

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра комп'ютерних систем та мереж

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему **MESH-МЕРЕЖА ДЛЯ ІОТ-ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМАХ
SMART CITY**

Виконав: студент 2 курсу, групи КНТз-514м
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Комп'ютерні системи та мережі

ЗУЙ М.С.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник .КИРИЧЕК Г.Г.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент РОМАНОВСЬКИЙ О. В.

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Комп'ютерних наук і технологій
Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»
Ступінь вищої освіти магістерський
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Комп'ютерні системи та мережі
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри Кудерметов Р.К.
“ 15 ” жовтня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА

ЗУЙ Микити Сергійовича
(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Mesh-мережа для IoT-пристроїв у системах Smart City
керівник проєкту (роботи) кан. техн. наук, доцент, КИРИЧЕК Галина Григорівна
(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 30 ” жовтня 2025 року № 491

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 23 грудня 2025 року
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) mesh-мережа для IoT-пристроїв у системах Smart City з використанням технологій Wi-Fi Mesh, із урахуванням пропускну здатності, надійності та енергоефективності, Thread (протоколи 6LoWPAN, RPL), підтримка IPv6 та високій надійності RPL-маршрутизації

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз предметної області. Порівняння технологій, протоколів і стандартів Mesh-мереж Smart City. Проєктування mesh-мережі для Smart City. Дослідження та порівняння mesh-мережі з аналогами

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Слайди презентації

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	КИРИЧЕК Г.Г., доцент		
нормоконтроль	ЩЕРБАК Н.В., ст. викл.		

7. Дата видачі завдання 01.10.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз джерел за темою дослідження	05.10.2025 р.	
2	Порівняння технологій, протоколів і стандартів mesh-мереж Smart City	10.10.2025 р.	
3	Вибір методів та технологій реалізації mesh-мережі Smart City	15.10.2025 р.	
4	Реалізація архітектури mesh-мережі Smart City	20.10.2025 р.	
5	Налаштування mesh-мережі	01.11.2025 р.	
6	Проведення розрахунків щільності IoT-вузлів у міському середовищі	10.11.2025 р.	
7	Дослідження та порівняння mesh-мережі з аналогами	20.11.2025 р.	
8	Оформлення додатків, графічного матеріалу	01.12.2025 р.	
9	Оформлення пояснювальної записки;	10.12.2025 р.	

Студент Микита ЗУЙ
(підпис) (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) Галина КИРИЧЕК
(підпис) (ім'я, ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 90 с., 25 рис., 6 ліст., 8 табл., 24 джерела.

6LoWPAN, BORDER ROUTER, IoT, MESH-МЕРЕЖІ, RPL, SMART CITY, THREAD, БЕЗДРОВОТІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МАРШРУТИЗАЦІЯ

Об'єкт дослідження – процес побудови та функціонування багатохопових бездротових Mesh-мереж у міській інфраструктурі Smart City.

Предмет дослідження – методи, протоколи та архітектурні рішення для створення енергоефективних і масштабованих IoT-мереж на основі технології Thread.

Мета роботи – підвищення ефективності міських IoT-систем шляхом розроблення моделі та архітектури Mesh-мережі Smart City з використанням протоколу Thread та обґрунтуванням її переваг над альтернативними технологіями.

Методи дослідження – аналіз стандартів бездротових мереж (Wi-Fi Mesh, Zigbee, Thread, Bluetooth Mesh, LoRa Mesh), моделювання роботи стеку Thread (6LoWPAN, RPL), розроблення логічної та структурної моделі мережі.

Результати – виконано порівняльний аналіз Mesh-протоколів, визначено, що Thread є оптимальним для сенсорної інфраструктури Smart City завдяки низькому енергоспоживанню, самовідновленню топології, підтримці IPv6 та високій надійності RPL-маршрутизації.

Галузь використання – системи Smart City: моніторинг довкілля, розумне освітлення, міські інженерні мережі, транспортні системи, автоматизовані сервіси збору та аналізу даних у великих IoT-інфраструктурах.

ABSTRACT

Explanatory note to the master's work: 90 p., 25 figures, 6 listings, 8 tables, 24 sources.

6LoWPAN, BORDER ROUTER, IoT, MESH-MEPEЖИ, RPL, SMART CITY, THREAD, WIRELESS SENSOR NETWORKS, ENERGY EFFICIENCY, ROUTING

Object of research – the process of constructing and operating multi-hop wireless Mesh networks within the Smart City infrastructure.

Subject of research – methods, protocols, and architectural solutions for creating energy-efficient and scalable IoT networks based on the Thread technology.

Purpose of the work – to improve the efficiency of urban IoT systems by developing a model and architecture of a Smart City Mesh network using the Thread protocol and by substantiating its advantages over alternative technologies.

Research methods – analysis of wireless networking standards (Wi-Fi Mesh, Zigbee, Thread, Bluetooth Mesh, LoRa Mesh), theoretical modelling of the Thread stack operation (6LoWPAN, RPL), development of the logical and structural network models.

Results – a comparative analysis of Mesh protocols has been performed, demonstrating that Thread is the optimal solution for the sensor infrastructure of Smart City due to its low energy consumption, self-healing topology, IPv6 support, and high reliability of RPL routing.

Field of application – Smart City systems: environmental monitoring, municipal engineering networks, transportation systems, and automated services for data collection and analysis in large-scale IoT infrastructures.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Аналіз предметної області.....	9
1.1 Аналіз аналогів.....	11
1.2 Функціональні вимоги до Mesh-мережі Smart City	15
1.3. Технічні вимоги до пристроїв та середовища.....	17
1.4 Основні завдання.....	21
2 Порівняння технологій, протоколів і стандартів Mesh-мереж Smart City	23
2.1 Технологічні основи побудови бездротових Mesh-мереж	23
2.2 Порівняльний аналіз Mesh-протоколів і стандартів для Smart City	26
2.3 Вимоги до пропускної здатності, затримки та надійності.....	29
2.4 Логічна та структурна модель Mesh-мережі Smart City.....	32
2.5 Висновки до розділу	37
3. Проектування mesh-мережі для Smart City	39
3.1 Обґрунтування вибору протоколу Mesh.....	39
3.2 Реалізація архітектури Mesh-мережі Smart City	42
3.3 Налаштування безпеки Mesh-мережі Smart City.....	46
3.4 Розрахунок щільності IoT-вузлів у міському середовищі	51
3.5 Налаштування та введення Mesh-мережі Smart City в експлуатацію.....	56
4. Дослідження та порівняння Mesh-мережі з аналогами.....	60
4.1. Обґрунтування вибору середовища моделювання Mesh-мережі.....	60
4.2. Опис початкових умов моделювання.....	62
4.3. Теоретичне моделювання роботи стеку Thread	64
4.4. Аналіз маршрутизації та поведінки мережі при змінних навантаженнях	68
4.5. Оцінка затримки, пропускної здатності та стійкості до відмов.....	71
4.6 Висновки до розділу	76
Висновки	78
Перелік джерел посилання	80
Додаток А.....	83

ВСТУП

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій, зростання кількості підключених пристроїв і глобальна цифровізація міського середовища зумовлюють появу концепції Smart City - інтегрованої системи інфраструктурних рішень, що забезпечують підвищення якості життя населення, ефективне управління ресурсами та стале функціонування міських процесів. Ключовим елементом такої системи є мережі Інтернету речей (Internet of Things, IoT), які забезпечують взаємодію великої кількості сенсорів, датчиків, виконавчих пристроїв і сервісів моніторингу.

У зв'язку з високою щільністю забудови, мобільністю учасників міського руху, необхідністю покриття великих територій і забезпеченням надійного зв'язку між тисячами IoT-вузлів усе більшого поширення набувають багатохопові бездротові мережі типу Mesh. Такі мережі є децентралізованими та здатні самоорганізовуватися, реконфігурувати маршрути та забезпечувати передачу даних навіть у випадку виходу з ладу окремих вузлів. Це робить Mesh-архітектури перспективними для систем відеоспостереження, інтелектуального освітлення, транспортної аналітики, екологічного моніторингу, розумних паркувальних сервісів та інших компонентів Smart City.

Проте проектування міської Mesh-мережі є складним інженерним завданням, що потребує аналізу фізичних умов розміщення IoT-вузлів, характеристик радіоканалів, вимог до пропускної здатності, енергоспоживання, масштабованості та безпеки. Додаткові труднощі виникають через різноманітність протоколів Mesh - IEEE 802.11s, Zigbee Mesh, Thread, Bluetooth Mesh, LoRa Mesh - кожен з яких має свої обмеження й особливості застосування.

У роботі виконано комплексне дослідження підходів до побудови Mesh-мереж у Smart City, проведено аналіз вимог до транспортної інфраструктури IoT, реалізовано проект міської Mesh-мережі з урахуванням пропускної здатності, надійності та енергоефективності. Окрему увагу приділено безпеці, оскільки міська інфраструктура є критично важливою і потребує високого рівня захисту від кібератак.

Дослідження включає моделювання роботи Mesh-топології, аналіз протоколів маршрутизації для IoT (RPL, HWMP, AODV, DSR), оцінку продуктивності мережі за різних сценаріїв навантаження, а також обґрунтування вибору апаратних рішень для розгортання реальної системи. Створена архітектура є масштабованою, придатною до впровадження в умовах міста та відповідає сучасним вимогам інфраструктурних рішень Smart City.

Таким чином, метою роботи є розроблення та дослідження архітектури Mesh-мережі для IoT-пристроїв у Smart City, що забезпечує високу надійність, безпеку, енергоефективність та здатність до масштабування.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Сучасні міські інфраструктури зазнають трансформації під впливом цифровізації, зростання кількості IoT-пристроїв та впровадження концепції Smart City. Метою розвитку таких систем є підвищення ефективності управління ресурсами, оптимізація транспортних потоків, моніторинг екологічних показників, забезпечення безпеки та покращення якості життя населення. Центральне місце в цій екосистемі займають IoT-технології, які забезпечують збір, передавання та аналіз великих обсягів даних у реальному часі [1].

У більшості сучасних міст IoT-інфраструктури включають сенсорні вузли, мережеві шлюзи, хмарні сервіси та системи аналітики. Водночас технологічні та архітектурні рішення для побудови таких мереж суттєво різняться: від стільникових технологій (NB-IoT, LTE-M) до бездротових персональних мереж (BLE, Zigbee) та радіотехнологій великої дальності (LoRaWAN). Проте в умовах складної міської забудови та високих вимог до автономності, гнучкості та масштабованості все більшої уваги набувають мережі типу Mesh [2].

Mesh-технологія забезпечує децентралізоване підключення, у якому кожен IoT-вузол може передавати дані не лише безпосередньо до шлюзу, а й через сусідні пристрої. Такий принцип побудови забезпечує адаптивність мережі до змінного середовища, її здатність до самовідновлення та стійкість до відмов окремих вузлів. Саме такі властивості роблять Mesh одним з ключових кандидатів для розгортання міських IoT-рішень у системах моніторингу, розумного освітлення, транспортної логістики, управління енергоспоживанням та безпеки. Розглядаючи можливості Mesh-технологій для Smart City, необхідно врахувати характеристику середовища. Міські райони характеризуються складною радіоелектричною обстановкою, високим рівнем інтерференцій,

значною щільністю будівель та великою кількістю гетерогенних пристроїв. У таких умовах від мережевого рішення вимагається стійкість каналів зв'язку, оптимальна маршрутизація, підтримка автономної роботи та механізми збереження енергії на рівні IoT-вузлів.

У наукових дослідженнях останніх років активно аналізуються ефективність протоколів Mesh, методи оптимізації енергоспоживання, способи побудови гібридних топологій, застосування технологій штучного інтелекту для маршрутизації та прогнозування мережевих збоїв [3]. Особлива увага приділяється стандартам IEEE 802.11s, Thread, Zigbee PRO, Bluetooth Mesh та LoRa Mesh, які забезпечують різні рівні енергоспоживання, пропускної здатності та дальності передачі. Виходячи з формування цілей Smart City та аналізу особливостей міського середовища, для розроблення IoT-архітектури на основі Mesh-технологій необхідно врахувати такі аспекти:

- умови експлуатації та щільність розміщення вузлів;
- вимоги до пропускної здатності та затримки;
- вимоги до надійності та живучості мережі;
- сумісність з існуючими міськими мережами;
- можливість масштабування та розширення функціоналу;
- енергоефективність і автономність кінцевих пристроїв;
- безпеку передавання даних і захист від атак.

На основі виконаного аналізу формулюється основне завдання роботи - проєктування та обґрунтування архітектури Mesh-мережі для IoT-пристроїв у середовищі Smart City з урахуванням функціональних та технічних вимог, особливостей міського середовища та тенденцій розвитку сучасних бездротових технологій. У межах завдання необхідно визначити оптимальну структуру мережі, оцінити вимоги до вузлів, дослідити можливості сучасних протоколів та сформулювати рекомендації щодо їх використання [4]. У результаті отримаємо систематизований огляд предметної області, визначено ключові параметри, які

впливають на ефективність IoT-мереж у Smart City, та сформулюємо основні завдання для подальшого проєктування Mesh-архітектури.

1.1 Аналіз аналогів

Розвиток концепції Smart City зумовив стрімке зростання кількості IoT-пристроїв, які забезпечують автоматизований збір, передавання та аналіз даних у міському середовищі. Щоб підтримувати їхню ефективну взаємодію, міська інфраструктура має включати надійні бездротові технології, здатні працювати в умовах високої щільності забудови, нестабільного радіосередовища та великої кількості одночасно активних пристроїв. Для цього у сучасних міських системах широко застосовуються різні типи Mesh-мереж, які забезпечують багатохопову передачу даних, високу масштабованість та гнучкість конфігурації топології [5].

Одним із найбільш поширених рішень є **Wi-Fi Mesh (IEEE 802.11s)**, що виник як технологія для розширення та оптимізації покриття бездротових локальних мереж (рис.1.1).

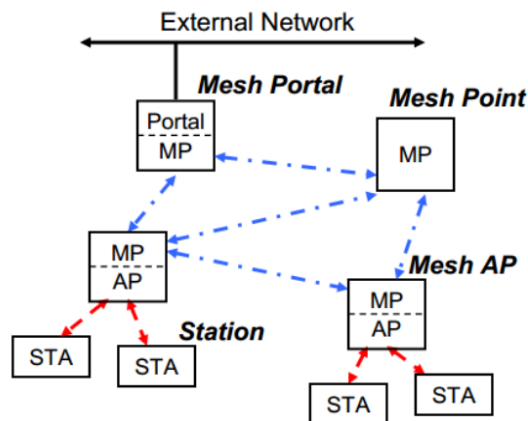


Рисунок 1.1 - Wi-Fi Mesh (IEEE 802.11s)

У системах Smart City Wi-Fi Mesh використовується для високошвидкісних сервісів - відеоспостереження, потокового передавання з дорожніх камер, міських інформаційних табло та транспортних хабів [6]. Головною перевагою Wi-Fi Mesh є висока пропускна здатність та підтримка механізмів QoS. Проте технологія має низку суттєвих обмежень: високе енергоспоживання, залежність від перевантаженого діапазону 2.4/5 ГГц та обмежена стійкість у сенсорних системах із великою кількістю малопотужних вузлів. Через це Wi-Fi Mesh не може виступати універсальною платформою для повномасштабної міської IoT-мережі.

Іншим популярним рішенням є **Zigbee Mesh (IEEE 802.15.4)**, орієнтований на малопотужні сенсорні IoT-вузли (рис.1.2). Zigbee дозволяє формувати великі розподілені мережі з низьким енергоспоживанням, що робить його ефективним у таких системах, як моніторинг довкілля, автоматизоване керування освітленням та комунальними мережами [7].

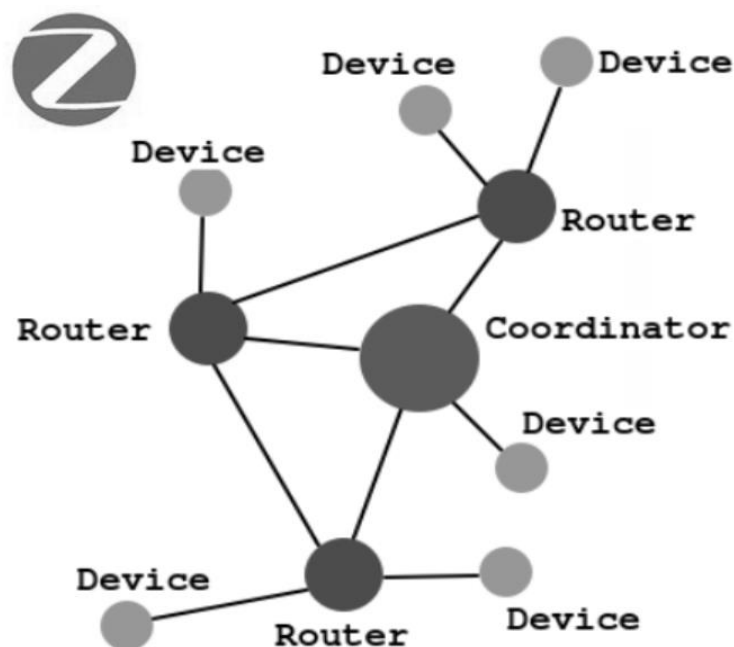


Рисунок 1.2 - Zigbee Mesh (IEEE 802.15.4)

Проте обмежена швидкість передавання даних (до 250 кбіт/с) та відсутність нативної підтримки IPv6 ускладнюють взаємодію з гетерогенними міськими платформами, хмарними сервісами та IoT-інфраструктурою нового покоління. У великих системах Zigbee потребує додаткових шлюзів для трансляції протоколів, що знижує гнучкість і масштабованість.

Третю групу аналогів становить **Bluetooth Mesh**, який набув поширення у комерційних системах освітлення та indoor-навігації. Технологія заснована на протоколі BLE та використовує механізм керованої ширококомовної ретрансляції (managed flooding). Це суттєво спрощує архітектуру, але водночас створює значне службове навантаження при великій кількості вузлів. У міському середовищі Bluetooth Mesh демонструє обмежену масштабованість та не може забезпечувати структуровану маршрутизацію, необхідну для комплексних IoT-систем, що потребують стабільного та прогнозованого каналного рівня [8].

Окреме місце займає технологія **LoRaWAN** та **LoRa Mesh**, що забезпечує надвелику дальність передачі сигналу та мінімальне енергоспоживання (рис.1.3).

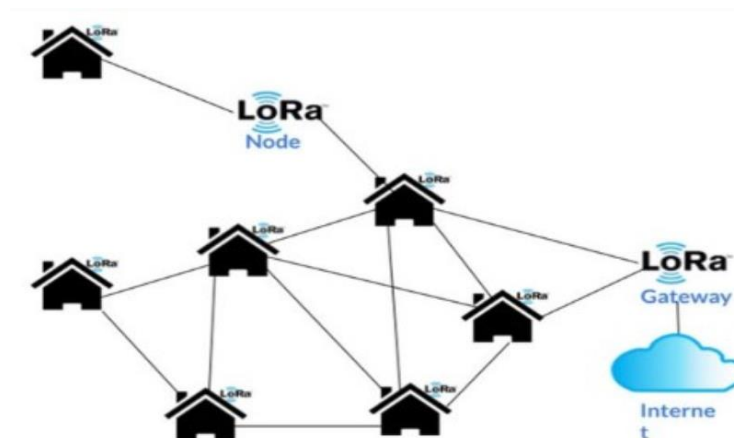


Рисунок 1.3 – LoRa рішення

LoRa широко застосовується у системах екологічного моніторингу, відстеження заповненості контейнерів для сміття, управління лічильниками

води та газу, а також у сільськогосподарських IoT-рішеннях [9]. Проте низька пропускна здатність (одиниці–десятки кбіт/с) та високі затримки не дозволяють використовувати LoRa Mesh для динамічних міських сервісів чи задач реального часу. Технологія ефективна для рідкісної телеметрії, але не підходить як основа єдиної міської IoT-мережі.

Порівняльний аналіз наведених рішень свідчить, що жоден із традиційних Mesh-протоколів не забезпечує збалансованої комбінації енергоефективності, масштабованості, підтримки IPv6, стійкості до перешкод та можливості автономної роботи сенсорних вузлів. Це визначило появу технології нового покоління - **Thread**, спеціально розробленої для IoT-інфраструктур. Thread працює на базі IEEE 802.15.4, має нативну підтримку IPv6 через 6LoWPAN, використовує маршрутизацію RPL та забезпечує автоматичне відновлення топології без втручання оператора [10]. На відміну від Zigbee, Thread є повністю IP-сумісним, а порівняно з Bluetooth Mesh він має структуровану маршрутизацію та кращу масштабованість. У порівнянні з Wi-Fi Mesh, Thread споживає значно менше енергії, а в порівнянні з LoRa забезпечує вищу швидкість та стабільнішу роботу в щільному міському середовищі.

Таким чином, аналіз аналогів підтверджує доцільність використання Thread як базової технології для побудови міських IoT Mesh-мереж. Цей протокол поєднує ключові переваги різних підходів та усуває їх типові недоліки, що дозволяє створити масштабовану, надійну та довготривалу мережеву інфраструктуру Smart City.

1.2 Функціональні вимоги до Mesh-мережі Smart City

Спираючись на результати аналізу сучасних міських IoT-інфраструктур та принципів побудови Mesh-мереж, визначимо базові функціональні вимоги, яким має відповідати мережа Smart City. Ці вимоги зумовлені високою динамічністю міського середовища, великою кількістю гетерогенних пристроїв та необхідністю підтримання безперервного обміну даними між різними міськими сервісами. Оскільки мережа формується як основа для систем освітлення, моніторингу транспорту, екологічного контролю та інженерної автоматики, її функціональні характеристики безпосередньо визначають якість функціонування критичних сервісів міста.

Однією з ключових вимог є забезпечення безперервного збору та передачі даних у реальному часі. У межах Smart City велика кількість IoT-вузлів генерує інформацію з різною частотою оновлення - від сенсорів повітря та систем раннього виявлення інцидентів до камер відеоспостереження та транспортних контролерів. Mesh-мережа повинна гарантувати доставку телеметрії навіть у випадках локальних збоїв або часткової недоступності окремих вузлів.

Не менш важливою є вимога до адаптивності топології, оскільки міське середовище характеризується змінними умовами поширення сигналу, наявністю перешкод, високою щільністю забудови та постійною появою нових елементів інфраструктури. Mesh-мережа має підтримувати автоматичне додавання нових пристроїв, а також перебудову маршрутів при зміні радіусів дії, появі завад або зникненні сусідніх вузлів [11]. Саме децентралізована природа Mesh-архітектури дає змогу зберігати стабільність навіть за умов інтенсивної динаміки міських процесів.

Функціональною вимогою є також самовідновлення мережі. У разі відмови вузла, надмірного навантаження або зниження якості радіоканалу

система повинна автоматично знаходити альтернативні шляхи передачі даних. Це забезпечує безперервність роботи сервісів, що критично важливо для систем управління рухом, аварійного оповіщення, контролю інженерних мереж або моніторингу стану довкілля.

Функціональні вимоги охоплюють також масштабованість, що є ключовою особливістю урбанізованих інфраструктур [12]. Розвиток Smart City передбачає постійне збільшення кількості IoT-пристроїв - від десятків до сотень тисяч. Mesh-мережа має забезпечувати інтеграцію нових вузлів без потреби в глибокій реконфігурації мережі та без погіршення якості обслуговування. Саме багатохопова структура дає змогу рівномірно розподіляти навантаження та уникати перевантаження окремих вузлів.

Окремою вимогою виступає гетерогенність підтримуваних сценаріїв, оскільки міська інфраструктура працює з різними типами даних: телеметрією з низькою частотою оновлення, подіями з високими вимогами до затримки, статусною інформацією датчиків та службовими повідомленнями керування. Мережа повинна підтримувати передачу даних із різним рівнем пріоритету, забезпечуючи коректне функціонування критичних сервісів навіть при пікових навантаженнях [13].

Функціональна модель Mesh-мережі має також враховувати розподілене прийняття рішень, що зменшує залежність від центрального вузла та підвищує стійкість системи. Завдяки цьому мережа може функціонувати навіть у режимі часткової автономії, виконуючи локальні задачі моніторингу або реагування.

Крім того, важливим функціональним аспектом є забезпечення взаємодії з міськими платформами, включаючи хмарні сервіси, SCADA-системи, транспортні диспетчерські платформи та аналітичні модулі. Мережа має забезпечувати стандартизовану передачу даних та інтеграцію з системами різного призначення, підтримуючи єдиний інформаційний простір Smart City.

Узагальнюючи, функціональні вимоги до Mesh-мережі Smart City формують базову основу для її подальшого проектування та вибору протоколів. Саме вони визначають здатність мережі адаптуватися до динамічних міських умов, забезпечувати надійну передачу даних та інтегруватися в єдину екосистему розумного міста. На наступному етапі важливо розглянути технічні вимоги, що конкретизують параметри пропускну здатності, затримки, енергоефективності та стійкості, необхідні для реалізації цих функціональних можливостей.

1.3 Технічні вимоги до пристроїв та середовища

Спираючись на сформовані у попередньому підрозділі функціональні вимоги, у цьому розділі розглянемо технічні параметри, які визначають можливість практичної реалізації Mesh-мережі Smart City. Технічні вимоги зумовлені особливостями міського середовища, інтенсивністю радіонавантаження, кількістю IoT-пристроїв та необхідністю забезпечення стабільного багатохопового зв'язку в широкому діапазоні умов експлуатації. Саме ці параметри визначають відповідність конкретної технології реальним сценаріям використання у міській інфраструктурі.

Першим критично важливим аспектом є радіотехнологія та параметри бездротового каналу. Міське середовище насичене джерелами інтерференції - Wi-Fi, LTE/5G, радіорелейними станціями, Bluetooth-пристроями та іншими Mesh-мережами [14]. Тому вибір технології повинен враховувати високу ймовірність колізій, багатопроменевість, затінення сигналу будівлями та рухомими об'єктами. Для пристроїв необхідною є підтримка адаптивного вибору каналів, автоматичного коригування потужності передавання та

механізмів виявлення/уникнення колізій. Пропускна здатність каналу повинна відповідати типам переданих даних - від одиниць кілобіт на секунду для сенсорної телеметрії до кількох мегабіт на секунду у випадках фотофіксації та потокової аналітики [15].

Другою групою технічних вимог є затримка та швидкість маршрутизації, що мають ключове значення для міських сервісів реального часу. Для систем управління транспортом, аварійного реагування та інтелектуального освітлення допустима затримка не повинна перевищувати 50–100 мс, тоді як для екологічних сенсорів можливе використання каналів з більшою затримкою [16]. Технологія повинна підтримувати прогнозовану поведінку при збільшенні кількості хопів та ефективні алгоритми побудови маршрутів із мінімальним накладним службовим трафіком.

Третім важливим аспектом є енергоспоживання IoT-пристроїв, оскільки значна частина вузлів працює автономно протягом місяців або років без заміни джерела живлення. Пристрої повинні підтримувати наднизьке енергоспоживання у режимах сну, енергоощадну маршрутизацію та ефективну буферизацію пакетів. Радіомодулі мають забезпечувати мінімальне споживання під час передачі й прийому, а стеки протоколів - повторне використання з'єднань та компресію службових заголовків.

Не менш суттєвою є вимога до криптографічних механізмів захисту, які повинні бути реалізовані апаратно або апаратно-прискорено для уникнення навантаження на малопотужні контролери. Smart City передбачає роботу з конфіденційними даними, тому пристрої повинні підтримувати AES-128/256, захищену автентифікацію, цілісність пакетів, захист від повторних атак та стійкість до компрометації окремих вузлів [17]. Мережа має запобігати атакам типу wormhole, Sybil, sinkhole та routing manipulation, які є типовими для багатохопових топологій.

Окремою групою є вимоги до надійності та фізичної стійкості IoT-пристроїв, оскільки вони експлуатуються на вулицях, інженерних спорудах та інших відкритих об'єктах. Пристрої повинні відповідати класам захисту не нижче IP65, мати розширений температурний діапазон роботи, стійкість до вібрацій, опадів, ультрафіолету та статичних електричних розрядів [18]. Радіомодулі повинні зберігати стабільні характеристики навіть за умов зволоження та сильних перепадів температур.

Технічні вимоги охоплюють також масштабованість мережевої інфраструктури, що передбачає можливість роботи тисяч вузлів без деградації маршрутизації. Технологія повинна забезпечувати оптимальне балансування навантаження, захист від надмірного зростання службового трафіку та можливість створення кількох незалежних логічних доменів [19]. Важливим є також обмеження радіуса дії окремого хопу, що впливає на планування топології та кількість граничних вузлів.

Ще одним ключовим параметром є сумісність протоколів та підтримка стандартних мережевих інтерфейсів, оскільки інфраструктура Smart City є гетерогенною за своєю природою. Технічні характеристики мають передбачати підтримку IPv6, інтеграцію з хмарними платформами, можливість роботи з протоколами CoAP, MQTT, UDP та підтримку форматів обміну телеметрією. Це спрощує взаємодію між системами різних виробників та забезпечує модульність під час модернізації мережі.

На рисунку 1.4 наведена діаграма з узагальненими технічними та функціональними вимогами. Діаграма відображає структуру вимог до mesh-мережі Smart City, узагальнюючи технічні та функціональні аспекти її побудови та експлуатації. Технічні вимоги охоплюють пропускну здатність, допустимі затримки передачі даних, енергоефективність IoT-вузлів, стійкість до радіоперешкод, кіберзахист та сумісність зі стандартами й хмарними платформами.

Функціональні вимоги спрямовані на забезпечення стабільної роботи мережі в динамічному міському середовищі, підтримку різних класів сервісів і пріоритетів трафіку. Окремо підкреслено необхідність масштабованості, самоконфігурації, самовідновлення топології та безперервного збору й передачі даних від гетерогенних IoT-пристроїв.

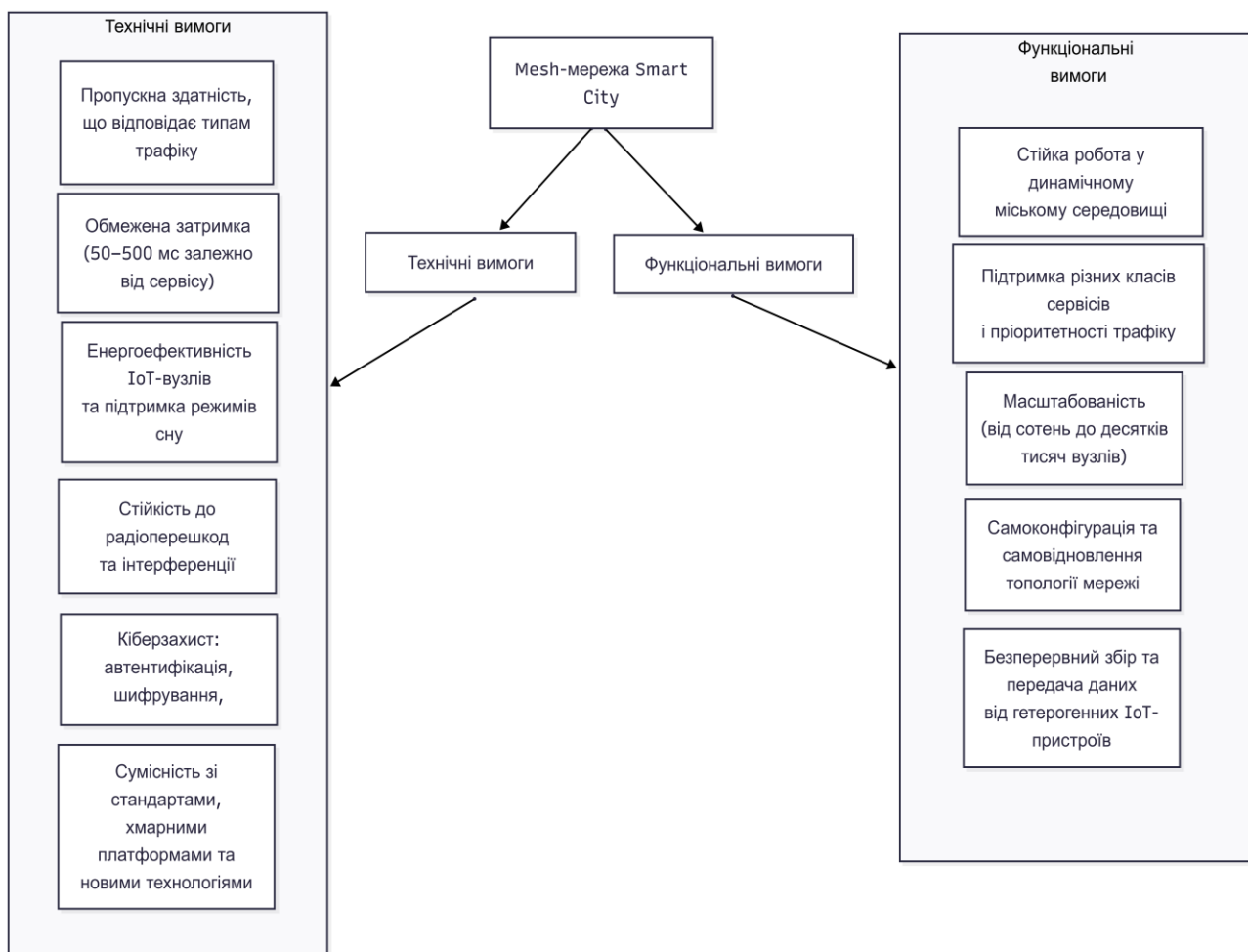


Рисунок 1.4 - Загальні вимоги до Mesh-мереж Smart City

Узагальнюючи, функціональні та технічні вимоги маємо, що описані вище вимоги формують концептуальну основу для вибору протоколів Mesh, визначення архітектури мережі, яку потрібно реалізувати та дослідити в ході

виконання роботи і моделювання її основних характеристик та параметрів в умовах реального міського середовища.

Саме ці вимоги визначають можливість практичного впровадження Mesh-рішень у Smart City та забезпечують їх ефективність, відмовостійкість, надійність і довготривалу експлуатацію.

1.4 Основні завдання

Спираючись на результати аналізу аналогів Mesh-технологій, а також сформульовані функціональні та технічні вимоги до мережі Smart City, у цьому підрозділі визначимо комплекс основних завдань, які необхідно розв'язати в межах дипломної роботи. Оскільки проєктування міської IoT-інфраструктури на базі Mesh-мережі охоплює як теоретичні, так і практичні аспекти, завдання структуровано таким чином, щоб забезпечити поетапний перехід від аналізу до моделювання, реалізації та дослідження мережевої системи.

Першим ключовим завданням є вивчення сучасних технологій побудови багатохопових бездротових мереж, зокрема Wi-Fi Mesh, Zigbee, Thread, Bluetooth Mesh та LoRa Mesh. Це включає аналіз їх архітектурних підходів, механізмів маршрутизації, рівня енергоефективності, пропускної здатності та придатності до міського середовища з високим рівнем радіоперешкод і складною забудовою. Результати цього аналізу створюють основу для подальшого вибору оптимальної технології.

Друге завдання полягає у визначенні вимог до функціонування мережі Smart City, зокрема вимог до пропускної здатності, затримки, масштабованості та надійності. Окремо розглядаються вимоги до енергоспоживання сенсорних пристроїв, їх життєвого циклу, здатності працювати автономно та механізми

підвищення безпеки. Аналіз цих параметрів дозволяє сформувати набір критеріїв, за якими оцінюються протоколи Mesh.

Наступним завданням є обґрунтування вибору протоколу Thread як базової технології для побудови міської сенсорної інфраструктури. Обґрунтування включає порівняння з альтернативами, аналіз здатності протоколу функціонувати в умовах високої щільності вузлів та необхідність інтеграції з міськими IP-сервісами через механізми 6LoWPAN та Border Router.

Важливою частиною роботи є розроблення логічної та структурної моделі Mesh-мережі, що описує розподіл ролей між сенсорними пристроями, маршрутизаторами та граничними вузлами, визначає можливу кількість хопів, особливості побудови топології та способи розміщення обладнання в міському середовищі. Структурна модель повинна враховувати особливості розташування вуличних об'єктів, енергопостачання, перешкод та щільності забудови.

Четверте завдання полягає у реалізації архітектури Thread Mesh, що включає налаштування сенсорних вузлів (ESP32-H2, nRF52840), маршрутизаторів Mesh та Thread Border Router, а також інтеграцію з міською транспортною мережею через MikroTik KNOT або аналогічні пристрої. На цьому етапі необхідно забезпечити коректне формування топології, розподіл ролей вузлів, налаштування безпеки, запуск механізмів самоконфігурації та самовідновлення.

Наступне завдання - налаштування безпекових механізмів, що включає автентифікацію вузлів, шифрування трафіку, захист від атак на маршрутизацію, а також розробку політик доступу. В умовах міської інфраструктури питання кіберзахисту має першочергове значення, оскільки компрометація мережі може вплинути на роботу критичних сервісів.

Окремим етапом є моделювання роботи стеку Thread за різних сценаріїв, що включають зміни топології, відмову окремих вузлів, збільшення

навантаження, вплив перешкод та випадкове вимикання пристроїв. Теоретична модель повинна описати роботу механізмів RPL, поведінку DAG-структури, час відновлення маршрутів та характеристику затримок у багатохопових топологіях.

Наступним завданням є проведення досліджень і порівняння із альтернативними технологіями, використовуючи отримані під час моделювання дані. Для цього необхідно сформувати таблиці та графіки, що відображають пропускну здатність, затримку, стійкість до збоїв, споживання енергії та інші важливі параметри.

Завершальне завдання - оцінити ефективність розробленої архітектури, визначити її переваги та обмеження, а також сформувати рекомендації щодо подальшого розгортання системи в умовах реального міського середовища. Цей аналіз дозволяє зрозуміти, наскільки розроблена модель відповідає сучасним вимогам Smart City та які перспективи має її практичне впровадження.

Таким чином, сформульовані завдання охоплюють повний цикл дослідження Mesh-мережі для IoT-пристроїв у системах Smart City - від аналізу технологій і моделювання до практичного розгортання, забезпечення безпеки та оцінювання результатів. Їх реалізація дозволить створити комплексну модель міської сенсорної інфраструктури та підтвердити доцільність використання протоколу Thread у міських IoT-системах.

2 ПОРІВНЯННЯ ТЕХНОЛОГІЙ, ПРОТОКОЛІВ І СТАНДАРТІВ MESH-МЕРЕЖ SMART CITY

2.1 Технологічні основи побудови бездротових Mesh-мереж

Спираючись на сформовані у першому розділі функціональні та технічні вимоги до міської IoT-інфраструктури, у цьому підрозділі розглянемо

технологічні принципи побудови бездротових Mesh-мереж, які застосовуються у системах Smart City. Основна увага зосереджується не на кількісному порівнянні характеристик, а на архітектурних підходах, принципах організації топології та механізмах взаємодії вузлів у багатохопових мережах.

Mesh-мережа є децентралізованою бездротовою системою, у якій кожен вузол може виконувати як функції кінцевого пристрою, так і функції ретрансляції трафіку [20]. На відміну від класичних топологій типу «зірка» або «дерево», Mesh-архітектура не має єдиної точки відмови та здатна автоматично перебудовувати маршрути у разі зміни умов зв'язку або виходу з ладу окремих елементів. Для міського середовища така властивість є критично важливою, оскільки Smart City характеризується динамічністю, щільною забудовою та нерівномірним розподілом радіоперешкод.

Технологічною основою Mesh-мереж є багатохопова маршрутизація, за якої передавання даних між вузлом-джерелом і вузлом-приймачем здійснюється через проміжні вузли. Кількість таких переходів може змінюватися залежно від розташування пристроїв, якості каналу та рівня навантаження. Це дозволяє суттєво розширити зону покриття мережі без збільшення потужності передавання та зменшити вимоги до розміщення центральних вузлів інфраструктури.

У контексті Smart City Mesh-мережі використовуються для об'єднання великої кількості IoT-пристроїв, які можуть бути розміщені на вуличних опорах, фасадах будівель, інженерних спорудах, транспортних об'єктах або всередині приміщень. Такі пристрої часто працюють в автономному режимі та мають обмежені обчислювальні ресурси і джерела живлення. Тому Mesh-технології для Smart City повинні підтримувати енергоефективні механізми обміну, мінімізувати службовий трафік і забезпечувати стабільну роботу навіть за значної кількості вузлів.

Залежно від рівня реалізації Mesh-логіки виділяють декілька технологічних підходів. У високошвидкісних бездротових мережах Mesh-функції можуть реалізовуватися на канальному рівні, що забезпечує мінімальні затримки та високу пропускну здатність, але вимагає значних апаратних ресурсів. У сенсорних IoT-мережах Mesh-логіка зазвичай реалізується на мережевому рівні, де маршрутизація оптимізується з урахуванням енергоспоживання, надійності каналів і тривалості автономної роботи вузлів. Такий підхід є більш придатним для розгортання великомасштабних міських систем.

Важливим аспектом технологічної організації Mesh-мереж є механізми самоконфігурації та самовідновлення. Після додавання нового вузла мережа повинна автоматично інтегрувати його в існуючу топологію, визначити оптимальні маршрути та оновити таблиці маршрутизації. Аналогічно, у разі втрати зв'язку з окремим вузлом або погіршення якості каналу система повинна перебудувати маршрути без участі оператора. Це дозволяє зменшити експлуатаційні витрати і підвищити надійність функціонування міських сервісів.

Окрему роль у Mesh-архітектурах Smart City відіграє інтеграція сенсорних мереж з міською IP-інфраструктурою. Для цього використовуються граничні вузли або шлюзи, які забезпечують трансляцію трафіку між локальними Mesh-сегментами та транспортною мережею міста. Така багаторівнева архітектура дозволяє поєднати енергоефективні IoT-мережі з високошвидкісними каналами передачі даних і забезпечити централізований моніторинг та керування.

Таким чином, Mesh-мережі у Smart City розглядаються як технологічна основа для побудови гнучкої, масштабованої та стійкої IoT-інфраструктури. Їх архітектурні принципи забезпечують адаптацію до умов міського середовища, автономність роботи вузлів і можливість поступового розширення системи. Розуміння цих технологічних основ є необхідним для подальшого

порівняльного аналізу конкретних Mesh-протоколів та обґрунтованого вибору рішення, що найбільш повно відповідає вимогам Smart City, що буде виконано у наступному підрозділі.

2.2 Порівняльний аналіз Mesh-протоколів і стандартів для Smart City

Спираючись на технологічні принципи побудови Mesh-мереж, розглянуті у підрозділі 2.1, у цьому підрозділі проведемо порівняльний аналіз протоколів і стандартів, що безпосередньо реалізують багатохопову маршрутизацію у бездротових мережах Smart City. Метою аналізу є систематизація технічних і функціональних характеристик Mesh-протоколів та визначення їхньої придатності для різних класів міських IoT-застосувань.

Для інфраструктури Smart City ключовими є такі параметри: масштабованість мережі, енергоефективність кінцевих вузлів, стійкість до відмов, затримка передавання даних, можливість інтеграції з IP-мережами та здатність працювати в умовах щільної міської забудови [21]. Саме за цими критеріями доцільно порівнювати сучасні Mesh-рішення.

Одним із класичних стандартів є IEEE 802.11s, який визначає побудову Mesh-мереж на основі Wi-Fi. Маршрутизація у цьому стандарті реалізується за допомогою Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP), що поєднує проактивні та реактивні механізми. IEEE 802.11s забезпечує високу пропускну здатність і низькі затримки, однак характеризується значним енергоспоживанням і підвищеною чутливістю до перевантаження радіоефіру, що обмежує його використання у масових сенсорних мережах.

Zigbee Mesh, заснований на стандарті IEEE 802.15.4, орієнтований на малопотужні IoT-пристрої. У Zigbee застосовується маршрутизація на основі

AODV, адаптована до сенсорних мереж. Протокол добре масштабується за кількістю вузлів і забезпечує тривалу автономну роботу, проте має обмежену пропускну здатність і не підтримує нативну IP-адресацію, що ускладнює інтеграцію з міськими інформаційними платформами.

Протокол Thread також базується на IEEE 802.15.4, але реалізує повноцінний IPv6-стек через механізм 6LoWPAN [22]. Для маршрутизації використовується протокол RPL, який формує орієнтований ациклічний граф маршрутів та забезпечує самовідновлення топології. Thread поєднує низьке енергоспоживання, масштабованість і пряму інтеграцію з IP-інфраструктурою Smart City, що робить його одним із найбільш універсальних Mesh-протоколів для міських IoT-систем.

Bluetooth Mesh реалізує багатохопову передачу даних за принципом керованої широкомовної ретрансляції (managed flooding). Такий підхід спрощує реалізацію протоколу, але призводить до зростання навантаження на радіоканал при збільшенні кількості вузлів. Bluetooth Mesh доцільно застосовувати у локальних підсистемах Smart City, зокрема для керування освітленням або інформаційних маячків, однак його масштабованість у великих міських мережах є обмеженою.

LoRa Mesh є спеціалізованим рішенням, орієнтованим на максимальну дальність зв'язку та мінімальне енергоспоживання. Mesh-реалізації на основі LoRa дозволяють вузлам виконувати функції ретрансляції, що підвищує покриття у складних умовах. Водночас низька пропускну здатність і значні затримки обмежують застосування LoRa Mesh сценаріями періодичного моніторингу, де обмін даними не є критичним за часом.

Для узагальнення результатів аналізу у таблиці 2.1 наведено порівняльні технічні та функціональні характеристики основних Mesh-протоколів, що застосовуються у системах Smart City.

З огляду на різноманіття бездротових Mesh-технологій, що застосовуються у системах Smart City, доцільно виконати не лише їх загальний опис, а й порівняльний аналіз функціональних можливостей, які визначають придатність тієї чи іншої технології для міських IoT-сценаріїв. До таких можливостей належать підтримка самоорганізації та самовідновлення мережі, масштабованість, енергоефективність кінцевих вузлів, а також рівень інтеграції з IP-інфраструктурою міста та підтримка критичних сервісів.

Таблиця 2.1 – Порівняльні характеристики Mesh-протоколів для Smart City

Технологія	Пропускна здатність	Довжина одного хопу	Споживання енергії	Тип маршрутизації	Стійкість до завад	Застосування
Wi-Fi Mesh (802.11s)	до 600 Мбіт/с	50–250 м	високе	HWMP	середня	відеоспостереження, транспортні системи
Zigbee Mesh	до 250 кбіт/с	20–100 м	дуже низьке	AODV-based	середня	сенсорні вузли, освітлення
Thread	до 250 кбіт/с	30–150 м	низьке	RPL	висока	міські IoT-системи, автоматизація
Bluetooth Mesh	до 2 Мбіт/с (BLE 5), фактично менше	10–50 м	низьке	managed flooding	низька	освітлення, маяки
LoRa Mesh	0.3–50 кбіт/с	500–5000 м	дуже низьке	багатохопові варіанти	висока	телеметрія великої території

Узагальнене порівняння функціональних характеристик основних Mesh-технологій, що розглядаються у даній роботі, наведено в таблиці 2.2, що дозволяє наочно оцінити їх переваги та обмеження в контексті застосування у Smart City.

Таблиця 2.2 – Порівняння функціональних можливостей Mesh-технологій у Smart City

Характеристика	Wi-Fi Mesh	Zigbee	Thread	Bluetooth Mesh	LoRa Mesh
Підтримка IPv6	часткова	відсутня	повна	відсутня	часткова
Самоорганізація мережі	обмежена	так	так	так	обмежена
Самовідновлення маршрутів	середнє	добре	високе	середнє	низьке
Масштабованість	середня	висока	висока	висока	низька
Підтримка енергоощадних вузлів	низька	висока	дуже висока	висока	дуже висока
Інтеграція з IP-мережею міста	через шлюзи	через шлюзи	нативна	через шлюзи	через шлюзи
Підтримка критичних сервісів	обмежена	часткова	повна	часткова	непридатна

Наведене порівняння показує, що Mesh-протоколи мають різну спеціалізацію та орієнтовані на різні сценарії використання в інфраструктурі Smart City. Високошвидкісні стандарти доцільні для сервісів із великим обсягом трафіку, тоді як сенсорні протоколи оптимізовані для енергоефективної роботи й масштабування. Отримані результати порівняльного аналізу створюють основу для подальшого обґрунтування вибору протоколу Mesh та проєктування міської IoT-мережі, що буде виконано у наступних підрозділах.

2.3 Вимоги до пропускної здатності, затримки та надійності

Спираючись на результати порівняльного аналізу Mesh-протоколів, сформулюємо вимоги до ключових параметрів якості обслуговування Mesh-мережі Smart City. До таких параметрів належать пропускна здатність, затримка передавання даних та надійність функціонування мережі. Саме вони визначають можливість практичного використання Mesh-архітектури для міських сервісів

різного призначення – від періодичного сенсорного моніторингу до систем, що працюють у режимі близькому до реального часу.

Особливістю Smart City є одночасна робота гетерогенних IoT-пристроїв, які генерують трафік з різними характеристиками. Частина сенсорів передає невеликі обсяги даних з великими інтервалами, тоді як інші елементи інфраструктури потребують стабільного та оперативного обміну інформацією. Тому вимоги до мережі не можуть бути уніфікованими і повинні враховувати специфіку конкретних сервісів.

Пропускна здатність Mesh-мережі визначає максимальний обсяг даних, який може бути переданий між вузлами за одиницю часу. У багатохопових мережах ефективна пропускна здатність зменшується зі зростанням кількості хопів, оскільки один і той самий радіоканал використовується як для приймання, так і для ретрансляції пакетів.

Для більшості сенсорних сервісів Smart City, таких як моніторинг температури, вологості, рівня забруднення повітря або стану інженерних мереж, достатньою є пропускна здатність у межах десятків або сотень кілобіт за секунду на сегмент мережі. У таких сценаріях ключовим фактором є не максимальна швидкість, а стабільність передачі та мінімізація енергоспоживання.

Водночас окремі підсистеми Smart City, зокрема транспортний моніторинг або передавання агрегованих даних від груп сенсорів, можуть вимагати вищої пропускної здатності. У таких випадках доцільно застосовувати ієрархічну архітектуру, де сенсорний рівень працює на енергоефективних Mesh-протоколах, а транспортний рівень забезпечується високошвидкісними каналами.

Затримка є одним із найбільш критичних параметрів для міських IoT-систем, особливо у випадках, коли дані використовуються для керування або прийняття рішень у реальному часі. У Mesh-мережах загальна затримка

складається з часу доступу до радіоканалу, часу обробки пакета вузлом та затримки, пов'язаної з багатохопковою передачею.

Для систем, що виконують функції моніторингу без жорстких часових обмежень, допустима затримка може становити сотні мілісекунд або навіть секунди. Натомість для таких сервісів, як адаптивне керування освітленням, транспортна сигналізація або аварійне сповіщення, затримка повинна бути обмежена значеннями порядку десятків мілісекунд.

При зростанні кількості вузлів і хопів затримка в Mesh-мережі неминуче зростає, тому при проектуванні Smart City необхідно обмежувати глибину багатохопових сегментів та оптимізувати алгоритми маршрутизації з урахуванням пріоритетності трафіку.

Надійність Mesh-мережі визначається її здатністю забезпечувати безперервну передачу даних у разі відмов окремих вузлів, появи завад або зміни умов радіопоширення. Для міської інфраструктури ця властивість є критично важливою, оскільки відмова мережі може призвести до порушення роботи систем безпеки, транспорту або комунальних служб.

Mesh-архітектура забезпечує надійність за рахунок наявності альтернативних маршрутів між вузлами. У разі втрати одного з маршрутів мережа повинна автоматично перебудувати топологію та відновити зв'язок без втручання оператора. Вимоги Smart City передбачають, що час відновлення зв'язку має бути мінімальним і не перевищувати значень, допустимих для конкретного сервісу.

Окрім стійкості до відмов, важливим аспектом надійності є захист від перевантажень та деградації якості зв'язку. Мережа повинна підтримувати балансування навантаження, уникати концентрації трафіку на окремих вузлах і забезпечувати прогнозовану поведінку при масштабуванні.

Для узагальнення вимог до параметрів якості обслуговування у таблиці 2.3 наведено типові значення пропускної здатності, затримки та надійності для різних класів сервісів Smart City.

Таблиця 2.3 – Кількісне порівняння Mesh-технологій за вимогами Smart City

Параметр	Wi-Fi Mesh	Zigbee	Thread	Bluetooth Mesh
Типова затримка(1 хоп), мс	5–10	20–30	10–20	20–50
Максимальна кількість вузлів	~250	>65 000	>10 000	>10 000
Типова дальність хопу, м	30–50	10–100	30–100	10–50
Пропускна здатність, кбіт/с	>10 000	250	250	125
Підтримка IPv6	так	ні	так	ні
Тип маршрутизації	Layer 2/3	Tree	RPL (DAG)	Flooding
Енергоспоживання вузла, мВт	500-2000	20-60	10-40	20-80
Придатність для Smart City	обмежена	добра	висока	обмежена

Наведене кількісне порівняння за ключовими показниками якості обслуговування підтверджує, що протокол Thread найбільш повно відповідає вимогам міських IoT-систем щодо затримки, масштабованості, енергоефективності та інтеграції з IP-інфраструктурою, що обґрунтовує його вибір для подальшого проектування Mesh-мережі Smart City.

2.4 Логічна та структурна модель Mesh-мережі Smart City

Спираючись на результати аналізу вимог до Mesh-мережі та порівняння протоколів, у цьому підрозділі розглянемо узагальнену логічну та структурну модель мережі, орієнтованої на використання протоколу Thread як базового рішення для сенсорного рівня Smart City. Метою моделювання є формування цілісного уявлення про взаємодію IoT-вузлів, шлюзів, транспортної

інфраструктури та міських сервісів, а також встановлення зв'язків між окремими елементами архітектури.

Логічна модель Mesh-мережі відображає функціональний поділ на рівні, абстрагуючись від конкретного розміщення пристроїв у просторі (рис.2.1). У контексті Smart City доцільно виділити такі логічні рівні:

- рівень сенсорних вузлів, що включає датчики, виконавчі пристрої та локальні контролери, об'єднані в Thread Mesh-мережі;
- транспортний рівень, що складається з каналів зв'язку між граничними вузлами і міськими центрами обробки (оптичні лінії, Ethernet, 4G/5G, Wi-Fi Mesh);
- рівень граничних вузлів (Border Router), які забезпечують вихід з локальних Mesh-сегментів до міської IP-інфраструктури;
- рівень сервісів і платформ, де функціонують сервери збору даних, аналітичні системи, платформи керування міськими службами та прикладні інтерфейси.

На сенсорному рівні вузли Thread утворюють багатохопову Mesh-структуру, у якій кожен пристрій може бути як кінцевим сенсором, так і проміжним ретранслятором. Завдяки маршрутизації RPL і механізмам самоконфігурації топології створюється ієрархія маршрутів у вигляді орієнтованого ациклічного графа, де граничний вузол виступає коренем, а окремі IoT-пристрої формують гілки та піддерева. Така логічна структура забезпечує стійкість до відмов окремих вузлів, а маршрутизація може адаптуватися до змін радіосередовища та навантаження.

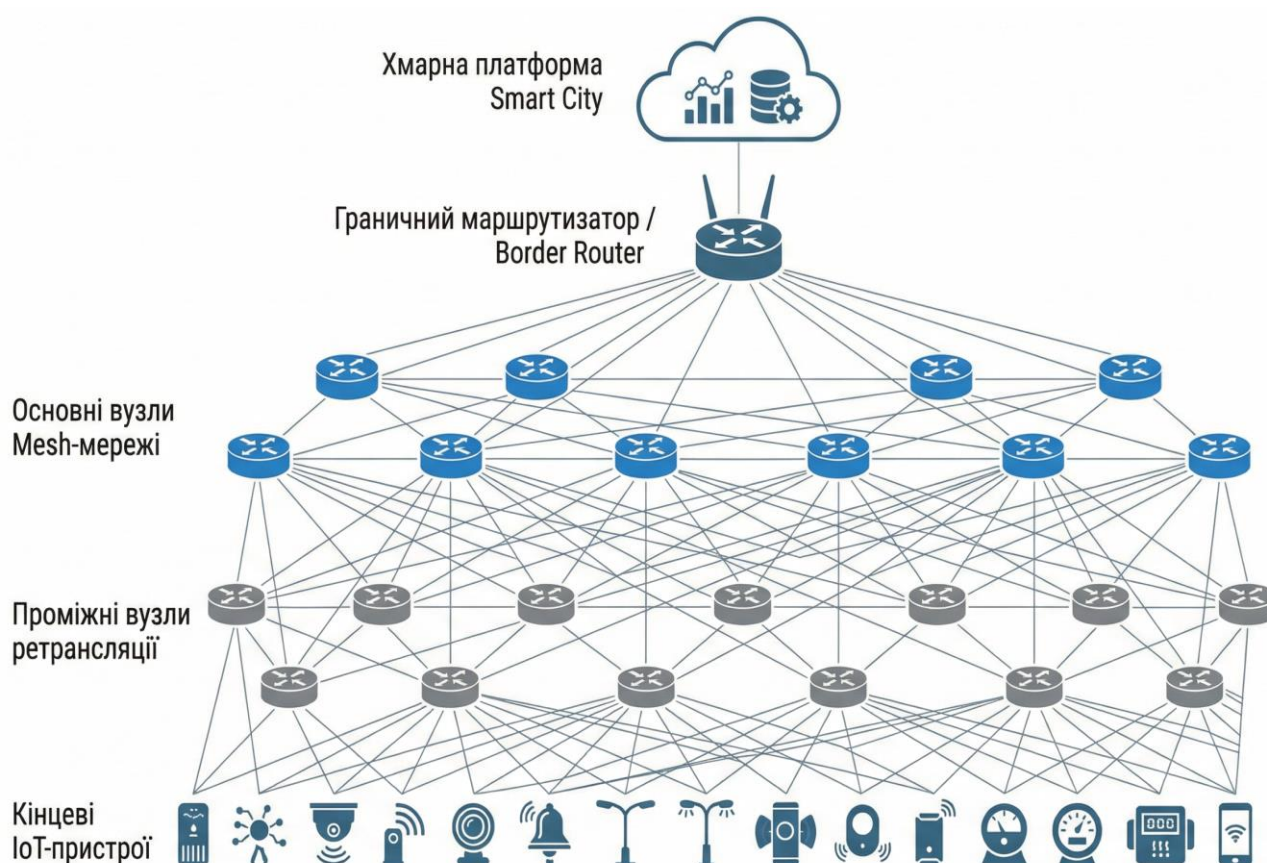


Рисунок 2.1 - Логічна схема Mesh-мережі для IoT-пристроїв

Рівень граничних вузлів забезпечує логічне розділення локальних Mesh-сегментів та загальноміської IP-мережі [23]. Кожен граничний вузол виконує функції маршрутизації, трансляції протоколів, фільтрації трафіку та застосування політик безпеки. На цьому рівні реалізуються механізми пріоритизації трафіку, розподілення потоків за класами сервісів, а також інтеграція різних Mesh-технологій, якщо в окремих підсистемах паралельно застосовуються Zigbee, Bluetooth Mesh чи Wi-Fi Mesh.

Транспортний рівень логічно об'єднує всі граничні вузли в єдину міську інфраструктуру. Залежно від сценарію впровадження він може базуватися на оптоволоконній мережі оператора, міській MAN-мережі, бездротових мікрохвильових каналах або комбінації декількох технологій. Головною задачею транспортного рівня є забезпечення гарантованої пропускної здатності

та мінімально можливих затримок для критичних сервісів, а також сегментація трафіку між різними підсистемами Smart City.

На рівні сервісів формується логічна надбудова у вигляді платформ моніторингу та керування, аналітичних модулів та інтеграційних інтерфейсів з міськими службами [24]. У цій частині логічної моделі визначаються правила зберігання та обробки даних, механізми візуалізації, оповіщення та взаємодії з операторами систем. Саме цей рівень забезпечує перетворення сирих телеметричних даних із Mesh-мережі на прикладні сервіси для мешканців і міської адміністрації. Структурна модель мережі деталізує логічну архітектуру, відображаючи просторове розміщення вузлів та канали фізичного з'єднання між ними (рис.2.2). У структурі Mesh-мережі Smart City доцільно виділити кілька типових фрагментів:

- локальні кластери сенсорних вузлів, розгорнуті на окремих вулицях, перехрестях, площах, парках чи транспортних вузлах;
- опорні точки інфраструктури (освітлювальні опори, фасади будівель, інженерні споруди), де розміщуються граничні вузли та вузли ретрансляції;
- магістральні сегменти, що з'єднують граничні вузли з центральними вузлами обробки даних;
- резервні канали зв'язку, що забезпечують живучість мережі у разі відмови окремих ділянок.

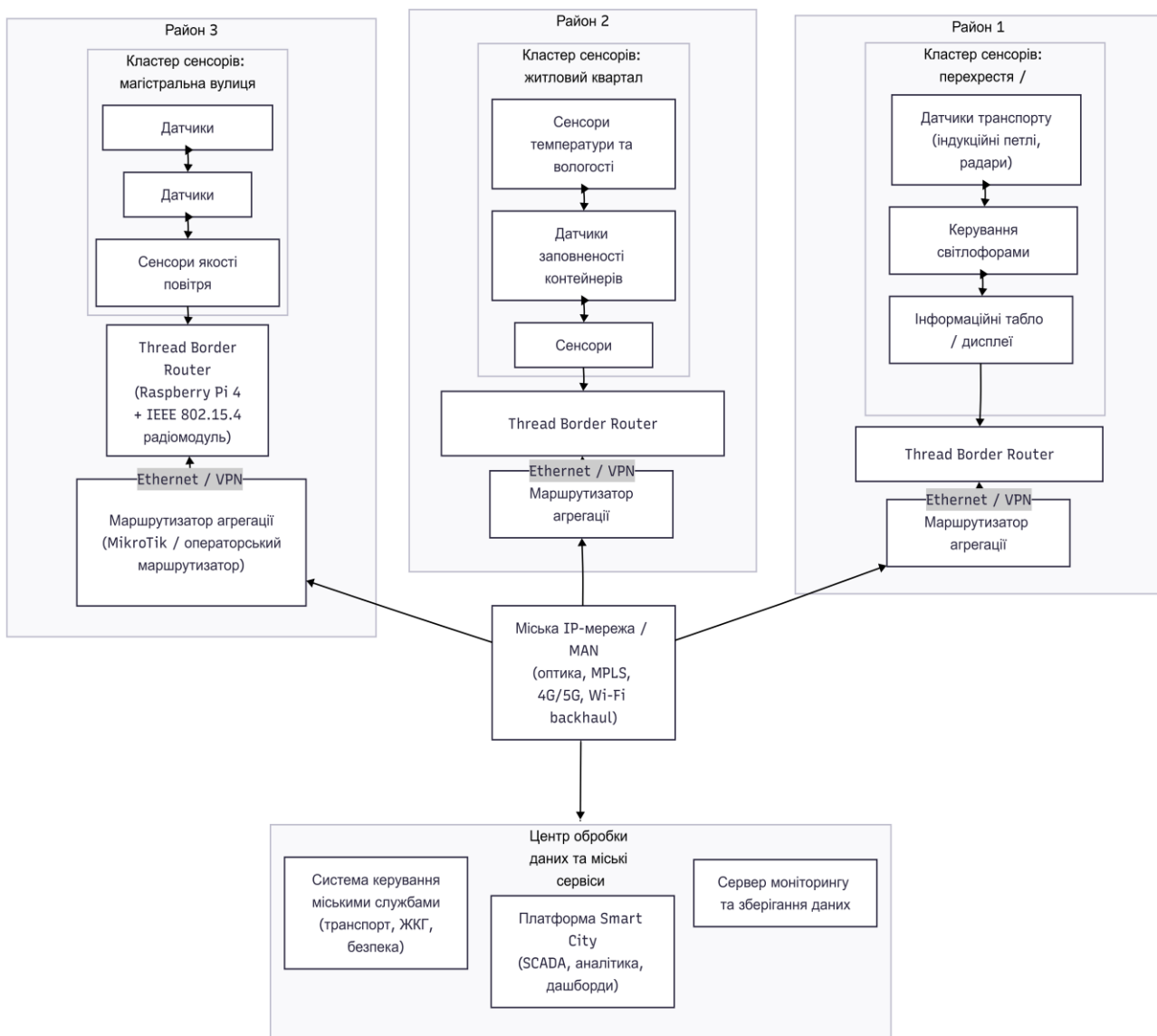


Рисунок 2.2 - Структурна схема Mesh-мережі для IoT-пристроїв

У типовому сценарії розумного міста сенсорні кластери можуть формуватися навколо функціональних зон: наприклад, мережа датчиків освітлення й руху вздовж магістральної дороги, кластер датчиків якості повітря у житловому кварталі, вузли моніторингу заповненості контейнерів для сміття в комунальній зоні тощо. У кожному кластері Thread-вузли утворюють Mesh-топологію, а один або декілька граничних вузлів забезпечують зв'язок із міською інфраструктурою.

Модель мережі передбачає також визначення щільності розміщення вузлів, радіусу дії окремих радіомодулів та кількості проміжних хопів між сенсорами та граничними вузлами. Ці параметри пов'язані з вимогами до затримки, надійності та енергоефективності, сформульованими у першому розділі. Наприклад, системи управління дорожнім рухом потребують меншої кількості хопів і більшої щільності вузлів, ніж системи екологічного моніторингу, де допустимі більші затримки.

Важливим елементом структурної моделі є прив'язка вузлів до існуючої міської інфраструктури. Розміщення граничних вузлів на опорах освітлення чи об'єктах транспортної інфраструктури дозволяє ефективно використовувати наявні лінії живлення та опорні конструкції. При цьому транспортний рівень може бути реалізований у вигляді поєднання оптоволоконних сегментів та бездротових каналів, що забезпечують гнучкість при модернізації та розширенні мережі.

Узагальнюючи, логічна мережева модель формалізує функціональні ролі компонентів mesh-мережі Smart City та характер взаємодії між ними, тоді як структурна модель відображає фізичну реалізацію запропонованої архітектури в умовах міського середовища. Сформована сукупність моделей слугує методологічною основою для подальшого проектування мережевої топології, обґрунтованого вибору параметрів розгортання вузлів і моделювання режимів функціонування мережі в наступних розділах роботи.

2.5 Висновки до розділу

У цьому розділі, спираючись на сформульовані у першому розділі функціональні та технічні вимоги до Mesh-мережі Smart City, виконано

порівняльний аналіз технологій, протоколів і стандартів, що можуть бути використані для побудови міської IoT-інфраструктури. Розглянуто як високошвидкісні рішення транспортного рівня, так і малопотужні протоколи для сенсорних мереж, а також проаналізовано їх придатність до застосування в умовах складного міського середовища.

Проведене дослідження показало, що класичні стільникові технології та Wi-Fi-інфраструктура можуть ефективно використовуватися на магістральному та агрегаційному рівнях, але не завжди відповідають вимогам енергоефективності та масштабованості у сенсорних сегментах. У цьому контексті особливе значення мають протоколи Mesh, орієнтовані на IoT: Zigbee Mesh, Thread, Bluetooth Mesh та LoRa Mesh, кожен з яких демонструє власний баланс між дальністю дії, пропускнуою здатністю, енергоспоживанням та складністю інтеграції.

Аналіз сучасних Mesh-протоколів показав, що Wi-Fi Mesh доцільно застосовувати переважно для підсистем з високими вимогами до пропускнуої здатності, але він є надмірним для більшості сенсорних сценаріїв. Zigbee Mesh є зрілим стандартом для мереж з малим обсягом телеметричних даних, проте обмеження щодо IP-інтеграції ускладнюють його використання в масштабі всього міста. Bluetooth Mesh виявився ефективним у нішевих застосуваннях, зокрема в системах освітлення, але механізм flooding-маршрутизації створює ризик перевантаження мережі при значному зростанні кількості вузлів. LoRa Mesh, своєю чергою, добре підходить для покриття великих територій з рідкісною передачею невеликих обсягів даних, проте не може виступати універсальним рішенням для різномірних сервісів Smart City.

На основі порівняння характеристик основним кандидатом для реалізації сенсорного шару Mesh-мережі обрано протокол Thread. Він поєднує низьке енергоспоживання, підтримку багатохопкової маршрутизації, нативну інтеграцію з IPv6 (через 6LoWPAN), криптографічний захист та механізми

самоконфігурації й самовідновлення топології. Наявність Border Router спрощує взаємодію з міською IP-інфраструктурою та хмарними сервісами, що є критично важливим для комплексних рішень Smart City.

У межах розділу також побудовано узагальнену логічну та структурну модель Mesh-мережі, яка відображає взаємодію сенсорних кластерів, граничних вузлів, транспортного рівня та рівня сервісів. Логічна модель формалізує ролі окремих компонентів мережі, тоді як структурна модель описує фізичне розміщення вузлів, типові схеми побудови кластерів та прив'язку до об'єктів міської інфраструктури. Такий підхід забезпечує узгодження вимог до пропускної здатності, затримки, надійності та енергоефективності з конкретними сценаріями розгортання.

Узагальнюючи результати розділу, можна зробити висновок, що сформовано теоретичну основу для подальшого проектування Mesh-мережі Smart City на базі протоколу Thread. Вибір цієї технології є обґрунтованим з точки зору відповідності вимогам до масштабованості, енергоефективності, стійкості до відмов та інтегрованості з IP-орієнтованою міською інфраструктурою. Отримані моделі та висновки будуть використані у наступному розділі для розроблення архітектури, топології та параметрів розгортання мережі в умовах розумного міста.

3 ПРОЄКТУВАННЯ MESH-МЕРЕЖІ ДЛЯ SMART CITY

3.1 Обґрунтування вибору протоколу Mesh

Спираючись на результати аналізу вимог до міських IoT-систем, сформованих у попередньому розділі, можна зробити висновок, що інфраструктура Smart City потребує мережевих технологій, здатних

забезпечувати високу надійність, автономність та стійкість до динамічних змін середовища. Значна кількість гетерогенних пристроїв, обмеження щодо енергоспоживання, щільна міська забудова, а також потреба в автоматичному відновленні зв'язку роблять традиційні мережеві топології недостатньо ефективними. У таких умовах оптимальним рішенням є використання Mesh-архітектури, яка забезпечує багатоходову маршрутизацію, відсутність єдиної точки відмови та адаптивне балансування навантаження між вузлами.

З огляду на зазначені вимоги основою мережі обрано протокол Thread, який поєднує енергоефективність стандарту IEEE 802.15.4, повноцінну підтримку IPv6 через технологію 6LoWPAN та сучасні алгоритми маршрутизації RPL. На відміну від Zigbee, Thread дозволяє кожному вузлу працювати в одному адресному просторі міської мережі, а не у власному сегменті, що суттєво спрощує масштабування. Крім того, Thread передбачає механізм автоматичного вибору лідера та відновлення топології без втручання адміністратора - функції, які є критично важливими для Smart City з великою кількістю автономних сенсорів.

Одним із ключових параметрів, що вплинув на вибір Thread, є здатність протоколу забезпечувати стабільність мережі навіть у разі втрати окремих вузлів. Завдяки RPL-маршрутизації кожний елемент мережі може оперативно перебудовувати дерево маршрутів, використовуючи найкращі доступні шляхи з урахуванням метрик якості лінку, рівня перешкод та залишкової енергії. Це створює умови для довготривалої автономної роботи системи в міському середовищі, де відмови або деградація вузлів є звичайним явищем.

Для моделювання сенсорних вузлів обрано мікроконтролери ESP32-H2 та nRF52840, які забезпечують апаратну підтримку IEEE 802.15.4, апаратне шифрування AES-128 та розширені енергозберігальні режими. ESP32-H2 підтримує Thread і Matter на рівні мікропрограмного забезпечення, що робить його перспективною платформою для розбудови міських IoT-мереж.

Мікроконтролер nRF52840, у свою чергу, відзначається стабільною роботою з мережами низької потужності, збалансованими характеристиками обробки пакетів та можливістю тривалої автономної роботи від батарейних джерел. Використання двох різних апаратних платформ дозволяє дослідити поведінку мережі у змішаному середовищі та підвищує універсальність моделі.

Особливо важливою складовою архітектури є Thread Border Router, який забезпечує взаємодію бездротового Mesh-сегмента з основною міською IP-мережею. У реалізації використано рішення на основі Raspberry Pi 4, обладнане радіомодулем nRF52840 Dongle. Такий підхід дозволяє розгорнути повноцінний стек OpenThread, забезпечити трансляцію протоколів 6LoWPAN ↔ IPv6 та реалізувати механізми автентифікації, шифрування та управління мережею. Вибір відкритої програмної платформи (OpenThread) дозволяє проводити експериментальне моделювання та гнучко змінювати параметри маршрутизації без апаратних обмежень.

Для інтеграції Mesh-мережі з транспортною та серверною інфраструктурою міста застосовано маршрутизатор MikroTik KNOT, який підтримує Thread/BLE/LoRa/Ethernet та надає можливість агрегації даних у єдиному центрі обробки. У запропонованій архітектурі KNOT виконує роль верхнього вузла, відповідального за отримання даних від пограничного маршрутизатора, їх фільтрацію, шифрування та передавання у міську мережу за допомогою VPN-тунелю або окремого зашифрованого каналу. Така інтеграція дозволяє дослідити весь шлях проходження даних - від сенсора до центру прийняття рішень.

Структурно обрана архітектура складається з трьох взаємодоповнювальних рівнів:

- рівень сенсорних вузлів - автономні пристрої на базі ESP32-H2/nRF52840, що формують первинну топологію Mesh і забезпечують збір даних;

- рівень мережевої взаємодії - Thread Border Router, який виконує роль шлюзу між Mesh-сегментом і IP-мережею;
- рівень міської інтеграції - MikroTik KNOT, відповідальний за агрегацію даних, управління сервісами та захищений вихід у транспортну мережу міста.

Таке багаторівневе рішення забезпечує гнучкість під час розгортання, високу відмовостійкість та можливість подальшого масштабування архітектури. Крім того, ця структура дозволяє реалізувати елементи інформаційної безпеки та провести повноцінне моделювання характеристик мережі в умовах міського середовища.

3.2 Реалізація архітектури Mesh-мережі Smart City

Спираючись на обґрунтований у попередньому підрозділі вибір технології Thread як базової мережевої платформи, розглянемо особливості практичної реалізації міської Mesh-мережі. Реалізація охоплює формування топології, налаштування ролей вузлів, забезпечення стійкості маршрутизації, інтеграцію з транспортною інфраструктурою та впровадження механізмів кіберзахисту. Кінцевою метою є побудова адаптивної, масштабованої та безпечної мережі, що відповідає функціональним вимогам Smart City.

Для практичного впровадження архітектури використовується модель що складається з трьох рівнів, а саме:

- рівень сенсорних вузлів – містить малопотужні IoT-пристрої (датчики довкілля, освітлення, інженерна автоматика), що формують первинний Mesh-граф. Вони працюють за стандартом IEEE 802.15.4 та підтримують Thread-стек;

– рівень маршрутизаторів Mesh – складається зі стаціонарних вузлів підвищеної потужності, які забезпечують стабільність топології, підтримують маршрутизацію RPL та забезпечують балансування навантаження;

– рівень граничних маршрутизаторів (Border Routers) – відповідає за перехід між Mesh-доменом та міською IP-мережею (Ethernet/MPLS/5G). На цьому рівні реалізується перетворення 6LoWPAN ↔ IPv6.

Таке розподілення дозволяє чітко структурувати функції мережі та гарантує, що зміни або відмови на одному рівні не впливатимуть критично на інші. Для наочного відображення архітектури Thread Mesh-сегмента та базових параметрів його конфігурування побудовано структурну схему мережі з вказанням ключових налаштувань протоколу Thread і механізмів маршрутизації RPL (рисунк 3.1).

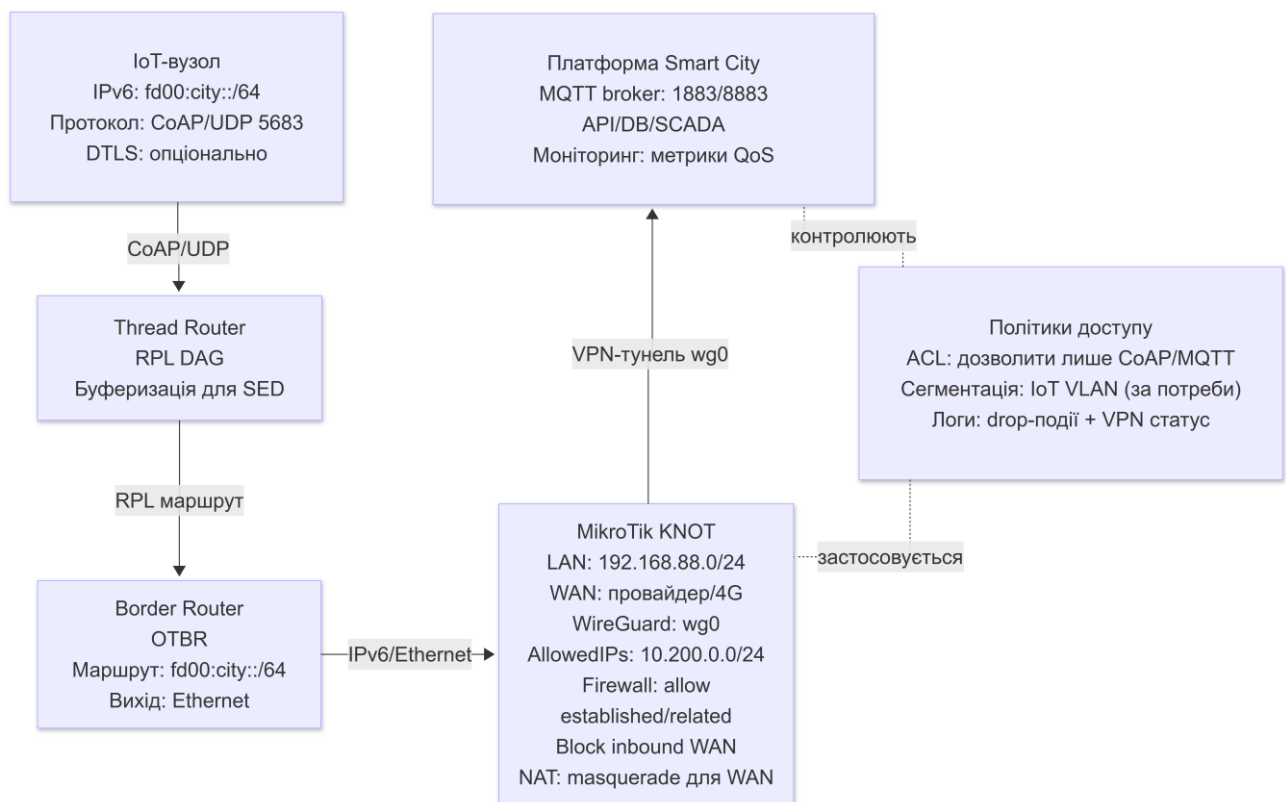


Рисунок 3.1 – Структурна схема Thread Mesh-сегмента Smart City з ключовими параметрами налаштування

Наведені параметри (канал, PAN ID, IPv6-префікс і метрики RPL) визначають правила формування топології Mesh та безпосередньо впливають на стійкість зв'язності й ефективність багатохопкової передачі даних у міському середовищі.\

Відповідно до концепції Thread, формування топології ґрунтується на автоматичній ролі вузлів:

- leader – обирається автоматично та забезпечує координацію управління топологією;
- router – виконує функції ретрансляції та маршрутизації;
- end device – обмінюється даними лише через батьківський Router, споживаючи мінімум енергії;
- border router – реалізує зовнішній обмін повідомленнями через IP-транспорт.

У процесі розгортання міської мережі першим активується граничний маршрутизатор, після чого інші вузли автоматично проводять аутентифікацію, обмін службовими повідомленнями та приєднання до топології.

Реалізація Mesh-вузлів у міському середовищі передбачає врахування:

- наявності перешкод (бетон, металоконструкції, транспорт);
- щільності забудови;
- впливу сторонніх джерел радіошуму.

Залежно від середовища конфігурація може змінювати розмір кластерів вузлів Thread (PAN) та адаптувати рівень потужності передавачів.

Після формування Mesh-домену відбувається інтеграція з сервісами Smart City:

- хмарна аналітика – для агрегування телеметрії;
- міські SCADA-системи – для інженерних мереж;
- транспортні IoT-платформи – для управління світлофорами, парковками, диспетчерськими центрами;

– GIS-системи – для відображення розміщення вузлів на географічній мапі.

Передавання даних між Thread-доменом і зовнішньою IP-мережею здійснюється через стандартні протоколи UDP/CoAP/MQTT.

Для підтримання стабільності мережі реалізуються такі механізми:

- автоматичне переназначення ролей при втраті Leader;
- адаптивний вибір батьківських вузлів для End Devices;
- побудова кількох незалежних логічних маршрутів;
- моніторинг якості каналу та періодична переоцінка ресурсів вузлів.

У випадку відмови вузла маршрутизації RPL автоматично перебудовує дерево маршрутів (DAG), мінімізуючи втрати пакетів.

Таким чином, реалізація архітектури mesh-мережі Smart City на основі протоколу Thread забезпечує формування стійкої, масштабованої та енергоефективної мережевої інфраструктури, здатної функціонувати в умовах динамічного та зашумленого міського середовища, а також інтегруватися з широким спектром міських цифрових сервісів і платформ. Запропонована мережева структура створює передумови для надійного обміну даними між гетерогенними IoT-пристроями та централізованими системами управління. У наступному підрозділі на основі цієї архітектури буде розглянуто налаштування та аналіз механізмів інформаційної безпеки, необхідних для забезпечення захисту каналів передавання даних і вузлів IoT від зовнішніх та внутрішніх загроз.

3.3 Налаштування безпеки Mesh-мережі Smart City

Спираючись на побудовану та реалізовану топологію Mesh-мережі, у цьому підрозділі розглянемо механізми кіберзахисту, які забезпечують конфіденційність, цілісність і доступність даних у міському середовищі. Оскільки інфраструктура Smart City є критичною для функціонування транспорту, енергетики, екологічного моніторингу та безпеки населення, безпека мережі відіграє визначальну роль у її працездатності.

Основні загрози Mesh-мереж включають несанкціонований доступ до вузлів, перехоплення даних, спотворення маршрутів, атакування окремих елементів мережі (blackhole, Sybil, wormhole), а також фізичний доступ до пристроїв. Тому налаштування безпеки повинно бути комплексним і охоплювати всі рівні - від радіоканалу до протоколів передачі даних та управління маршрутизацією. Для наочного відображення реалізації захисту в проєктованій Mesh-мережі сформовано модель безпеки із зонуванням мережі та визначенням контрольних точок на межі Thread-сегмента і транспортної інфраструктури Smart City (рисунок 3.2).

Модель (рисунок 3.2) демонструє, що конфіденційність і контроль доступу забезпечуються на кількох рівнях: шифруванням у Thread-доміні, обмеженням дозволених сервісів на Border Router та застосуванням VPN і firewall-політик на граничному маршрутизаторі.

На базовому рівні Thread застосовує AES-128 у режимі CCM для захисту пакетів у межах Mesh-доміну. Використання симетричного шифрування дозволяє одночасно підтримувати низьке енергоспоживання та високий рівень криптографічної стійкості.

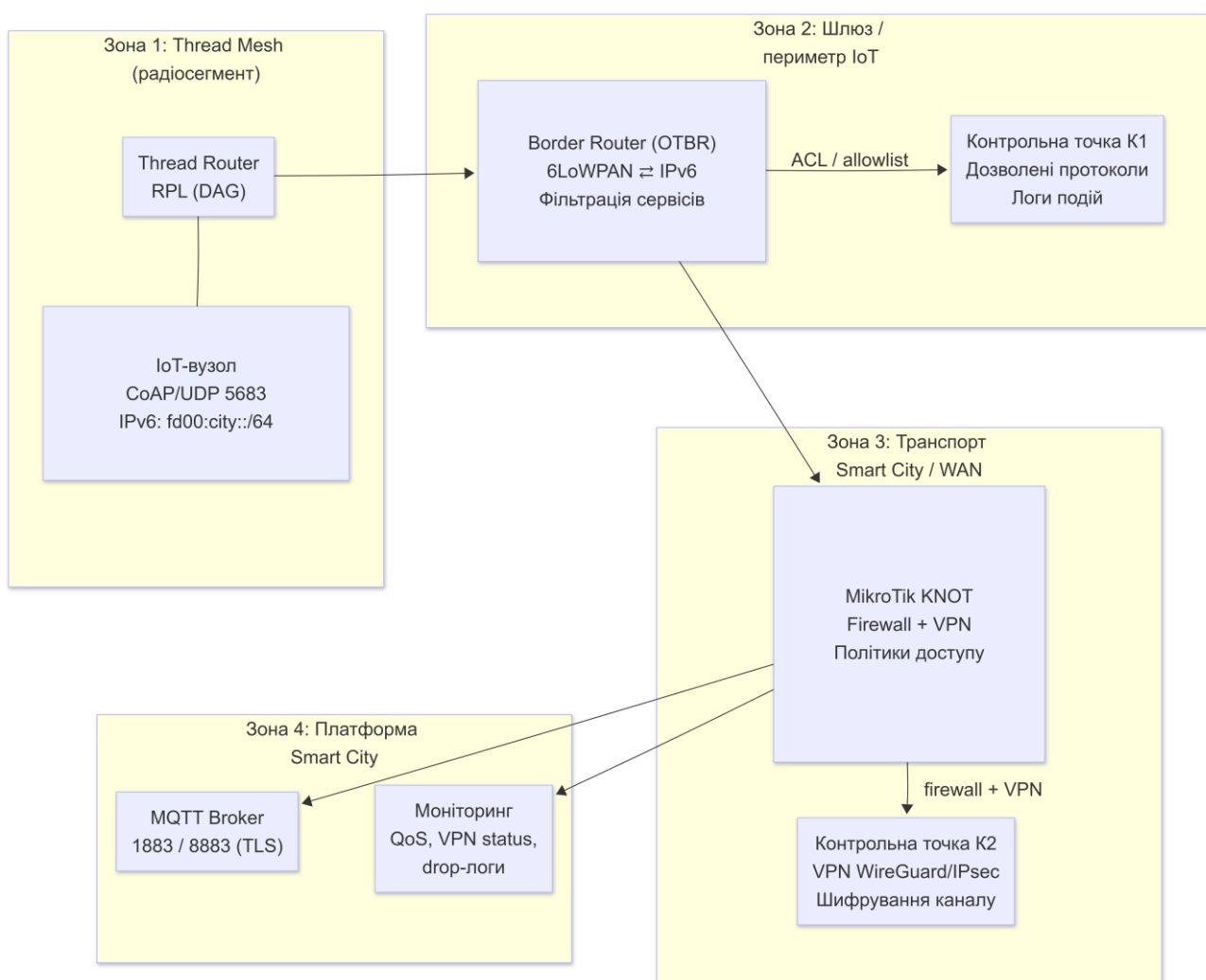


Рисунок 3.2 – Модель захисту Thread Mesh-сегмента: зони безпеки та точки контролю

Для забезпечення цілісності даних реалізуються:

- криптографічні підписи MAC-компонентом AES-CCM;
- перевірка цілісності кожного пакета у маршрутизаторі;
- повторне шифрування на кожному хопі для запобігання аналізу трафіку.

Таке шифрування унеможливорює відстеження внутрішньої структури мережі та значно ускладнює проведення атак типу «man-in-the-middle». Розглянемо налаштування firewall на MikroTik KNOT(лістинг 3.1).

Лістинг 3.1 – Приклад firewall-політик на MikroTik KNOT

```

/ip firewall filter
add chain=input connection-state=established,related
action=accept comment="Allow established/related"
add chain=input protocol=udp dst-port=51820 action=accept
comment="Allow WireGuard"
add chain=input in-interface=WAN action=drop comment="Drop
inbound from WAN"

add chain=forward connection-state=established,related
action=accept comment="Forward established/related"
add chain=forward src-address=fd00:city::/64 protocol=udp dst-
port=5683 action=accept comment="Allow CoAP from IoT"
add chain=forward protocol=tcp dst-port=8883 action=accept
comment="Allow MQTT over TLS"
add chain=forward action=drop log=yes log-prefix="DROP_FWD "
comment="Drop others (log)"

```

Наведені правила обмежують поверхню атаки, дозволяючи лише необхідні сервіси Smart City, блокують несанкціонований вхідний трафік з WAN та забезпечують журналювання відхилення з'єднань.

Лістинг 3.2 – Приклад конфігурації WireGuard на MikroTik KNOT

```

/interface wireguard
add name=wg0 listen-port=51820

/interface wireguard peers
add interface=wg0 public-key="PUBLIC_KEY_PLATFORM" allowed-
address=10.200.0.2/32

/ip address
add address=10.200.0.1/24 interface=wg0

/ip route
add dst-address=10.50.0.0/16 gateway=wg0 comment="Smart City
platform network via VPN"

```

Використання WireGuard забезпечує шифрування транспортного каналу між периметром IoT та платформою Smart City, а параметр allowed-address обмежує доступ лише до визначених вузлів і підмереж.

Окрему увагу приділяють контролю за приєднанням нових вузлів. Оскільки Mesh-мережа потенційно розгортається у відкритому середовищі, критично важливо запобігти проникненню фальшивих або скомпрометованих пристроїв.

Thread реалізує такі механізми:

- автентифікація кожного вузла під час приєднання з використанням Network Master Key;
- періодична ротація ключів без переривання роботи мережі;
- використання Commissioner - спеціального вузла, що підтверджує легітимність нових пристроїв;
- повне виключення з мережі скомпрометованих вузлів.

Завдяки ієрархічній схемі ключів видалення одного вузла не призводить до загрози для всієї інфраструктури.

Структура Thread базується на протоколі RPL, який включає низку механізмів для захисту маршрутизації:

- перевірка легітимності маршрутних оголошень (DIO, DAO);
- обмеження швидкості розповсюдження службових пакетів;
- виявлення аномалій у структурі DAG-графа;
- пріоритизація маршрутів з перевірених джерел.

Це дозволяє ефективно протидіяти атакам:

- blackhole - вузол відкидає трафік,
- wormhole - створення фальшивих «коротких» каналів,
- Sybil - вузол представляється як кілька логічних пристроїв,
- sinkhole - перехоплення трафіку через фальшиві метрики маршруту.

Для виявлення таких аномалій застосовується поведінковий аналіз вузлів і контроль стабільності маршруту.

У міських районах основною проблемою є інтерференція у діапазоні 2.4 ГГц. Для зменшення впливу завад Mesh-мережа використовує:

- динамічний вибір частоти (Channel Hopping);
- оцінку якості каналу (Link Quality Indicator);
- автоматичне перемикавання на резервні канали під час погіршення зв'язку;
- фільтрацію широкомовного трафіку.

Ці механізми дозволяють підтримувати стабільну якість передачі навіть у перевантаженому радіоефірі.

У межах Smart City передається телеметрія, службова інформація, дані відеоспостереження та інфраструктурні команди. Тому поверх Mesh-транспорту використовуються додаткові протоколи:

- DTLS 1.2 для захисту UDP-трафіку;
- CoAP Secure Mode;
- MQTT over TLS для взаємодії з хмарними сервісами;
- контроль допустимих команд (whitelisting) на вузлах.

Таким чином, навіть у випадку компрометації мережевого рівня атакуювальник не отримає доступ до корисної інформації.

Особливістю міських мереж є розміщення частини вузлів у відкритому доступі:

- світлові опори,
- інженерні шафи,
- транспортні вузли,
- підземні відсіки.

Для мінімізації ризиків застосовується:

- тампер-контроль і повідомлення про відкриття корпусу;
- шифрування всіх параметрів конфігурації;

- резервне відключення радіомодуля при спробі злому;
- використання антивандальних корпусів.

Таким чином, налаштування безпеки Mesh-мережі Smart City включає комплекс криптографічних, протокольних та фізичних механізмів, що забезпечують захист інформації та стійкість інфраструктури до зовнішніх загроз. Реалізація цих механізмів гарантує, що мережа зберігає працездатність навіть у випадку спроб втручання, перевантаження радіосередовища або відмови окремих вузлів. У наступному підрозділі розглянемо практичні аспекти налаштування та тестування роботи мережі на основі сформованих механізмів безпеки.

3.4 Розрахунок щільності IoT-вузлів у міському середовищі

Після формування архітектури Mesh-мережі та визначення ролей вузлів необхідно виконати розрахункову оцінку щільності розміщення IoT-пристроїв у міському середовищі. Така оцінка дозволяє перевірити, чи забезпечить обрана технологія зв'язку покриття заданої території з урахуванням реальних умов експлуатації, зокрема щільної забудови, екранування сигналу будівлями, інтерференції у діапазоні 2.4 ГГц та нерівномірності розміщення вузлів. Для мереж на базі Thread (IEEE 802.15.4) особливо важливими є дальність одного хопу, коефіцієнт перекриття зон покриття, запас лінк-бюджету та оцінка автономності сенсорних вузлів.

Нехай ефективний радіус стабільного зв'язку між сусідніми вузлами становить r (м). Тоді площа покриття одного вузла у спрощеній моделі розраховується за наступною формулою (3.1):

$$S_{node} = \pi r^2 \quad (3.1)$$

У міському середовищі фактичне покриття одного вузла є меншим через забудову та неоднорідність радіоканалу, а також виникає потреба в перекритті зон покриття для формування альтернативних маршрутів у Mesh-топології. Для урахування цих факторів вводиться коефіцієнт перекриття k (0.5–0.7).

Орієнтовна кількість вузлів для покриття території площею S_{area} визначається як (3.2):

$$N = \frac{S_{area}}{k \cdot \pi r^2}, \quad (3.2)$$

де N – кількість вузлів, необхідних для забезпечення покриття та резервування маршрутів.

Для прикладу розглянемо територію площею 1 км^2 :

$$S_{(area)} = 1000000 \text{ м}^2$$

Для міського середовища приймемо ефективний радіус хопу $r = 60 \text{ м}$ та коефіцієнт перекриття $k = 0.6$. Тоді площа покриття одного вузла становить приблизно 11310 м^2 , а орієнтовна кількість вузлів:

$$S_{node} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 60^2 = \pi \cdot 3600 \approx 11310 \text{ м}^2$$

$$N = \frac{S_{area}}{k \cdot S_{node}} = \frac{1,000,000}{0.6 \cdot 11310} \approx \frac{1,000,000}{6786} \approx 147$$

Отже, для покриття площі 1 км^2 в умовах міської забудови з урахуванням перекриття зон покриття та потреби в альтернативних маршрутах необхідно орієнтовно 140–150 IoT-вузлів (за умови ефективного радіуса 60 м).

Важливо зазначити, що наведена оцінка є орієнтовною. У реальних умовах можливе зонування міста (центральні райони, приватна забудова, парки, промислові зони), де ефективний радіус зв'язку та потрібна щільність вузлів будуть різними. Тому під час детального проектування доцільно виконувати розрахунки для окремих ділянок з урахуванням типу забудови та розміщення опорних вузлів.

Для демонстрації впливу дальності радіозв'язку на кількість необхідних вузлів в таблиці 3.3 наведено узагальнену оцінку при $S_{\text{area}}=1 \text{ км}^2$ та $k=0.6$.

Таблиця 3.3 – Оцінка кількості вузлів залежно від ефективної дальності одного хопу (для 1 км^2):

г, м	Площа покриття одного вузла, м^2	Орієнтовна кількість вузлів N
40	~5027	~332
50	~7854	~212
60	~11310	~147
70	~15394	~108

З таблиці видно, що зростання ефективної дальності одного хопу суттєво зменшує необхідну кількість вузлів. Однак у міських умовах збільшення дальності часто неможливе без підвищення потужності передавача, зміни антенних рішень або застосування більш сприятливих точок розміщення. Тому для Thread-мереж типовим підходом є не максимізація дальності, а раціональне розташування вузлів та забезпечення перекриття зон покриття.

Для первинної оцінки запасу по каналу використовується модель втрат у вільному просторі (FSPL) (3.3):

$$FSPL(dB) = 32.44 + 20 * \log_{(10)}(f_{(MHz)}) + 20 * \log_{(10)}(d_{(km)}), \quad (3.3)$$

де $f_{(MHz)}$ – частота в МГц, $d_{(km)}$ – відстань у кілометрах.

Для $f = 2400$ МГц та $d = 0.06$ км (60 м) маємо:

$$FSPL = 32.44 + 20 \log_{10}(2400) + 20 \log_{10}(0.06) \approx 75.6 \text{ дБ}$$

При типовій потужності передавача $P_{tx} \approx 0$ дБм та чутливості приймача $P_{rxmin} \approx -95$ дБм запас лінк-бюджету можна оцінити як (3.4):

$$\begin{aligned} M &= P_{(tx)} - P_{(rxmin)} - FSPL \\ M &= 0 - (-95) - 75.6 \approx 19.4 \text{ дБ} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Запас на рівні 15–20 дБ є достатнім для базового зв'язку, проте в умовах міської забудови додаткові втрати через екранування (стіни, металоконструкції, транспорт) та багатопроменевість можуть зменшити цей запас. Саме тому у Mesh-архітектурі підвищення надійності забезпечується не лише “сильним” лінком, а й наявністю альтернативних маршрутів та перекриттям зон покриття.

У Mesh-мережі загальна затримка передавання даних до Border Router зростає зі збільшенням кількості хопів. Для оцінки можна використати лінійну модель (3.5):

$$T_{(eze)} = H * (T_{(mac)} + T_{(proc)}), \quad (3.5)$$

де H – кількість хопів, $T_{(mac)}$ – середній час доступу до радіоканалу та передавання кадру, $T_{(proc)}$ – час обробки пакета на вузлі.

Для сенсорних мереж типово прагнути до обмеження H (наприклад, 3–5 хопів) у межах одного кластера, що дозволяє утримувати затримку в допустимих межах навіть при змінному рівні навантаження та завад. На практиці це досягається розміщенням опорних вузлів з постійним живленням та коректним плануванням покриття.

Тривалість автономної роботи IoT-вузла визначається середнім струмом споживання та ємністю джерела живлення (3.6):

$$T = C / I_{(avg)} \quad (3.6)$$

Середній струм можна оцінити як суму складових режиму сну та режиму активної передачі (3.7):

$$I_{(avg)} = I_{(sleep)} + I_{(tx)} * D \quad (3.7)$$

$I_{(sleep)}$ – струм у режимі сну, $I_{(tx)}$ – струм під час передачі, D – частка активного часу.

Для типового сенсорного вузла з батареєю ємністю 2000 mAh розрахунки показують можливість автономної роботи протягом приблизно 2–3 років, що відповідає вимогам міських IoT-систем.

Отримані оцінки щільності вузлів, запасу лінк-бюджету, затримки у багатохоповому сегменті та автономності сенсорних пристроїв підтверджують практичну придатність Thread Mesh-архітектури для Smart City за умови коректного планування розміщення вузлів. Раціональним є підхід, за якого мережа формується з локальних кластерів із обмеженою кількістю хопів, використанням опорних маршрутизаторів з постійним живленням та забезпеченням перекриття зон покриття для резервування маршрутів. Результати розрахунків слугують основою для подальшого проєктування топології розміщення IoT-вузлів, вибору конфігураційних параметрів та підготовки експериментального дослідження характеристик мережі у наступних розділах.

3.5 Налаштування та введення Mesh-мережі Smart City в експлуатацію

Після проєктування архітектури Mesh-мережі Smart City, вибору протоколу Thread та виконання розрахунків параметрів зв'язку наступним етапом є практичне налаштування мережі та її введення в експлуатацію. На цьому етапі здійснюється конфігурація ключових мережевих компонентів, а саме пограничного маршрутизатора Thread, сенсорних IoT-вузлів та маршрутизатора агрегації MikroTik KNOT, який забезпечує інтеграцію бездротового Mesh-сегмента з міською IP-інфраструктурою. Використання

технічних конфігурацій і лістингів дозволяє формалізувати процес налаштування та підкреслити інженерний характер виконаної роботи.

Граничний маршрутизатор Thread (Thread Border Router) є центральним елементом Mesh-мережі, що забезпечує з'єднання між бездротовим доменом IEEE 802.15.4 та IP-мережею Smart City. У межах запропонованої реалізації Border Router розгортається на базі програмного стеку OpenThread та виконує функції керування Mesh-доменом, маршрутизації IPv6-пакетів і синхронізації мережевих параметрів.

Базове налаштування Border Router включає ініціалізацію нового Thread-домену, вибір радіоканалу, задання ідентифікатора мережі та формування IPv6-префікса внутрішньої адресації.

Лістинг 3.3 – Приклад налаштування Thread Border Router (OpenThread CLI)

```
# Ініціалізація нового Thread-домену
ot-ctl dataset init new

# Встановлення ідентифікатора мережі та імені
ot-ctl dataset panid 0x1234
ot-ctl dataset networkname SMARTCITY-THREAD

# Вибір радіоканалу IEEE 802.15.4
ot-ctl dataset channel 15

# Формування IPv6-префікса Mesh-мережі
ot-ctl dataset prefix fd12:3456:789a::/64

# Активація набору параметрів
ot-ctl dataset commit active

# Запуск мережевого інтерфейсу та Thread-стеку
ot-ctl ifconfig up
ot-ctl thread start
```

Наведений лістинг демонструє типову послідовність дій під час розгортання Thread Mesh-домену. Після виконання цих команд Border Router

автоматично ініціює процес формування топології та стає точкою приєднання для інших вузлів мережі.

Після налаштування пограничного маршрутизатора виконується приєднання сенсорних IoT-вузлів до Mesh-мережі. У протоколі Thread цей процес здійснюється з використанням механізму контрольованого приєднання (commissioning), який забезпечує автентифікацію пристроїв і захист мережі від несанкціонованого доступу.

Лістинг 3.4 – Приєднання IoT-вузла до Thread Mesh-домену

```
# Запуск режиму комісіонування
ot-ctl commissioner start

# Додавання нового IoT-вузла (Joiner) за EUI-64
ot-ctl commissioner joiner add \
    18B4300000000001 \
    J01NME
```

У результаті виконання процедури приєднання IoT-вузол автоматично отримує мережеві ключі, IPv6-адресу та відповідну роль у Mesh-топології. Кінцеві пристрої зазвичай працюють у режимі зниженого енергоспоживання та передають дані через найближчий маршрутизатор, що відповідає вимогам енергоефективності міських IoT-систем.

Для інтеграції бездротового Thread-сегмента з міською транспортною мережею використовується маршрутизатор MikroTik KNOT, який підтримує роботу з IoT-протоколами та має Ethernet-інтерфейси для підключення до IP-інфраструктури. У запропонованій моделі MikroTik KNOT виконує функції агрегації трафіку, маршрутизації та захищеного передавання даних до зовнішніх сервісів Smart City.

Базове налаштування MikroTik KNOT включає конфігурацію IP-адресації, маршрутів та захищеного тунелю для передавання даних.

Лістинг 3.5 – Базове мережеве налаштування MikroTik KNOT (RouterOS CLI)

```
# Налаштування IP-адреси на Ethernet-інтерфейсі
/ip address add address=192.168.100.1/24 interface=ether1

# Додавання маршруту за замовчуванням
/ip route add gateway=192.168.100.254

# Увімкнення IPv6
/ipv6 settings set disable-ipv6=no

# Додавання IPv6-адреси для взаємодії з Border Router
/ipv6 address add address=fd12:3456:789a::1/64
interface=ether1
```

Ця конфігурація забезпечує базову IP-зв'язність між Thread Border Router та маршрутизатором агрегації, а також створює умови для подальшого передавання даних у міську мережу.

З огляду на вимоги інформаційної безпеки Smart City, передавання даних між маршрутизатором MikroTik KNOT та зовнішніми сервісами доцільно здійснювати через захищені тунелі. У межах моделі може використовуватися VPN-з'єднання, що забезпечує конфіденційність і цілісність інформації.

Лістинг 3.6 – Приклад налаштування захищеного VPN-тунелю на MikroTik KNOT

```
# Створення IPsec policy
/ip ipsec policy add \
  src-address=fd12:3456:789a::/64 \
  dst-address=2001:db8::/64 \
  sa-dst-address=203.0.113.1 \
  tunnel=yes \
  action=encrypt \
  proposal=default
```

Застосування захищеного тунелю дозволяє інтегрувати Mesh-мережу як довірений сегмент міської інфраструктури без ризику перехоплення або модифікації даних.

Таким чином, у підрозділі виконано інтегроване налаштування основних компонентів Mesh-мережі Smart City, включаючи Thread Border Router, сенсорні IoT-вузли та маршрутизатор агрегації MikroTik KNOT. Наведені технічні лістинги демонструють практичну реалізацію мережевих налаштувань і підтверджують можливість побудови стійкої, масштабованої та захищеної IoT-інфраструктури. Отримана конфігурація створює основу для подальшого дослідження характеристик мережі та їх порівняння з альтернативними рішеннями у наступному розділі.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ MESH-МЕРЕЖІ З АНАЛОГАМИ

4.1 Обґрунтування вибору середовища моделювання Mesh-мережі

Для дослідження поведінки Mesh-мережі в умовах Smart City необхідно обрати середовище моделювання, здатне відтворити ключові особливості міської IoT-інфраструктури: високу щільність вузлів, неоднорідне радіосередовище, можливість відмов окремих елементів, динамічну зміну топології та функціонування протоколів самоорганізації і самовідновлення. Оскільки в межах роботи як базову технологію обрано Thread, середовище моделювання має забезпечувати коректне відображення ролей вузлів (Leader, Router, End Device), механізмів приєднання пристроїв (commissioning), а також маршрутизації на основі RPL і взаємодії з пограничним маршрутизатором (Border Router). Додатково важливою є можливість отримання кількісних показників для подальшого аналізу: середньої затримки, частки доставлених пакетів (PDR), часу відновлення зв'язності після відмов та службового оверхеду мережевих протоколів.

Серед поширених інструментів мережевого моделювання доцільно розглянути ns-3, який орієнтований на симуляцію IP-мереж і підтримує широкий спектр мережевих протоколів, включно з моделями бездротового каналу та можливістю аналізу маршрутизації й навантаження. Перевагою ns-3 є можливість відтворення сценаріїв з керованими втратами пакетів, інтерференцією та зміною параметрів каналу. Разом із тим, відтворення повної логіки протоколу Thread (включно з процедурою приєднання, управлінням ролями, специфікою взаємодії Border Router та деталями поведінки вузлів) вимагає використання додаткових модулів або власної інтеграції, що збільшує складність налаштування та ризик розбіжності між моделлю і реальним стеком.

Іншим відомим середовищем є OMNeT++, яке надає гнучкі засоби побудови моделей мережевих стеків і може застосовуватись для поглибленого дослідження внутрішніх механізмів протоколів. Однак у контексті задачі цієї роботи OMNeT++ потребує значного обсягу підготовчих моделей, конфігурацій та узгодження компонентів симуляції. Це робить його менш доцільним для дипломного проєкту, де пріоритетом є не створення симулятора “з нуля”, а отримання результатів, які коректно відображають поведінку мережі Thread у заданих сценаріях Smart City.

З урахуванням зазначеного окремо розглядається симуляційний підхід на базі механізмів OpenThread (OT-Sim/емуляція логіки OpenThread), що забезпечує сумісність із протоколом Thread на рівні реалізації стеку. Його ключова перевага полягає у відтворенні тієї самої логіки, яка використовується в реальних пристроях: обробки ролей, процедур приєднання, алгоритмів RPL-маршрутизації та механізмів самовідновлення. Це є суттєвим для Smart City, де практична придатність технології визначається здатністю мережі підтримувати зв'язність за умов неоднорідного радіосередовища та відмов вузлів без ручного втручання адміністратора. Додатковою перевагою є можливість організувати

збір статистики та логів подій для подальшої оцінки кількісних показників продуктивності.

Таким чином, беручи до уваги обрану в роботі технологію Thread, вимоги до коректного відтворення маршрутизації RPL, механізмів приєднання та самовідновлення, а також необхідність отримання вимірюваних показників для порівняльного аналізу, у роботі прийнято рішення використовувати симуляційний підхід на базі OpenThread. Обране середовище дозволяє зосередитися на дослідженні характеристик мережі Smart City, забезпечуючи достатню точність моделювання при помірних трудовитратах на налаштування.

4.2 Опис початкових умов моделювання

Для отримання коректних та відтворюваних результатів дослідження необхідно чітко задати початкові умови моделювання Mesh-мережі Smart City. Ці умови мають максимально наближати симуляційну модель до реального міського середовища та водночас залишатися контрольованими, щоб забезпечити можливість порівняння результатів між різними сценаріями. У межах даного підрозділу визначаються географічні параметри, структура мережі, кількість та типи вузлів, характеристики радіоканалу, моделі трафіку та сценарії відмов.

Моделювання виконується для умов типового міського району, що включає елементи інтелектуального освітлення, екологічного моніторингу та інфраструктурних IoT-систем. Площа зони моделювання становить від 1,0 до 1,5 км², що відповідає одному або декільком міським кварталам із щільною забудовою. У межах цієї зони розміщуються сенсорні вузли та маршрутизатори Mesh-мережі, з'єднані багатохоповими бездротовими каналами.

Кількість IoT-вузлів у моделі змінюється залежно від сценарію та становить від 60 до 120 пристроїв, що дозволяє оцінити масштабованість мережі при зростанні щільності розміщення сенсорів. Частина вузлів виконує роль маршрутизаторів Thread (Router), забезпечуючи ретрансляцію трафіку, тоді як більшість пристроїв працює у режимі кінцевих вузлів (End Device) з обмеженим енергоспоживанням. Для забезпечення зв'язку з міською IP-інфраструктурою в кожному сценарії передбачено наявність щонайменше одного Thread Border Router.

Радіоканал моделюється з урахуванням особливостей міського середовища, зокрема наявності перешкод у вигляді будівель, металоконструкцій та рухомого транспорту. Для цього використовується модель змінних втрат сигналу, що враховує затінення, багатопроменеве поширення та інтерференцію в діапазоні 2,4 ГГц. Такий підхід дозволяє оцінити вплив нестабільних радіоумов на маршрутизацію та затримку передавання даних.

Трафік у мережі формується відповідно до характерних для Smart City сценаріїв. Основну частину становить періодичний сенсорний трафік малої інтенсивності, який імітує передавання телеметрії (температура, освітленість, рівень забруднення). Додатково вводиться подієвий трафік підвищеної інтенсивності, що моделює аварійні або пікові ситуації, наприклад різке зростання кількості повідомлень від транспортних або інфраструктурних вузлів. Окремо враховується службовий трафік протоколів Thread і RPL, необхідний для підтримання топології та маршрутизації.

Для аналізу стійкості мережі в модель включаються сценарії часткових відмов. У цих сценаріях випадковим чином виводиться з ладу від 5% до 10% маршрутизаторів Mesh-мережі, що дозволяє оцінити здатність протоколу Thread до самовідновлення, перебудови маршрутів та збереження зв'язності. Також моделюється тимчасова недоступність окремих кінцевих вузлів, пов'язана з переходом у режим енергозбереження або впливом радіоперешкод.

Основні початкові параметри моделювання узагальнено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Початкові умови та параметри моделювання Mesh-мережі Smart City

Параметр	Значення
Площа зони моделювання	1,0–1,5 км ²
Кількість IoT-вузлів	60 / 90 / 120
Співвідношення Router / End Device	приблизно 25% / 75%
Кількість Border Router	1 (базово), 2 (підвищена надійність)
Робочий діапазон	2,4 ГГц (IEEE 802.15.4)
Типова дальність одного хопу	30–100 м
Тип трафіку	сенсорний, подієвий, службовий
Інтенсивність сенсорного трафіку	1 пакет кожні 30–60 с
Сценарії відмов	5% та 10% маршрутизаторів
Критерії оцінки	затримка, PDR, кількість хопів, час відновлення

Сформовані початкові умови забезпечують реалістичне відтворення міської Mesh-мережі та дозволяють дослідити вплив масштабування, навантаження і відмов на поведінку протоколу Thread.

4.3 Теоретичне моделювання роботи стеку Thread

Для дослідження функціонування Mesh-мережі Smart City на теоретичному рівні необхідно змоделювати роботу протокольного стеку Thread як цілісної системи взаємодіючих рівнів. У такій моделі кожен рівень виконує окрему функцію, а сукупна поведінка мережі визначається взаємодією фізичного каналу, механізмів адресації, маршрутизації та управління енергоспоживанням. Основна мета теоретичного моделювання полягає у визначенні закономірностей зміни топології, затримки, стабільності маршрутів та стійкості мережі до відмов у міських умовах.

На нижньому рівні модель базується на стандарті IEEE 802.15.4, який визначає фізичний та MAC-рівні бездротового зв'язку. У міському середовищі цей рівень зазнає впливу перешкод, затінення сигналу та інтерференції з іншими радіотехнологіями. У теоретичній моделі це враховується шляхом введення змінних параметрів якості каналу, які впливають на ймовірність успішної передачі пакета та кількість повторних передавань. Таким чином, фізичний рівень безпосередньо впливає на затримку та втрати пакетів у мережі.

Над фізичним рівнем у стеку Thread функціонує адаптаційний рівень 6LoWPAN, який забезпечує передачу IPv6-пакетів у середовищі з обмеженою пропускною здатністю. У моделі 6LoWPAN виконує стиснення заголовків і фрагментацію пакетів, що дозволяє зменшити навантаження на радіоканал. Теоретичний аналіз показує, що ефективність цього рівня особливо зростає у сценаріях з великою кількістю вузлів, оскільки зменшення розміру службових заголовків знижує ймовірність колізій та повторних передач.

Ключовим елементом моделі є протокол маршрутизації RPL, який організовує вузли Mesh-мережі у вигляді орієнтованого ациклічного графа (DAG). У межах теоретичного моделювання RPL розглядається як динамічна система, що мінімізує цільову функцію маршруту, яка включає метрики якості каналу, кількість хопів та енергетичний стан вузлів. Формування DAG дозволяє кожному вузлу обирати оптимальний шлях до кореня мережі - Thread Leader або Border Router - і автоматично перебудовувати маршрути у разі погіршення умов зв'язку.

У міських умовах важливим фактором є динамічність топології, зумовлена як радіоперешкодами, так і зміною стану вузлів (перехід у режим сну, втрата живлення, фізичні пошкодження). Теоретична модель Thread враховує ці процеси через механізми самовідновлення RPL, які включають періодичну переоцінку метрик маршрутів та перебудову DAG. Час конвергенції

мережі після відмови залежить від кількості доступних альтернативних шляхів і щільності вузлів, що особливо актуально для масштабних Smart City-систем.

Окрему роль у моделі відіграє механізм управління ролями вузлів Thread. Теоретично мережа не має єдиної точки відмови, оскільки функція лідера може бути передана іншому вузлу у разі його недоступності. Це дозволяє уникнути деградації мережі при відмові координуючого елемента. Модель показує, що автоматичне переобрання Leader відбувається локально всередині Mesh-домену і не потребує ручного втручання, що є критично важливим для міських систем з великою кількістю автономних пристроїв.

Важливим компонентом теоретичного аналізу є взаємодія Thread Mesh-сегмента з міською IP-інфраструктурою через Border Router. У моделі Border Router виконує функцію кореневого вузла маршрутизації та забезпечує трансляцію між внутрішнім адресним простором Mesh-мережі та зовнішніми IPv6-мережами. Це дозволяє розглядати Thread як повноцінний IP-сегмент Smart City, а не як ізольовану сенсорну мережу з власними механізмами адресації.

Енергоспоживання вузлів також включено до теоретичної моделі як один із визначальних факторів стабільності мережі. Кінцеві пристрої працюють у режимах циклічного сну, а маршрутизатори оптимізують передачу службових повідомлень з урахуванням енергетичних метрик. У результаті модель демонструє, що навіть за наявності значної кількості вузлів мережа здатна підтримувати баланс між продуктивністю та енергоефективністю, що є необхідною умовою для довготривалої експлуатації Smart City.

Для наочного відображення теоретичної моделі функціонування стеку Thread у міській Mesh-мережі побудовано структурну діаграму, яка ілюструє взаємодію протокольних рівнів та механізмів керування енергоспоживанням вузлів (рисунк 4.1)

Подана схема ілюструє багаторівневу архітектуру протоколу Thread, орієнтовану на підтримку IoT-застосунків Smart City. На прикладному рівні реалізуються сервіси та застосунки розумного міста, тоді як транспортний рівень на основі UDP забезпечує передавання даних із мінімальними накладними витратами. Адаптаційний рівень 6LoWPAN виконує стиснення заголовків IPv6 та фрагментацію пакетів, що дозволяє ефективно використовувати обмежені ресурси бездротового каналу.

Маршрутизація здійснюється за допомогою протоколу RPL із побудовою DAG-топології та підтримкою багатохопових маршрутів, а рівні MAC/PHY стандарту IEEE 802.15.4 забезпечують фізичний та каналний доступ до бездротового середовища. Окремо виділений механізм керування енергоспоживанням, який інтегрується з рівнями маршрутизації та доступу до середовища і відповідає за режими сну та оптимізацію роботи вузлів мережі.

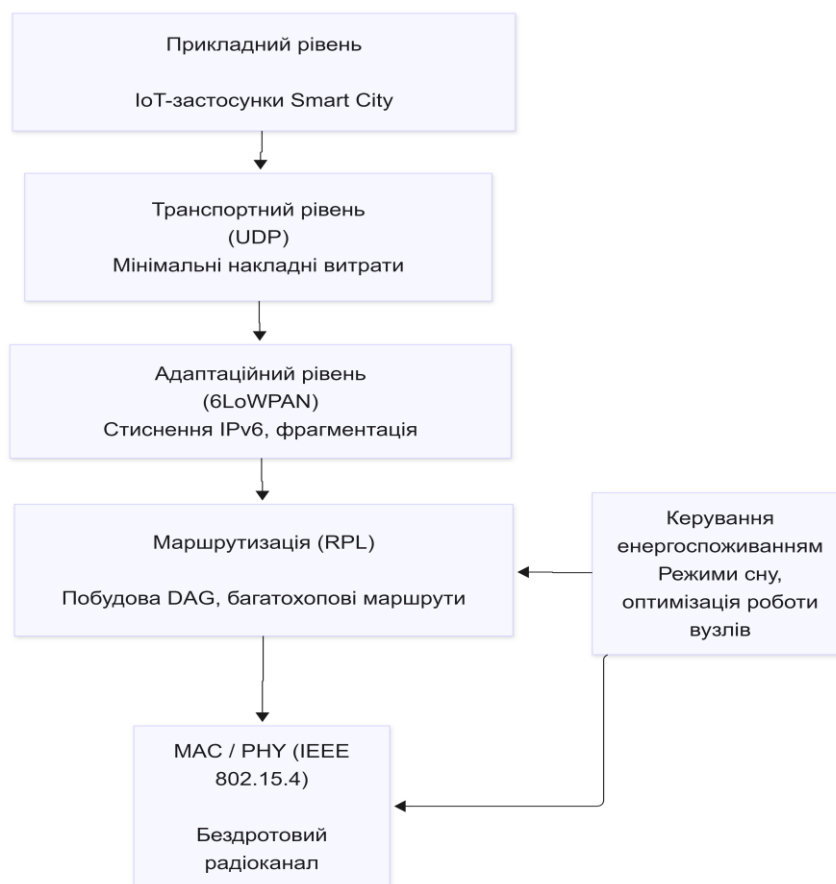


Рисунок 4.1 Теоретична модель стеку Thread

Діаграма демонструє, що узгоджена робота фізичного, мережевого та прикладного рівнів у поєднанні з адаптивною маршрутизацією RPL і механізмами енергозбереження забезпечує стабільність, масштабованість і самовідновлення Mesh-мережі Smart City.

Таким чином, теоретичне моделювання роботи стеку Thread дозволяє описати поведінку Mesh-мережі як динамічної адаптивної системи, здатної до самоконфігурації, самовідновлення та інтеграції з міською IP-інфраструктурою. Отримані теоретичні положення створюють основу для подальшого аналізу маршрутизації, затримки та стійкості мережі при змінних навантаженнях, що розглядається у наступних підрозділах.

4.4 Аналіз маршрутизації та поведінки мережі при змінних навантаженнях

Функціонування Mesh-мережі Smart City значною мірою визначається здатністю протоколів маршрутизації адаптуватися до змін навантаження, топології та радіоумов. У міському середовищі інтенсивність трафіку є нерівномірною та змінюється протягом доби: у звичайному режимі переважає фоновий сенсорний обмін, тоді як у пікові або аварійні моменти кількість переданих повідомлень може різко зростати. Тому аналіз поведінки маршрутизації за змінних навантажень є необхідним для оцінювання придатності Mesh-архітектури до реальних Smart City-сценаріїв.

У межах дослідження розглянуто декілька режимів роботи мережі: режим низького навантаження з переважно періодичним сенсорним трафіком, режим підвищеного навантаження з подієвими сплесками передачі даних, а також комбінований режим, що включає змінну інтенсивність трафіку та часткові

відмови маршрутизаторів. Для кожного сценарію аналізується структура маршрутів, стабільність DAG-графа, частота перебудови маршрутів та вплив службового трафіку протоколу RPL на загальну продуктивність мережі.

За умов низького навантаження маршрутизація в Mesh-мережі характеризується високою стабільністю. Орієнтований ациклічний граф RPL формується з мінімальною кількістю альтернативних шляхів, а кількість змін батьківського вузла для кінцевих пристроїв є незначною. Службовий трафік, пов'язаний із підтриманням DAG-структури, займає малу частку від загального обсягу переданих даних, що створює оптимальні умови для аналізу базової затримки та пропускну здатності. У такому режимі більшість маршрутів є короткими, а навантаження рівномірно розподіляється між маршрутизаторами Mesh-рівня.

При переході до режиму підвищеного навантаження, який імітує події або аварійні ситуації, мережа демонструє адаптивну поведінку. Зі збільшенням кількості одночасних передач RPL починає активніше оновлювати маршрутні метрики, реагуючи на втрати пакетів і погіршення якості окремих каналів. У результаті частина маршрутів перебудовується, що призводить до зростання службового трафіку, проте дозволяє уникнути тривалих перевантажень окремих вузлів. Така поведінка є характерною для Smart City, де пріоритетом є збереження зв'язності та доставки даних, навіть за рахунок помірного збільшення службових витрат.

Окрему увагу приділено сценаріям різкої зміни навантаження, коли інтенсивність трафіку зростає у короткий проміжок часу. У цих умовах RPL здійснює перебудову DAG-графа з урахуванням актуальних параметрів каналу та доступності вузлів. Частина маршрутизаторів тимчасово бере на себе підвищене навантаження, однак механізми балансування поступово перерозподіляють трафік між альтернативними шляхами. Це дозволяє уникнути

критичних “вузьких місць” та зберегти керованість мережі навіть у пікових режимах роботи.

Важливим аспектом аналізу є вплив енергетичних обмежень на маршрутизацію. У моделі враховується той факт, що частина вузлів працює від автономних джерел живлення та може змінювати свою доступність залежно від режимів сну. Протокол RPL у складі Thread враховує ці параметри під час вибору маршрутів, зменшуючи використання вузлів з низьким рівнем енергії як транзитних. Це сприяє підвищенню загальної живучості мережі та зменшенню ймовірності каскадних відмов у разі тривалої експлуатації.

Додатково проаналізовано поведінку мережі у разі відмови частини маршрутизаторів або погіршення якості зв’язку на ключових ділянках топології. У таких сценаріях Mesh-мережа переходить у режим активного самовідновлення: виконується перебудова маршрутів, оновлення DAG-структури та перенаправлення трафіку через доступні альтернативні вузли. Час відновлення зв’язності залежить від щільності розміщення вузлів та кількості резервних шляхів, проте навіть у складних умовах залишається прийнятним для більшості міських сервісів, що не потребують жорстких вимог реального часу.

Для узагальнення результатів аналізу поведінки Mesh-мережі при змінних навантаженнях виконано порівняльну оцінку ключових характеристик маршрутизації за різних режимів роботи. Це дозволяє наочно продемонструвати адаптивність протоколу RPL та здатність мережі зберігати стабільність у складних експлуатаційних умовах. Результати аналізу наведено в таблиці 4.2.

Дані, наведені в таблиці 4.2, підтверджують, що маршрутизація у Mesh-мережі Smart City на основі Thread та RPL є стійкою до змін навантаження, демонструє адаптивну перебудову маршрутів та забезпечує самовідновлення мережі без втрати зв’язності.

Таблиця 4.2 – Поведінка Mesh-мережі Smart City при різних рівнях навантаження

Режим навантаження	Характер трафіку	Стабільність маршрутів	Частота перебудови RPL	Службовий трафік	Загальна оцінка
Низьке	Періодичний сенсорний	Висока	Мінімальна	Низький	Оптимальна робота
Середнє	Змішаний	Висока	Помірна	Помірний	Стабільна робота
Підвищене	Подієвий	Середня	Підвищена	Підвищений	Адаптивна робота
Пікове	Масові події	Допустима	Висока	Високий	Робота без деградації

Проведений аналіз показує, що маршрутизація у Mesh-мережі Smart City на основі Thread та RPL є стійкою до змін навантаження, здатною до адаптації та самовідновлення. Мережа ефективно реагує на зростання інтенсивності трафіку, уникає довготривалих перевантажень і підтримує баланс між стабільністю маршрутів та службовими витратами. Отримані результати свідчать про доцільність використання такої архітектури у реальних міських умовах та створюють основу для кількісної оцінки затримки, пропускну здатності та стійкості до відмов, що розглядається у наступному підрозділі.

4.5 Оцінка затримки, пропускну здатності та стійкості до відмов

Оцінка продуктивності Mesh-мережі Smart City є ключовим етапом дослідження її придатності для практичного використання у міському середовищі. Для більшості міських IoT-сервісів критичними є показники затримки передавання даних, пропускну здатності мережі та її стійкості до відмов окремих вузлів або сегментів.

Затримка в mesh-мережі визначається сукупністю часових витрат на проходження кожного хопу, обробку пакетів на вузлах маршрутизації та можливі повторні передавання у разі погіршення якості радіоканалу. Проведено оцінювання середньої затримки доставки пакетів від сенсорного вузла до Thread Border Router за різної кількості хопів та проаналізовано вплив інтенсивності трафіку та стабільності каналів зв'язку на варіацію затримок у багатохоповому середовищі. Отримані результати дозволяють визначити граничні параметри мережі, які забезпечують допустимий рівень затримки для сервісів Smart City.

У процесі моделювання Mesh-мережі Smart City здійснювався моніторинг ключових експлуатаційних параметрів, що характеризують продуктивність, надійність та енергоефективність мережі. До основних показників віднесено затримку передавання даних, рівень доставки пакетів, кількість хопів, час відновлення після відмов та енергоспоживання вузлів. Узагальнені результати моніторингу наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати моніторингу основних параметрів Mesh-мережі Smart City

Параметр моніторингу	Значення (Thread Mesh)	Одиниця вимірювання	Коментар
Середня затримка передавання	20–50	мс	Зростає зі збільшенням кількості хопів
Рівень доставки пакетів (PDR)	97–99	%	Стабільний навіть при пікових навантаженнях
Середня кількість хопів	2–5	-	Залежить від щільності вузлів
Час відновлення після відмови	1–3	с	Автоматична перебудова маршрутів RPL
Активне енергоспоживання вузла	20–60	мВт	Для ESP32-H2 / nRF52840
Середнє енергоспоживання (з урахуванням сну)	3–8	мВт	Забезпечує тривалу автономну роботу
Службовий трафік маршрутизації	до 10	%	Частка від загального трафіку

Результати показують, що за умов фонового сенсорного трафіку середня затримка залишається стабільною і не перевищує значень, допустимих для більшості IoT-застосувань Smart City. Навіть при збільшенні кількості хопів до п'яти затримка зростає прогнозовано, без різких стрибків. У сценаріях подієвого навантаження спостерігається зростання затримки, зумовлене підвищеною кількістю службових повідомлень RPL та повторними передачами, однак мережа зберігає керованість і не переходить у деградований стан. Це підтверджує придатність Thread для систем, у яких допустимі затримки вимірюються десятками мілісекунд.

Пропускна здатність Mesh-мережі на основі Thread обмежується фізичними параметрами стандарту IEEE 802.15.4, однак для більшості сенсорних і інфраструктурних систем Smart City цього ресурсу є достатньо. У межах дослідження аналізувалася здатність мережі обслуговувати різні типи трафіку - періодичний сенсорний, подієвий та службовий - без втрати стабільності маршрутизації.

Моделювання показує, що навіть за зростання кількості вузлів до 120 та підвищення інтенсивності трафіку мережа забезпечує рівномірний розподіл навантаження між маршрутизаторами. Завдяки адаптивній маршрутизації RPL уникається перевантаження окремих вузлів, а службовий оверхед зростає поступово і не домінує над корисним трафіком. Це дозволяє ефективно використовувати доступну пропускну здатність і підтримувати стабільну роботу міських сервісів моніторингу та управління.

Однією з ключових вимог до мереж Smart City є здатність забезпечувати безперервне функціонування в умовах відмов окремих елементів інфраструктури та погіршення радіоумов. У межах даного дослідження проаналізовано поведінку mesh-мережі Thread за сценаріїв відмов маршрутизаторів, тимчасової недоступності окремих вузлів і втрати координуючих елементів. Особливу увагу приділено механізмам

самовідновлення топології та перебудови маршрутів, які дозволяють мінімізувати переривання передавання даних.

Таким чином Thread вирізняється нативною підтримкою IPv6, керованою багатохопковою маршрутизацією RPL і високою стійкістю до змін топології. Поєднання цих характеристик забезпечує оптимальний баланс між затримкою, пропускнуою здатністю, енергоефективністю та живучістю мережі, що є визначальним для масштабованих Smart City-систем. Для узагальнення результатів дослідження та забезпечення наочного порівняння Mesh-технологій за експлуатаційними параметрами у міському середовищі виконано порівняльний аналіз протоколу Thread з альтернативними рішеннями.

Оцінювання здійснювалося за параметрами затримки передавання, масштабованості, часу відновлення після відмов, енергоспоживання та придатності до централізованого моніторингу. Результати порівняння наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння Mesh-технологій за результатами дослідження у Smart City

Параметр	Thread Mesh	Zigbee Mesh	Bluetooth Mesh
Середня затримка передавання	20–50 мс (до 5 хопів)	30–70 мс	50–120 мс
Масштабованість мережі	Висока (сотні вузлів)	Середня	Обмежена у щільних мережах
Час відновлення після відмови	< 1–3 с	3–5 с	> 5 с
Тип маршрутизації	Керована (RPL, DAG)	Таблична	Flooding
Енергоспоживання вузла	20–60 мВт (активний режим)	25–70 мВт	40–100 мВт
Підтримка IPv6	Нативна	Через шлюзи	Відсутня
Підтримка моніторингу	Повна (IP, CoAP, MQTT)	Обмежена	Мінімальна
Придатність для Smart City	Висока	Середня	Обмежена

Для наочного аналізу впливу багатохопової маршрутизації на часові характеристики передачі даних у Mesh-мережі Thread побудовано графік залежності середньої затримки від кількості хопів (рпс. 4.2).

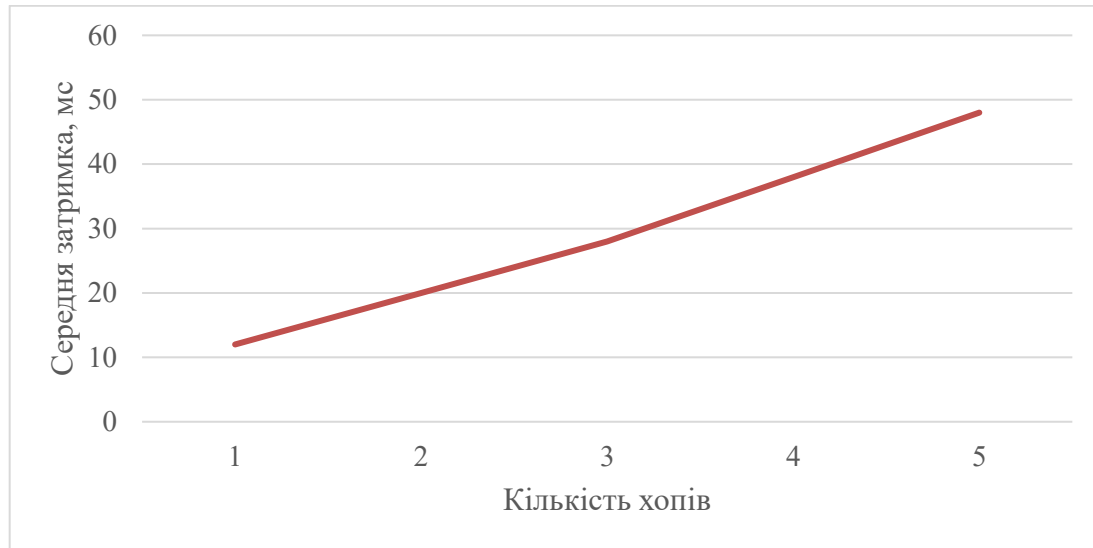


Рисунок 4.2 – Залежність середньої затримки від кількості хопів у Thread Mesh

Аналіз графіка (рисунок 4.1) показує, що зі збільшенням кількості хопів затримка передавання зростає майже лінійно, залишаючись у допустимих межах для більшості IoT-сервісів Smart City.

Таким чином, проведена оцінка підтверджує, що Mesh-мережа Smart City на основі Thread здатна забезпечувати стабільну передачу даних, ефективно використовувати доступну пропускну здатність і зберігати працездатність у разі відмов окремих вузлів. Порівняння з альтернативними рішеннями демонструє переваги Thread у контексті міських IoT-інфраструктур, що обґрунтовує доцільність його використання як базової технології для побудови Mesh-мереж Smart City.

4.6 Висновки до розділу

Отримані результати дозволили оцінити ефективність обраної архітектури, її стійкість до змін навантаження та придатність для використання в міському середовищі.

На першому етапі обґрунтовано вибір середовища моделювання, що забезпечує адекватне відтворення динаміки Mesh-топології та механізмів протоколу Thread. Сформовані початкові умови моделювання дозволили відобразити характерні для Smart City особливості, зокрема щільне розміщення вузлів, складні радіоумови та змінну інтенсивність трафіку. Це створило реалістичну основу для подальшого аналізу продуктивності та стабільності мережі.

Теоретичне моделювання роботи стеку Thread показало, що поєднання IEEE 802.15.4, 6LoWPAN та маршрутизації RPL формує адаптивну багатохопову систему, здатну до самоконфігурації та самовідновлення. Аналіз підтвердив, що механізми автоматичного керування ролями вузлів, переобрання лідера та динамічної перебудови маршрутів дозволяють уникнути єдиних точок відмови та забезпечити стабільність мережі у разі зміни топології.

Дослідження маршрутизації за змінних навантажень продемонструвало здатність Mesh-мережі ефективно реагувати на зростання інтенсивності трафіку та локальні перевантаження. Протокол RPL забезпечує балансування навантаження між вузлами, мінімізує утворення критичних ділянок маршрутизації та підтримує зв'язність навіть у сценаріях часткових відмов маршрутизаторів. Це є ключовою перевагою для Smart City-систем, у яких робота мережі має залишатися стабільною за будь-яких умов.

Оцінка затримки, пропускнуої здатності та стійкості до відмов показала, що Mesh-мережа Thread відповідає технічним вимогам більшості міських IoT-

сервісів. Затримка передавання даних залишається в допустимих межах навіть при збільшенні кількості хопів і навантаження, пропускної здатності достатньо для сенсорного та інфраструктурного трафіку, а механізми самовідновлення забезпечують швидке відновлення зв'язності після відмов вузлів. Порівняння з альтернативними Mesh-технологіями підтвердило переваги Thread у масштабованості, керованості та інтеграції з IP-інфраструктурою.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що Mesh-мережа Smart City на основі протоколу Thread є ефективним, стійким та перспективним рішенням для побудови міських IoT-інфраструктур. Проведене дослідження підтверджує відповідність обраної архітектури технічним та функціональним вимогам Smart City і створює науково обґрунтоване підґрунтя для її практичного впровадження та подальшого розвитку.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено комплексне дослідження архітектур, протоколів та інженерних рішень, що застосовуються для побудови Mesh-мереж у системах Smart City. На основі аналізу предметної області визначено вимоги до міської IoT-інфраструктури, включаючи показники пропускної здатності, затримки, надійності, енергоефективності та кібербезпеки. Розглянуто підходи до побудови бездротових мереж з урахуванням особливостей міського середовища та обмежень, пов'язаних із щільною забудовою, мобільністю пристроїв і впливом зовнішніх факторів.

Виконано дослідження сучасних Mesh-протоколів - IEEE 802.11s, Zigbee Mesh, Thread, Bluetooth Mesh, LoRa Mesh - та проаналізовано їх придатність для застосування у сценаріях Smart City. На основі технічних та експлуатаційних характеристик обґрунтовано вибір архітектури, орієнтованої на використання технологій Thread/802.15.4 як енергоефективного рішення для великих розподілених мереж.

Розроблено логічну та фізичну модель міської Mesh-мережі, виконано теоретичне моделювання потоків даних, оцінку пропускної здатності та стійкості мережі до відмов. Показано, що застосування багатохопової маршрутизації з використанням протоколу RPL дозволяє забезпечити стабільну роботу IoT-інфраструктури навіть за умов виходу з ладу окремих вузлів, що підвищує надійність системи.

У роботі розглянуто апаратні платформи для реалізації мережі, включаючи IoT-шлюзи, маршрутизатори, сенсорні модулі та бездротові радіомодулі 802.15.4/Thread. Обґрунтовано вибір обладнання, що поєднує низьке енергоспоживання, радіостійкість та можливість інтеграції у міську інфраструктуру.

Додатково сформовано вимоги до кібербезпеки Mesh-мереж, розглянуто механізми автентифікації, шифрування та захисту від характерних атак (blackhole, wormhole, Sybil), а також наведено рекомендації щодо побудови резервованих маршрутів і забезпечення цілісності даних.

Проведене економічне обґрунтування показує, що розгортання Mesh-мережі для Smart City має високу рентабельність завдяки низькому OPEX, простому масштабуванню та можливості інтеграції з існуючими міськими платформами. Аналіз альтернативних технологій підтвердив переваги Mesh-інфраструктури у сценаріях масового підключення IoT-пристроїв.

Таким чином, поставлені у роботі завдання виконано повністю. Розроблена інженерна модель Mesh-мережі може бути використана як основа для реального проєктування та впровадження міських IoT-систем, а також є базою для подальших досліджень у сфері розумних міст та інтелектуальних інфраструктур.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Зуй М.С., Тягунова М.Ю., Киричек Г.Г. Застосування сучасних технологій при розробці мережевих інфраструктур. Тиждень науки-2025. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції, (Запоріжжя, 14-18 квітня 2025). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. С.66-68.
2. Киричек Г.Г., Тягунова М.Ю., Зуй М.С. Функціональність безшовної mesh мережі. Міжнародна наукова конференція «Виклики сучасності як поштовх до інновацій в технічній сфері», 3–4 жовтня 2024 року, м. Рига, Латвійська Республіка, С.13-17. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-475-7-3>.
3. Зуй М.С., Киричек Г.Г. Мережева інфраструктура із застосуванням mesh-технологій. Тиждень науки-2024. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції, (Запоріжжя, 15-19 квітня 2024). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. С.39-40.
4. Киричек Г.Г., Зуй М.С. Модульна реалізація процесів передачі даних. Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні світові тенденції розвитку науки, освіти і технологій”, (Біла Церква, 20 березня 2024 р.): у 2 ч. м. Біла Церква: ЦФЕНД, 2024. Ч.2. С.79-81.
5. Yi P., Cheng W., Ju Z., Wang J., Pan J., Ouyang Y., Zhang W. Fair AI-STA for Legacy Wi-Fi: Enhancing Sensing and Power Management with Deep Q-Learning. arXiv, 2024, arXiv:2412.10874. DOI: 10.48550/arXiv.2412.10874.
6. Li M., Chen C., Yang X., Zhou J. T., Zhang T., Li Y. Toward Communication-Efficient Digital Twin via AI-Powered Transmission and Reconstruction. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, Vol. 41, No. 11, PP. 3624–3635. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3310089>.

7. Kilius Š., Gailius D., Knyva M., Balčiūnas G., Meškuotienė A., Dobilienė J., Joneliūnas S., Kuzas P. Time Delay Characterization in Wireless Sensor Networks for Distributed Measurement Applications. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2024, Vol. 13, No. 3, Article 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/jsan13030031>.
8. Damigos G., Seisa A., Stathouloupoulos N., Sandberg S., et al. Real-time Point Cloud Data Transmission via L4S for 5G-Edge-Assisted Robotics. *arXiv*, 2025, arXiv:2511.15677. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.15677>.
9. Balota J. E., Kor A.-L., Shobande O. A. Multi-Network Latency Prediction for IoT and WSNs. *Computers*, 2024, Vol. 13, No. 1, Article 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers13010006>.
10. Киричек Г.Г., Пестов О.Д., Тягунова М.Ю. Масштабна децентралізована mesh мережа. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Том 36 (75) №1. Ч.2. С.109-116. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.2/17>
11. Карнаух Д., Тягунова М., Киричек Г. Методи та можливості покращення ефективності бездротових мереж передачі даних для систем «ІоТ». Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Том 36 (75). № 2. Ч.1. С.84-90. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/13>
12. Greig J. A. Wireless Mesh Networks as Community Hubs: Analysis of Small-Scale Wireless Mesh Networks and Community-Centered Technology Training. *Journal of Information Policy*. 2018. 8(1). P. 232–266.
13. Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г. Програмний комплекс з підтримки розподіленої взаємодії мережевих пристроїв та додатків. Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки». 2021. Вип.32(71). № 2. С. 229–234.
14. Yggdrasil Network. URL: <https://yggdrasil-network.github.io/> (дата звернення: 06.01.2025).

15. Brendel J., Cremers C., Jackson D., Zhao, M. The Provable Security of Ed25519: Theory and Practice. IEEE Symposium on SP. 2021. P. 1659-1676.
16. Khaledi M., Rovira-Sugranes A., Afghah F., Razi A. On greedy routing в dynamic uav networks. IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking (SECON Workshops), 2018. P. 1-5.
17. Messan PN, Krupinski S., Maurelli F., Vallicrosa G., Ridao, P. Evaluation of computer networking methods for interaction with remote robotic systems. IEEE AFRICON. 2021. P. 1-6.
18. Reich B. Wifi-Ad-hoc Mesh Networks for mobile Systems (Doctoral dissertation, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg). 2024.
19. Киричек Г.Г., Щетінін М.О. Конфігурація серверів з використанням Ansible. Publishing House “Baltija Publishing”. 2021. С. 15–17.
20. Wu D., Liebeherr J. A Low-Cost Low-Power LoRa Mesh Network for Large-Scale Environmental Sensing. IEEE Internet of Things Journal. 2023. P. 1.
21. Yamamoto R., Yamazaki T., Ohzahata S. VORTEX: Network-Driven Opportunistic Routing for Ad Hoc Networks. Sensors. 2023. 23(6). P. 2893.
22. Prabu S., Maheswari M., Jothi B., Banupriya J., Bindu G. Efficient Bloom Filter-Based Routing Protocol for Scalable Mobile Networks. Engineering Proceedings. 2023. 59(1). P. 75.
23. Schubert D., Jaeger B., Helm M. Network Emulation using Linux Network Namespaces. Network. 2019. 57.
24. Massaron L., Mueller J. P. Python for Data Science For Dummies. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 418 p.

ДОДАТОК А

СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ



Рисунок А.1 – Слайд презентації 1



Мета дослідження:

Проектування та дослідження Mesh-мережі для IoT у середовищі Smart City з урахуванням реальних міських умов.

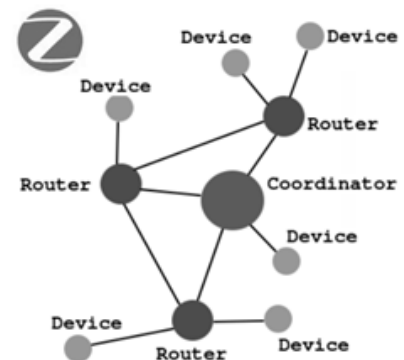
Основні завдання:

- аналіз існуючих технологій;
- формування технічних вимог до мережі;
- вибір оптимального Mesh-протоколу;
- проектування архітектури мережі;
- розгляд механізмів безпеки;
- дослідження характеристик та поведінки мережі.

Рисунок А.2 – Слайд презентації 2

Актуальність роботи

Із стрімким розвитком концепції Smart City, кількість пристроїв IoT експоненціально зростає, досягаючи тисяч вузлів у межах одного міського району. У цих умовах, традиційні зіркові або ієрархічні топології мереж стикаються з критичними викликами.



3

Рисунок А.3 – Слайд презентації 3

Аналіз існуючих бездротових технологій

Zigbee

- Низьке енергоспоживання.
- Обмежена масштабованість.
- Складна інтеграція з IP-мережами (відсутність нативної підтримки IPv6).

Bluetooth Mesh

- Орієнтований на керування освітленням.
- Неефективна багатохорова маршрутизація для великої кількості вузлів.
- Обмежена сфера застосування.

Wi-Fi Mesh

- Висока пропускну здатність.
- Значне енергоспоживання.

4

Рисунок А.4 – Слайд презентації 4

Аналіз існуючих бездротових технологій

Технологія	Пропускна здатність	Довжина одного хопу	Споживання енергії	Тип маршрутизації	Стійкість до завад	Застосування
Wi-Fi Mesh (802.11s)	до 600 Мбіт/с	50–250 м	високе	HWMP	середня	відеоспостереження, транспортні системи
Zigbee Mesh	до 250 кбіт/с	20–100 м	дуже низьке	AODV-based	середня	сенсорні вузли, освітлення
Thread	до 250 кбіт/с	30–150 м	низьке	RPL	висока	міські IoT-системи, автоматизація
Bluetooth Mesh	до 2 Мбіт/с (BLE 5), фактично менше	10–50 м	низьке	managed flooding	низька	освітлення, маяки
LoRa Mesh	0.3–50 кбіт/с	500–5000 м	дуже низьке	багатохопові варіанти	висока	телеметрія великої території

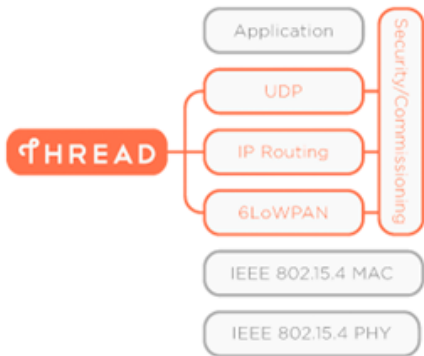
5

Рисунок А.5 – Слайд презентації 5

Обґрунтування вибору протоколу Thread

За результатами порівняльного аналізу, протокол Thread визнано найбільш перспективним для використання в IoT-мережах Smart City. Він унікальним чином поєднує в собі ключові переваги:

- Нативна підтримка IPv6.
- Енергоефективність.
- Відсутність ізольованих сегментів:.



6

Рисунок А.6 – Слайд презентації 6



Архітектура Mesh-мережі для Smart City

01

Сенсорні IoT-вузли

Основні елементи мережі, що збирають дані та передають їх далі.

02

Thread Border Router

Шлюз, що забезпечує зв'язок між Thread-мережею та міською IP-мережею.

03

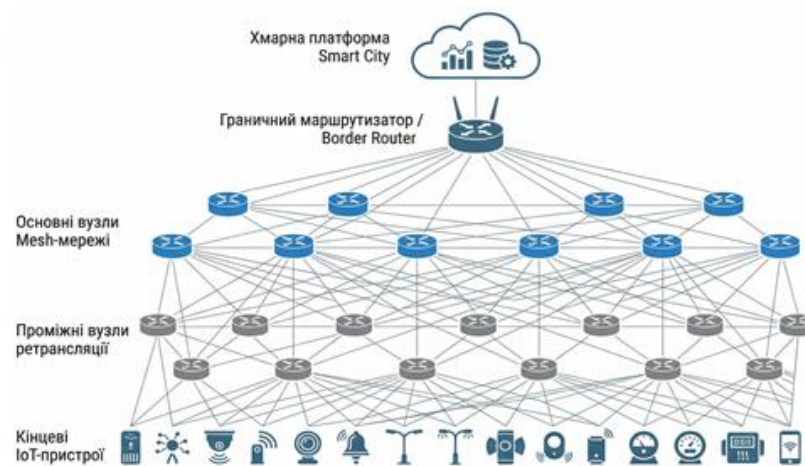
Рівень інтеграції з міською IP-мережею

Забезпечує зв'язок з центральними серверами та іншими міськими службами.

7

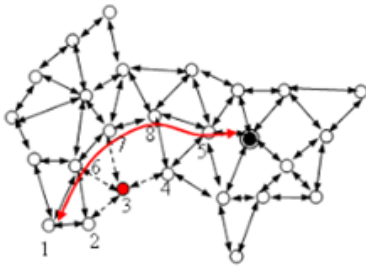
Рисунок А.7 – Слайд презентації 7

Логічна схема Mesh-мережі для IoT-пристроїв



8

Рисунок А.8 – Слайд презентації 8



Маршрутизація та механізми самовідновлення

Протокол RPL

Динамічно формує орієнтований ациклічний граф маршрутів, що оптимізує передачу даних.

Автоматичне самовідновлення

Однією з ключових переваг Thread є вбудовані механізми самовідновлення. У разі відмови окремих вузлів, перешкод або погіршення якості каналу зв'язку, мережа автоматично перебудовує маршрути.

9

Рисунок А.9 – Слайд презентації 9

Безпека Mesh-мережі: Багаторівневий захист

Рівень Thread

Використовується надійне шифрування AES-128 для захисту всіх комунікацій усередині мережі, запобігаючи несанкціонованому доступу.

Прикладний рівень

Застосовуються протоколи DTLS або TLS для захисту даних кінцевих користувачів та програм.

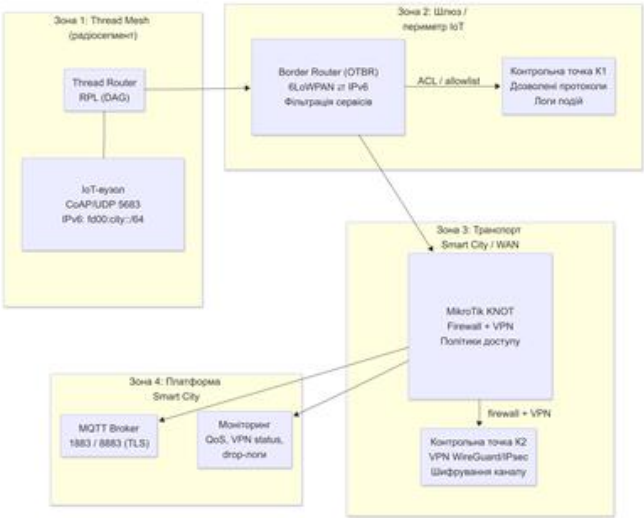
Межа з міською інфраструктурою

Для інтеграції з міською IP-мережею використовуються VPN-тунелі та firewall-політики.

10

Рисунок А.10 – Слайд презентації 10

Модель захисту Thread Mesh-сегмента:
зони безпеки та точки контролю

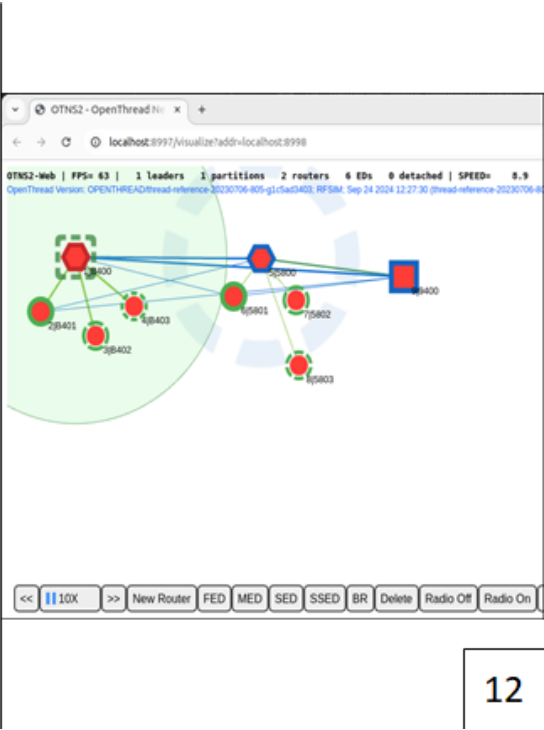


11

Рисунок А.11 – Слайд презентації 11

Модельовання поведінки мережі

Для дослідження поведінки мережі було використано середовище OTNS2, яке дозволяє моделювати реальні механізми Thread і RPL. Моделювання проводилось з урахуванням щільності вузлів, змінного навантаження та можливих відмов елементів мережі.



12

Рисунок А.12 – Слайд презентації 12

Результати дослідження Mesh-мережі

Стабільна робота при зростанні вузлів	Прогнозоване зростання затримки	Ефективне самовідновлення
Дослідження показали, що Mesh-мережа на основі Thread забезпечує стабільне функціонування при значній кількості підключених вузлів	Затримка передачі даних зростає відповідно до збільшення кількості хопів	Механізми самовідновлення дозволяють мережі автоматично відновлювати зв'язок

13

Рисунок А.13 – Слайд презентації 13

THREAD

Висновки: переваги Thread для Smart City

Енергоефективність	Масштабованість	Надійність
Забезпечує тривалий час роботи пристроїв від батарей.	Легко адаптується до зростання кількості вузлів.	Механізми самовідновлення та динамічна маршрутизація.

14

Рисунок А.14 – Слайд презентації 14

Публікації

1. Зуй М.С., Тягунова М.Ю., Киричек Г.Г. Застосування сучасних технологій при розробці мережевих інфраструктур. Тиждень науки-2025. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції, (Запоріжжя, 14-18 квітня 2025). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. С.66-68.
2. Киричек Г.Г., Тягунова М.Ю., Зуй М.С. Функціональність безшовної mesh мережі. Міжнародна наукова конференція «Виклики сучасності як поштовх до інновацій в технічній сфері», 3–4 жовтня 2024 року, м. Рига, Латвійська Республіка, С.13-17. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-475-7-3>.
3. Киричек Г.Г., Тягунова М.Ю., Зуй М.С. Критерії оцінювання та система дистанційного навчання. Міжнародна наукова конференція «Євроінтеграційні тенденції у сфері педагогіки та психології і перспективи для України», (Рига, 19–20 березня 2025). м. Рига, Латвійська Республіка, 2025. С.125-129. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-550-1-32>.
4. Зуй М.С., Киричек Г.Г. Мережева інфраструктура із застосуванням mesh-технологій. Тиждень науки-2024. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції, (Запоріжжя, 15-19 квітня 2024). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. С.39-40.
5. Киричек Г.Г., Зуй М.С. Модульна реалізація процесів передачі даних. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні світові тенденції розвитку науки, освіти і технологій», (Біла Церква, 20 березня 2024 р.): у 2 ч. м. Біла Церква: ЦФЕНД, 2024. Ч.2. С.79-81.

Рисунок А.15 – Слайд презентації 15