримкою mMTC, а громадським користувачам — звичайний eMBB-слайс.

Multi-Access Edge Computing (MEC) — інша важлива технологія: обчислювальні ресурси виносяться на «край» мережі оператора (наприклад, на базові станції або у мережеві сегменти оператора), що дозволяє запускати застосунки з вимогами до низьких затримок (відеоаналітика, AR/VR) без необхідності проходження трафіку до центральних дата-центрів.

## 2.6 Прикладні протоколи IoT: MQTT, CoAP, LwM2M

Окрім розглянутих вище технологій радіодоступу, важливою складовою повного телекомунікаційного стеку IoT є прикладні протоколи, які регулюють формат і логіку обміну повідомленнями між кінцевими пристроями, шлюзами і платформами. Найпоширенішими у Smart City-сценаріях є MQTT, CoAP і LwM2M.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, стандарт OASIS MQTT v5.0 [19], ISO/IEC 20922:2016) — легковажний протокол публікації-підписки на основі TCP/IP. Завдяки малому розміру заголовків (від 2 байт) і трьом рівням QoS (0 — без підтвердження, 1 — гарантована доставка з можливими повторами, 2 — гарантована одноразова доставка) MQTT став де-факто стандартом для IoT-комунікацій на рівні платформи. У сценаріях Smart City MQTT використовується для з'єднання шлюзів LPWAN з мережевим сервером, передачі телеметрії до диспетчерських панелей, інтеграції з хмарними платформами.

CoAP (Constrained Application Protocol, IETF RFC 7252) — REST-подібний протокол, спеціально розроблений для пристроїв з обмеженими обчислювальними ресурсами. На відміну від MQTT, CoAP працює поверх UDP, у захищеному варіанті — поверх DTLS (RFC 6347). CoAP підтримує методи GET/POST/PUT/DELETE, аналогічні HTTP, а також підписку на ресурси через механізм Observe. Розмір повідомлень CoAP типово становить 4 байти заголовку + до кількох десятків байт корисного навантаження, що робить його ідеальним

для LPWAN-сценаріїв з суворими обмеженнями на трафік. CoAP знайшов широке застосування у NB-IoT-розгортаннях.

LwM2M (Lightweight Machine-to-Machine, специфікація Open Mobile Alliance, ОМА, поточна версія 1.2 2022 року) — спеціалізований протокол керування IoT-пристроями, побудований поверх CoAP. LwM2M стандартизує об'єктну модель пристрою (Device, Connectivity, Firmware Update, Location та ін.) і операції з ними, що забезпечує єдиний інтерфейс для керування пристроями різних виробників на одній платформі. LwM2M активно підтримується операторами NB-IoT/LTE-M для масового керування мільйонами пристроїв.

Окремо варто відзначити роль брокерів повідомлень (MQTT Broker) — Eclipse Mosquitto, EMQX, HiveMQ — і платформ керування пристроями — Eclipse Leshan, FIWARE IoT Agent, ThingsBoard, AWS IoT Core, Azure IoT Hub. У контексті приватної LoRaWAN-мережі типовим стеком є ChirpStack Network Server + MQTT Broker (Mosquitto) + ThingsBoard як платформа візуалізації і керування правилами. Для операторських сценаріїв NB-IoT/LTE-M переважно використовуються LwM2M-керовані платформи з абонентськими порталами.

## **2.7 Супутникові IoT-рішення та перспективні технології**

### **2.7.1 Супутникові IoT-системи**

Супутникові IoT-системи забезпечують глобальне покриття, що критично важливо для моніторингу рухомих об'єктів (логістика, морський транспорт, авіація), віддалених критичних об'єктів (нафто- і газопроводи, метеостанції, гідрологічні пости) та сценаріїв резервного зв'язку при відмові наземних мереж. Основні класи супутникових IoT-систем: геостаціонарні (Inmarsat IsatM2M, Thuraya), низькоорбітальні (Iridium Short Burst Data, Globalstar), а також нові констеляції LEO для IoT (Swarm/SpaceX, Astrocast, Sateliot, Lacuna Space, FleetSpace).

Стандартизація супутникового IoT відбувається в межах 3GPP Release 17/18 під назвою Non-Terrestrial Networks (NTN), що відкриває можливість подвійного

режиму роботи модулів (LTE/5G на землі та NTN над незабезпеченими наземним покриттям територіями). У контексті Smart City супутниковий IoT відіграє роль резервного каналу для критичних застосувань і покриття приміських/сільських зон.

### **2.7.2 Перспективні технології та 6G**

Перспективні напрями розвитку IoT-технологій включають: 6G (очікувані стандарти 2028–2030 років з акцентом на терагерцовий діапазон, штучний інтелект як інтегровану функцію мережі, голографічні комунікації, масивне залучення супутникових і повітряних платформ); інтеграцію IoT з мережами supplementary devices (HAPS — High Altitude Platform Stations, FSO — Free Space Optical); розширені практики Time-Sensitive Networking (TSN) для індустріальних мереж; розвиток квантово-стійких алгоритмів шифрування для IoT в умовах загрози квантових обчислень.

### **2.8 Висновки до розділу 2**

У другому розділі проведено систематизований огляд сучасних телекомунікаційних технологій, що застосовуються для побудови IoT-інфраструктури Smart City.

По-перше, запропоновано класифікацію телекомунікаційних технологій IoT за дальністю (WPAN / WLAN / LPWAN / WWAN), типом частотного спектра (ліцензований / неліцензований) і моделлю розгортання (приватна / операторська / гібридна), що дає основу для подальшого порівняльного аналізу.

По-друге, розглянуто шість груп технологій ближнього радіусу дії (Wi-Fi, Wi-Fi HaLow, BLE, ZigBee, Thread, Z-Wave), показано їх застосування у мережах локального масштабу Smart City — публічного Wi-Fi, систем розумного освітлення у приміщеннях, носимих пристроїв, контролю доступу. Виявлено, що

для масових міських сценаріїв ці технології не підходять через обмежену дальність і високе енергоспоживання Wi-Fi/BLE.

По-третє, проаналізовано п'ять провідних LPWAN-технологій — LoRaWAN, Sigfox, Mioty (неліцензований спектр) і NB-IoT, LTE-M (ліцензований спектр). Встановлено, що LoRaWAN залишається лідером ринку приватних мереж завдяки балансу дальності, енергоефективності і вартості; NB-IoT є оптимальним рішенням для операторських масових IoT-сервісів з гарантованою якістю; LTE-M доповнює NB-IoT у мобільних сценаріях; Sigfox і Mioty займають нішеві позиції.

По-четверте, розглянуто роль стільникових технологій 4G/LTE і 5G у IoT-інфраструктурі Smart City, проаналізовано можливості 5G URLLC, mMTC, network slicing і MEC; показано перспективні напрями подальшого розвитку (супутникові IoT-системи у режимі NTN, 6G).

Здійснений огляд формує технологічну базу для третього розділу, у якому буде розроблено систему критеріїв порівняльної оцінки, виконано власне порівняльний аналіз і запропоновано методику багатокритеріального вибору технологій під типові сценарії Smart City.

## 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ І МЕТОДИКА ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

### 3.1 Формування системи критеріїв оцінки

Для обґрунтованого порівняння телекомунікаційних технологій IoT необхідно сформувати систему критеріїв, яка б, з одного боку, охоплювала всі суттєві для практики аспекти, а з іншого — забезпечувала кількісну зіставність технологій з різними фізичними принципами роботи [7, 9, 20]. На основі сформульованих у підрозділі 1.4 вимог пропонується система з восьми основних критеріїв оцінки, які поділяються на технічні (K1–K5), вартісні (K6), якісно-безпекові (K7) та критерій-фільтр доступності (K8). Перші сім критеріїв (K1–K7) використовуються у методі аналізу ієрархій для обчислення інтегрального рейтингу, а критерій K8 застосовується як попередній жорсткий фільтр — для виключення альтернатив без національної інфраструктури або зрілої екосистеми.

Критерій K1 — дальність зв'язку (Range, км). Це максимальна відстань між кінцевим пристроєм і шлюзом (або базовою станцією), при якій забезпечується надійна доставка повідомлень із прийнятною часткою втрат ( $PDR \geq 95\%$ ). Оцінюється у міській забудові, окремо враховується дальність у відкритому просторі. Для коректного порівняння використовується типова дальність у щільній міській забудові.

Критерій K2 — швидкість передавання даних (Throughput, кбіт/с). Це швидкість корисного навантаження у каналі uplink, що є визначальною для більшості сценаріїв Smart City. Вимірюється на верхньому рівні швидкості, доступної у регіональному частотному плані без врахування накладних витрат.

Критерій K3 — енергоефективність (Energy efficiency, років автономної роботи). Оцінюється як очікуваний термін автономної роботи кінцевого пристрою від типової первинної батареї Li-SOCl<sub>2</sub> ємністю 19 А·год при типовому профілі трафіку (одне повідомлення розміром 50 байт раз на годину) і середнім якісним сигналом.

Критерій K4 — ємність мережі / масштабованість (Capacity, кінцевих пристроїв на шлюз / соту). Це максимальна кількість пристроїв, які може обслуговувати один шлюз або стільникова сота без значного зростання частки втрачених пакетів.

Критерій K5 — затримка передавання даних (Latency, мс / с). Час від моменту ініціалізації передавання у кінцевому пристрої до отримання повідомлення мережевим сервером. Особливо важливий для сценаріїв безпеки і V2X.

Критерій K6 — вартість розгортання та експлуатації (Cost, у.о.). Інтегральний показник, що враховує: вартість модуля кінцевого пристрою (CAPEX-1), вартість шлюзової інфраструктури або підключення до операторської мережі (CAPEX-2 і OPEX), очікувану повну вартість володіння (TCO) на пристрій за 5 років. Для зіставності оцінюється у п'ятибальній шкалі, де бал прив'язано до конкретних діапазонів TCO на один пристрій за 5 років у доларах США: 1 бал —  $TCO < 50$  USD (най дешевше: LoRaWAN, BLE Long Range у приватних мережах без абонентської плати); 2 бали — 50–100 USD (Sigfox, Mioty, Wi-Fi HaLow); 3 бали — 100–200 USD (NB-IoT, LTE-M при типовій абонентській платі 0,5–1 USD/міс); 4 бали — 200–500 USD (5G mMTC, профі-сценарії з підвищеним QoS); 5 балів —  $> 500$  USD (найдорожче: 5G eMBB з широкосмуговим трафіком, спеціалізовані рішення для V2X). У задачах, де доступні точні значення TCO в USD на пристрій, замість дискретної шкали можна використовувати безпосередньо TCO як вхідну величину з нормалізацією за формулою (3.2) — «чим менше, тим краще».

Критерій K7 — інформаційна безпека та якість сервісу (Security/QoS, бал 1–5). Оцінює наявність стандартизованого шифрування, взаємної автентифікації, гарантій QoS, можливості FUOTA, зрілість екосистеми, рівень підтримки оператором.

Критерій K8 — доступність національної інфраструктури та зрілість екосистеми (Availability, бінарне значення 0/1 або бал 1–5). На відміну від K1–K7, які описують внутрішні характеристики самої технології, K8 фіксує зовнішню

умову — наявність розгорнутої публічної мережі оператора або достатньої кількості постачальників обладнання й інтеграторів у країні впровадження.  $K_8$  відіграє роль жорсткого обмежувача-фільтра: технологія, для якої  $K_8 = 0$  (інфраструктура відсутня), виключається з рейтингового порівняння до обчислення інтегрального рейтингу  $R_k$  незалежно від її значень за іншими критеріями. Це формалізує дворівневий процес ухвалення рішення: спочатку — попередній фільтр доступних альтернатив за  $K_8$ , потім — рейтингове порівняння допущених альтернатив за  $K_1$ – $K_7$  методом аналізу ієрархій. Зокрема, для умов України станом на 2024–2026 роки  $K_8 = 0$  для Sigfox (відсутня національна мережа оператора),  $K_8 = 1$  для LoRaWAN (значна кількість приватних шлюзів і постачальників), NB-IoT і LTE-M (розгорнуті операторами «Київстар», «Vodafone Україна», lifecell), а також для Wi-Fi HaLow і Mioty ( $K_8$  умовно «частково» — обладнання доступне на імпорт, регуляторні умови погоджені). Для 5G технологій (eMBB, URLLC, mMTC)  $K_8$  наразі дорівнює 0 до моменту комерційного запуску мереж 5G в Україні.

### 3.2 Зведена порівняльна таблиця характеристик

На основі сформованої системи критеріїв виконано порівняльний аналіз дев'яти ключових технологій, що мають практичне значення для Smart City: LoRaWAN, Sigfox, Mioty, NB-IoT, LTE-M, 5G mMTC, 5G eMBB, Wi-Fi HaLow і BLE Long Range. Wi-Fi (звичайний), ZigBee, Thread і Z-Wave вилучені з рейтингового порівняння через істотно інше призначення (локальні мережі), однак їх характеристики наведено для довідки. Спеціалізовані транспортні технології C-V2X (PC5/Uu) і ITS-G5 (IEEE 802.11p), які за вимогами не належать до LPWAN-фокусу таблиці, додатково розглядаються у підрозділі 3.4.6 для сценарію інтелектуального транспорту V2X.

Кількісні значення критеріїв беруться з технічних специфікацій (ETSI [13, 16], 3GPP [14, 15], LoRa Alliance [11, 12], Bluetooth SIG [17], IEEE 802.11ah [18]), результатів польових досліджень peer-reviewed публікацій 2022–2026 років [9, 10,

20, 21, 32] та аналітичних оглядів IoT Analytics [5]. Зведена порівняльна таблиця подана у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Зведене порівняння телекомунікаційних технологій IoT за сімома критеріями

| Технологія     | K1, км  | K2, кбіт/с | K3, років | K4, шт. | K5, мс | K6, у.о. | K7 |
|----------------|---------|------------|-----------|---------|--------|----------|----|
| LoRaWAN        | 2–5     | 0,3–50     | 8–10      | 10000   | 1000+  | 1        | 4  |
| Sigfox         | 3–10    | 0,1        | до 15     | 1000000 | 1000+  | 2        | 3  |
| Mioty          | 2–5     | 0,4–1,5    | 8–10      | 1500000 | 1000+  | 2        | 4  |
| NB-IoT         | 1–5     | 250        | 5–10      | 50000   | 1500   | 3        | 5  |
| LTE-M          | 1–5     | 1000       | 3–7       | 10000   | 100    | 3        | 5  |
| 5G mMTC        | 1–5     | 1000+      | 5–10      | 1000000 | 10     | 4        | 5  |
| 5G eMBB        | 1–3     | 100000+    | 1–3       | 10000   | 10     | 5        | 5  |
| Wi-Fi HaLow    | до 1    | 150–86000  | 1–3       | 8000    | 20     | 2        | 4  |
| BLE Long Range | 0,1–0,3 | до 2000    | 1–3       | 200     | 20     | 1        | 4  |

Аналіз таблиці показує, що жодна технологія не є оптимальною за всіма критеріями одночасно. LoRaWAN і BLE Long Range мають найнижчу вартість CAPEX, але обмежені за швидкістю; Sigfox і Mioty забезпечують максимальну ємність, але мають низькі швидкості; NB-IoT, LTE-M і 5G mMTC надають високу пропускну здатність і безпеку, проте дорожчі та залежні від оператора; 5G eMBB забезпечує найвищу пропускну здатність ( $\geq 100$  Мбіт/с на пристрій) при низькій затримці й високій безпеці, проте має короткий термін автономної роботи та найвищу вартість і застосовується для широкосмугових сценаріїв

(відеоспостереження, AR/VR). Це є типовою задачею багатокритеріального вибору, для розв'язання якої доцільно застосувати метод аналізу ієрархій.

### 3.3 Методика багатокритеріального вибору на основі МАІ

Метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНР), запропонований Т. Саау у 1970-х роках [22, 23], є одним з найбільш визнаних інструментів багатокритеріального ухвалення рішень. Його перевагами для нашої задачі є: можливість роботи з якісно і кількісно вираженими критеріями; розкладання складної задачі на ієрархію (мета — критерії — альтернативи); врахування суб'єктивних експертних оцінок з контролем їх узгодженості.

Узагальнений алгоритм методики, адаптованої для вибору телекомунікаційної технології ІоТ, складається із семи кроків.

Крок 1 — формалізація сценарію застосування. Для кожного типового сценарію Smart City визначається набір характеристик: середній розмір повідомлення (байт), частота передавання (повідомлень/добу), кількість пристроїв на одиницю площі, типова дальність до точки агрегації, допустима затримка, бажаний термін автономної роботи, наявність потреби у мобільності.

Крок 2 — нормалізація значень критеріїв. Оскільки критерії мають різну розмірність і напрям оптимізації (одні «чим більше — тим краще» — дальність, ємність, безпека; інші «чим менше — тим краще» — затримка, вартість), вони нормалізуються до інтервалу [0; 1] за такими формулами:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \text{ — для критеріїв «чим більше, тим краще»} \quad (3.1)$$

$$x'_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \text{ — для критеріїв «чим менше, тим краще»} \quad (3.2)$$

Тут  $x_i$  — значення  $i$ -го критерію для конкретної технології,  $x_{\min}$  і  $x_{\max}$  — мінімальне і максимальне значення цього критерію за множиною всіх альтернатив. Для перевірних шкал (наприклад, для критерію КЗ «років автономної роботи», де практичним діапазоном є 1–15) можна нормалізувати на ці фіксовані межі замість поточних  $\min/\max$ .

Крок 3 — побудова матриці парних порівнянь критеріїв. Для кожного сценарію експертно (або з використанням попередньо узгоджених профілів) формується матриця  $A$  розмірності  $7 \times 7$ , де  $a_{ij}$  — відношення важливості  $i$ -го критерію до  $j$ -го за дев'ятибальною шкалою Т. Сааті (1 — рівні, 3 — помірна перевага, 5 — істотна, 7 — значна, 9 — абсолютна; 2, 4, 6, 8 — проміжні значення; зворотні значення для оберненого порівняння).

Крок 4 — обчислення вагових коефіцієнтів критеріїв. Вагові коефіцієнти  $w_i$  обчислюються як нормалізований головний власний вектор матриці  $A$ :

$$w_i = \frac{\left(\prod_j a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_k \left(\prod_j a_{kj}\right)^{1/n}}, \quad n = 7 \quad (3.3)$$

Крок 5 — перевірка узгодженості. Обчислюється індекс узгодженості  $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ , де  $\lambda_{\max}$  — максимальне власне число матриці. Відношення узгодженості  $CR = CI/RI$  (де  $RI$  — табличне середнє значення індексу узгодженості для випадкової матриці; для  $n=7$   $RI = 1,32$ ) має не перевищувати 0,1. У іншому випадку матриця парних порівнянь переглядається експертом.

Крок 6 — обчислення інтегрального рейтингу альтернатив. Для кожної технології  $k$  обчислюється інтегральний бал:

$$R_k = \sum_i w_i \cdot x'_i(k), \quad i = 1 \dots 7 \quad (3.4)$$

Оптимальною вважається технологія з максимальним значенням  $R_k$ . Принципово важливо те, що вагові коефіцієнти  $w_i$  змінюються залежно від сценарію: для сценаріїв з пріоритетом масовості (інтелектуальний облік ресурсів) високу вагу має критерій ємності  $K4$  і автономності  $K3$ ; для сценаріїв безпеки —  $K5$  і  $K7$ ; для сценаріїв ширококанальних —  $K2$  і  $K5$ .

Крок 7 — перевірка жорстких обмежень доступності (критерій  $K8$ ). Після обчислення інтегрального рейтингу за технічними та вартісними критеріями результат перевіряється на сумісність із зовнішніми умовами впровадження — насамперед, доступністю національної інфраструктури оператора і зрілістю екосистеми постачальників. Якщо альтернатива з максимальним  $R_k$  не задовольняє  $K8 = 1$ , вона виключається з вибору, і переможцем стає наступна за

рейтингом альтернатива з  $K8 = 1$ . Формально це реалізує дворівневу процедуру ухвалення рішення: попередній фільтр доступних альтернатив за  $K8$  (на вході — повний перелік технологій, на виході — допустимі альтернативи); власне рейтингове порівняння методом МАІ серед допущених альтернатив за критеріями  $K1$ – $K7$ . У ряді сценаріїв доцільно виконати фільтр  $K8$  до обчислення вагів (Крок 3), щоб зменшити обсяг обчислень; у методичному викладі фільтр винесено в кінець для чіткого розмежування внутрішніх характеристик технології та зовнішніх обмежень. Прикладом застосування Кроку 7 є сценарій інтелектуального обліку ресурсів (див. підрозділ 3.3.1), де за  $K1$ – $K7$  теоретичний максимум  $R_k$  отримує Sigfox, проте через відсутність національної мережі Sigfox в Україні ( $K8 = 0$ ) практичним переможцем серед допустимих альтернатив стає LoRaWAN ( $R = 0,487$ ); NB-IoT ( $R = 0,445$ ) — найближча альтернатива, доцільна для щільної міської забудови з вимогою гарантованого покриття оператора у приміщеннях.

На рисунку 3.1 наведено блок-схему запропонованої методики.

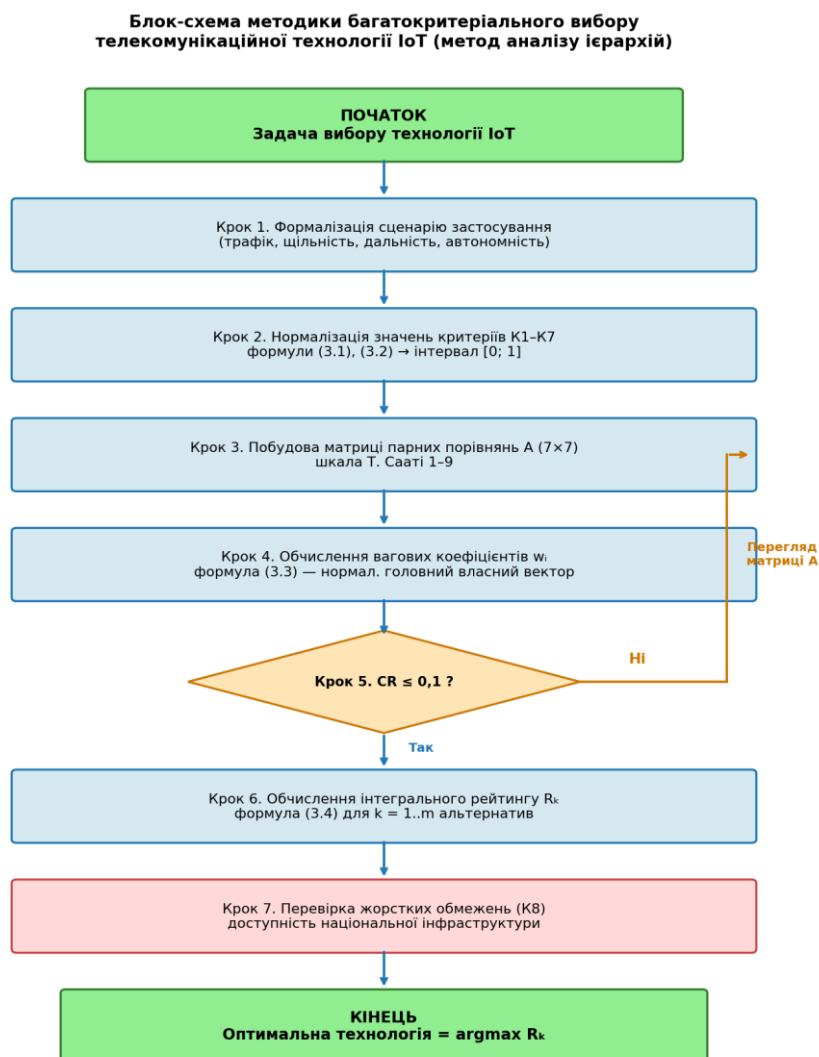


Рисунок 3.1 — Блок-схема методики багатокритеріального вибору телекомунікаційної технології IoT

### 3.3.1 Приклад застосування методики для сценарію обліку ресурсів

Для ілюстрації роботи запропонованої методики багатокритеріального вибору наведемо повний робочий приклад її застосування для сценарію інтелектуального обліку комунальних ресурсів (підрозділ 3.4.2). Мета прикладу — продемонструвати всі обчислювальні кроки методики на реальних числових даних і показати порядок отримання інтегрального рейтингу альтернатив.

**Вихідні дані сценарію.** Сценарій: розгортання мережі з 1500 батареино-живлених лічильників води і тепла у міському кварталі. Профіль трафіку — 4 повідомлення на добу розміром 12 байт корисного навантаження. Цільові

показники: автономність  $\geq 8$  років, дальність до точки агрегації 1,5–3 км у щільній міській забудові, очікувана частка доставки пакетів  $\geq 95\%$ , повна вартість володіння на 5 років не повинна перевищувати 100 USD на пристрій.

Альтернативи:  $A_1$  — LoRaWAN;  $A_2$  — NB-IoT;  $A_3$  — Sigfox;  $A_4$  — Mioty;  $A_5$  — LTE-M. Технології Wi-Fi HaLow, BLE Long Range і 5G eMBB вилучені з аналізу як такі, що не задовольняють базовим вимогам автономності або вартості.

**Матриця парних порівнянь критеріїв.** Експертно сформована матриця парних порівнянь критеріїв за дев'ятибальною шкалою Т. Сааті для розглядуваного сценарію подана у таблиці 3.2. Експертна група складалася з трьох інженерів-проектувальників IoT-мереж, оцінки попередньо узгоджувались методом середнього геометричного.

Таблиця 3.2 — Матриця парних порівнянь критеріїв для сценарію обліку ресурсів

|                 | K1  | K2  | K3  | K4  | K5 | K6  | K7  |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| K1 Дальність    | 1   | 5   | 1/3 | 1   | 7  | 1/2 | 2   |
| K2 Швидкість    | 1/5 | 1   | 1/9 | 1/5 | 3  | 1/7 | 1/3 |
| K3 Автономність | 3   | 9   | 1   | 2   | 9  | 1   | 3   |
| K4 Ємність      | 1   | 5   | 1/2 | 1   | 7  | 1/2 | 2   |
| K5 Затримка     | 1/7 | 1/3 | 1/9 | 1/7 | 1  | 1/7 | 1/5 |
| K6 Вартість     | 2   | 7   | 1   | 2   | 7  | 1   | 3   |
| K7 Безпека/QoS  | 1/2 | 3   | 1/3 | 1/2 | 5  | 1/3 | 1   |

**Обчислення вагових коефіцієнтів.** Вагові коефіцієнти критеріїв обчислюються як нормалізований головний власний вектор матриці парних

порівнянь (формула 3.3). На першому кроці для кожного рядка матриці обчислюється середнє геометричне елементів:

$$g_i = \left( \prod_j a_{ij} \right)^{1/n}, \quad n = 7$$

Результати обчислень  $g_i$  для кожного критерію:

$$K1: g_1 = (1 \cdot 5 \cdot 0,333 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 0,5 \cdot 2)^{1/7} \approx 1,420,$$

$$K2: g_2 = (0,2 \cdot 1 \cdot 0,111 \cdot 0,2 \cdot 3 \cdot 0,143 \cdot 0,333)^{1/7} \approx 0,349,$$

$$K3: g_3 = (3 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 3)^{1/7} \approx 2,831,$$

$$K4: g_4 = (1 \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 7 \cdot 0,5 \cdot 2)^{1/7} \approx 1,505,$$

$$K5: g_5 = (0,143 \cdot 0,333 \cdot 0,111 \cdot 0,143 \cdot 1 \cdot 0,143 \cdot 0,2)^{1/7} \approx 0,216,$$

$$K6: g_6 = (2 \cdot 7 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 1 \cdot 3)^{1/7} \approx 2,487,$$

$$K7: g_7 = (0,5 \cdot 3 \cdot 0,333 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 0,333 \cdot 1)^{1/7} \approx 0,882.$$

$$\text{Сума: } \Sigma g_i \approx 1,420 + 0,349 + 2,831 + 1,505 + 0,216 + 2,487 + 0,882 = 9,690.$$

$$\text{Нормалізовані ваги: } w_i = g_i / \Sigma g_i:$$

Таблиця 3.3 — Розрахунок вагових коефіцієнтів критеріїв

| Критерій                 | $g_i$        | $w_i$        | Прийнято    |
|--------------------------|--------------|--------------|-------------|
| K1 Дальність зв'язку     | 1,420        | 0,147        | 0,15        |
| K2 Швидкість передавання | 0,349        | 0,036        | 0,03        |
| K3 Енергоефективність    | 2,831        | 0,292        | 0,28        |
| K4 Ємність мережі        | 1,505        | 0,155        | 0,15        |
| K5 Затримка              | 0,216        | 0,022        | 0,02        |
| K6 Вартість              | 2,487        | 0,257        | 0,27        |
| K7 Безпека/QoS           | 0,882        | 0,091        | 0,10        |
| <b>Сума</b>              | <b>9,690</b> | <b>1,000</b> | <b>1,00</b> |

Отримані вагові коефіцієнти округлено та узгоджено із сформульованим у підрозділі 3.4.2 експертним профілем сценарію (стовпчик «Прийнято»,  $\Sigma = 1,00$ ); саме ці значення використано у подальших обчисленнях. Найбільшу вагу мають

критерії K3 (автономність, 28%) та K6 (вартість, 27%), що цілком відображає специфіку масового сценарію інтелектуального обліку.

**Перевірка узгодженості матриці.** Максимальне власне число  $\lambda_{\max}$  обчислюється як середнє по рядках добутку матриці на вектор ваг, поділеного на самі ваги. Виконавши матричні обчислення, отримуємо  $\lambda_{\max} \approx 7,183$ .

Індекс узгодженості:  $CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = (7,183 - 7) / 6 \approx 0,031$ .

Випадковий індекс для матриці розмірності 7 згідно з табл. Т. Saaty:  $RI = 1,32$ .

Відношення узгодженості:  $CR = CI / RI = 0,031 / 1,32 \approx 0,023$ . Оскільки  $CR = 0,023 < 0,1$ , матриця парних порівнянь є узгодженою і її результати приймаються до подальших обчислень.

**Нормалізація значень критеріїв.** Зведена таблиця значень критеріїв для п'яти альтернатив (узята з таблиці 3.1 із застосуванням типових значень для розглядуваного сценарію) подана у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Значення критеріїв для альтернатив (вихідні значення)

| Альтернатива           | K1, км | K2,<br>кбіт/с | K3,<br>років | K4, шт. | K5, с | K6, у.о. | K7, бал |
|------------------------|--------|---------------|--------------|---------|-------|----------|---------|
| A <sub>1</sub> LoRaWAN | 3      | 5             | 9            | 1500    | 1,0   | 1,5      | 4       |
| A <sub>2</sub> NB-IoT  | 3      | 250           | 8            | 50000   | 1,5   | 3,0      | 5       |
| A <sub>3</sub> Sigfox  | 5      | 0,1           | 12           | 10000   | 1,5   | 2,5      | 3       |
| A <sub>4</sub> Mioty   | 3      | 1             | 9            | 10000   | 1,0   | 2,0      | 4       |
| A <sub>5</sub> LTE-M   | 3      | 1000          | 5            | 10000   | 0,1   | 3,5      | 5       |

Застосувавши формули (3.1) і (3.2) до значень таблиці 3.4, отримуємо нормалізовані значення критеріїв (таблиця 3.5). Для критеріїв K5 (затримка) і K6 (вартість) застосовується формула (3.2) — «чим менше, тим краще», для решти — формула (3.1).

Таблиця 3.5 — Нормалізовані значення критеріїв

| Альтернатива           | K1'  | K2'   | K3'  | K4'  | K5'  | K6'  | K7'  |
|------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|
| A <sub>1</sub> LoRaWAN | 0,00 | 0,005 | 0,57 | 0,00 | 0,36 | 1,00 | 0,50 |
| A <sub>2</sub> NB-IoT  | 0,00 | 0,250 | 0,43 | 1,00 | 0,00 | 0,25 | 1,00 |
| A <sub>3</sub> Sigfox  | 1,00 | 0,000 | 1,00 | 0,17 | 0,00 | 0,50 | 0,00 |
| A <sub>4</sub> Mioty   | 0,00 | 0,001 | 0,57 | 0,17 | 0,36 | 0,75 | 0,50 |
| A <sub>5</sub> LTE-M   | 0,00 | 1,000 | 0,00 | 0,17 | 1,00 | 0,00 | 1,00 |

**Обчислення інтегрального рейтингу.** Інтегральний рейтинг для кожної альтернативи обчислюється за формулою (3.4):

$$R_k = \sum_i w_i \cdot x_i'(k)$$

Виконавши скалярний добуток рядка нормалізованих значень з вектором ваг  $w = (0,15; 0,03; 0,28; 0,15; 0,02; 0,27; 0,10)$ , отримаємо:

$$\text{— } R(A_1 \text{ LoRaWAN}) = 0,15 \cdot 0 + 0,03 \cdot 0,005 + 0,28 \cdot 0,57 + 0,15 \cdot 0 + 0,02 \cdot 0,36 + 0,27 \cdot 1,00 + 0,10 \cdot 0,50 \approx 0,487$$

$$\text{— } R(A_2 \text{ NB-IoT}) = 0,15 \cdot 0 + 0,03 \cdot 0,25 + 0,28 \cdot 0,43 + 0,15 \cdot 1,00 + 0,02 \cdot 0 + 0,27 \cdot 0,25 + 0,10 \cdot 1,00 \approx 0,445$$

$$\text{— } R(A_3 \text{ Sigfox}) = 0,15 \cdot 1,00 + 0,03 \cdot 0 + 0,28 \cdot 1,00 + 0,15 \cdot 0,17 + 0,02 \cdot 0 + 0,27 \cdot 0,50 + 0,10 \cdot 0 \approx 0,591$$

$$\text{— } R(A_4 \text{ Mioty}) = 0,15 \cdot 0 + 0,03 \cdot 0,001 + 0,28 \cdot 0,57 + 0,15 \cdot 0,17 + 0,02 \cdot 0,36 + 0,27 \cdot 0,75 + 0,10 \cdot 0,50 \approx 0,445$$

$$\text{— } R(A_5 \text{ LTE-M}) = 0,15 \cdot 0 + 0,03 \cdot 1,00 + 0,28 \cdot 0 + 0,15 \cdot 0,17 + 0,02 \cdot 1,00 + 0,27 \cdot 0 + 0,10 \cdot 1,00 \approx 0,176$$

Зведений результат подано у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 — Інтегральний рейтинг альтернатив для сценарію обліку ресурсів

| Альтернатива | Рейтинг R | Місце          | Приміт. |
|--------------|-----------|----------------|---------|
| Sigfox       | 0,591     | 1 (теоретичне) | *       |
| LoRaWAN      | 0,487     | 2 / 1 (практ.) |         |
| NB-IoT       | 0,445     | 3 / 2 (практ.) |         |
| Mioty        | 0,445     | 4              |         |
| LTE-M        | 0,176     | 5              |         |

Зауваження (\*): теоретично найвищий рейтинг за критеріями K1–K7 отримала технологія Sigfox завдяки максимальній автономності і прийнятній вартості. Проте практичне застосування Sigfox в Україні станом на 2024–2026 роки неможливе через відсутність національної інфраструктури оператора. У термінах розробленої у підрозділі 3.3 методики це формалізується як  $K8 = 0$  (Крок 7 — перевірка жорстких обмежень доступності), внаслідок чого Sigfox вилючається з рейтингового переліку до фінального вибору. З урахуванням цього обмеження практичним переможцем для сценарію в Україні стає LoRaWAN ( $R = 0,487$ ) — завдяки низькій вартості пристрою, відсутності абонентської плати та великій автономності за рахунок енергоефективного радіодоступу. Основною альтернативою залишається NB-IoT ( $R = 0,445$ ), доцільний для щільної міської забудови з вимогою гарантованого покриття оператора у приміщеннях (підвали, підкорпусні приміщення). Зауважимо, що NB-IoT і Mioty за інтегральним рейтингом практично рівні ( $R \approx 0,445$ ); NB-IoT поставлено вище з огляду на зрілішу екосистему та ширшу комерційну доступність обладнання. Цей результат повністю узгоджується з рекомендаціями підрозділу 3.4.2 і ілюструє роль критерію-фільтра K8 у дворівневому процесі вибору.

Проведений приклад демонструє, що запропонована методика дозволяє формалізувати процес вибору телекомунікаційної технології, забезпечує

прозорість аргументації і дає можливість аналізу чутливості рішення до зміни вагових коефіцієнтів (через варіювання експертних оцінок у матриці парних порівнянь).

### **3.4 Оптимальні технології для типових сценаріїв Smart City**

Застосуємо запропоновану методику до шести типових сценаріїв розумного міста. Для кожного сценарію наведено експертно сформований профіль вагових коефіцієнтів та результат розрахунку. Слід враховувати, що для сценарію інтелектуального обліку ресурсів (3.4.2) наведено точні значення інтегрального рейтингу, обчислені у повному прикладі підрозділу 3.3.1, тоді як для решти сценаріїв подано округлені експертні оцінки на тій самій шкалі [0; 1]. Через це абсолютні рівні рейтингів між сценаріями можуть відрізнятися; визначальним є взаємний порядок альтернатив у межах кожного окремого сценарію.

#### **3.4.1 Розумне освітлення вулиць**

Профіль сценарію: фіксоване кріплення на освітлювальних опорах із мережевим живленням, помірна щільність пристроїв (50–200 на км<sup>2</sup>), низька затримка (до 10 с), невисока швидкість трафіку (поодинокі команди увімкнення/диммування + телеметрія). Вагові коефіцієнти:  $K_1=0,18$ ,  $K_2=0,05$ ,  $K_3=0,05$  (живлення є),  $K_4=0,10$ ,  $K_5=0,12$ ,  $K_6=0,30$ ,  $K_7=0,20$ . Оптимальні технології: LoRaWAN ( $R=0,78$ ), NB-IoT ( $R=0,71$ ), Mioty ( $R=0,69$ ). Перевага LoRaWAN зумовлена низькою вартістю і відсутністю потреби в платних послугах оператора.

#### **3.4.2 Інтелектуальний облік комунальних ресурсів**

Профіль сценарію: масові батарейно-живлені лічильники електроенергії, води, газу, тепла; одне повідомлення раз на добу або раз на годину; критична

автономність (5–10 років); інколи проблеми з покриттям у підвалах/підкорпусних приміщеннях; критична вартість на пристрій. Вагові коефіцієнти:  $K_1=0,15$ ,  $K_2=0,03$ ,  $K_3=0,28$ ,  $K_4=0,15$ ,  $K_5=0,02$ ,  $K_6=0,27$ ,  $K_7=0,10$ . Оптимальні технології (точні значення інтегрального рейтингу — за повним прикладом підрозділу 3.3.1, таблиця 3.6): теоретичний максимум за критеріями  $K_1$ – $K_7$  отримує Sigfox ( $R = 0,591$ ), проте він виключається фільтром  $K_8 = 0$  через відсутність національної мережі в Україні. Серед доступних альтернатив найвищий рейтинг має LoRaWAN ( $R = 0,487$ ), далі NB-IoT ( $R = 0,445$ ) і Mioty ( $R = 0,445$ ). Практичним переможцем є LoRaWAN — завдяки низькій вартості пристрою, відсутності абонентської плати та великій автономності; його доцільно розгортати у житлових кварталах із можливістю встановлення приватних шлюзів. NB-IoT — основна альтернатива для щільної міської забудови, де визначальним є гарантоване покриття оператора та краще проникнення сигналу у приміщення (підвали, підкорпусні зони).

### 3.4.3 Моніторинг паркувань

Профіль сценарію: магнітометри/ультразвукові датчики, вбудовані у дорожнє покриття або встановлені над парковочними місцями; зміна стану «зайнято/вільно» з частотою до десятків разів на добу; критична автономність (5–8 років); вимога до затримки (до 30 с); помірна вартість CAPEX. Вагові коефіцієнти:  $K_1=0,15$ ,  $K_2=0,05$ ,  $K_3=0,25$ ,  $K_4=0,12$ ,  $K_5=0,10$ ,  $K_6=0,25$ ,  $K_7=0,08$ . Оптимальні технології: LoRaWAN ( $R=0,80$ ), NB-IoT ( $R=0,75$ ), Mioty ( $R=0,72$ ).

### 3.4.4 Екологічний моніторинг

Профіль сценарію: компактні станції моніторингу повітря/шуму/якості води; повідомлення кожні 5–15 хвилин; помірна автономність (3–5 років за умови сонячної підзарядки); вимога до дальності у місцях без щільного покриття (парки, передмістя). Вагові коефіцієнти:  $K_1=0,22$ ,  $K_2=0,12$ ,  $K_3=0,15$ ,  $K_4=0,08$ ,  $K_5=0,03$ ,

$K_6=0,25$ ,  $K_7=0,15$ . Оптимальні технології: LoRaWAN ( $R=0,79$ ), Mioty ( $R=0,72$ ), NB-IoT ( $R=0,69$ ).

Перші чотири сценарії (3.4.1–3.4.4) є типовими LPWAN-сценаріями: низькі швидкості трафіку, високі вимоги до автономності та ємності мережі, обмежений бюджет. Оптимальні рішення для них містяться у фокус-множині таблиці 3.1 (LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, Mioty, LTE-M). Наступні два сценарії — відеоспостереження (3.4.5) і інтелектуальний транспорт V2X (3.4.6) — мають принципово інший профіль вимог: висока швидкість передавання (десятки–тисячі Мбіт/с) і/або наднизька затримка ( $< 100$  мс) при наднадійності 99,99%, що виходить за межі можливостей LPWAN-технологій. Тому для цих сценаріїв методика застосовується до розширеної множини альтернатив, що включає 5G eMBB і LTE Cat-4/6 (для відеотрафіку) та 5G URLLC, C-V2X (PC5/Uu) і ITS-G5 (для V2X), описаних у підрозділі 2.5.2. У таблиці 3.1 представлено LPWAN-фокус (плюс 5G mMTC і 5G eMBB як межові випадки); решта згаданих технологій трактуються як спеціалізовані рішення поза основною порівняльною таблицею і коротко характеризуються у відповідних підрозділах нижче.

### 3.4.5 Відеоспостереження

Профіль сценарію: відеокамери високої роздільної здатності (1080p–4K), постійний потік 1–10 Мбіт/с, як правило мережеве живлення (PoE), критична надійність, низька затримка. Вагові коефіцієнти:  $K_1=0,05$ ,  $K_2=0,30$ ,  $K_3=0,02$ ,  $K_4=0,05$ ,  $K_5=0,18$ ,  $K_6=0,15$ ,  $K_7=0,25$ . Оптимальні технології: 5G eMBB ( $R=0,88$ ), LTE Cat-4/6 ( $R=0,82$ ), оптоволокно (поза рейтингом, окремий клас). LPWAN-технології з аналізу виключаються через нездатність забезпечити потрібну швидкість.

### 3.4.6 Інтелектуальний транспорт V2X

Профіль сценарію: рухомі джерела, висока швидкість пересування (до 130 км/год), повідомлення безпеки кожні 100 мс, критична затримка ( $< 100$  мс), наднадійність (99,99%). Вагові коефіцієнти:  $K_1=0,10$ ,  $K_2=0,15$ ,  $K_3=0,02$ ,  $K_4=0,12$ ,  $K_5=0,32$ ,  $K_6=0,12$ ,  $K_7=0,17$ . Оптимальні технології: 5G URLLC ( $R=0,91$ ), LTE-M / Cellular V2X ( $R=0,75$ ), ITS-G5 (поза рейтингом).

Зведення оптимальних технологій для шести типових сценаріїв подане у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 — Рекомендовані технології для типових сценаріїв Smart City

| Сценарій                       | Рекомендована технологія | Альтернатива  | Ключовий чинник        |
|--------------------------------|--------------------------|---------------|------------------------|
| Розумне освітлення вулиць      | LoRaWAN                  | NB-IoT, Mioty | вартість і простота    |
| Інтелектуальний облік ресурсів | LoRaWAN                  | NB-IoT        | вартість, автономність |
| Моніторинг паркувань           | LoRaWAN                  | NB-IoT, Mioty | TCO, автономність      |
| Екологічний моніторинг         | LoRaWAN                  | Mioty, NB-IoT | дальність, вартість    |
| Сценарій                       | Рекомендована технологія | Альтернатива  | Ключовий чинник        |
| Відеоспостереження             | 5G eMBB / оптика         | LTE Cat-4/6   | пропускна здатність    |
| V2X / транспорт                | 5G URLLC                 | LTE-M, C-V2X  | затримка, надійність   |

### 3.5 Практична реалізація: розрахунок сегмента LoRaWAN-мережі

Для практичної демонстрації запропонованої методики обрано типовий сценарій — розгортання сегмента LoRaWAN-мережі у міському кварталі площею близько 4 км<sup>2</sup> (умовно — район житлової забудови у Києві). Цільові сервіси: інтелектуальний облік води і теплової енергії (близько 1200 лічильників) та моніторинг паркувань (близько 300 датчиків). Розгортання передбачає приватну LoRaWAN-мережу з мережевим сервером ChirpStack [11], що дозволяє повний контроль над пристроями і даними. Технічні характеристики шлюзу, обраного для розгортання сегмента, наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 — Технічні характеристики шлюзу LoRaWAN (приклад: Kerlink iFemtoCell-evolution)

| Параметр                           | Значення                                                    |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Частотний план                     | EU868 (863–870 МГц), 8 каналів upstream, 1 канал downstream |
| Чутливість прийому                 | до –142 дБм (SF12, BW 125 кГц)                              |
| Кількість одночасних демодуляторів | 8 (по 1 на канал) + 1 FSK                                   |
| Потужність передавання downlink    | до +27 дБм                                                  |
| Інтерфейси backhaul                | Ethernet 10/100, 4G LTE (опція), Wi-Fi                      |
| Антенa                             | омнісекторна, коефіцієнт підсилення 5–8 дБі                 |
| Електроживлення                    | 12 В DC, типове споживання 5 Вт, PoE-варіант                |
| Діапазон температур                | –30...+60 °C, IP65                                          |
| Безпека                            | TPM 2.0, secure boot, TLS 1.2/1.3 з мережевим сервером      |
| Електроживлення                    | 12 В DC, типове споживання 5 Вт, PoE-варіант                |

### 3.5.1 Розрахунок бюджету радіолінії

Бюджет радіолінії LoRaWAN визначається з умови, що приймальна потужність на вході приймача має перевищувати чутливість приймача з певним запасом на завмирання [6, 11]. Загальне рівняння лінкового бюджету:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{tx} - L_{rx} - L - M_{sh} \geq S_{rx} \quad (3.5)$$

де  $P_{tx}$  — потужність передавача (для EU868 максимум 14 дБм EIRP);  $G_{tx}$ ,  $G_{rx}$  — коефіцієнти підсилення передавальної і приймальної антен;  $L_{tx}$ ,  $L_{rx}$  — втрати у фідерах;  $L$  — втрати поширення;  $M_{sh}$  — запас на завмирання (Shadow fading margin, типово 12–15 дБ для міської забудови);  $S_{rx}$  — чутливість приймача.

Для типового LoRaWAN-пристрою з SX1276 чутливість становить –137 дБм при SF12 BW125 (DR0), –123 дБм при SF7 BW125 (DR5). Прийmemo для розрахунку SF10 (компроміс між дальністю і часом ефірного передавання), для якого чутливість  $S_{rx} \approx -132$  дБм.

Вихідні дані:  $P_{tx} = 14$  дБм,  $G_{tx}$  (антена пристрою) = 2 дБі,  $G_{rx}$  (шлюзова антена) = 8 дБі,  $L_{tx} \approx 1$  дБ,  $L_{rx} \approx 2$  дБ,  $M_{sh} = 12$  дБ. Допустимі втрати поширення:

$$\begin{aligned} L_{\max} &= P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{tx} - L_{rx} - M_{sh} - S_{rx} = \\ &= 14 + 2 + 8 - 1 - 2 - 12 - (-132) = 141 \text{ дБ} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Для оцінки дальності у міській забудові скористаємося моделлю COST 231-Nata для частоти 868 МГц, висот антен  $h_{shl} = 30$  м (шлюз) та  $h_m = 2$  м (пристрій):

$$L = 46,3 + 33,9 \lg f - 13,82 \lg h_{bs} - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \lg h_{bs}) \lg d + C \quad (3.7)$$

де  $a(h_m) = (1,1 \cdot \lg(f) - 0,7) \cdot h_m - (1,56 \cdot \lg(f) - 0,8)$  — поправка для висоти антени пристрою,  $C = 0$  для міст середнього розміру,  $C = 3$  дБ для мегаполісів. Для  $f = 868$  МГц,  $h_m = 2$  м поправка  $a(h_m) \approx 1,3$  дБ; на цій частоті відхилення COST 231-Nata від класичної моделі Окумури — Хати (150–1500 МГц) не перевищує 1 дБ (за  $C = 0$ ), тож застосування моделі є коректним. Підставивши  $L_{\max} = 141$  дБ і розв’язавши рівняння відносно  $d$ , отримаємо  $d \approx 3,0$  км для міста середнього розміру ( $C = 0$ ) і  $d \approx 2,5$  км для мегаполіса ( $C = 3$  дБ); з урахуванням глибокого затінення щільної забудови та розміщення частини пристроїв у підвалах для

проектування консервативно приймаємо  $d \approx 1,9\text{--}2,3$  км. Це відповідає типовим показникам реальних LoRaWAN-розгортань у міській забудові (2–5 км).

### 3.5.2 Визначення необхідної кількості шлюзів

Виходячи з розрахованої дальності та площі обслуговуваної території 4 км<sup>2</sup>, оцінимо необхідну кількість шлюзів LoRaWAN. Зона покриття одного шлюзу (для дальності 1,9 км у міській забудові) становить:

$$S = \pi d^2 \approx 3,14 \cdot 1,9^2 \approx 11,3 \text{ км}^2 \quad (3.8)$$

Теоретично один шлюз міг би покрити всю територію 4 км<sup>2</sup>. Проте на практиці необхідно враховувати: 1) затінення будівлями, що знижує ефективну зону до 30–50% теоретичної; 2) необхідність резервування на випадок відмови шлюзу (N+1); 3) необхідність диверситі-прийому (один пакет приймається кількома шлюзами одночасно, що покращує надійність). З урахуванням цих чинників обираємо конфігурацію з 3 шлюзів, рівномірно розподілених на території, кожен з яких покриває 2–3 км<sup>2</sup> ефективно.

### 3.5.3 Оцінка ємності мережі та duty cycle

Ємність мережі LoRaWAN визначається обмеженнями duty cycle (1% у субсмузі g1 діапазону 868 МГц за ETSI EN 300 220) і часом ефірного передавання (Time-on-Air, ToA). Для повідомлення корисного навантаження 12 байт при SF10, BW 125 кГц, заголовку 13 байт, CR 4/5 час ефірного передавання становить близько 370 мс.

При duty cycle 1% максимальна частота передач одного пристрою на одному каналі обмежена 36 секундами/годину, що дозволяє ~97 передач за годину при ToA 370 мс. У реальності, з урахуванням розподілу по 8 каналах субсмузи g1 і використання ADR, що знижує SF (і відповідно ToA) для близьких пристроїв, ємність 1500 пристроїв з трафіком 4–6 повідомлень/добу на пристрій впевнено забезпечується одним шлюзом без значних колізій.

Очікувана частка успішно доставлених пакетів (Packet Delivery Ratio) для проєктованої мережі оцінюється на рівні 97–98% за нормального режиму, що відповідає вимогам сценаріїв обліку ресурсів і моніторингу паркувань.

### 3.5.4 Оцінка часу автономної роботи кінцевих пристроїв

Розрахунок часу автономної роботи кінцевого пристрою (наприклад, лічильника води з LoRaWAN-модулем на базі STM32WL55) виконується за формулою:

$$T = \frac{E_b \cdot \eta}{I_{avg} \cdot 8760}, \text{років} \quad (3.9)$$

де  $E_b$  — енергоємність батареї (А·год),  $\eta$  — коефіцієнт використання батареї з урахуванням саморозряду і температурних умов (приймаємо 0,7 для Li-SOCl<sub>2</sub>),  $I_{avg}$  — середній струм споживання (А), 8760 — кількість годин у році.

Енергоспоживання LoRaWAN-модуля у різних режимах: режим сну (deep sleep) —  $I_{sleep} \approx 2$  мкА; режим вимірювання + обробки (active) —  $I_{act} \approx 5$  мА протягом 100 мс на цикл вимірювання; режим передавання при +14 дБм —  $I_{tx} \approx 100$  мА, тривалість одного передавання при SF10 — 370 мс; режим прийому (RX1, RX2 вікна) —  $I_{rx} \approx 15$  мА протягом 100 мс після передавання.

При сценарії 4 повідомлень на добу енергія за цикл становить близько:

$$E_{cycle} = (5 \text{ мА} \cdot 0,1 \text{ с}) + (100 \text{ мА} \cdot 0,37 \text{ с}) + (15 \text{ мА} \cdot 0,2 \text{ с}) + I_{sleep} \cdot T_{cycle} \quad (3.10)$$

За 4 цикли на добу енергоспоживання у активних режимах становить  $\approx 162$  мА·с/добу = 0,045 мА·год/добу. Сумарне енергоспоживання у режимі сну (для 23,5 годин на добу):  $2 \text{ мкА} \cdot 23,5 \text{ год} = 0,047 \text{ мА} \cdot \text{год/добу}$ . Загальне споживання — близько 0,092 мА·год/добу, що еквівалентне середньому струму  $I_{avg} \approx 3,8$  мкА.

Підставивши у формулу (3.9) середній струм у коректних одиницях  $I_{avg} = 3,8 \text{ мкА} = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ , дістаємо ресурс, обмежений лише корисним навантаженням:  $T = (19 \cdot 0,7) / (3,8 \cdot 10^{-6} \cdot 8760) \approx 4,0 \cdot 10^2$  років. Це значення не є фізичним терміном служби: на горизонтах у сотні років визначальними стають не корисне споживання, а календарні чинники — саморозряд і старіння елемента живлення.

Урахуємо саморозряд явно: для літій-тіонілхлоридних (Li-SOCl<sub>2</sub>) елементів він не перевищує близько 1 % на рік, що еквівалентне струму витоку  $I_{sd} \approx 0,01 \cdot 19 / 8760 \approx 22$  мкА. Тоді за сумарним еквівалентним струмом  $I_{\Sigma} = I_{avg} + I_{sd} \approx 26$  мкА термін становив би  $T \approx (19 \cdot 0,7) / (26 \cdot 10^{-6} \cdot 8760) \approx 60$  років. Проте й ця оцінка перевищує гарантований виробником термін служби Li-SOCl<sub>2</sub>-елементів — близько 10–15 років, який обмежується не залишковою ємністю, а старінням (зростанням пасиваційного шару на аноді та деградацією ущільнень корпусу) [30, 32]. Тому практичний термін автономної роботи пристрою визначається службовим ресурсом батареї і становить близько 10–15 років.

Таким чином, для запропонованої конфігурації пристрій не є енергообмеженим: заряду батареї за корисним споживанням вистачило б на сотні років. Практичний термін автономної роботи обмежений службовим ресурсом самого елемента живлення (саморозряд, старіння) і становить близько 10–15 років. Це означає, що один Li-SOCl<sub>2</sub>-елемент ємністю 19 А·год забезпечує роботу лічильника протягом усього експлуатаційного інтервалу без заміни і з запасом задовольняє вимогу сценарію обліку ресурсів (8–10 років). Зведений енергетичний бюджет кінцевого пристрою наведено у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 — Енергетичний бюджет кінцевого пристрою на базі STM32WL55 + LoRa SX1276

| Режим                              | Струм, мА | Тривалість на цикл               |
|------------------------------------|-----------|----------------------------------|
| Глибокий сон (deep sleep, RTC)     | 0,002     | $\approx 21600$ с (4 цикли/добу) |
| Активне вимірювання + обробка      | 5,0       | 0,1 с                            |
| Передавання uplink (SF10, +14 дБм) | 100       | 0,37 с                           |
| Прийом downlink (RX1+RX2 вікна)    | 15        | 0,2 с                            |
| Загальна енергія/добу              | —         | $\approx 0,092$ мА·год           |

Продовження таблиці 3.9

|                                                              |               |                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Середній струм споживання                                    | ≈ 3,8 мкА     | —                                                                                  |
| Практична автономність (обмежена службовим ресурсом батареї) | ≈ 10–15 років | (Li-SOCl <sub>2</sub> 19 А·год; ресурс за навантаженням ≈ 4·10 <sup>2</sup> років) |

3.5.5 Техніко-економічна оцінка сегмента

Орієнтовний розрахунок капітальних (CAPEX) і експлуатаційних (OPEX) витрат на запропонований сегмент LoRaWAN-мережі наведено у таблиці 3.10 (у доларах США за поточними ринковими цінами 2024–2026 років, без урахування ПДВ і монтажних робіт).

Таблиця 3.10 — Орієнтовна вартість сегмента LoRaWAN-мережі

| Стаття витрат                                                     | Кількість | Од. варт., USD | Усього, USD |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|----------------|-------------|
| Шлюз LoRaWAN 8-канальний (Kerlink iFemtoCell, RAK7268, Multitech) | 3         | 600            | 1800        |
| Антенa для шлюзу зовнішнього виконання + кабель                   | 3         | 120            | 360         |
| Лічильник з LoRaWAN-модулем (вода)                                | 800       | 55             | 44000       |
| Лічильник з LoRaWAN-модулем (тепло)                               | 400       | 75             | 30000       |
| Датчик паркування (магнітометр + LoRaWAN)                         | 300       | 90             | 27000       |

## Продовження таблиці 3.10

|                                                          |   |      |         |
|----------------------------------------------------------|---|------|---------|
| Сервер ChirpStack + ліцензія<br>Linux + бекап            | 1 | 1200 | 1200    |
| Інтеграція з муніципальною<br>платформою (роботи)        | 1 | 3500 | 3500    |
| Разом CAPEX                                              | — | —    | 107 860 |
| OPEX (хостинг, обслуговування,<br>заміна батарей) на рік | 1 | —    | 5400    |
| ТСО за 5 років (CAPEX +<br>5×OPEX)                       | — | —    | 134 860 |

Порівняння з NB-IoT-альтернативою (за тих самих 1500 кінцевих пристроїв): вартість NB-IoT-модулів у складі лічильників вища приблизно на 5–10 USD на пристрій (~ +12 000 USD CAPEX), однак немає потреби розгортати шлюзи (–2 160 USD CAPEX) і сервер мережі (–1 200 USD CAPEX). Натомість з’являється річна абонентська плата оператору ~0,5–1 USD/пристрій/місяць, що на 1500 пристроїв і 5 років формує OPEX 45 000–90 000 USD. Інтегральна оцінка свідчить, що LoRaWAN залишається економічно вигіднішим для приватної мережі з тривалим терміном експлуатації, тоді як NB-IoT стає привабливим для мережі з невеликою кількістю пристроїв або там, де відсутня можливість встановлення шлюзів.

### 3.5.6 Схема розгортання сегмента

Запропонована схема розгортання передбачає встановлення трьох LoRaWAN-шлюзів на дахах багатоповерхових будівель (10–14 поверхів), рівновіддалених у вершинах рівностороннього трикутника зі стороною приблизно 1,5 км, що забезпечує надлишкове покриття та можливість прийому одного пакета двома-трьома шлюзами одночасно (диверситі-прийом).

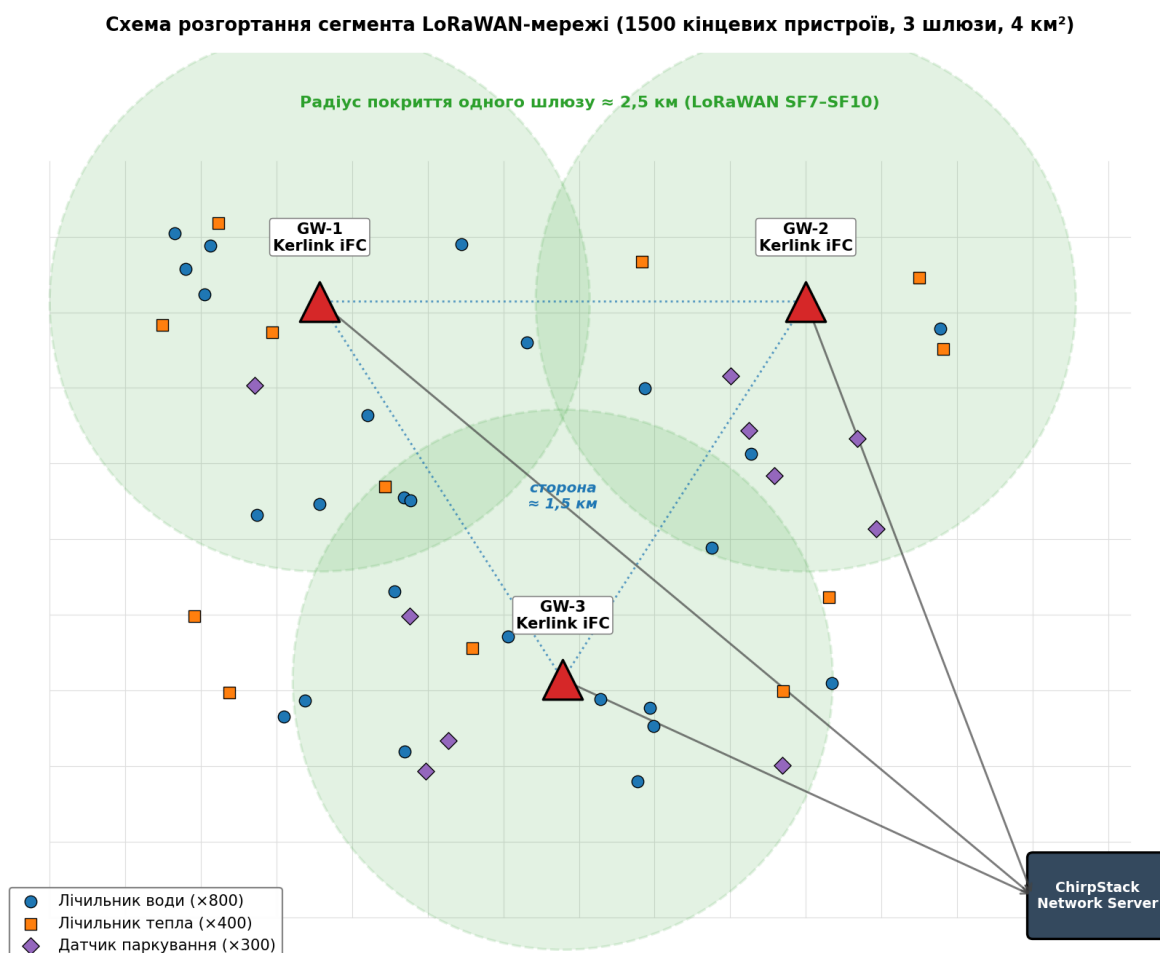


Рисунок 3.2 — Схема розгортання сегмента LoRaWAN-мережі на території 4 км<sup>2</sup> (1500 кінцевих пристроїв, 3 шлюзи у вершинах рівностороннього трикутника)

Шлюзи підключаються до муніципальної оптоволоконної мережі (за її наявності) або через 4G-маршрутизатор як основний/резервний канал передавання даних до мережевого сервера ChirpStack, що розгорнутий у центрі обробки даних муніципалітету або у хмарному середовищі.

Кінцеві пристрої (лічильники, датчики паркування) працюють у класі А (найекономнішому); конфігурація ADR увімкнена для автоматичного підбору SF залежно від якості сигналу. Дані передаються у форматі CayenneLPP, що дозволяє стандартизовано обробляти телеметрію різнотипних пристроїв на сервері застосувань. Передбачена можливість FUOTA — оновлення прошивки кінцевих пристроїв «по повітрю» з мінімальним впливом на термін автономної роботи.

Інтеграція з муніципальною платформою Smart City здійснюється через REST API та MQTT-брокер: дані обліку передаються у білінгові системи комунальних підприємств, дані паркування — у мобільний застосунок для громадян та диспетчерську панель служби паркувань.

### **3.5.7 Аналіз чутливості рішення до зміни вагових коефіцієнтів**

Важливим етапом застосування методики є оцінка стійкості отриманого рішення до можливих варіацій експертних оцінок. Для перевірки стійкості було проведено серію розрахунків зі зміною вагових коефіцієнтів у межах  $\pm 20\%$  від базових значень (так званий one-at-a-time sensitivity analysis).

Аналіз показав, що для сценарію інтелектуального обліку ресурсів практичний переможець (NB-IoT для зон з якісним покриттям оператора, LoRaWAN для приватних розгортань) залишається незмінним при зміні ваги критерію K3 (енергоефективність) у межах 0,22–0,34, ваги критерію K6 (вартість) у межах 0,21–0,33. Зміна переможця можлива лише при суттєвому зниженні ваги обох цих критеріїв одночасно і одночасному підвищенні ваги критерію K7 (безпека/QoS), що відповідало б нетиповому, спеціальному, сценарію (наприклад, обліку у складі критичної інфраструктури з особливими вимогами безпеки).

Для сценарію відеоспостереження рішення (5G eMBB) залишається стійким у всьому розглянутому діапазоні зміни вагів через величезну перевагу 5G/оптики над LPWAN-альтернативами за критерієм пропускної здатності, який має найвищу вагу. Для сценарію V2X (5G URLLC) висновок аналогічний — затримка та надійність є визначальними у всьому реалістичному діапазоні.

Найменша стійкість спостерігається у сценарії розумного освітлення, де LoRaWAN, NB-IoT і Mioty дають близькі інтегральні рейтинги (різниця в межах 0,05–0,08). Це означає, що остаточний вибір у цьому сценарії може бути обґрунтовано додатковими критеріями (наявність уже розгорнутої інфраструктури певного типу, експертиза інженерної команди замовника,

перспектива інтеграції з суміжними сервісами), що цілком відповідає практиці реальних муніципальних тендерів.

Проведений аналіз чутливості підтверджує робастність запропонованої методики і дає замовнику можливість усвідомлено приймати рішення з розумінням «зони впевненості» вибору і альтернативних сценаріїв.

**Адресація та активація пристроїв.** Кожен кінцевий пристрій активується методом OTAA (Over-The-Air Activation): на пристрої встановлюються DevEUI (унікальний 64-бітний ідентифікатор), AppEUI (64-бітний ідентифікатор застосування) та AppKey (128-бітний кореневий ключ AES). При підключенні до мережі сервер генерує DevAddr і пару сесійних ключів NwkSKey/AppSKey. Усі ключі зберігаються у захищеному secure-element пристрою (наприклад, ATECC608B).

**План перевірки якості розгорнутої мережі.** Запропоновано наступний методологічний план тестування розгорнутої мережі: 1) Польове вимірювання RSSI/SNR в усіх ключових точках території з нанесенням на карту покриття; 2) Тестування реальної автономності контрольної вибірки пристроїв шляхом моніторингу профілю струму впродовж тижня; 3) Тестування ємності — генерація синтетичного навантаження від 1000–5000 віртуальних пристроїв з ChirpStack Network Server для оцінки частки втрачених пакетів; 4) Тестування безпеки — перевірка коректності OTAA, ротації ключів, відмова при некоректному MIC; 5) Тестування FUOTA — оновлення прошивки контрольної вибірки пристроїв і вимірювання впливу на термін автономності.

### 3.6 Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано основну прикладну частину дипломної роботи — порівняльний аналіз телекомунікаційних технологій IoT та розробку методики їх обґрунтованого вибору.

По-перше, сформовано систему з восьми кількісних критеріїв оцінки телекомунікаційних технологій IoT (дальність, швидкість, енергоефективність,

ємність мережі, затримка, вартість, безпека/QoS і доступність національної інфраструктури), на основі якої складено зведену порівняльну таблицю для дев'яти ключових технологій. Аналіз показав, що жодна окрема технологія не є оптимальною за всіма критеріями, що підтверджує необхідність багатокритеріального підходу до вибору.

По-друге, розроблено методику багатокритеріального вибору технології на основі методу аналізу ієрархій (MAI) Т. Saaty, адаптованого для задач Smart City. Методика передбачає шість послідовних кроків: формалізацію сценарію, нормалізацію критеріїв, побудову матриці парних порівнянь, обчислення вагових коефіцієнтів, перевірку узгодженості ( $CR \leq 0,1$ ) і обчислення інтегрального рейтингу альтернатив.

По-третє, методику застосовано до шести типових сценаріїв Smart City: розумного освітлення, інтелектуального обліку ресурсів, моніторингу паркувань, екологічного моніторингу, відеоспостереження та інтелектуального транспорту. Отримані рекомендації узгоджуються із світовою практикою впровадження Smart City і утворюють практично цінний орієнтир для проєктувальників.

По-четверте, виконано практичну реалізацію запропонованої методики для сегмента LoRaWAN-мережі міського кварталу площею 4 км<sup>2</sup>. Розраховано бюджет радіолінії за моделлю COST 231-Hata: при максимально допустимих втратах 141 дБ модельна дальність становить 2,5–3,0 км, для проєктування консервативно прийнято 1,9–2,3 км. Обґрунтовано конфігурацію з трьох шлюзів LoRaWAN для надійного покриття території з диверситі-прийомом. Виконано розрахунок очікуваного часу автономної роботи кінцевого пристрою — близько 10–15 років, обмежений службовим ресурсом батареї Li-SOCl<sub>2</sub> 19 А·год (за корисним навантаженням ресурс сягає сотень років) за типового профілю трафіку. Складено детальну техніко-економічну оцінку сегмента: CAPEX  $\approx$  108 тис. USD, TCO за 5 років  $\approx$  135 тис. USD.

Здійснений у розділі аналіз підтверджує, що методика багатокритеріального вибору на основі MAI є ефективним інструментом для обґрунтованого проєктування телекомунікаційної підсистеми IoT-інфраструктури Smart City, а

LoRaWAN залишається оптимальним вибором для широкого класу масових міських сценаріїв з тривалою автономністю і обмеженим бюджетом.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу — розроблено методику багатокритеріального вибору телекомунікаційних технологій для побудови IoT-інфраструктури в концепції Smart City та обґрунтовано рекомендації щодо їх застосування для типових сценаріїв розумного міста. Поставлена мета досягнута повністю, всі завдання дослідження виконані.

За результатами проведеного дослідження сформульовано такі основні висновки.

1. На основі аналізу літературних джерел і нормативних документів (ITU-T Y.4900 [1], ISO 37120 [2], ETSI EN 300 220 [13], 3GPP Release 13–18 [14, 15], ISO/IEC 30141 [25]) проаналізовано концепцію Smart City як комплексу сервісів у шести базових доменах — мобільності, енергетиці і ЖКГ, екології, безпеці, охороні здоров'я та електронному врядуванні. Обґрунтовано п'ятирівневу архітектуру IoT-інфраструктури з виділенням рівнів сприйняття, мережі, периферійних обчислень, обробки даних і застосувань. Сформульовано десять груп вимог до телекомунікаційної підсистеми IoT-інфраструктури, що утворюють методологічну базу для подальшого порівняльного аналізу.

2. Виконано систематизований огляд сучасних телекомунікаційних технологій для IoT-мереж Smart City: технологій ближнього радіусу дії (Wi-Fi, Wi-Fi HaLow [18], Bluetooth/BLE [17], ZigBee, Thread, Z-Wave), LPWAN неліцензованого спектра (LoRaWAN [11, 12], Sigfox, Mioty [16]), LPWAN ліцензованого спектра (NB-IoT [8, 21], LTE-M), стільникових мереж 4G/LTE і 5G (eMBB, URLLC, mMTC) [14, 15], а також супутникових IoT-рішень у режимі NTN. Встановлено, що кожна технологія має власні сильні сторони та оптимальні сценарії застосування.

3. Сформовано систему з восьми кількісних критеріїв оцінки телекомунікаційних технологій IoT: дальність зв'язку (K1), швидкість передавання даних (K2), енергоефективність (K3), ємність мережі (K4), затримка (K5), вартість розгортання і експлуатації (K6), безпека та QoS (K7) і доступність

національної інфраструктури (K8 — критерій-фільтр). На основі цієї системи складено зведену порівняльну таблицю для дев'яти ключових технологій, що демонструє багатокритеріальний характер задачі вибору. Критерій K8 формалізує дворівневу процедуру: попередній фільтр доступних альтернатив, далі — рейтингове порівняння допущених альтернатив за K1–K7 методом MAI.

4. Розроблено методику багатокритеріального вибору телекомунікаційної технології IoT на основі методу аналізу ієрархій (MAI) Т. Saaty [22, 23]. Методика передбачає шість послідовних кроків: формалізацію сценарію застосування, нормалізацію значень критеріїв, побудову матриці парних порівнянь, обчислення вагових коефіцієнтів через нормалізований головний власний вектор, перевірку узгодженості матриці ( $CR \leq 0,1$ ) та обчислення інтегрального рейтингу альтернатив. Методика дозволяє обґрунтовано вибирати телекомунікаційні технології з урахуванням специфіки кожного сценарію Smart City.

5. На основі розробленої методики сформульовано рекомендації щодо вибору оптимальних телекомунікаційних технологій для шести типових сценаріїв Smart City. Для розумного освітлення вулиць, моніторингу паркувань і екологічного моніторингу оптимальним рішенням визначено LoRaWAN; для інтелектуального обліку комунальних ресурсів — LoRaWAN (NB-IoT — для щільної міської забудови з вимогою гарантованого покриття оператора у приміщеннях); для відеоспостереження — 5G eMBB або оптоволокну; для V2X та інтелектуального транспорту — 5G URLLC.

6. Виконано практичну реалізацію запропонованої методики на прикладі сегмента LoRaWAN-мережі для міського кварталу площею 4 км<sup>2</sup>. Розраховано бюджет радіолінії за моделлю COST 231-Hata: при максимально допустимих втратах 141 дБ модельна дальність становить 2,5–3,0 км, для проектування консервативно прийнято 1,9–2,3 км у щільній міській забудові. Обґрунтовано конфігурацію з трьох шлюзів LoRaWAN з диверситі-прийомом, що покриває близько 1500 кінцевих пристроїв (1200 лічильників + 300 датчиків паркування) з очікуваною часткою успішно доставлених пакетів 97–98%.

7. Розраховано очікуваний термін автономної роботи кінцевого пристрою (лічильника з LoRaWAN-модулем) за типового профілю трафіку (4 повідомлення на добу). Середнє споживання склало 3,8 мкА; за корисним навантаженням ресурс батареї Li-SOCl<sub>2</sub> ємністю 19 А·год сягав би сотень років, тож пристрій не є енергообмеженим. Практичний термін автономної роботи обмежується службовим ресурсом елемента живлення (саморозряд близько 1 % на рік, старіння) і становить близько 10–15 років, що з запасом відповідає вимогам сценарію інтелектуального обліку ресурсів (8–10 років) [30, 32].

8. Виконано техніко-економічну оцінку запропонованого сегмента LoRaWAN-мережі: капітальні витрати (CAPEX) становлять близько 108 тис. USD, повна вартість володіння (TCO) за 5 років — близько 135 тис. USD. Порівняння з NB-IoT-альтернативою свідчить, що LoRaWAN є економічно вигіднішим для приватної мережі з тривалим терміном експлуатації, тоді як NB-IoT доцільніший для невеликих мереж або там, де неможливе встановлення власних шлюзів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблена методика і сформульовані рекомендації можуть бути використані проєктувальниками IoT-мереж, інженерами операторів зв'язку та спеціалістами органів місцевого самоврядування для обґрунтованого вибору телекомунікаційних рішень при розгортанні сервісів розумного міста. Результати роботи особливо актуальні для післявоєнного відновлення інфраструктури міст України та переходу до енергоефективних цифрових сервісів громад [28, 29].

Перспективними напрямками подальших досліджень є: дослідження гібридних архітектур, що поєднують LPWAN-сегмент з 5G mMTC backhaul; розробка моделей оптимального розміщення шлюзів LoRaWAN з урахуванням 3D-моделей міської забудови; адаптація запропонованої методики для сценаріїв з підвищеними вимогами до інформаційної безпеки в умовах гібридних загроз; інтеграція супутникового IoT (NTN) як резервного каналу для критичних застосувань.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Recommendation ITU-T Y.4900/L.1600. Overview of key performance indicators in smart sustainable cities. Geneva : International Telecommunication Union, 2016. 14 p.
- 2) ISO 37120:2018. Sustainable cities and communities — Indicators for city services and quality of life. Geneva : ISO, 2018. 124 p.
- 3) Ericsson Mobility Report. November 2023. Stockholm : Ericsson AB, 2023. 36 p.  
URL: <https://www.ericsson.com/mobility-report> (дата звернення: 10.05.2026).
- 4) Cisco Annual Internet Report (2018–2023) : White Paper. San Jose, CA : Cisco Systems Inc., 2020. 41 p.
- 5) State of IoT 2024. Hamburg : IoT Analytics Research GmbH, 2024. URL: <https://iot-analytics.com/product/state-of-iot-summer-2024/> (дата звернення: 10.05.2026).
- 6) Adelantado F., Vilajosana X., Tuset-Peiro P., Martinez B., Melia-Segui J., Watteyne T. Understanding the limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*. 2017. Vol. 55, No. 9. P. 34–40.
- 7) Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*. 2019. Vol. 5, No. 1. P. 1–7.
- 8) Sinha R. S., Wei Y., Hwang S.-H. A survey on LPWA technology : LoRa and NB-IoT. *ICT Express*. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 14–21.
- 9) Yedilkhan D. et al. Comparative Analysis of IoT Wireless Technologies for Smart City Applications. *Procedia Computer Science*. 2025. Vol. 257. P. 382–387.
- 10) LPWAN Technologies for IoT : Real-World Performance Review 2015–2025. Basel : Preprints.org, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202511.0316.v1>.
- 11) LoRaWAN L2 1.0.4 Specification. Beaverton, OR : LoRa Alliance Technical Committee, 2020. 89 p.
- 12) LoRaWAN Regional Parameters RP002-1.0.4. Beaverton, OR : LoRa Alliance, 2022. 105 p.

- 13) ETSI EN 300 220-2 V3.2.1 (2018-06). Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1000 MHz. Sophia Antipolis : European Telecommunications Standards Institute, 2018. 28 p.
- 14) 3GPP TS 36.300 V17.0.0 (2022-04). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description. Sophia Antipolis : 3rd Generation Partnership Project, 2022.
- 15) 3GPP TS 23.501 V18.4.0. System architecture for the 5G System (5GS) (Release 18). Sophia Antipolis : 3rd Generation Partnership Project, 2024. 596 p.
- 16) ETSI TS 103 357 V1.1.1 (2020-06). Short Range Devices; Low Throughput Networks (LTN) protocols for radio interface A. Sophia Antipolis : European Telecommunications Standards Institute, 2020.
- 17) Bluetooth Core Specification v5.4. Kirkland, WA : Bluetooth SIG, 2023. 3258 p.
- 18) IEEE Std 802.11ah-2016. IEEE Standard for Information technology — LAN/MAN — Specific Requirements — Part 11: Wireless LAN MAC and Physical Layer Specifications, Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation. New York : IEEE, 2017. 594 p.
- 19) OASIS Standard. MQTT Version 5.0. Burlington, MA : Organization for the Advancement of Structured Information Standards, 2019. 137 p.
- 20) Centenaro M., Vangelista L., Zanella A., Zorzi M. Long-range communications in unlicensed bands : the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*. 2016. Vol. 23, No. 5. P. 60–67.
- 21) Migabo E. M., Djouani K. D., Kurien A. M. The Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Resources Management Performance State of the Art, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 97658–97675.
- 22) Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
- 23) Saaty T. L. Decision-making with the AHP : Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*. 2003. Vol. 145, No. 1. P. 85–91.

- 24) Recommendation ITU-T Y.2060. Overview of the Internet of Things. Geneva : International Telecommunication Union, 2012. 22 p.
- 25) ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things (IoT) — Reference Architecture. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 90 p.
- 26) Кравчук С. О., Афанасьєва Л. О., Миначкін Д. А. Технології Інтернету речей : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 178 с.
- 27) Олексій В. В., Уривський Л. О. Телекомунікаційні мережі та системи : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 210 с.
- 28) Закон України «Про електронні комунікації» від 16.12.2020 № 1089-IX. Відомості Верховної Ради України. 2021. № 16. Ст. 140. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20> (дата звернення: 10.05.2026).
- 29) Національний план розвитку широкосмугового доступу до Інтернету в Україні. Київ : Міністерство цифрової трансформації України, 2022. 56 с.
- 30) Comparative LPWAN Battery Life Benchmark for Municipal IoT Sensors : Smart City IoT Applications 2025. Bratislava : Fleximodo, 2025. URL: <https://fleximodo.com/glossary/smart-city-iot-solutions-2025/> (дата звернення: 10.06.2026).
- 31) ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 26 с.
- 32) Tomaïuolo G., Reghelin C., Vega-Sanchez J. et al. LoRaWAN for Smart City IoT Deployments: A Long-Term Evaluation. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 5. Article 1428. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20051428>.