

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»



Факультет комп'ютерних наук та технологій
Кафедра «Комп'ютерні системи та мережі»

ЗУЙ МИКИТА СЕРГІЙОВИЧ
Група КНТз-514м

MESH-МЕРЕЖА ДЛЯ ІОТ-ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМАХ
SMART CITY

АВТОРЕФЕРАТ

дипломної роботи на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня
«магістр» 123 Комп'ютерна інженерія
освітньої програми Комп'ютерні системи та мережі

2025 р.

Дипломна робота є рукопис.

Робота виконана в національному університеті «Запорізька політехніка», на кафедрі комп'ютерних систем та мереж

Керівник

кандидат технічних наук, доцент
Киричек Галина Григорівна
Національний університет «Запорізька політехніка», доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж

**Офіційний
рецензент:**

**Романовський Олександр
Володимирович,**
Генеральний директор
ТОВ «Науково-виробниче
підприємство «ХАРТРОН-ЮКОМ»

Захист відбудеться "24" грудня 2025 р.

Секретар екзаменаційної комісії, доцент кафедри
комп'ютерних систем та мереж **Т.В. Голуб**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку інформаційно-комунікаційних технологій концепція Smart City є одним із пріоритетних напрямів цифрової трансформації міського середовища. Її впровадження передбачає широке використання IoT-пристроїв для моніторингу та управління транспортною інфраструктурою, енергоспоживанням, екологічним станом, системами освітлення та іншими міськими сервісами. Кількість таких пристроїв у межах одного міського району може сягати тисяч і десятків тисяч, що висуває підвищені вимоги до мережевої інфраструктури, зокрема щодо масштабованості, надійності та ефективності передавання даних.

Традиційні мережеві топології, такі як зіркова або ієрархічна, не завжди здатні забезпечити безперебійну роботу в умовах щільної міської забудови, радіочастотних перешкод та автономного живлення значної частини вузлів. Наявність єдиної точки відмови, обмежена гнучкість маршрутизації та складність масштабування знижують ефективність таких рішень у контексті Smart City. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають Mesh-мережі, які забезпечують багатохопову передачу даних, відсутність централізованих вузлів керування та здатність до автоматичного самовідновлення топології.

Використання Mesh-архітектури дозволяє підвищити відмовостійкість мережі, рівномірно розподіляти навантаження між вузлами та адаптуватися до динамічних змін міського середовища, таких як відмова окремих пристроїв або погіршення якості радіоканалу. Особливий інтерес у цьому контексті становлять Mesh-технології, що підтримують нативну інтеграцію з IP-мережами, оскільки це спрощує взаємодію IoT-сегмента з існуючою міською інфраструктурою та хмарними сервісами.

Однією з таких технологій є протокол Thread, який базується на стандарті IEEE 802.15.4, забезпечує енергоефективну багатоходову маршрутизацію та підтримує IPv6 через механізми 6LoWPAN. Поєднання низького енергоспоживання, відмовостійкості та сумісності з IP-протоколами робить Thread перспективним рішенням для побудови масштабованих IoT-мереж Smart City. Водночас питання проектування архітектури таких мереж,

забезпечення їхньої безпеки та дослідження поведінки за умов змінного навантаження і відмов вузлів залишаються недостатньо вивченими.

У зв'язку з цим дослідження та проектування Mesh-мережі для IoT у середовищі Smart City на основі протоколу Thread є актуальною науково-практичною задачею, розв'язання якої сприяє підвищенню ефективності, надійності та довговічності міських інформаційних систем.

Мета і завдання дослідження. Метою дипломної роботи є 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, а також оцінювання можливостей інтеграції такої мережі з міською IP-інфраструктурою.

Досягнення поставленої мети передбачає комплексний підхід, що поєднує аналіз існуючих технологій бездротового зв'язку, інженерне проектування мережевої архітектури та дослідження поведінки Mesh-мережі в умовах, наближених до реального міського середовища. Особливу увагу в роботі приділено здатності мережі до автоматичного самовідновлення, адаптації до змін топології та підтримання стабільної роботи за умов змінного навантаження й автономного живлення IoT-вузлів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати такі основні завдання:

- провести аналіз сучасних бездротових Mesh-технологій і протоколів, що застосовуються в IoT-системах Smart City, та визначити їхні переваги й обмеження;
- сформулювати функціональні та технічні вимоги до мережевої інфраструктури Smart City з урахуванням щільності розміщення вузлів, умов міської забудови та радіочастотного середовища;
- обґрунтувати вибір протоколу Thread як базової технології для побудови Mesh-мережі IoT;
- спроектувати архітектуру Mesh-мережі та визначити ролі її основних компонентів, включно з сенсорними вузлами, маршрутизаторами та граничними вузлами;
- дослідити механізми маршрутизації, самовідновлення топології та забезпечення безпеки в Mesh-мережі;

– виконати моделювання роботи Mesh-мережі та проаналізувати її характеристики за різних сценаріїв навантаження і відмов окремих вузлів.

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.

Методи дослідження. У роботі застосовано методи аналізу та порівняння мережевих технологій, структурного проєктування мереж, теоретичного моделювання роботи протоколів маршрутизації, а також комп’ютерного моделювання Mesh-мережі в середовищі OpenThread Simulation, аналіз стандартів бездротових мереж (Wi-Fi Mesh, Zigbee, Thread, Bluetooth Mesh, LoRa Mesh), моделювання роботи стеку Thread (6LoWPAN, RPL), реалізація логічної та структурної моделі мережі. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректністю постановки задачі, використанням стандартних протоколів і моделей, а також аналізом поведінки мережі за різних умов навантаження.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримано подальший розвиток підходів до проєктування Mesh-мереж для Smart City шляхом комплексного аналізу архітектури, маршрутизації та безпеки мережі на основі протоколу Thread. Запропоновано модель Mesh-інфраструктури, яка забезпечує самовідновлення топології, масштабованість і інтеграцію з міською IP-мережею.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої архітектури Mesh-мережі та результатів дослідження при проєктуванні реальних IoT-систем Smart City, зокрема для систем екологічного моніторингу, інтелектуального освітлення та міської інженерної інфраструктури.

Апробація результатів дипломної роботи. Основні положення дипломної роботи та результати досліджень представлено на конференціях та опубліковано:

- Тиждень науки-2025. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції, (Запоріжжя, 14-18 квітня 2025).

- Міжнародна наукова конференція «Виклики сучасності як поштовх до інновацій в технічній сфері». (Рига, Латвійська Республіка, 3–4 жовт. 2024). DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-475-7-3>.

- Міжнародна наукова конференція «Євроінтеграційні тенденції у сфері педагогіки та психології і перспективи для України», (Рига, Латвійська Республіка, 19–20 бер. 2025). DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-550-1-32>.

- Тиждень науки-2024. Факультет комп'ютерних наук і технологій. Тези доповідей науково-практичної конференції, (Запоріжжя, 15-19 квітня 2024)

- Міжнародна науково-практична конференція “Сучасні світові тенденції розвитку науки, освіти і технологій”, (Біла Церква, 20 березня 2024).

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирох розділів, висновків, переліку джерел та додатків. Пояснювальна записка містить 90 сторінок тексту, 25 рисунків, 6 лістингів та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розвитку IoT-систем у середовищі Smart City та розглянуто основні підходи до побудови бездротових мереж для масового підключення сенсорних пристроїв. Проаналізовано особливості функціонування міських IoT-інфраструктур, зокрема високу щільність розміщення вузлів, наявність радіочастотних перешкод, автономний режим роботи пристроїв та вимоги до безперервності передавання даних.

Розглянуто традиційні мережеві топології та встановлено їх обмеження в умовах міського середовища, зокрема наявність єдиних точок відмови, складність масштабування та зростання навантаження на центральні вузли. Обґрунтовано доцільність використання Mesh-архітектури як більш стійкого та адаптивного підходу для побудови IoT-мереж Smart City.

У розділі виконано аналіз основних бездротових Mesh-технологій, зокрема Zigbee, Bluetooth Mesh, Wi-Fi Mesh (рисунк 1) та Thread. Проведено порівняння їх технічних і функціональних характеристик за критеріями енергоспоживання, масштабованості, підтримки багатохопкової маршрутизації, інтеграції з IP-мережами та придатності до використання в умовах міської забудови. Встановлено, що окремі технології мають суттєві обмеження щодо енергоефективності або стабільності маршрутизації при великій кількості вузлів.

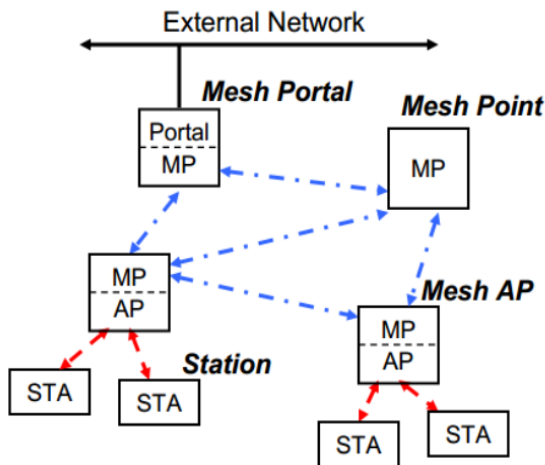


Рисунок 1 - Wi-Fi Mesh (IEEE 802.11s)

На основі проведеного аналізу сформульовано функціональні та технічні вимоги до Mesh-мережі для IoT у середовищі Smart City, зокрема вимоги до відмовостійкості, автоматичного самовідновлення топології, безпеки передавання даних та можливості інтеграції з міською IP-інфраструктурою. Також визначено основні завдання, які необхідно вирішити в процесі проектування та дослідження мережі.

У другому розділі виконано порівняльний аналіз сучасних Mesh-технологій, що застосовуються для побудови IoT-мереж у середовищі Smart City, з урахуванням технічних і функціональних характеристик. Основну увагу приділено можливостям

IPv6 через механізми 6LoWPAN, що забезпечує прозору інтеграцію Mesh-сегмента з міською IP-мережею.

Окрему увагу приділено питанням маршрутизації та якості обслуговування. Проаналізовано роботу протоколу RPL, який використовується в Thread-мережах для формування багатохопових маршрутів, балансування навантаження та автоматичного самовідновлення топології. Розглянуто вплив характеристик радіоканалу, кількості хопів і навантаження на затримку передавання даних та стабільність роботи мережі.

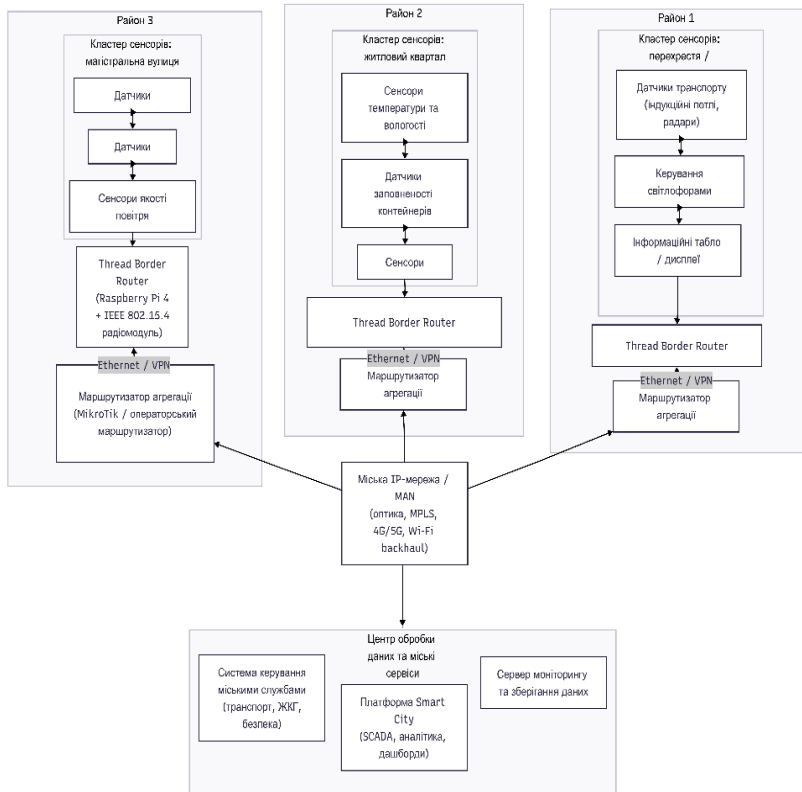


Рисунок 2.2 - Структурна схема Mesh-мережі для IoT-пристроїв

Таким чином, у другому розділі сформовано обґрунтований вибір Mesh-технології та протоколів для подальшого проєктування

мережі, що створює теоретичну та методичну основу для розроблення архітектури Mesh-мережі Smart City, розглянутої в наступному розділі.

У третьому розділі виконано проектування Mesh-мережі для IoT у середовищі Smart City на основі обраної технології Thread. Розроблено загальну архітектуру мережі, визначено функціональні ролі її основних компонентів та обґрунтовано принципи їхньої взаємодії в межах міської інфраструктури.

У розділі сформовано багаторівневу модель мережі, що включає сенсорні вузли, маршрутизатори Mesh-сегмента та граничні маршрутизатори, які забезпечують інтеграцію бездротової мережі з міською IP-інфраструктурою. Визначено призначення кожного рівня та описано механізми автоматичного формування топології, розподілу ролей вузлів і підтримання зв'язності мережі за умов динамічних змін середовища.

Особливу увагу приділено налаштуванню маршрутизації та механізмам самовідновлення. Проаналізовано роботу протоколу RPL у складі стеку Thread, розглянуто принципи побудови орієнтованого ациклічного графа маршрутів та алгоритми адаптації мережі у разі відмов окремих вузлів. Показано, що обрана архітектура забезпечує відсутність єдиної точки відмови та здатність до автоматичного відновлення працездатності без втручання адміністратора.

У межах третього розділу також розглянуто питання забезпечення безпеки Mesh-мережі (рисунк 4). Описано застосування криптографічних механізмів захисту даних, автентифікації вузлів та контролю доступу, а також особливості захисту маршрутизації та протидії типовим загрозам для бездротових Mesh-мереж. Показано, що використання вбудованих механізмів безпеки Thread дозволяє забезпечити конфіденційність і цілісність даних у міському середовищі.

Окремим етапом виконано інженерні розрахунки, зокрема оцінку щільності розміщення IoT-вузлів, вплив кількості хопів на затримку передавання даних та енергоефективність мережі. Отримані результати дозволили обґрунтувати вибрані параметри розгортання Mesh-мережі та підтвердити її придатність для використання у реальних умовах Smart City.

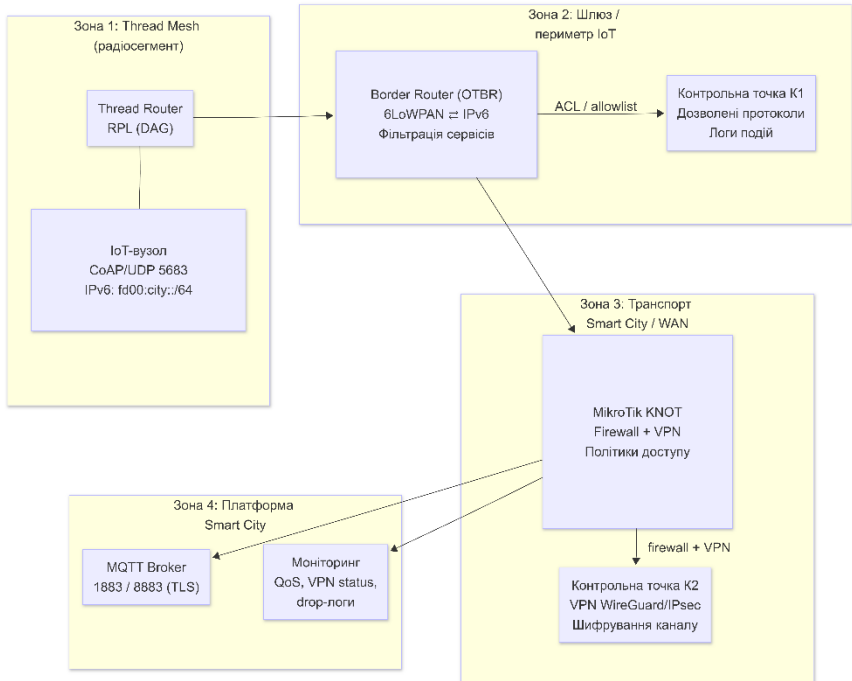


Рисунок 4 – Модель захисту Thread Mesh-сегмента: зони безпеки та точки контролю

Таким чином, у третьому розділі сформовано повну технічну модель Mesh-мережі IoT, що поєднує архітектурні рішення, налаштування протоколів і механізми безпеки, створюючи практичну основу для подальшого дослідження та порівняльного аналізу, представлених у четвертому розділі.

У **четвертому розділі** виконано дослідження працездатності та ефективності спроектованої Mesh-мережі Smart City, а також проведено її порівняння з альтернативними рішеннями за ключовими експлуатаційними параметрами. Дослідження спрямовано на оцінювання стабільності маршрутизації, затримки передавання даних, пропускну здатності та стійкості мережі до відмов окремих вузлів у міському середовищі.

У розділі обґрунтовано вибір середовища моделювання та сформовано початкові умови експериментів, що відображають

характерні особливості Smart City, зокрема щільність розміщення IoT-пристроїв, змінні радіочастотні умови та нерівномірне навантаження. Моделювання дозволило відтворити динаміку Mesh-топології та проаналізувати поведінку мережі за різних сценаріїв роботи.

Проведено аналіз маршрутизації та реакції мережі на змінні навантаження. Дослідження показало, що використання протоколу RPL у складі стеку Thread забезпечує адаптивну перебудову маршрутів, рівномірний розподіл трафіку та ефективне уникнення локальних перевантажень. Навіть у разі різкого зростання інтенсивності передавання даних мережа зберігає зв'язність і не демонструє критичної деградації характеристик.

Окрему увагу приділено оцінюванню затримки та пропускної здатності. Результати дослідження свідчать, що затримка передавання даних у Mesh-мережі залишається в допустимих межах для більшості міських IoT-сервісів навіть за багатохопової маршрутизації. Пропускна здатність, обмежена фізичними параметрами стандарту IEEE 802.15.4, є достатньою для сенсорних і керуючих застосувань Smart City та ефективно використовується завдяки оптимізації маршрутів.

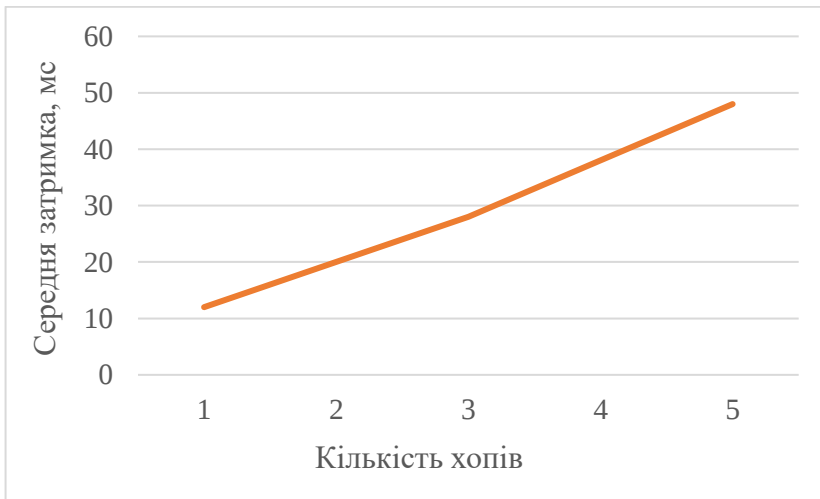


Рисунок 5 – Залежність середньої затримки від кількості хопів

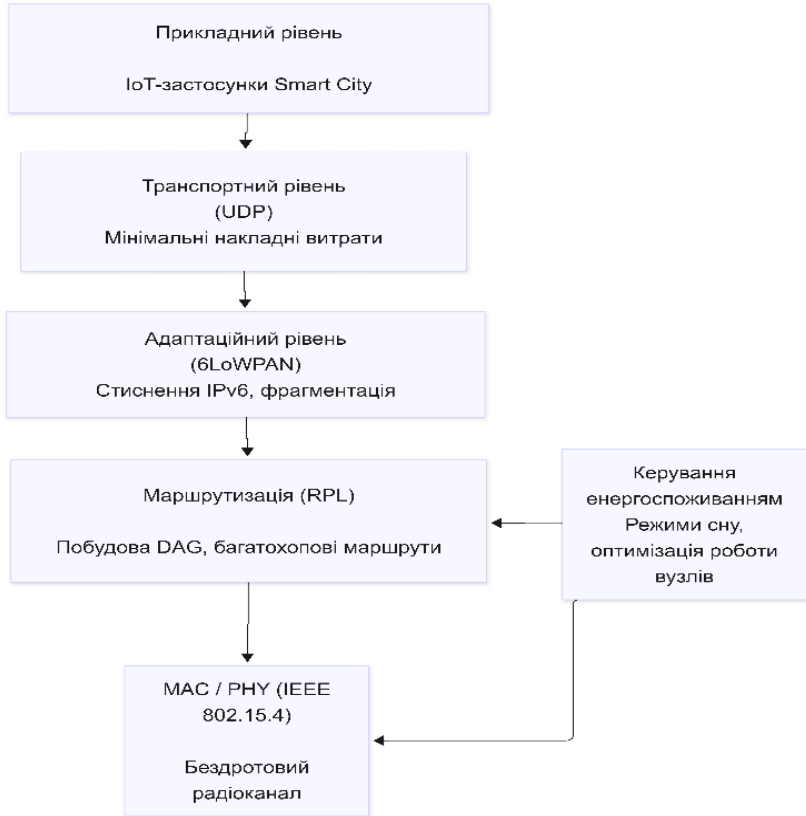


Рисунок 6 Теоретична модель стеку Thread

Важливим етапом дослідження стала оцінка стійкості мережі до відмов. Моделювання відключення окремих вузлів і ключових елементів топології показало, що Mesh-мережа на основі Thread здатна автоматично відновлювати маршрути, переобирати координуючі вузли та зберігати працездатність без втручання оператора. Це підтверджує високу живучість запропонованої архітектури у порівнянні з мережами, що мають централізовану структуру.

Проведено порівняння отриманих результатів з характеристиками альтернативних Mesh-рішень, зокрема Zigbee та Bluetooth Mesh. Установлено, що Thread демонструє кращу

керованість, нативну інтеграцію з IP-мережами та вищу стабільність маршрутизації у масштабованих міських сценаріях, зберігаючи при цьому низький рівень енергоспоживання.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що спроектована Mesh-мережа Smart City на основі протоколу Thread відповідає функціональним і технічним вимогам міських IoT-систем. Отримані дані обґрунтовують доцільність використання обраної архітектури для практичного впровадження та створюють підґрунтя для подальшого розвитку й масштабування мережі.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено науково-прикладну задачу проєктування та дослідження Mesh-мережі для IoT у середовищі Smart City з метою підвищення надійності, масштабованості та енергоефективності міської мережевої інфраструктури. Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу предметної області та існуючих рішень обґрунтовано доцільність використання Mesh-архітектури для побудови IoT-мереж Smart City, що зумовлено високою щільністю вузлів, динамічними умовами міського середовища та вимогами до відмовостійкості й автономності систем;

2. Проведений порівняльний аналіз сучасних Mesh-технологій (Zigbee, Bluetooth Mesh, Wi-Fi Mesh, Thread) дозволив визначити протокол Thread як оптимальне рішення для міських IoT-систем завдяки поєднанню низького енергоспоживання, нативної підтримки IPv6, ефективної багатохопкової маршрутизації та зручної інтеграції з IP-інфраструктурою;

3. Спроектовано багаторівневу архітектуру Mesh-мережі Smart City, що включає сенсорні вузли, маршрутизатори Mesh-сегмента та граничні маршрутизатори, яка забезпечує автоматичне формування топології, відсутність єдиної точки відмови та можливість подальшого масштабування мережі;

4. Реалізовано та проаналізовано механізми маршрутизації на основі протоколу RPL, що забезпечують адаптивну перебудову

маршрутів, балансування навантаження та самовідновлення мережі у разі відмов окремих вузлів або погіршення радіоумов;

5. Досліджено механізми забезпечення безпеки Mesh-мережі, зокрема автентифікацію вузлів, криптографічний захист даних, захист маршрутизації та стійкість до типових атак, що підтвердило можливість використання Thread у критично важливих міських IoT-сервісах;

6. Проведене моделювання та дослідження роботи Mesh-мережі за різних сценаріїв навантаження показало, що запропонована архітектура забезпечує прийнятні показники затримки, пропускну здатності та стійкості до відмов, зберігаючи високу енергоефективність вузлів у міських умовах експлуатації.

Результати виконаних досліджень підтверджують працездатність і ефективність запропонованої Mesh-мережі для IoT у середовищі Smart City та свідчать про досягнення мети магістерської роботи у повному обсязі. Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та впровадження масштабованих міських IoT-систем із підвищеними вимогами до надійності та автономності.